



# Молодежный Вестник УГАТУ

**2018**

№ 1 (18)

Научный журнал  
«Уфимского государственного авиационного  
технического университета»

**Главный редактор:**

Александров И. В., д-р физ.-мат. наук, проф.

**Ответственный секретарь:**

Гумерова М. Б., канд. техн. наук, доц.

**Редакционная коллегия:**

Ахмеров В. В., канд. техн. наук (ФЗЧС)

Беляева Л. С. канд. техн. наук, доц. (ОНФ)

Дзинтер Н. В., ст. преп. (ИНЭК)

Минасова Н. С., канд. техн. наук, доц. (ОРМУ)

Михайлов А. Е., канд. техн. наук, доц. (ФАДЭТ)

Саяпова Л. Р., ст. преп. (ФАВИЭТ)

Сигачева Т. Н., канд. техн. наук, доц. (ФИРТ)

Хадиуллин С. Х., канд. техн. наук, доц. (ИАТМ)

**Редакционный совет:**

Ахмедзянов Д. А., д-р техн. наук, проф. (ФАДЭТ)

Водопьянов В. В., д-р техн. наук, проф. (ОНФ)

Елизарьев А. Н., канд. геогр. наук, доц. (ФЗЧС)

Орлова Е. В., канд. техн. наук, доц. (ИНЭК)

Рамазанов К. Н., д-р техн. наук, доц. (ИАТМ)

Уразбахтина Ю. О., канд. техн. наук, доц. (ФАВИЭТ)

Юсупова Н. И., д-р техн. наук, проф. (ФИРТ)

## Учредитель и издатель

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Уфимский государственный авиационный  
технический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-46326 от 26 августа 2011 г.

**Контактные адреса издателя:** 450008, Уфа, К. Маркса, 12,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»

**Контактные адреса редакции:** 450008, Уфа, К. Маркса, 12,  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»

Дата подписания в печать 21.05.2018.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 23,5. Уч.-изд. л. 23,4.

Тираж 80 экз.

Заказ № 37.

Цена свободная

Отпечатано в редакционно- издательском комплексе ФГБОУ ВО «УГАТУ»  
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12 .

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ</b> .....	5
<b>Ахметшин И. Р., Гришин А. Н.</b> Моделирование теплового состояния лопаток газовых турбин с конвективной системой охлаждения на основе пакета ANSYS.....	5
<b>Багаутдинов М. З., Симонов Н. Б.</b> Расчет коэффициента полезного действия для 5-ступенчатого компрессора по результатам испытаний.....	9
<b>Бугаев М. Г., Калимуллин Р. Р.</b> К вопросу о жидкостных скоплениях в трубопроводе.....	14
<b>Бутенко В. Ю.</b> Согласование системы турбонаддува с характеристиками двигателя ДДА-120М для авиации.....	18
<b>Валимухаметов Р. Р., Борисов А. О.</b> Моделирование газообмена двухтактного ДВС с мощностным клапаном в настроенной выпускной системе.....	24
<b>Вафин Р. К., Асылбаев А. В.</b> Влияние магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде на микротвердость стали 08X18H10T.....	27
<b>Глухов И. А., Старовойтов С. В.</b> Определение влияния покрытия инструмента на температуру свободного резания с использованием метода конечных элементов..	32
<b>Губайдуллина Р. Р., Сенюшкин Н. С.</b> Расчет высотно-скоростных характеристик ПВРД.....	37
<b>Жернаков В. С., Мардимасова Т. М., Акбашев В. Р., Конева К. В.</b> Исследование влияния величины натяга на распределение технологических напряжений в соединении «пластина – кольцо».....	40
<b>Зайнуллина Л. И., Александров И. В.</b> Влияние энергии дефекта упаковки на толщину деформационных двойников в сплавах системы Cu-Al, подвергнутых интенсивной пластической деформации.....	46
<b>Зиннатуллина Г. С., Вавилов В. Е.</b> Повышение энергоэффективности и надежности электрических машин за счет повышения интенсивности охлаждения.....	50
<b>Ибатуллина Л. Н., Бикбулатов А. М.</b> Оценка работы теплоэнергетического оборудования при различных режимах работы.....	54
<b>Ильина Г. З., Жилин А. Н.</b> Сравнение источника теплоснабжения для многоквартирного жилого дома на основе индивидуального теплового пункта и крышной газовой котельной.....	57
<b>Корнилин С. В.</b> Пути совершенствования современных авиационных двигателей и связанные с этим проблемы.....	60
<b>Костров В. С., Гишваров А. С., Зырянов А. В., Князев А. А.</b> Анализ причинно-следственных связей изменения подогрева масла в ГПП АЛ-31СТ.....	63
<b>Кугубаев О. Ю., Борисов А. О.</b> Экспериментальная методика определения коэффициентов в уравнении тягового баланса.....	69
<b>Месропян А. В., Шарипов Р. Р.</b> Моделирование реальных нагрузок на стенде испытания гидроприводов.....	73
<b>Мигранов А. М., Мухамадеев В. Р.</b> Исследование композиционных покрытий для режущего инструмента.....	76

<b>Мустафина Э. Р.</b> Возможность применения турбодетандера на Затонской ТЭЦ.....	80
<b>Муругова О. В., Никифоров Р. В.</b> Оценка влияния исходной морфологии микроструктуры высокопрочной стали на геометрию сварного шва при моделировании тепловых процессов при дуговой сварке.....	85
<b>Мухамадеев В. Р., Мигранов А. М., Кутлубаев Р. Р.</b> Триботехнические свойства покрытий с различными технологиями их нанесения.....	91
<b>Мухаметдинов И. И., Кудоярова В. М.</b> Анализ эффективности применения турбопривода питательного насоса для блока ПГУ-220 в программе boiler designer...	95
<b>Павлинич С. П., Шайхутдинова И. И.</b> Современный подход при подготовке производства отливок из алюминиевых сплавов.....	100
<b>Политов А. С.</b> Оптимизация процесса протягивания путем интерполяции профиля зубьев многосекционных протяжек.....	106
<b>Раэриндзатуву Ж. С., Гишваров А. С.</b> Выбор параметров нейро-сетевого моделирования рабочих процессов при решении задачи диагностики состояния ВГТД .....	112
<b>Река Н. Г., Коуров Г. Н., Лютов А. Г.</b> Определение параметров нагреваемого тела при торцовом точении металла.....	120
<b>Сайдуганов А. Р., Кудояров Р. Г., Акмаев О. К.</b> Разработка классификации станков-роботов с элементами параллельной кинематики.....	123
<b>Салимгареев М. М., Вахитов Ю. Р.</b> Повышение мощности двигателя ВАЗ 21124 при помощи механического наддува.....	128
<b>Салимзянова А. А., Князев А. А., Рахимов А. А., Гишваров А. С.</b> Исследование прочности охлаждаемой рабочей лопатки турбины высокого давления.....	133
<b>Салимзянова А. А., Князев А. А., Рахимов А. А., Гишваров А. С.</b> Исследование эффективности пылезащитного устройства вертолетного двигателя.....	137
<b>Симонов Н. Б.</b> Расчет соосных несущих винтов в режиме вися в ANSYS CFX.....	143
<b>Ступникова Е. Г.</b> Выбор и расчет теплонасосной установки для отопления внеплощадочных очистных сооружений ПАО «ОДК-УМПО» .....	147
<b>Субхангулов А. А.</b> Методы снижения эмиссии вредных выбросов из камер сгорания ГТД.....	154
<b>Тимошенко Я. К.</b> Экспериментальная оценка глубины охлаждения рабочей лопатки турбины двигателя АЛ-31СТ.....	159
<b>Хабиров А. И., Жилин А. Н.</b> Оборудование для резервирования электропитания ...	165
<b>Хасанова Д. А., Чуракова А. А.</b> Анализ данных РСА по влиянию ИПДК на структуру аморфных сплавов на основе Zr.....	169
<b>Чикуров Н. Г., Мокин В. А.</b> Микропрограммные дискретно-логические системы управления.....	172
<b>Чудинов В. В.</b> Методы регулирования газовоздушного тракта котла.....	179
<b>Шайдуллин Р. И., Исмагилова М. Р.</b> Возможное применение элементов знаний при синтезе технологических операций.....	182

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.431.75

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН С КОНВЕКТИВНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПАКЕТА ANSYS

И. Р. АХМЕТШИН<sup>1</sup>, А. Н. ГРИШИН<sup>2</sup>

nex.102@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Представлено моделирование теплового состояния лопаток газовой турбины с конвективной системой охлаждения. В последние годы прогресс вычислительной техники резко расширил возможность решения задач с большим объемом вычислений, которые требуют большое количество памяти. Это в свою очередь сделало возможным моделировать системы охлаждения на вычислительной технике, которая сокращает время на проектировании и проведении испытаний последнего.

**Ключевые слова:** ANSYS; охлаждаемая конвективная лопатка; тепловое состояние; давление охлаждающего воздуха.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время температура газа перед турбиной газотурбинной установки является одним из главных параметров экономичности, срока службы, а также критерием для дальнейшей модернизации конструкции всей установки [1]. Этот аспект подразумевает собой требования с одной стороны к разработкам все новых и новых конструктивных решений турбин и их систем охлаждения, а с другой же стороны разработка все более конструктивных материалов усовершенствованными характеристиками. На данный момент увеличение жаропрочности сплавов применяемых в изготовлении газотурбинных установках практически стоит на месте, а также идет тенденция удорожания. В свете этих событий рациональным решением повышения температуры газа остается совершенствование систем охлаждения теплонагруженных частей турбины. Интенсивность глубины охлаждения можно увеличить не только за счет повышения расхода охлаждающего воздуха, от

которого снижается КПД установки, но и достижением высокой интенсивности теплообмена в лопатках. Все вышесказанное и представляет актуальность проблемы создания высокоэффективных схем ГТУ систем охлаждения для повышения интенсивности теплообмена без увеличения расхода воздуха из компрессора и методов расчета их оптимальных параметров. Численное моделирование систем охлаждения лопаток позволяет на этапе проектирования сравнивать и изменять параметры профиля лопатки отверстий перфорации их диаметры и количество и выбирать оптимальные их соотношения для лучшей интенсификации теплообмена.

В последние годы прогресс вычислительной техники резко расширил возможность решения задач с большим объемом вычислений, которые требуют большое количество памяти. Это в свою очередь сделало возможным моделировать системы охлаждения на вычислительной технике, которая сокращает время на проектировании и проведения испытаний

последнего. Целью данной работы является построение геометрии лопатки и моделирование конвективной системы охлаждения лопаток в ПО ANSYS при различных давлениях охлаждающего воздуха.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА НА РАСХОД И ТЕМПЕРАТУРУ ЛОПАТКИ

Для проведения имитационного моделирования течения газов в сопловом аппарате газовой турбины с учетом подачи охлаждающего воздуха и теплопроводности через стенку лопатки была построена трехмерная геометрическая модель, которая состоит из непосредственно лопатки и области, которая ограничивает объем течения газов для одной лопатки (всего сопловый венец имеет 60 лопаток) (рис. 1). Лопатка имеет закрутку по высоте. Внутри ее тела выполнена полость, внутри которой подается охлаждающий воздух и сбрасывается в проточную часть через выходную кромку лопатки (рис. 2).

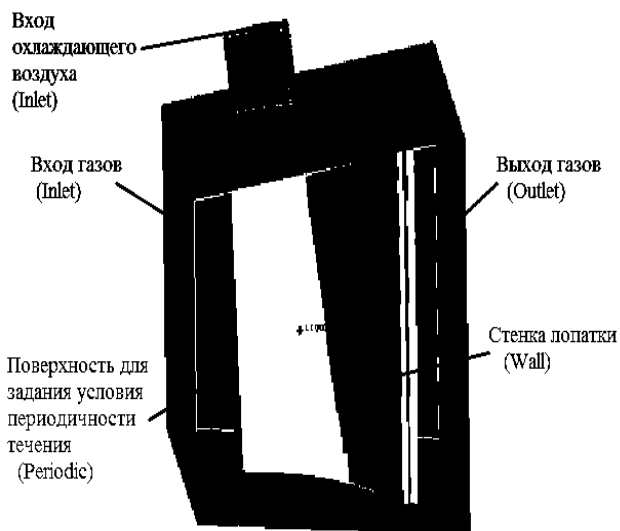


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель лопатки и граничные условия

По данной трехмерной модели построена расчетная сетка, состоящая из порядка 2 млн. тетраэдральных элементов как для области жидкости (область течения газов и воздуха), так и для области твердого тела (стенка лопатки) (рис. 3).

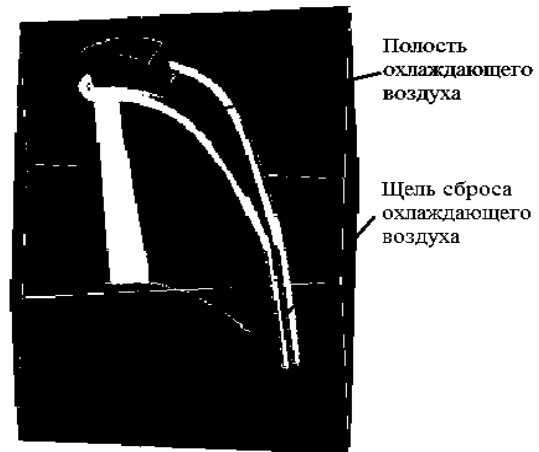


Рис. 2. Модель полости охлаждающего воздуха

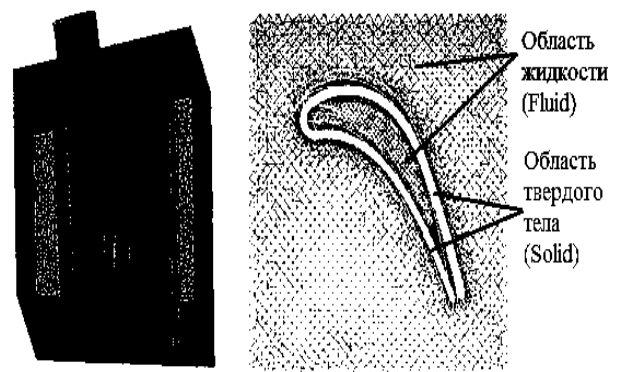


Рис. 3. Расчетная сетка

Для проведения имитационных расчетов задавались следующие исходные данные:

- Вход газа – Inlet: полное давление 1,9 МПа, температура 1550 К;
- Выход газов – Outlet: массовый расход 1,4 кг/с;
- Вход охлаждающего воздуха – Inlet: полное давление на входе, температура 700 К.

Для проведения многовариантных расчетов давление охлаждающего воздуха задавалось в диапазоне 1,7 – 2,1 МПа (всего 5 вариантов).

Также заданы интерфейс периодичности границ сектора и интерфейс между областями жидкости и твердого тела, для которого установлено условие теплопроводности (рис. 4).

Результаты расчетов для различных значений давления охлаждающего воздуха представлены ниже в виде контуров температур по сечения области, а также контуров температур поверхности лопатки (рис. 5, 6).

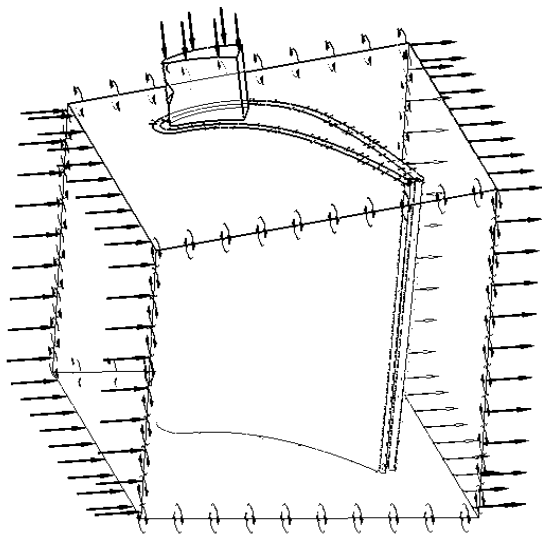


Рис. 4. Граничные условия расчетной модели

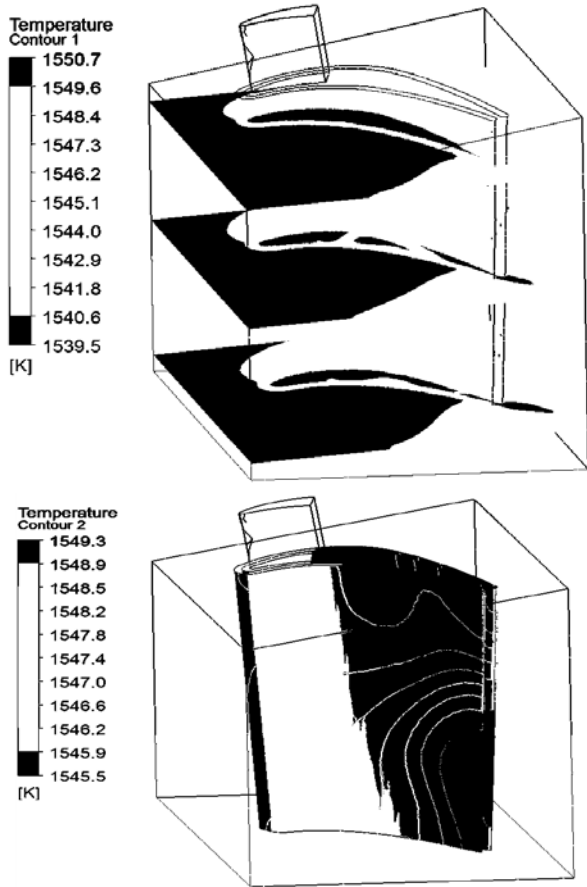


Рис. 5. Контуры температур по сечениям и поверхности лопатки при 1,7 МПа

В результате проведения исследования была выявлена зависимость температуры лопатки и расход охлаждающего воздуха от давления. Для наглядности построен график зависимости (рис. 7).

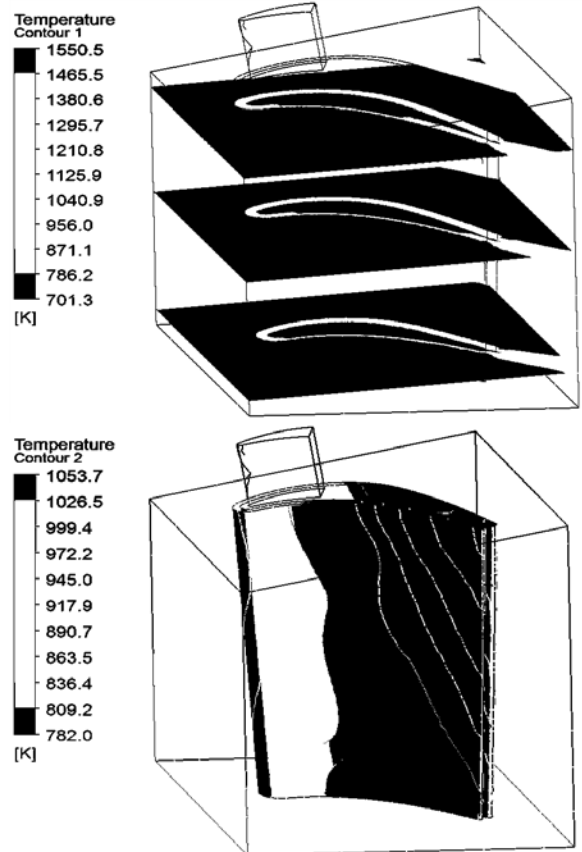


Рис. 6. Контуры температур по сечениям и поверхности лопатки при давлении 2,1 МПа

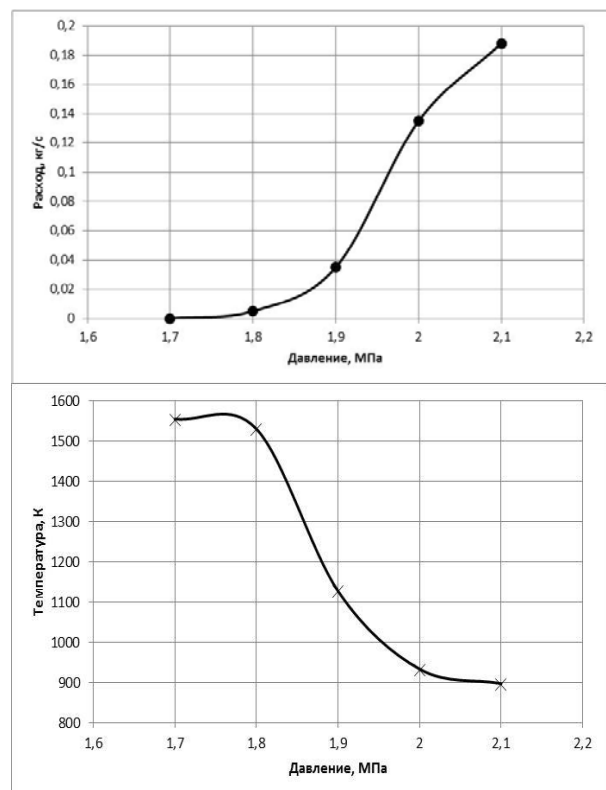


Рис. 7. Графики зависимости расхода и температуры от давления охлаждающего воздуха

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены процесс моделирования системы охлаждения лопаток газовой турбины, также представлены зависимости температуры стенок лопаток от давления охлаждающего воздуха.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н.. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: МЭИ, 2002, 584 с. [ Tsanev S.V, Burov V.D, Remezov A.N. *Gas turbine and combined-cycle plants of thermal power plants*. Moscow: National Research University «MPEI», 2002. ]

2. Кудоярова В. М., Кишалов А. Е. Решение прикладных задач теплообмена и гидрогазодинамики в пакете ANSYS: учебное пособие / Уфимск. гос. авиац.техн. ун-т. Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 219 с. [ Kudoyarova V. M., Kishalov A. Ye. *Solution of applied problems of heat exchange and fluid dynamics in the ANSYS package*. - UFA: Ufa State Aviation University, 2016. ]

### ОБ АВТОРАХ

**АХМЕТШИН Ильдaр Ралифович**, магистрант каф. АТИТ. Дипл. инженер-механик (БГАУ, 2016). Готовит дис. о открытых активных системах охлаждения лопаток ГТ с источником энергии на базе комбинир. ДВС.

**ГРИШИН Александр Николаевич**, доцент, канд. техн. наук каф. АТИТ, научное направление: повышение эффективности использования энергии в транспортных средствах и энергетических установках.

### METADATA

**Title:** Modeling of thermal state of gas turbines shovel with convective cooling system based on ansys package.

**Authors:** I. R. Akhmetshin<sup>1</sup>, A.N. Grishin<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>nex.102@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 5-8, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract.** The purpose of this article is to simulate the thermal state of the gas turbine blades with a convective cooling system. In recent years, the progress of computer technology has dramatically increased the ability to solve problems with large amounts of computation, which require a large amount of memory. This, in turn, made it possible to simulate cooling systems on computer equipment, which reduces the time for designing and performing the tests of the latter.

**Keywords:** ANSYS, cooled convective vane, thermal state, cooling air pressure.

**About authors:**

**AKHMETSHIN, Ildar Ralifovich**, graduate student. ATIT. Diploma. engineer-mechanic (BSAU, 2016). Prepares dis. on open active cooling systems for GT blades with a power source on the basis of a combined. ICE.

**GRISHIN, Alexander Nikolaevich**, Associate Professor, Cand.Tech.Sc. ATIT, scientific direction: increasing the efficiency of energy use in vehicles and power plants.



## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ 5-СТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

М. З. БАГАУТДИНОВ<sup>1</sup>, Н. Б. СИМОНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>baganet@mail.ru, <sup>2</sup>sventigo@yandex.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Предлагается последовательность действий для расчета величин коэффициента полезного действия компрессора по результатам испытаний в стендовых условиях. Последовательность апробирована на данных по результатам испытания 5-ступенчатого компрессора с трансзвуковыми рабочими лопатками. Все результаты вычислений приведены в виде графиков и таблиц, рассчитана погрешность между фактическими значениями и результатами расчетов.

**Ключевые слова:** компрессор; испытания; коэффициент полезного действия.

### ВВЕДЕНИЕ

При испытании на стендах очевидным является тот факт, что с увеличением температуры и давления по тракту компрессора возрастают и потери по ступеням. Для это, при испытаниях проводят комплексные замеры параметров по тракту, приводят схемы препарировки. Ниже приведены расчетные зависимости, по которым можно определять КПД за ступенью и оценивать точность установки датчиков, т.к. при замере давлений, необходимо измерять пиковое давление, максимальную температуру в выделенной поверхности тока.

Вдоль поверхностей тока для РК по  $T_1^*$  и  $T_2^*$  имеем  $\bar{H}_{T_{PK_i}} \cong C_p (T_2^* - T_1^*)$  или по  $i^*$ .

$$\pi_{PK_{i0}}^* = (T_2^* / T_1^*)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Фактическое значение степени повышения давления за ступенью  $\pi_{PK}^* = P_2^* / P_1^*$ .

Коэффициент восстановления полного давления рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{PK_w} = \pi_{PK}^* / \pi_{PK_{i0}}^*.$$

Отсюда КПД рабочего колеса равен

$$\eta_{PK_u}^* = 1 - (1 - \sigma_{PK}^{0,286}) \left( \frac{C_p T_1^*}{H_T} + 1 \right).$$

Для ступени будет справедливо:

$$\sigma_{CT} = \sigma_{PK_w} \sigma_{HA}$$

Точнее  $\sigma_{CT} = \sigma_{PK_w} \sqrt{\sigma_{oz} \sigma_{oz_w}} \sigma_{HA}$ .

$$\eta_{CT_u}^* = 1 - (1 - \sigma_{CT}^{0,286}) \left( \frac{C_p T_1^*}{H_T} + 1 \right).$$

Для повышения КПД ступени  $\eta_{CT_u}^*$  надо повышать коэффициент восстановления полного давления  $\sigma_{CT}$ .

Для этого необходимо уменьшить степень реактивности  $\rho$  т.е. уменьшить угол закрутки потока на входе  $\alpha_1$  при условии, что работа не изменяется  $H_T = idem$ .

Для апробации вышеприведенных зависимостей предлагается использовать данные [1].

Результаты расчета приведены на рис. 1–6. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных величин КПД представлены в табл. 1.

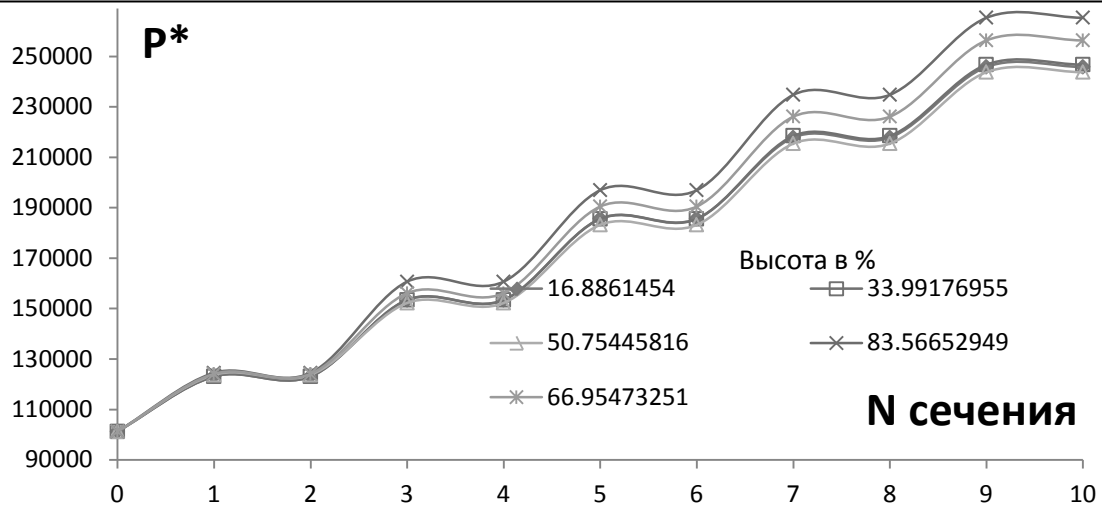


Рис. 1. Распределение полного давления по тракту компрессора

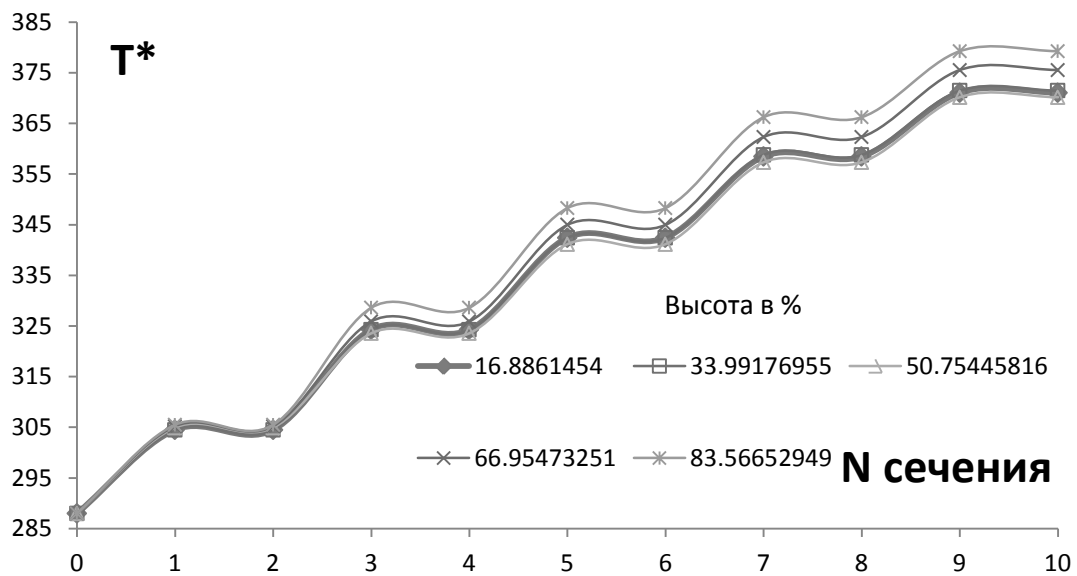


Рис. 2. Распределение полной температуры по тракту компрессора

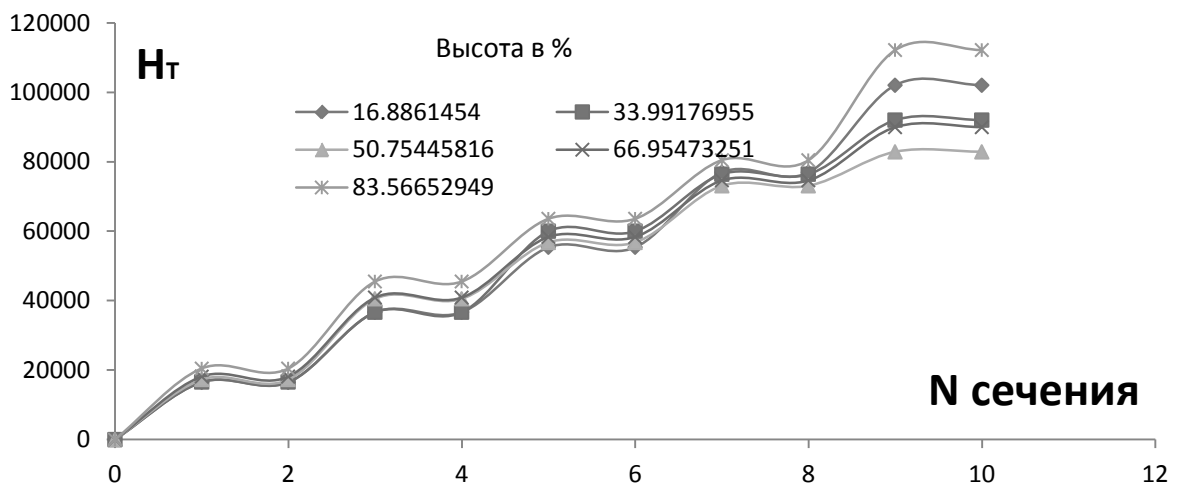


Рис. 3. Распределение работы по тракту компрессора

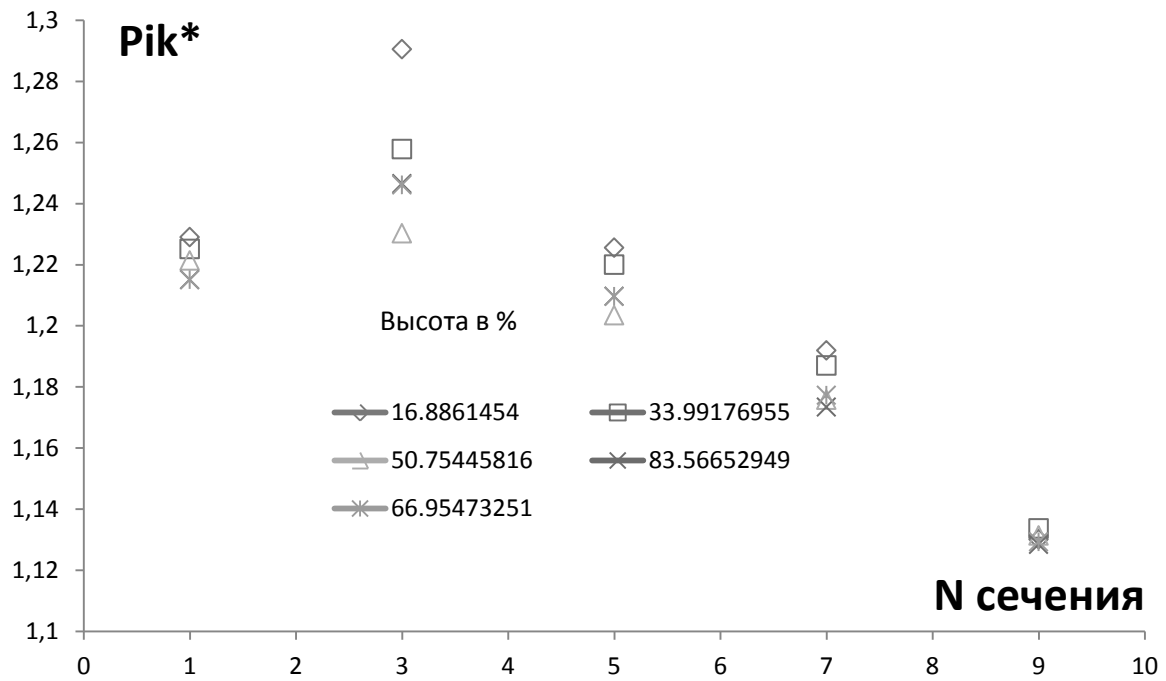


Рис. 4. Распределение степени повышения полного давления по тракту компрессора

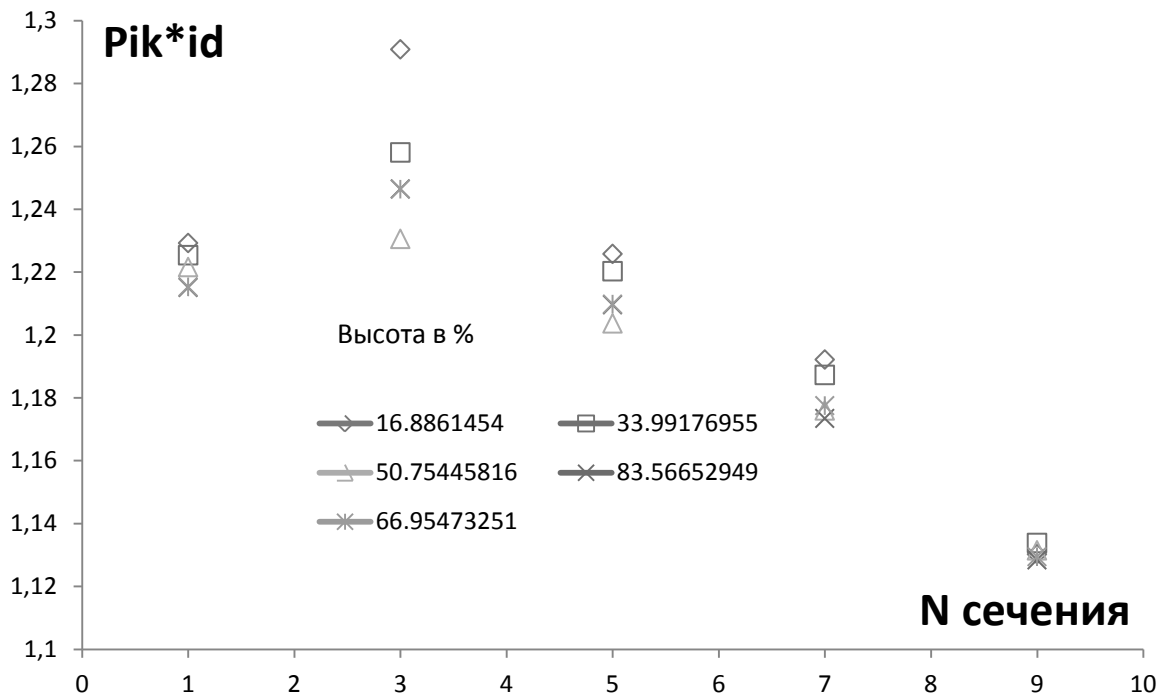


Рис. 5. Распределение степени повышения полного давления, рассчитанного по параметру полной температуры, по тракту компрессора

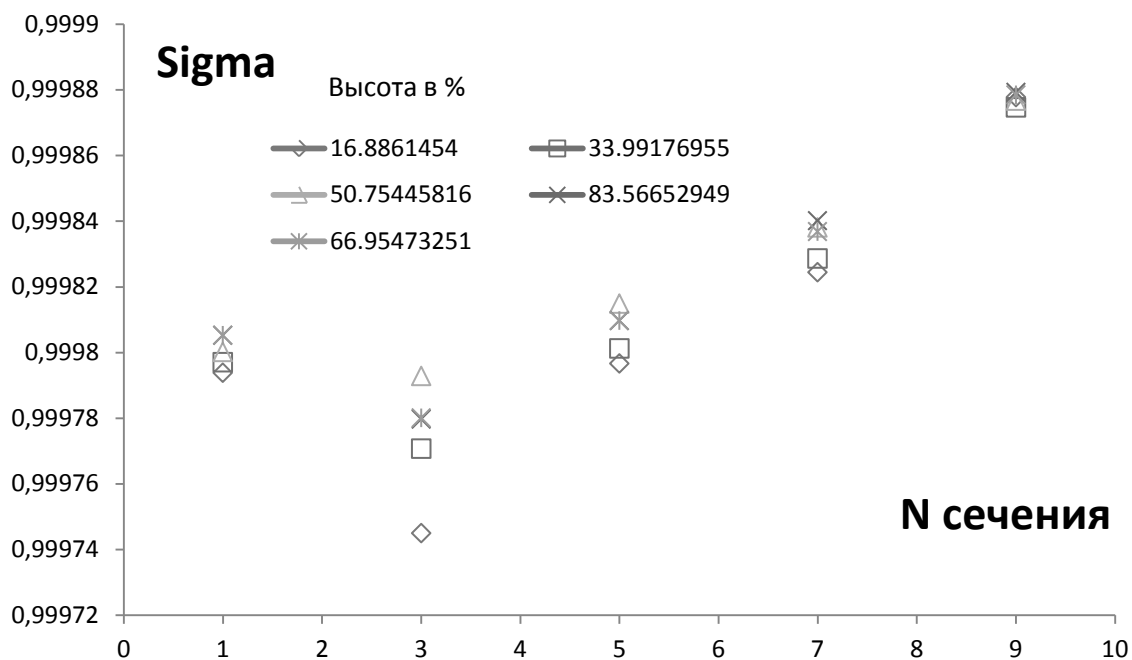


Рис. 6. Распределение коэффициента восстановления полного давления по тракту компрессора

Таблица 1

Сравнение расчетных и экспериментальных величин КПД

КПД (Р)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0.998966003		0.998406221		0.998067754		0.997850393		0.99771814
	0.998968602		0.998409231		0.998092695		0.997869674		0.997725834
	0.99898373		0.998501503		0.998179135		0.997949813		0.997791598
	0.999014939		0.99848554		0.998147089		0.997908269		0.997757285
	0.999106869		0.998570467		0.998248033		0.998017571		0.99789259
КПД (Э)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1.00504451		0.993909348		0.987484587		0.919570707		0.817010309
	1.002373887		0.993909348		0.910727497		0.929734848		0.910695876
	0.986053412		0.881444759		0.939827374		0.952462121		0.995296392
	0.953486647		0.930807365		0.980332922		0.999873737		0.976868557
	0.858382789		0.896033994		0.951911221		0.97594697		0.816752577
$\delta, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	-0.604799853		0.452442916		1.071729828		8.512633703		22.11818243
	-0.339722045		0.452745747		9.592902237		7.328414698		9.556423857
	1.311320228		13.28009976		6.208774355		4.775800582		0.250699789
	4.774927128		7.270910942		1.817154746		-0.196571611		2.138335608
	16.39409377		11.44336861		4.867766182		2.26145502		22.17807666

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено расчетное исследование 5-ступенчатого компрессора. Проведен анализ зависимостей для получения КПД. Полученные результаты приведены на рисунках и в таблицах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Experimental** investigation of a five-stage axial-flow research compressor with transonic rotors in all stages IV - blade element performance. Donald M. Sandercock. Lewis Flight Propulsion Laboratory, Cleveland, Ohio. 15 May 1957.

### ОБ АВТОРАХ

**СИМОНОВ Николай Борисович**, асп. каф. авиац. двигателей. Маг.-инж. (УГАТУ, 2014). Готовит дис. в обл. моделир. раб. процессов лопаточных машин.

**БАГАУТДИНОВ Марат Закиевич**, асп. каф. авиац. двигателей. Маг.-инж. (УГАТУ, 2010). Готовит дис. в обл. моделир. раб. процессов лопаточных машин.

**МИРОНОВ Валерий Викторович**, проф. каф. АСУ. Дипл. радиофизик (Воронежск. гос. ун-т, 1975). Д-р техн. наук по упр. в техн. системах (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. иерархических моделей и ситуационного управления.

### METADATA

**Title:** Calculation of main rotor on the static mode in ansys cfx.

**Authors:** M. Z. Bagautdinov, N. B. Simonov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** baganet@mail.ru<sup>1</sup>, sventigo@yandex.ru<sup>2</sup>

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 9-13, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** A sequence of actions is proposed for calculating the values of the efficiency of the compressor based on the test results in bench conditions. The sequence was tested on the results of testing a 5-stage compressor with transonic working vanes. All results of calculations are shown in the form of graphs and tables, the error between the actual values and calculation results is calculated.

**Key words:** compressor, test, efficiency.

**About authors:**

**SIMONOV, Nikolay Borisovich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Aircraft Engines, Master of Technics & Technology (UGATU, 2014).

**BAGAUTDINOV, Marat Zakievich**, asp. kaf. aviac. dvigatelej. Mag.-inzh. (UGATU, 2010). Gotovit dis. v obl. modelir. rab. processov lopatochnyh mashin.

## К ВОПРОСУ О ЖИДКОСТНЫХ СКОПЛЕНИЯХ В ТРУБОПРОВОДЕ

М. Г. БУГАЕВ<sup>1</sup>, Р. Р. КАЛИМУЛЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>bugai1294@mail.ru, <sup>2</sup>radik\_kalimullin@bk.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Представлены результаты исследования течения двухфазной среды в трубопроводе сложной формы. Произведен анализ причин возникновения жидкости в трубопроводе, а также методы их устранения. Исследованы работы разных ученых о проблеме жидкостных скоплений в трубопроводе, а также методах их устранения. Предложен дополнительный метод изучения возникновения жидкостных осадков в трубопроводе, а именно моделирования течения многокомпонентной среды в трубопроводе сложной формы в пакете программ ANSYS-CFX.

**Ключевые слова:** численное моделирование; трубопровод; скопление осадков; аварии в трубопроводе; зона скопления осадков; ANSYS-CFX.

### ВВЕДЕНИЕ

Газовую промышленность можно назвать основной отраслью хозяйственного комплекса России. В настоящее время она играет значительную роль в поддержании жизнедеятельности населения страны. Природный газ – один из самых важных составляющих топливно-энергетических ресурсов страны, так как объём добычи составляет больше половины от общего топливного баланса страны [1].

Транспортируемый по газопроводам природный газ, в основном, в своем составе содержит мелкие жидкостные включения, которые представляют собой, как правило, распыленные частицы воды, масел, газового конденсата и других углеводородов [2, 3].

Причины попадания жидкости во внутреннюю полость газопровода различны:

- некачественная подготовка природного газа для транспорта на дальние расстояния на объектах добычи;
- потери технических жидкостей при технологических операциях по транспортировке газа;
- попадание жидкости в полость трубы при строительно-монтажных и ремонтно-восстановительных работах [4].

Аварии на трубопроводе происходят не только по техническим причинам, существует и ряд других, основным из которых является человеческий фактор. Не малое число катастроф происходит в результате халатности при изготовлении и введении в эксплуатацию трубопровода. В настоящее время применяется ряд мероприятий по уменьшению содержания мелких жидкостных включений в транспортируемом газе [4].

### МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

К методам очистки внутренней полости трубопровода от жидкостных скоплений можно отнести конденсатосборник, конденсатосборник типа расширительная камера, метод дриппа, очистка протаскиванием скреба и метод очистки поршнем (рис. 1) [4].

Анализ научной литературы показал, что исследованием данной проблемы занимались ученые такие как Галямов А. К., Селиверстов В.Г., Потапенко Е.С., Усольцев М.Е. и т.д. Работы этих авторов посвящены методам инженерного расчета скопления жидкой фазы в газопроводе.

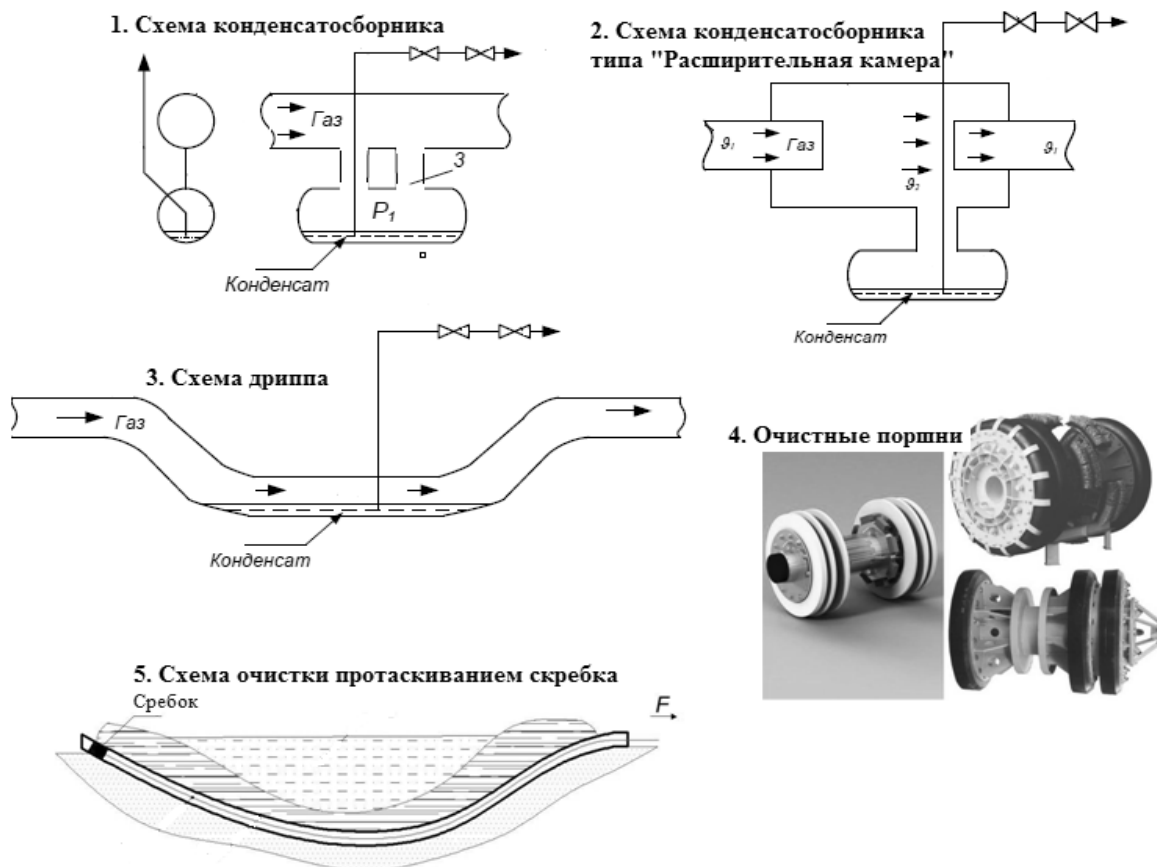


Рис. 1. Схемы очистки трубопроводов от жидкостных скоплений

А.К. Галямовым рассмотрено движение газа на восходящих участках трассы при наличии скопления жидкости. После проведенного исследования автором получены несколько математических выражений:

1. условие, определяющее вынос жидкостного скопления из пониженного участка трубопровода [5, 6]:

$$\sin \alpha < \frac{\frac{\lambda_{\bar{A}}}{4} \cdot \frac{Fr_{ид}}{\pi^2 \cdot \bar{\delta}^2(S)}}{\frac{\xi}{\bar{p}(S)} - \frac{Fr_{ид}}{\eta \cdot \pi^2 \cdot \bar{\delta}^3(S)} - 1}$$

2. уравнение, определяющее положение границы газ-жидкость [5, 6]:

$$\frac{dH}{dS} = \frac{\left( \frac{P_H \cdot \gamma_{ж}}{\gamma_{гн} \cdot P} \cdot (1 - KM^2) - 1 \right) \cdot \sin \alpha - \frac{\lambda_{\Gamma} \cdot P_H \cdot \chi(H)}{8 \cdot \gamma_{гн} \cdot f(H)} \cdot kM^2}{\left( \frac{P_H \cdot \gamma_{ж}}{\gamma_{гн} \cdot P} \cdot (1 - KM^2) - 1 \right) \cdot \cos \alpha - \frac{P_H \cdot df(H)}{\gamma_{гн} \cdot f(H)} \cdot kM^2}$$

М. Е. Усольцевым получено уравнение, описывающие вынос скопления жидкости из пониженного участка газопровода [7]:

$$\beta_{\mathcal{E}} = 114,13 \cdot \left( \frac{\mu_{\mathcal{E}}}{\mu_{\bar{A}}} \right)^{0,0168} \cdot \left( \frac{\rho_{\mathcal{E}}}{\rho_{\bar{A}}} \right) \cdot Fr^{1,298} \cdot We^{-0,945} \cdot (1 + \sin \alpha)^{-0,616}$$

В работе В. Г. Селиверстова приведен расчет параметров трубопроводов для удаления жидкости из внутренней полости трубопровода [8]:

$$\frac{R \cdot T \cdot D}{\lambda_{\phi}} \left( \frac{1}{W_1^2} - \frac{1}{W_2^2} \right) = L$$

Анализ теоретических исследований по изучению удаления жидкостных скоплений показал, что многие российские и зарубежные ученые занимались данной проблемой. Большое количество исследований в этой области описывает теоретически и практи-

чески поведение жидкостного скопления при различных углах наклона, давлении, плотности жидкости и газа и других физико-химических характеристик. Исследование показало, что очистка водных или газовых скоплений затруднительно и стоит многих затрат для устранения.

Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать вывод о необходимости дальнейшего и более глубокого изучения процесса удаления жидкостных скоплений, а именно изучение численного моделирования аварийных участков трубопроводов.

В настоящее время численное моделирование стало неотъемлемой частью исследования и является одним из наиболее эффективных методов изучения гидродинамических процессов. Кроме этого на рынке появляется все больше современных вычислительных технологий способных более точно воссоздать реальную картину происходящих процессов. Применение современных математических пакетов позволит проводить численное моделирование опасных зон скопления осадков в виде конденсата и загрязнений на участках трубопроводов, а также выявить и предупредить аварийные ситуации.

В настоящее время в УГАТУ на базе учебного научного инновационного центра «Гидропневмоавтоматика» проводятся исследования, направленные на моделирование скопления жидкостей в трубопроводе. Инструментом для моделирования течения жидкостей в опасных зонах выбран высокопроизводительный вычислительный программный комплекс *ANSYS CFX*, поддерживающий большой набор моделей, описывающих различные явления, сопутствующие течениям жидкостей и газов [9].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью исследований является разработка методики моделирования аварийных участков трубопроводов для выявления точных геометрических и гидрогазодинамических параметров при проектировании и прокладки труб, что позволит предотвращать потери при течении потока газов трубопроводе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Оруджев С. А.** Газовая промышленность по пути прогресса. – М.: «Недра», 1976. [ Orudzhev S.A. The gas industry is on the path of progress. - Moscow: Nedra, 1976. ]
2. **Потапенко Е. С.** Экспериментальное исследование условий выноса жидкостных скоплений из внутренней полости газопровода: дис. на соиск. канд. тех. наук. РГУ им. И. М. Губкина, Москва, 2014. [ Potapenko E. S. Experimental study of the conditions for removal of fluid accumulations from the internal cavity of the gas pipeline: dis. to the soisk. Cand. those. sciences. RSU them. IM Gubkina, Moscow, 2014. ]
3. **Вольский Э. Н., Константинова И. М.** Режимы работы магистрального газопровода. – Л.: «Недра», 1970. [ Volsky E. N, Konstantinova I. M Modes of operation of the main gas pipeline. - L.: "The Nedra", 1970. ]
4. **Нечваль А. М.** Динамика образования газовых скоплений в трубопроводах и их удаления потоком перекачиваемой жидкости. (дисс. канд.техн. наук.,Уфа, 1991 г, 190 с.) [ Nechval AM Dynamics of formation of gas accumulations in pipelines and their removal by a flow of pumped liquid. (dissident, Candidate of Technical Sciences, Ufa, 1991, 190 p.) ]
5. **Галлямов А. К.** Диссертация на соискателя степени кандидата технических наук. Движение газожидкостных смесей по горизонтальным и наклонным трубопроводам. Москва, 1967. [ Gallyamov A.K. Thesis for the candidate of technical sciences degree. Movement of gas-liquid mixtures along horizontal and inclined pipelines. Moscow, 1967. ]
6. **Галлямов А. К., Губин В. Е.** Влияние скоплений воды и газа на эксплуатационные характеристики магистральных трубопроводов. – М.: ВНИИОНГ, 1970. [ Gallyamov AK, Gubin V.E. Influence of accumulations of water and gas on the operating characteristics of main pipelines. - Moscow: VNIIONG, 1970. ]
7. **Усольцев М. Е.** Удаление жидкостных скоплений из пониженных участков газопровода потоком транспортируемого газа. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2012 г. [ Usoltsev M.E. Removal of liquid accumulations from the reduced sections of the gas pipeline by the flow of the transported gas. Abstract for the degree of Candidate of Technical Sciences, St. Petersburg, 2012 ]
8. **Селиверстов В. Г.** Аналитические основы очистки полости и испытания газонефтепроводов. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2008. – 326 с. [ Seliverstov V.G. Analytical basis for cleaning the cavity and testing gas and oil pipelines. - M.: ООО "IRTS Gazprom", 2008. - 326 p. ]
9. **Бугаев М. Г.** Численное моделирование аварийных участков трубопроводов при транспорте нефтепродуктов [Текст] / Бугаев М. Г., Калимуллин Р. Р. // Энергосбережение. Наука и образование: сб. докл. межд. конф. / КФУ. – Набережные Челны, 2017. – С. 152-156. [ Bugaev MG, Numerical modeling of emergency sections of pipelines during transportation of petroleum products [Text] / Bugaev MG, Kalimullin RR // Energy saving. Science and Education: Sat. doc. Int. Conf. / CFCs. - Naberezhnye Chelny, 2017. - P. 152-156. ]

### ОБ АВТОРАХ

**БУГАЕВ Максим Геннадьевич**, магистрант кафедры ПГМ УГАТУ, степень бакалавра по направлению «Энергетическое машиностроение», профиль «Автоматизированные гидравлические и пневматические системы и агрегаты» (УГАТУ, 2016).



**КАЛИМУЛЛИН Радик Рифкатович**, доц. каф. ПГМ УГАТУ. Дипл. инж. тех. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2008). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. высоконапор. многофаз. течения жидкости.

#### METADATA

**Title:** To the question of liquid accumulations in the pipeline

**Authors:** M. G. Bugaev<sup>1</sup>, R. R. Kalimullin<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> bugai1294@mail.ru, <sup>2</sup> radik\_kalimullin@bk.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 14-17, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The article is devoted to the investigation of the flow of a two-phase medium in a pipeline of complex shape. An analysis of the causes of liquid in the pipeline, as well as methods for their elimination. The work of different scientists on the problem of liquid clusters in the pipeline, as well as methods for their elimination are investigated. An additional method for studying the occurrence of liquid precipitation in a pipeline, namely, modeling the flow of a multicomponent medium in a complex pipeline in the ANSYS-CFX program package.

**Key words:** numerical modeling, pipeline, accumulation of precipitation, pipeline accidents, a zone of accumulation of precipitation, ANSYS-CFX.

**About authors:**

**BUGAEV, Maxim Gennadievich**, student of the department of PGM USATU, bachelor's degree in the field of "Power Engineering", profile "Automated hydraulic and pneumatic systems and units" (UGATU, 2016).

**KALIMULLIN, Radik Rifkatovich**, Assoc. cafe. PGM USATU, Dipl. Ing. those. and technology. on power machine building (UGATU, 2008). Cand. tech. Science (UGATU, 2013). Issl. in the region. high head. multiphase. of the flow of a liquid.

## СОГЛАСОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТУРБОНАДДУВА С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДВИГАТЕЛЯ ДДА-120М для АВИАЦИИ

В. Ю. БУТЕНКО

sadrick333@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В настоящее время на кафедре двигателей внутреннего сгорания УГАТУ разрабатывается двигатель для авиации (ДДА-120М). Основными задачами при проектировании является получение малых габаритов и массы двигателя с нужной внешней скоростной характеристикой. Рассматривается способ повышения мощности двигателя при использовании турбонаддува без значительного увеличения габаритов двигателя, метод подбора турбокомпрессора, а также проблемы, возникающие при использовании турбокомпрессора.

**Ключевые слова:** наддув, турбонаддув; мощность; энергия отработавших газов; характеристики; степень повышения давления; анализ.

### ВВЕДЕНИЕ

При проектировании двигателя первой задачей установлено получение необходимой мощности – 120 л.с. и более. Для получения необходимой мощности можно прибегнуть к различным способам, а именно изменение конструктивных особенностей двигателя, наддув или систем двигателя, таких как, к примеру, система зажигания, система охлаждения или система управления двигателем.

Наддув – один из самых эффективных способов повышения мощности двигателя внутреннего сгорания. Для повышения мощности двигателя решено использовать наддув с использованием газовой турбины, в которой часть энергии отработавших используется для получения механической работы, которая используется на привод компрессора.

Преимущества наддува:

- повышение мощности двигателя при заданных габаритах или уменьшение веса и габаритов при той же мощности;
- улучшение экономичности за счет роста индикаторного и механического КПД; расширение возможности получения

желаемой характеристики крутящего момента двигателя по частоте вращения;

- улучшение экологических показателей двигателя;

- уменьшение падения мощности при снижении плотности окружающего воздуха.

Недостатки использования наддува:

- увеличение механической и тепловой нагрузки на двигатель;
- увеличение напряжений в деталях двигателя и ухудшение условий смазывания сопряженных элементов;
- необходимость использования топлива с более высоким октановым числом;
- возможно ухудшение приемистости и неудовлетворительное протекание кривой крутящего момента.

На рис. 1 представлена самая распространенная схема использования турбонаддува с двигателем внутреннего сгорания.

Турбокомпрессоры могут быть выполнены по конструктивным схемам, отличающимся взаимным расположением рабочих колес компрессора, турбины и опор ротора (подшипников).

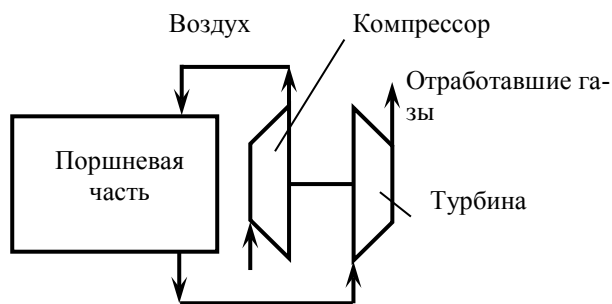


Рис. 1. Схема двигателя с турбокомпрессором

Конструкция турбокомпрессора должна обеспечивать работу при следующих условиях: высокая температура отработавших газов (до 1300 К); высокие частоты вращения ротора (до 300 000 об/мин в зависимости от размеров колес); высокие свойства проточной части.

Чаще всего в турбокомпрессорах двигателей наземного транспорта, роторы которых вращаются с большой частотой (до 300000 об/мин) применяют подшипники скольжения, изготовленные из бронзы с принудительной смазкой. Система смазки может быть отдельной или включенной в систему смазки двигателя. При относительно невысоких частотах вращения ротора крупных турбокомпрессоров применяют подшипники качения. Для них применяют либо смазку разбрызгиванием, либо подачу масла специальным насосом. В последнее время

ведущие фирмы даже для небольших турбокомпрессоров начали применять подшипники с керамическими шариками. Для таких подшипников не требуется система смазки – они заполнены пластической смазкой.

Колесо компрессора и улитку компрессора изготавливают преимущественно из алюминиевых сплавов литьем, а при высоких давлениях наддува и температурах (до 200° С) применяют сталь. Турбина работает при высоких температурах газа (500 – 1300° С), поэтому колесо турбины изготавливают из легированной стали, а корпус турбины – из чугуна или из стали. В настоящее время ведущие мировые производители ведут работы по применению керамических материалов в турбокомпрессорах.

Принцип действия турбокомпрессора представлен на рис. 2.

#### СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫЕ КОМПРЕССОРЫ

В настоящее время в России действует ГОСТ Р 53637-2009, который регламентирует параметры турбокомпрессоров только для автотракторных двигателей. Типоразмерный ряд предусматривает турбокомпрессоры только с радиальной турбиной: ТКР 4 ... ТКР 12 с максимальным весом 30 кг и степенью повышения давления от 1,7 до 2,7.

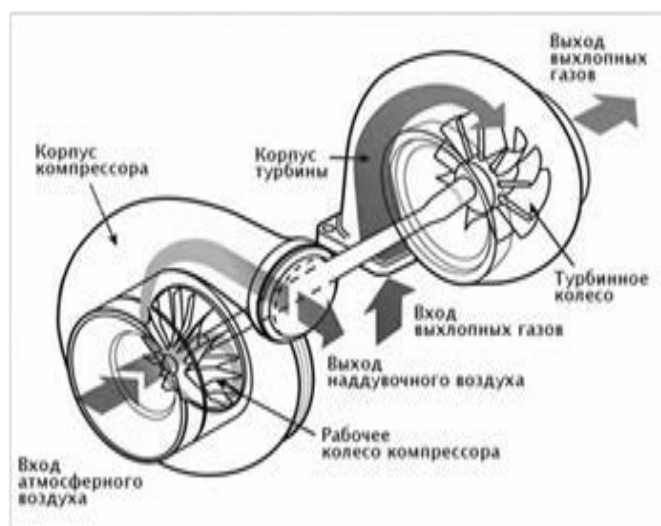


Рис. 2. Принцип действия турбокомпрессора

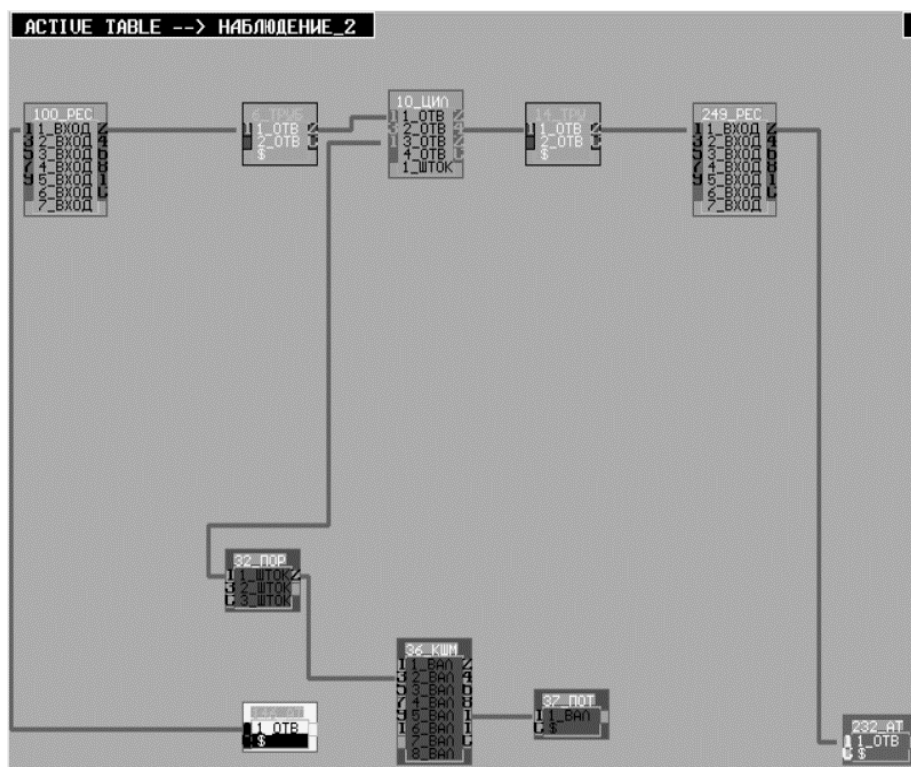


Рис. 3. Сборка модели двигателя ДДА-120М в СИМ «Альбея»

Российскими и зарубежными фирмами выпускаются сотни моделей агрегатов наддува с диаметрами колес от 25 до 950 мм и частотами вращения ротора в диапазоне от 10000 до 300 000 об/мин.

В России турбокомпрессоры производит НПО «Турботехника», многие предприятия, такие как ОАО «Автодизель» ЯМЗ, Пензенский дизельный завод, ОАО «КАМАЗ» являются партнерами выше названного научно-производственного объединения. Линейка серийно выпускаемых турбокомпрессоров представлена более чем 80 моделями. На двигателях, выпускаемые у нас в стране, устанавливают и зарубежные турбокомпрессоры.

Лидером по масштабам выпуска (40% рынка турбокомпрессоров для автотракторной техники) является американская фирма Garrett, входящая в концерн Honeywell International Inc. и выпускающая ежедневно 30 000 турбокомпрессоров. Линейка серийно выпускаемых компрессоров представлена более, чем 30 моделями.

Большую долю рынка занимают также фирмы KKK, Schwitzer, входящие в немецкий концерн BorgWarner Turbosystems, а также

фирмы Holset (Великобритания), IHI, Hitachi, Mitsubishi, Komatsu, Toyota (Япония).

По данным официального сайта компании концерн Honeywell International Inc. турбокомпрессора необходимой производительности нет в наличии. Поэтому было решено использовать агрегат производства научно-производственного объединения «Турботехника».

#### СОГЛАСОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Согласование характеристик турбокомпрессора с характеристиками двигателя можно провести, используя графоаналитический метод и дополнительное программное обеспечение, предназначенное для имитационного расчета двигателей. В нашем случае для расчета использовалась система имитационного моделирования «Альбея». Сборка модели в СИМ «Альбея» представлена на рис. 3. В основе графоаналитического метода лежит использование характеристики агрегата, представленной на рис. 4. Используя характеристику турбокомпрессора, необходимо найти давление наддува  $p_k$  и температуру наддува  $T_k$ .

Найденные параметры необходимо вводить в модуль «146\_АТМОСФЕРА», которые будут соответствовать давлению и температуре во впускном канале двигателя.

Используя расчетные данные по расходу воздуха атмосферного трехцилиндрового двигателя  $G_B=200,4$  кг/ч и необходимой степени повышения давления  $\pi_K=2,7$  был подобран турбокомпрессор ТКР 50.01.03. Использование данного турбокомпрессора позволило получить мощность  $N_i=121,1$  л.с. На рисунке 4 представлена внешняя скоростная характеристика атмосферного двигателя ДДА-120М и с использованием турбонаддува.

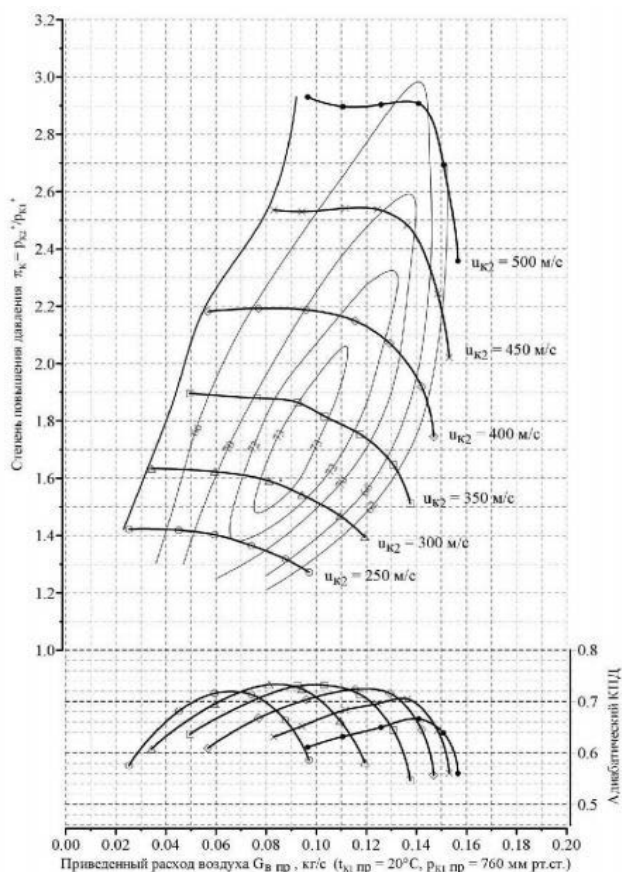


Рис. 4. Характеристика турбокомпрессора ТКР 50.01.03

Поскольку двигатель будет испытываться на стенде в лаборатории, необходимо подобрать турбокомпрессор, который бы работал совместно с двигателем на «земле». Для этого сначала производится расчет двигателя при нормальных условиях окружающей среды, а именно  $p_0=101,3$  кПа и  $T_0=293$ К.

При частоте вращения коленчатого вала двигателя равной 5800 об/мин двигатель развивает  $N_e=10,24$  кВт (13,92 л.с.) и  $G_B=200,4$  кг/ч (0,0557 кг/с).

Значение расхода воздуха  $G_K$  для двигателя с наддувом должно быть примерно в полтора-два раза выше, чем без наддува  $G_B$ . Поэтому ожидаемый расход воздуха через двигатель и, соответственно, через компрессор при частоте вращения коленчатого вала 5800 об/мин равен

$$G_K = (1,5...2)G_B = 300,6..400,8 \text{ кг/ч} \\ (0,0835..0,111 \text{ кг/с})$$

По характеристике компрессора при выбранном приближении расхода воздуха  $G_K = 0,111$  кг/с и частоте вращения вала компрессора  $n_K=181436$  об/мин определяются степени повышения давления  $\pi_K = 2,7$  и КПД компрессора  $\eta_K=0,65$ .

Определяется удельная адиабатная работа компрессора:

$$l_{к.ад} = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_0 \left( \pi_K^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \\ l_{к.ад} = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 287 \cdot 293,15 \cdot \left( 2,7^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) = 96629,76 \text{ Дж/кг}$$

Определяется температура воздуха после компрессора:

$$T_K = \frac{l_{к.ад}}{\eta_K c_p} + T_0 \\ T_K = \frac{96629,76}{0,65 \cdot 1005} + 293 = 441,07 \text{ К}$$

Определяется давление воздуха после компрессора:

$$P_K = P_0 \cdot \pi_K = 100000 \cdot 2,7 = 270000 \text{ Па}$$

В СИМ «АЛБЕЯ» в модуле АТМОСФЕРА на впуске вводятся значения давления  $P_K$  и температуры  $T_K$ . При заданных параметрах на впуске произведён расчёт двигателя. Получено значение расхода воздуха через двигатель  $G_D$ . Данное значение

сравнивается со значением расхода воздуха через компрессор  $G_K$ .

Расход воздуха через двигатель  $G_D = 0,1118$  кг/с.

Расход воздуха через компрессор:  $G_K = 0,111$  кг/с.

При сравнении  $G_D$  и приближением  $G_K$  видно, что разница не превышает 1%, следовательно, расчётная точка подобрана верно и найден режим совместной работы.

При заданном номинальном режиме ( $n_{ном} = 5800$  об/мин) достигается мощность  $N_i = 89,04$  кВт (121,1 л.с.).

После нахождения режима совместной работы, определяется передаточное отношение между валом компрессора и коленчатым валом двигателя.

$$i = \frac{n_K}{n_D} = \frac{181436}{5800} = 31,28$$

После нахождения передаточного отношения, аналогично приведенному выше расчету, получены данные для расчета двигателя в СИМ «Альбея» на других режимах работы. Данные представлены в табл. 1.

В соответствии с полученными параметрами в СИМ «Альбея» были получены характеристики мощности двигателя при других скоростных режимах. Данные представлены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры на впускном канале двигателя

$n$ , об/мин	$p_K$ , Па	$T_K$ , К
6000	281500	450,673
5500	254000	426,606
5000	225700	404,345
4500	201400	391,460
4000	177000	366,276
3500	155000	352,369

Таблица 2

Мощность двигателя без наддува и с наддувом

$n$ , об/мин	$N_p$ , л.с.	$N_{iK}$ , л.с.
6000	63,403	129,654
5500	58,524	110,548
5000	53,428	90,046
4500	48,185	83,950
4000	44,219	58,462
3500	39,066	44,346
3000	33,627	-
2500	27,985	-
2000	22,064	-
1500	15,936	-
1000	9,861	-

В соответствии с данными приведенными в табл. 2 построена внешняя скоростная характеристика двигателя атмосферного ДДА-120М и с турбонаддувом (рис. 5).

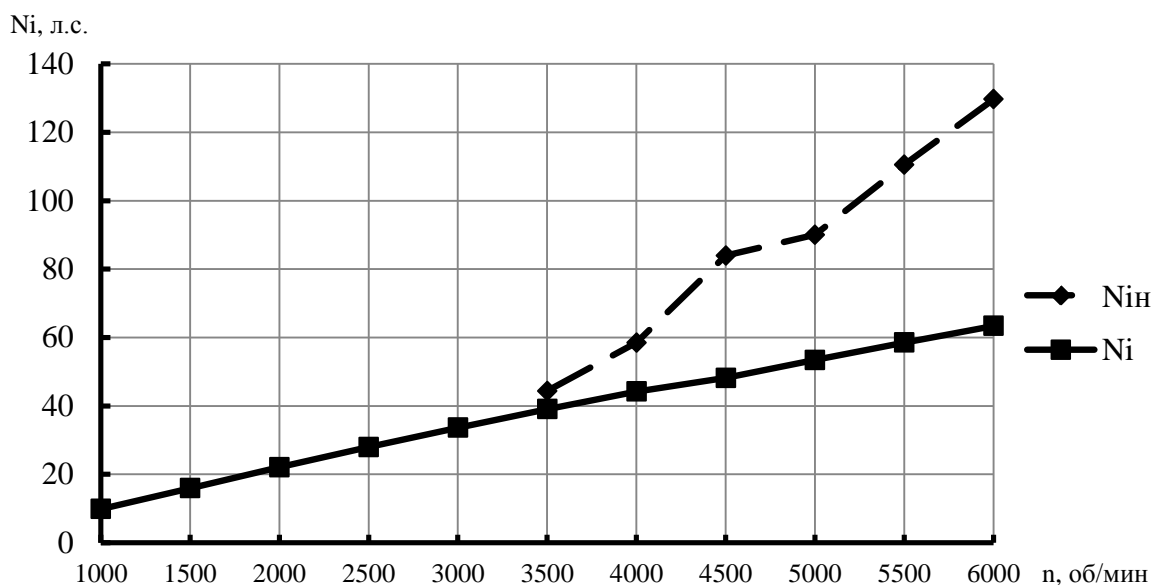


Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика двигателя ДДА-120М без наддува и с турбонаддувом

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так как двигатель будет испытываться на стенде в лаборатории, найденного турбокомпрессор ТКР 50.01.03 согласуется с двигателем ДДА-120М.

Но, поскольку степень повышения давления  $\pi_k$  больше 2, появилась необходимость использования системы промежуточного охлаждения наддувочного воздуха. В противном случае из-за высоких тепловых нагрузок двигатель не будет вырабатывать необходимую мощность.

Также нужно предусмотреть возможность работу двигателя ДДА-120М с двумя турбокомпрессорами, потому что ТКР 50.01.30 был подобран для работы при нормальных условиях.

*Авторы выражает благодарность канд. техн. наук, доц. А.О. Борисову за высказанные замечания и пожелания по улучшению статьи.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Официальный** сайт НПО «Турботехника» [Электронный ресурс] URL: <http://www.kamturbo.ru> (дата обращения 16.11.2017). [ Official website Research-and-production Association "Turbotekhnika" [Online]. Available: <http://www.kamturbo.ru> ]
2. **Официальный** сайт Garrett URL: <https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbochargers> (дата обращения 14.11.2016). [ Garrett official webpage [Online]. Available: <https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbochargers> ]
3. **Вахитов Ю. Р.** Агрегаты наддува двигателей: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2012. 158 с. [ Y. R. Vakhitov, Engine boosters: tutorial (in Russian) Ufa: USATU, 2012. ]
4. **Вахитов Ю. Р.** Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Агрегаты наддува двигателей». Уфа: УГАТУ, 2016. 14 с. [ Y. R. Vakhitov, Methodical rubric for design for discipline "Engine boosters" (in Russian) Ufa: USATU, 2016. ]
5. **Борисов А. О., Пенкин Д. В.** Система имитационного моделирования «Альбея». Моделирование систем автоматического управления: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2002. 95 с. [ A. O. Borisov, D. V. Penkin, Simulation modeling system "Albea". Simulation of systems for automatic control (in Russian) Ufa: USATU, 2002. ]

## ОБ АВТОРЕ

**БУТЕНКО Вячеслав Юрьевич**, маг. каф. ДВС. Бакалавр техн. наук (УГАТУ, 2016). Готовит дис. о системе турбонаддува для двигателя ДДА-120М, разрабатываемого на кафедре ДВС, УГАТУ.

## METADATA

**Title:** The reconciliation of turbo-supercharging system with the characteristic of the engine DDA-120M for aviation

**Author:** V. Y. Butenko

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** sadrick333@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 18-23, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** At present, the engine for aviation (DDA-120M) is being developed at the Department of Internal Combustion Engines of the USATU. The main tasks in the design are to obtain small dimensions and engine mass with the required external high-speed characteristic. In this article, we consider a method for increasing engine power when using a turbo-supercharger without significantly increasing engine dimensions, the method of selecting a turbocharger, and also the problems that arise with using a turbocompressor.

**Key words:** boost, turbo-supercharge, power, energy of exhaust gases, characteristics, degree of increase of pressure, analysis.

**About author:**

**BUTENKO, Vyacheslav Yurevich**, Graduate student. (Bachelor) Student, Dept. of Internal Combustion Engines. Bachelor of Technics & Technology (UGATU, 2016).

УДК 621.43.06

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗООБМЕНА ДВУХТАКТНОГО ДВС С МОЩНОСТНЫМ КЛАПАНОМ В НАСТРОЕННОЙ ВЫПУСКНОЙ СИСТЕМЕ

Р. Р. Валимухаметов<sup>1</sup>, А. О. Борисов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>notorious002@yandex.ru, <sup>2</sup>bor\_ao@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Приведены результаты исследования по установке модели мощностного клапана в выпускную систему для подстройки выпускной системы под различные режимы работы двигателя на базе двухтактного двигателя внутреннего сгорания. Исследованы процессы газообмена в двухтактном ДВС. Цель исследования: снижение токсичных выбросов, повышение мощности и топливной экономичности. Исследование проводилось методом имитационного моделирования в ПК «Альбея».

**Ключевые слова:** коэффициенты; топливная экономичность; фазы газораспределения; экспериментальная установка; внешняя скоростная характеристика; выпускная система; мощностной клапан.

Проблемы повышения топливной экономичности двухтактных двигателей и снижения токсичных выбросов взаимосвязаны, поэтому требуется комплексный подход к их решению.

Потери топливоздушный смеси в процессе перепуска, т.н. прямой выброс, очень распространенная проблема в современных двигателях. Это связано с тем, что продувочные и выпускные окна открываются практически одновременно, поэтому часть свежего заряда моментально попадает в выпускной коллектор, увеличивая расход топлива на 25-30%.

На сегодняшний день все более ужесточаются нормы токсичных выбросов. В соответствии с международными нормами валовый выброс вредных веществ, например, ручным бензомоторным инструментом не должен превышать 50-72 г/кВт·ч. Для достижения приведения количества выбросов к норме наиболее распространены следующие подходы:

- а) совершенствование впускного тракта двигателя;
- б) совершенствование продувки двигателя;
- в) совершенствование выпускной системы;

г) комбинированные системы подачи топлива;

д) установка катализаторов;

е) расслоение заряда.

Однако большинство технических решений, применяемых в современных двухтактных ДВС, существенно усложняют и удорожают конструкцию мотора. Поэтому основной задачей является добиться повышения топливной экономичности, а также снижение токсичных выбросов, при этом оставляя конструкцию двигателя простой и надежной в эксплуатации.

Целью исследования является исследование установки мощностного клапана в настроенную выпускную систему с подстройкой под различные режимы работы двигателя, для повышения мощности и экономичности двигателя, при этом оставляя его конструкцию такой же простой и надежной.

Достижение сформулированной цели работы осуществляется путем решения следующих задач:

1. Подбор оптимальных фаз газораспределения;
2. Расчет резонатора с двухступенчатым диффузором по методике Блера;



3. Анализ влияния мощностного клапана в настроенной системе выпуска.

Исследование по установке модели мощностного клапана в выпускную систему для подстройки выпускной системы под различные режимы работы двигателя на базе двухтактного двигателя внутреннего сгорания проводилось методом имитационного моделирования в программе "Альбея".

Для отладки проекта были использованы газодинамические модули представленные на рисунке (рис. 1).

На первом этапе моделирования, в качестве тестовой, была спроектирована и отлажена сборка двухтактного ДВС с кривошипно-камерной продувкой.

Далее в проект добавлен модуль диафрагма (мощностной клапан), который автоматически генерируется при связывании модуля «ТРУБКА» с другим модулем «ТРУБКА». Проведены расчеты индикаторных показателей, скоростей и давлений в выпускной системе по внешней скоростной характеристике.

В результате проведенного исследования

исследовано влияние фазы выпуска на индикаторные показатели двухтактного одноцилиндрового двигателя, произведена настройка выпускной трубы по Блэру, смоделирована работа мощностного клапана в СИМ «Альбея» и получен предполагаемый закон изменения сечения клапана для достижения максимальной мощности.

Результат всех расчетов приведены на рисунке (рис. 2).

В ходе исследования было выявлено следующее:

1) Настройка фаз газораспределения позволила получить наибольший прирост мощности на 5000 об/мин (прирост составил 1,26 кВт)

2) Настройка выпускной системы для режима работы двигателя на 6000 об/мин (номинальный режим работы) позволила увеличить мощность на данном режиме с 4,165 кВт до 6,388 кВт.

3) Использование мощностного клапана позволило выровнять внешнюю скоростную характеристику («полку» мощности) в диапазоне от 6000 об/мин до 8000 об/мин.

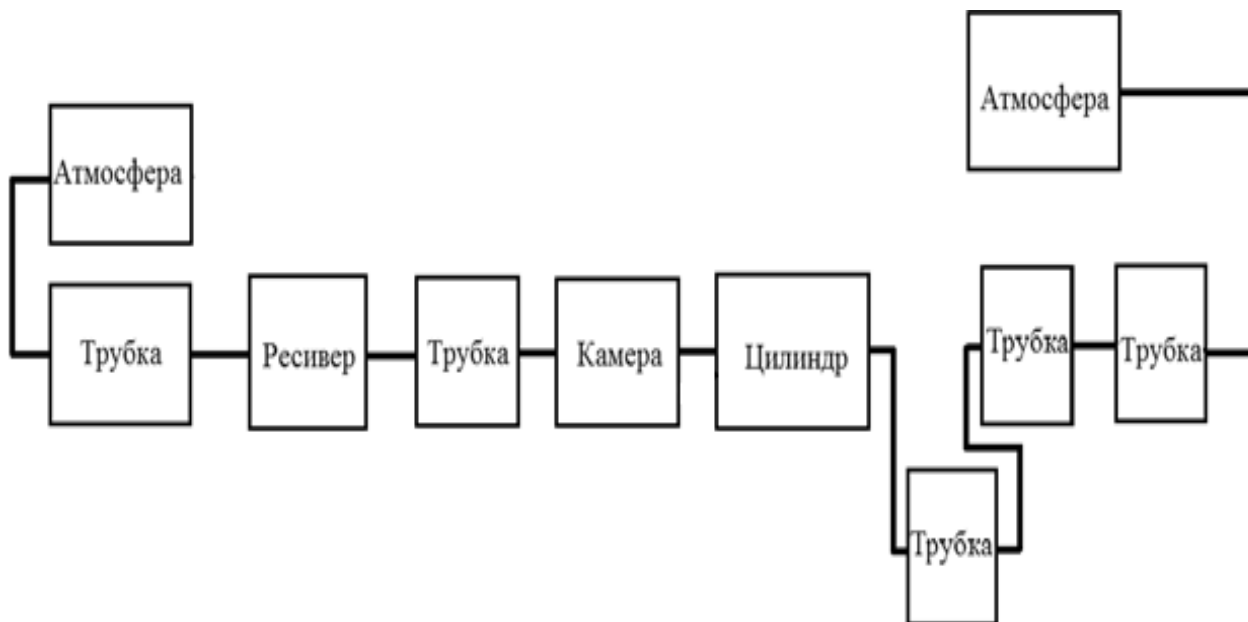


Рис. 1. Расчетная блок-схемы газовоздушного тракта (ГВТ) двигателя из набора имеющихся модулей элементов ГВТ

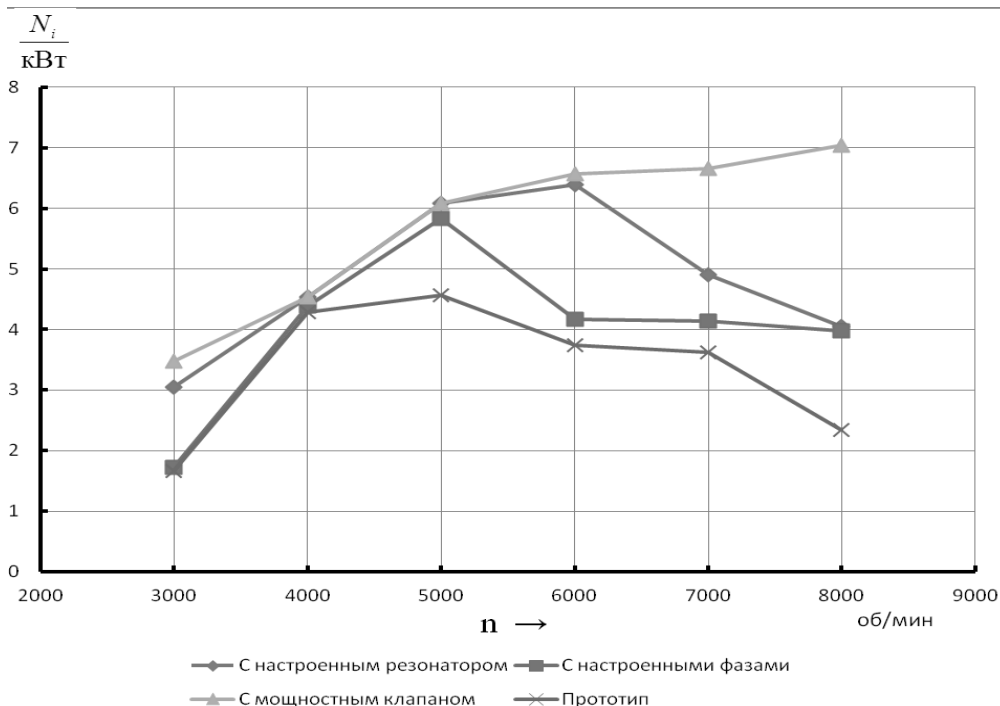


Рис. 2. Внешняя скоростная характеристика всех вариантов двигателя

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашов М. Г. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания: произв. лит.; / М. Г. Кондрашов, Ю. С. Григорьев, В. В. Тупов. М.: Машиностроение, 1990. 272с.
2. Рудой Б. П. Теория газообмена ДВС : учеб. пособие для студ. высшего. техн. проф. образования / Б.П. Рудой; под ред. Ф.Г. Бакиров.- Уфа: УАИ, 1978. -110 с.
3. Методические указания по моделированию рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания в интерактивной системе имитационного моделирования «АЛЬБЕЯ» / УГАТУ; Сост. Губайдуллин И.С., Загайко С.А., Рудая Н.В., Рудой Б.П., Хисматуллин К.А. Уфа, 1996. 41 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**ВАЛИМУХАМЕТОВ Рустам Римович**, магистрант каф. ДВС, дипл. бакалавра по напр. "Энергетическое машиностроение" (УГАТУ, 2016).

**БОРИСОВ Александр Олегович**, доц. каф. двигателей внутреннего сгорания. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1977). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (МАМИ, 1982). Иссл. в обл. управления двигателями внутреннего сгорания.

#### METADATA

**Title:** Modeling of the gas exchange of 2-tactical ice with a powerful valve in a designed exhaust system

**Authors:** R. R. Valimuhametov<sup>1</sup>, A. O. Borisov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>notorious002@yandex.ru, <sup>2</sup>bor\_ao@mail.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 24-26, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Within the framework of the work, a complex of studies was carried out to install a power valve model in the exhaust system for tuning the exhaust system for various modes of engine operation based on a two-stroke internal combustion engine.

Gas exchange processes in a two-stroke ICE were studied. The purpose of the study was to reduce toxic emissions, increase power and fuel efficiency. The study was carried out using the simulation method in the PC "Albea".

**Key words:** coefficients; fuel economy; phase of the gas distribution; experimental setup; external speed characteristic; exhaust system; power valve..

**About authors:**

**VALIMUHAMETOV, Rustam Rimovich**, Undergrad. Student, Dept. of Internal Combustion Engines. Bachelor of Power Engineering (USATU, 2016).

**BORISOV, Alexander Olegovich**, Prof., Dept. of Internal Combustion Engines. Graduate Mechanical Engineer (UAI, 1977). Cand. Of Tech. Sci. (MAMI, 1982)

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИОННОМ АЗОТИРОВАНИИ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ СТАЛИ 08X18H10T

Р. К. Вафин<sup>1</sup>, А. В. Асылбаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>vafinrk@mail.ru, <sup>2</sup>st.alex542@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Изучено влияние магнитного поля на микротвердость и толщину диффузионного слоя стали 08X18H10T и влияние предварительной обработки на диффузию азота при ионном азотировании в тлеющем разряде. Получены кривые распределения микротвердости по глубине при различных температурах. Установлено, что применение магнитного поля при азотировании приводит к увеличению микротвердости в 1,5...2 раза и 1,5-кратному увеличению толщины диффузионного слоя. Применение финишной обработки (алмазное выглаживание) перед ионным азотированием в тлеющем разряде повышает диффузию азота вглубь обрабатываемого материала вследствие образования деформированной структуры.

**Ключевые слова:** ионное азотирование; магнитное поле; сталь; микротвердость поверхности; толщина диффузионного слоя; диффузия азота.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные технологические процессы химико-термической обработки (ХТО) металлов должны быть высокоэффективными, ресурсосберегающими, малоотходными, экологически чистыми и легко управляемыми [1]. Данным критериям в полной мере удовлетворяет технологический процесс ионное азотирование.

Азотирование широко применяют в различных отраслях промышленности для повышения долговечности и надежности многих ответственных деталей и инструментов. При этом у обрабатываемых деталей повышаются прочность, твердость, износостойкость, задиростойкость, сопротивление усталости и коррозии, а при объемном (сквозном) насыщении – высокотемпературная прочность и жаропрочность [1].

По сравнению с традиционным газовым процессом, а также с другими способами упрочняющей ХТО, ионное азотирование имеет целый ряд преимуществ и технологических возможностей [1]. Среди них: высокая скорость диффузии; возможность получения азотированного слоя заданной структуры и фазового состава; сохранение высо-

кой чистоты обработки поверхности; снижение хрупкости азотированного слоя; уменьшение деформации изделий в процессе обработки; экологичность и универсальность процесса.

Использование магнитных полей при ионном азотировании позволяет повысить эффективность ионизации газа и на порядок плотность плазмы по сравнению с без магнитными устройствами [2, 3]. Особенностью такой обработки является интенсификация процесса за счет удержания магнитным полем электронов в зоне обработки, которые в свою очередь увеличивают число актов ионизации.

К настоящему моменту опубликовано множество работ посвященных влиянию предварительной пластической деформации на диффузию насыщающего элемента в металл. В некоторых из этих работ [4-7] говорится о том, что дефекты структуры, вызванные пластической деформацией, способствуют активной диффузии насыщающего элемента вглубь металла.

Целью данной работы является исследование влияния магнитного поля на микротвердость и толщину диффузионного слоя

стали 08X18H10T, и влияние предварительной обработки на диффузию азота при ионном азотировании в тлеющем разряде.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения эксперимента использовались образцы стали марки 08X18H10T (табл. 1), которая обладает такими характеристиками как жаростойкость и коррозионностойкость. Данная сталь является одной из самых распространенных и используемых марок высоколегированных нержавеющей сталей. Из-за наличия в составе хромо-никелевой группы она обладает нержавеющейими свойствами.

Таблица 1

#### Химический состав

C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe
до 0,08	до 0,8	до 2	9...11	17...19	до 0,3	~65

Примечание – Содержание серы (S) и фосфора (P) до 0,02 и до 0,035 соответственно.

Предварительно половина образцов (6 шт.) были обработаны электрохимическим полированием (ЭП), а другая половина (6 шт.) – финишной обработкой алмазное выглаживание (ФО).

Эксперимент производился на модернизированной электронно-лучевой установке ЭЛУ-5М (рис. 1). Для питания разряда использовался импульсный источник питания АрЕI-M-5PDC, с дисплея которого контролировались показания тока разряда и разности потенциалов. Образцы размещались в магнитном поле таким образом, что часть каждого из образцов попадала в область действия магнитного поля, а другая нет.

Перед началом ионного азотирования в вакуумной камере производилась ионная очистка поверхности образцов в течение 15 мин. в среде аргона. Процесс ионного азотирования проходил в газовой смеси из аргона, азота и водорода (50% Ar+35% N<sub>2</sub>+15% H<sub>2</sub>). Расход газа контролировался блоком управления РРГ БУИП 3. Давление рабочего газа было постоянным и составляло P=50 Па (табл. 1). Контроль поддержания заданной темпера-

туры производилось при помощи оптического пирометра Термикс.

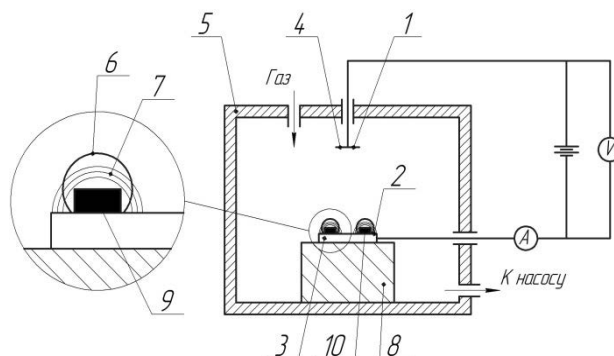


Рис. 1. Схема проведения эксперимента на установке ЭЛУ-5М: 1 – источник питания; 2 – катод; 3 – неодимовые магниты; 4 – анод; 5 – вакуумная камера; 6 – тороидальная область яркого свечения; 7 – силловые линии магнитного поля; 8 – подложка; 9 – образец с ЭП; 10 – образец с ФО

Таблица 2

#### Режимы ионного азотирования

№	T, °C	U, В	P, Па	t, ч
1	300	310	50	6
2	350	385		
3	400	310		
4	450	440		
5	500	500		
6	550	590		

Исследование микротвердости поверхностного слоя азотированных образцов проводилось на косых шлифах с помощью твердомера Struers Duramin-2. Оптические фотографии отпечатков были получены при помощи оптического микроскопа Olympus GX51.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для установления влияния наличия магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде был проведен эксперимент при различных температурах азотирования (табл. 2), после чего были произведены замеры твердости азотированных образцов на косых шлифах, оптические фотографии отпечатков представлены на рис. 2 и 3. Результаты измерения микротвердости азотированных образцов представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Результаты измерения микротвердости образцов с ФО**

Т, °С	Исходная микротвердость, HV <sub>100</sub>	Максимальная микротв. образцов после азотирования, HV <sub>100</sub>		Толщина диффузионного слоя после азотирования, мкм	
		в области МП	вне области МП	в области МП	вне области МП
300	600	871	689	45	12
350		950	732	50	8
400		910	774	55	32
450		753	637	20	8
500		1225	924	45	25
550		1445	759	32	12

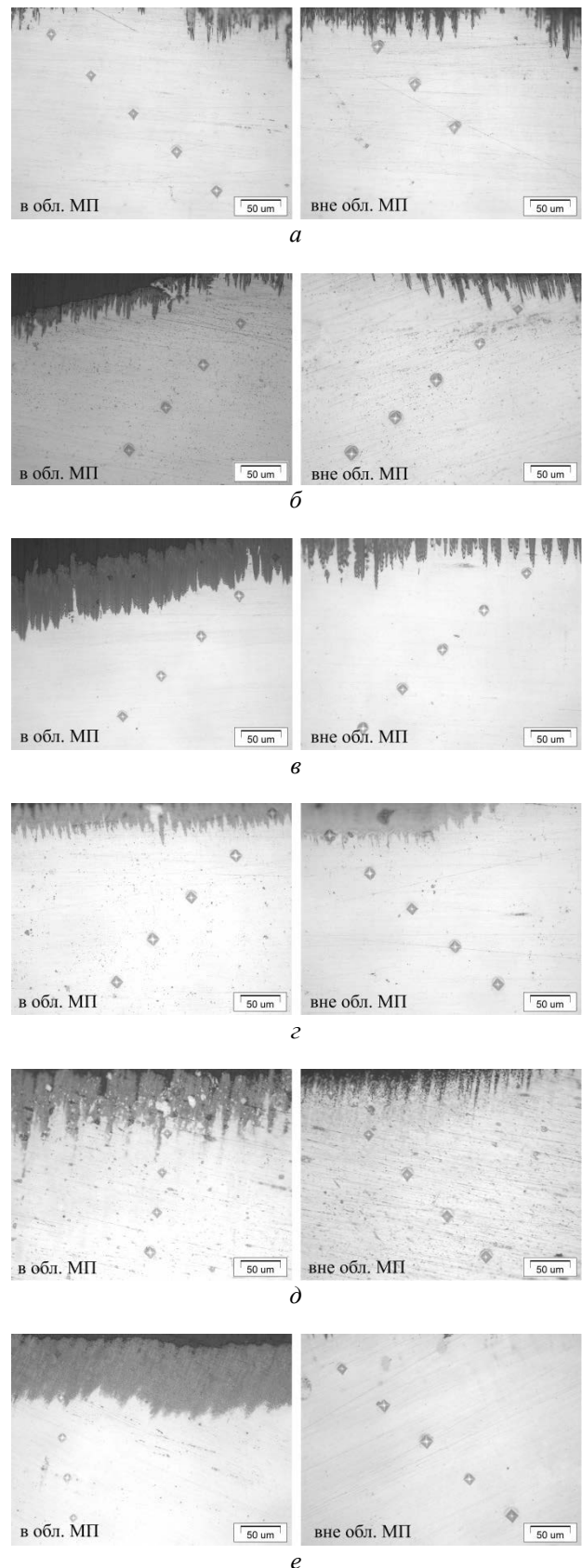
Анализ результатов измерения микротвердости образцов с ФО показал, что происходит 1,5 кратное увеличение толщины диффузионного слоя в зоне действия магнитного поля. Это обусловлено увеличением плотности ионного тока, за счет удержания магнитным полем электронов в зоне обработки, которые в свою очередь увеличивают число актов ионизации [8]. Также наличие магнитного поля значительно повышает энергию частиц, за счет чего повышается температура в зоне обработки [9].

Таблица 4

**Результаты измерения микротвердости образцов с ЭП**

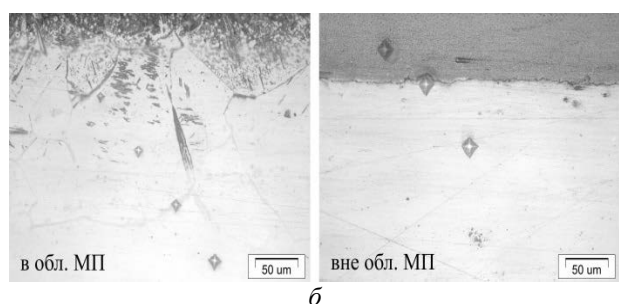
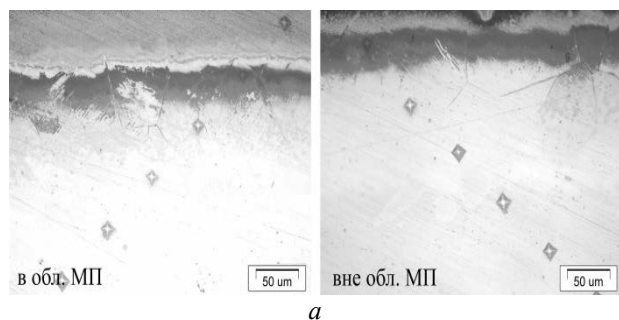
Т, °С	Исходная микротвердость, HV <sub>100</sub>	Максимальная микротв. образцов после азотирования, HV <sub>100</sub>		Толщина дифф. слоя после азотирования, мкм	
		в области МП	вне области МП	в области МП	вне области МП
300	200	253	250	16	10
350		216	216	—	—
400		210	210	—	—
450		251	251	8	8
500		425	396	16	15
550		581	212	17	—

Анализ результатов измерения микротвердости образцов с ЭП не показал изменения, за исключением тех образцов, которые были азотированы при высоких температурах.



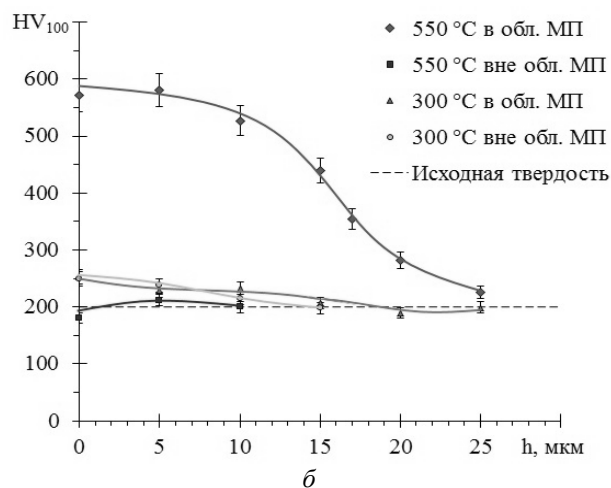
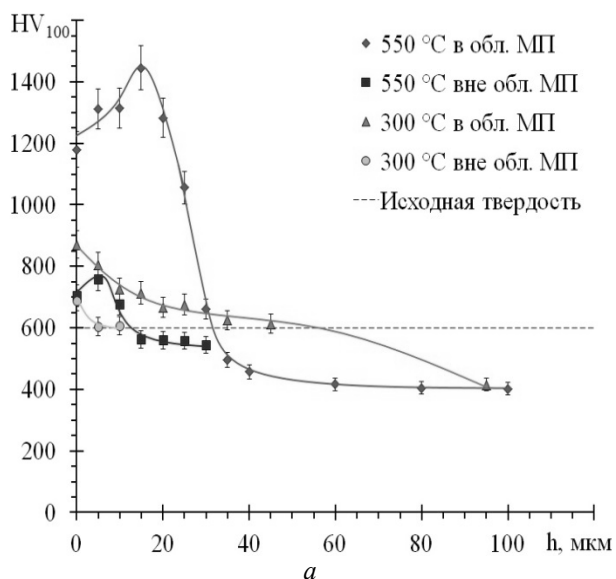
**Рис. 2.** Оптические фотографии отпечатков измерения микротвердости образцов с ФО, азотированных при (а) 300 °С, (б) 350 °С, (в) 400 °С, (г) 450 °С, (д) 500 °С и (е) 550 °С

Такая разница полученных результатов измерения образцов с ФО и ЭП связано с их исходной структурой перед азотированием. Образцы с ФО были подвергнуты пластической деформации структуры, это поспособствовало увеличению скорости диффузии азота вглубь материала.



**Рис. 3.** Оптические фотографии отпечатков измерения микротвердости образцов с ЭП, азотированных при (а) 500 °С и (б) 550 °С

Графики распределения микротвердости по глубине представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Распределение микротвердости по глубине образцов (а) с ФО и (б) с ЭП, азотированных при 300 и 550 °С

Анализ полученных графиков показал резкое снижение микротвердости от поверхности вглубь материала образцов, при высокотемпературном азотировании. Это объясняется тем, что при высоких температурах в зоне действия магнитного поля образуется избыточная энергия ионов, приводящая к катодному распылению.

## ВЫВОДЫ

В результате исследования влияния магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде на микротвердость стали 08X18N10T, было установлено, что:

1. Применение магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде интенсифицирует процесс насыщения стали азотом, вследствие увеличения числа актов ионизации [3, 4], приводящая к 1,5 кратному увеличению толщины диффузионного слоя обрабатываемых деталей.

2. При ионном азотировании с магнитным полем происходит увеличение микротвердости образцов из стали 08X18N10T в 1,5...2 раза по сравнению с ионным азотированием без магнитного поля.

3. Применение финишной обработки алмазное выглаживание перед ионным азотированием в тлеющем разряде повышает диффузию азота вглубь обрабатываемого материала, вследствие образования деформированной структуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.В., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: МГТУ им. Баумана, 1999. 400 с.
2. Лактин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г-И., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
3. Вафин Р.К., Швейёва Т.В., Асылбаев А.В., Мухаметов Р.И., Николаев А.А. Исследование технологических режимов ионного азотирования в плазме тлеющего разряда. Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017: сборник тезисов; Казань: Изд-во «Отечество», 2017. 264 с.
4. Лактин Ю.М., Кальнер В.Д., Седуков В.К. и др. Влияние предварительной холодной деформации на цементацию стали // Металловедение и термообработка металлов. 1971. № 12. С. 22–26.
5. Тиняев В.Г., Назаренко В.Д., Лактик А.М. Особенности формирования диффузионных слоев на сплавах железа после предварительной пластической деформации // Металлофизика и новейшие технологии. – 1996. Т. 18. № 2. С. 45–51.
6. Власов В.М., Жигунов К.В., Иванов И.С. и др. Влияние предварительной холодной пластической деформации на кинетику процесса азотирования теплостойких сталей // Металловедение и термообработка металлов. 2002. № 9. С. 39–41.
7. Ковалевская Ж.Г., Кукареко В.А. Особенности формирования азотированных слоев в пластически деформированной стали 40Х, обработанной интенсивными потоками ионов азота // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т.324. № 2. С. 118–127.
8. Рамазанов К.Н. Исследование структурно-фазовых превращений и свойств поверхностных слоев сталей при ионном азотировании в тлеющем разряде низкого давления: дис. ... д-ра техн. наук : Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 2016.
9. Вафин Р.К. Влияние ионного азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем на структуру и фазовый состав инструментальных сталей Р6М5 и Х12: автореф. дис. ... канд. техн. наук : Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 2013.

## ОБ АВТОРАХ

**ВАФИН Руслан Каримович**, доцент каф. технол. машиностроения. Дипл. инженер-технолог машиностроительных производств (УГАТУ, 2010). Канд. техн. наук (ИФПМ СО РАН, 2013). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазменных методов модифицирования поверхности.

**АСЫЛБАЕВ Александр Владиславович**, магистр. каф. технол. машиностроения. Дипл. бакалавр по направлению маш-ие (УГАТУ, 2017). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазменных методов модифицирования поверхности.

## METADATA

**Title:** Influence of the magnetic field at ion nitriding in the glow-discharge on the microhardness of steel 08H18N10T.

**Authors:** R. K. Vafin<sup>1</sup>, A. V. Asylbaev<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>vafinrk@mail.ru, <sup>2</sup>st.alex542@gmail.com,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 27-31, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print).**

**Abstract:** The influence of the magnetic field on the microhardness and thickness of the diffusion layer of 08X18H10T steel was studied, the effect of pre-treatment on the diffusion of nitrogen during ion nitriding in a glow discharge was studied. The distribution curves of microhardness in depth are obtained at various temperatures. It is established that the use of a magnetic field during nitriding leads to an increase in the micro-attenuation of 1.5 ... 2 times and a 1.5-fold increase in the thickness of the diffusion layer. Application of finishing machining diamond smoothing before ion azotirovaniya in a glow discharge increases the diffusion of nitrogen deep into the material being processed, due to the formation of a deformed structure.

**Key words:** ion nitriding; a magnetic field; steel; microhardness of the surface; thickness of the diffusion layer; diffusion of nitrogen.

**About authors:**

**VAFIN, Ruslan Karimovich**, assistant professor. technol. machine-building. Diploma. engineer-technologist of machine-building production (USATU, 2010). Cand. tech. Sciences (ISPM SB RAS, 2013). Issl. in the region. vacuum ion-plasma methods of surface modification.

**ASYLBAEV, Alexander Vladislavovich**, Master. cafe. tech-nol. machine building. Diploma. Bachelor in the direction of mash-ie (USATU, 2017). Issl. in the region. vacuum ion-plasma methods of surface modification.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКРЫТИЯ ИНСТРУМЕНТА НА ТЕМПЕРАТУРУ СВОБОДНОГО РЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И. А. Глухов<sup>1</sup>, С. В. Старовойтов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ivan9494@mail.ru, <sup>2</sup>sv\_starov@mail.ru

<sup>1</sup>АО «Институт технологии и организации производства» (НИИТ)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В целях определения возможности применения компьютерного моделирования для оценки технологических процессов проведено имитационное моделирование процесса свободного резания инструментом с покрытием и без, с помощью анализа, основанном на методе конечных элементов, и исследование его результатов для определения влияния износостойкого покрытия на температуру резания. Рассмотрен вопрос оценки адекватности построенной модели. Решение поставленных в работе задач базировалось на основных положениях и законах теории резания, теплотехники резания и термодинамики.

**Ключевые слова:** режущий инструмент; износостойкое покрытие; метод конечных элементов; температура резания; алюминиевый.

Существующие методы выбора марок инструментальных материалов, назначения режимов резания и смазочно-охлаждающих технологических средств, при промышленном освоении изготовления деталей в условиях отсутствия научно-обоснованных рекомендаций трудоемки, так как требуют проведения большого количества экспериментов [1–3]. Для сокращения времени промышленного освоения изготовления деталей из новых материалов целесообразно как можно большую часть натуральных экспериментов заменить компьютерным моделированием.

Целью данной работы является сокращение времени на выбор оптимальной марки инструментального материала, его покрытия и назначения соответствующих им режимов механической обработки деталей из алюминиевых сплавов за счет увеличения доли компьютерного моделирования. Существующее в настоящее время разнообразие обработки резанием обуславливает большое количество комбинаций условий

резания. Однако все виды можно классифицировать как:

- свободное резание рис. 1 (при свободном резании в работе принимает участие только одна режущая кромка);
- несвободное резание рис. 2 (при несвободном резании, помимо главной режу-

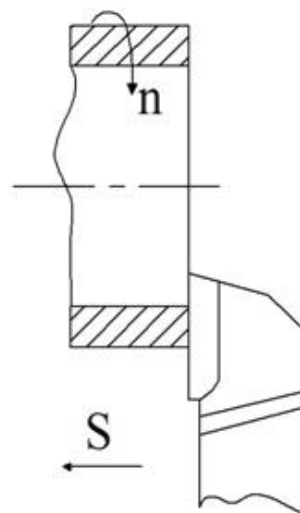


Рис. 1. Свободное резание



щей кромки, в работе принимают участие переходная и вспомогательные кромки).

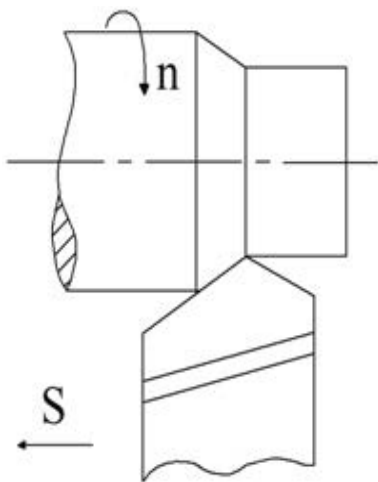


Рис. 2. Несвободное резание:  $n$  – частота вращения,  $S$  – подача

Несвободное резание сопровождается пересечением направлений схода стружки, что приводит к дополнительному теплообразованию и наклёпу, что затрудняет оценку экспериментальных данных и результатов моделирования, поэтому в данной статье рассматривается моделирование процесса свободного резания.

Широко используемым методом для решения задач деформации тела, а так же теплообмена, является метод конечных элементов. Сущность его заключается в том, что область, занимаемая телом, разбивается на

конечные элементы. Внутри каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить перемещения внутри элемента по перемещениям в узлах (в местах стыков конечных элементов).

Для проведения моделирования использовался программный пакет *DEFORM-2D*, поскольку в нем имеется специальный модуль для моделирования процесса резания, а также имеется возможность учитывать влияние износостойкого покрытия для режущего инструмента. Двухмерное моделирование позволяет проводить моделирование свободного резания быстрее, чем трёхмерное, что отвечает целям исследования по сокращению времени на технологическую подготовку производства.

В рамках проведения исследования была рассмотрена модель движения резца по поверхности детали из алюминиевого сплава в программном пакете *DEFORM-2D*. Приняты некоторые допущения: геометрия детали представлена упрощённо в виде прямоугольника, инструмент представлен в виде клина, полученного в главной секущей плоскости.

Исходная модель, сформированная в пакете *DEFORM-2D*, показана на рис. 3. Материал заготовки и инструмента выбирался по базе данных программы из ближайших аналогов к материалам, использованным в эксперименте: для заготовки – сплав Д16Т, для инструмента – сплав Т15К6 с покрытием Ti-N, а так же без покрытия.

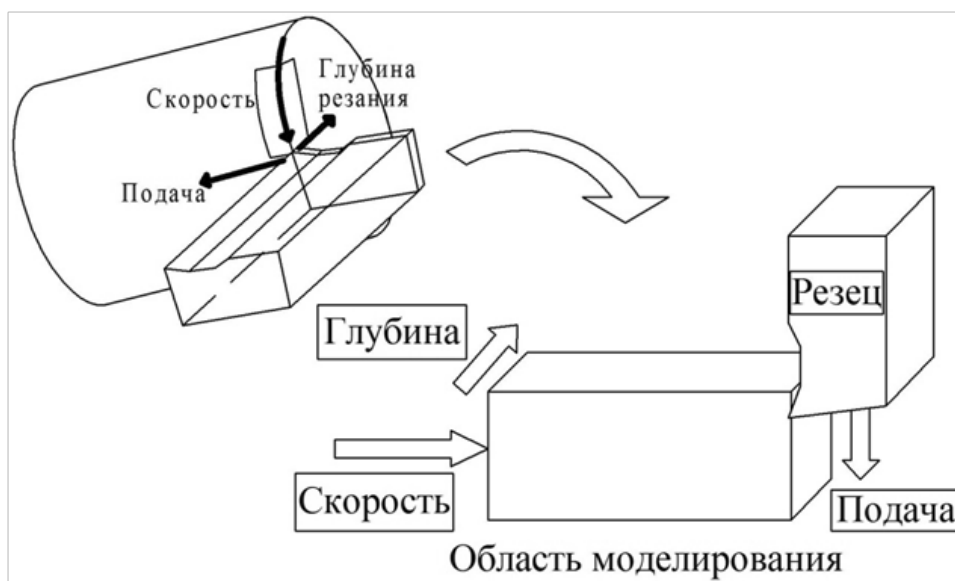


Рис. 3. Переход от схемы процесса несвободного резания к двухмерной модели, реализующей схему свободного резания

В зоне контакта учитывалось трение скольжения и теплообмен путём задания коэффициента трения и теплопередачи в программе. Величина внедрения в данной схеме назначалась в зависимости от подачи ( $S$ ). Для моделирования износостойкого покрытия на режущем инструменте применялся специализированный встроенный модуль (рис. 4).

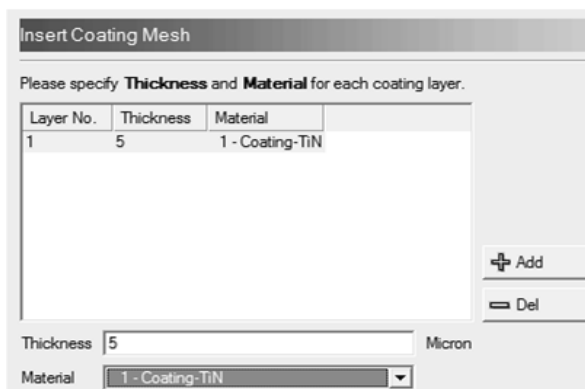


Рис. 4. Назначение покрытия на режущий инструмент

По итогам компьютерного моделирования проведена интерпретация полученных результатов. Температура в зоне резания является важным фактором, влияющим на износ режущего инструмента, и представляет собой

один из важнейших показателей состояния зоны контакта инструмента и детали.

Оценка степени точности и достоверности построенной компьютерной модели проводилась путём сравнения значений температуры резания, рассчитанной при моделировании, и полученной в результате проведения эксперимента [4, 5]. На рис. 5 приведён совместный график экспериментальных и расчетных данных, отражающий зависимость температуры от скорости резания. На представленном графике также приведены экспериментальные и расчетные данные о температуре резания при использовании износостойкого покрытия на инструменте.

Характер зависимости температуры резания от скорости для экспериментальных и расчетных данных аналогичен и не противоречит второму закону резания [6].

Для экспериментальных и расчетных данных характерна более низкая температура резания при использовании износостойкого покрытия. Исключение составляют малые скорости резания экспериментального исследования, когда отсутствие покрытия приводит к снижению температуры.

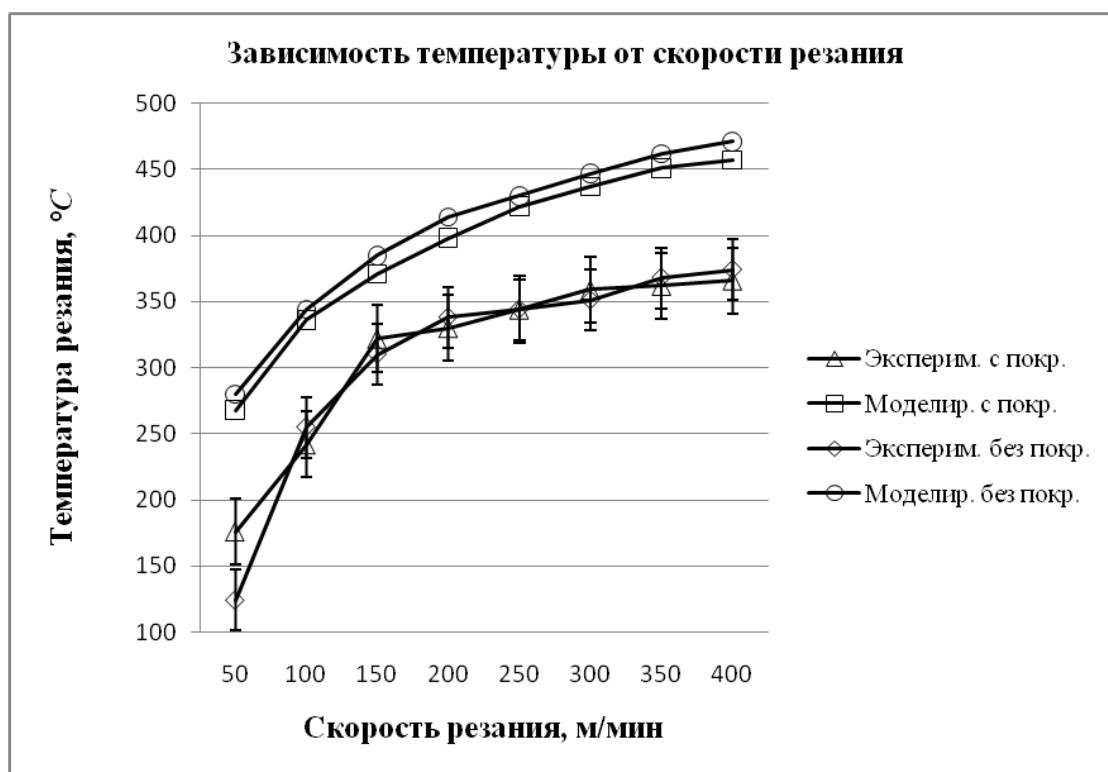


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования и измерения температуры резания при точении алюминиевого сплава

Данный факт объясняется явлением нароста на инструменте без покрытия, что привело к уменьшению фактического угла резания и изменению температурно-силового воздействия на режущий клин.

Экспериментально полученная температура резания оказалась меньше, чем расчётная. Это объясняется тем, что при моделировании из-за отсутствия в базе *DEFORM 2D* исследуемых материалов инструмента и заготовки были использованы их ближайшие зарубежные аналоги, для пары которых характерны более высокие температуры резания.

Таким образом, была получена удовлетворительная математическая модель, которая в дальнейшем позволяет оценить характеристики процесса резания без проведения эксперимента.

### ВЫВОДЫ

1) Зависимость температуры резания от скорости, полученная методом конечно – элементного анализа, является возрастающей, что согласуется с полученными экспериментальными данными и положениями теории резания.

2) Использование износостойкого покрытия приводит к снижению температуры резания, что подтверждается экспериментальными и расчётными данными.

3) Обоснована возможность использования метода компьютерного моделирования как способа исследования технологических процессов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постнов В. В., Старовойтов С. В., Хадиуллин С. Х.** Оценка эффективности эксплуатации твердосплавного инструмента на основе прогнозирования его режущей способности // СТН. 2013. № 5. С. 15-19. [ V. V. Postnov, S. V. Starovoytov, S. K. Khadiullin, "effectiveness evaluation of the carbide tool on basis of the prediction its cutting ability" (in Russian), in STIN, no 5 pp 15-19, 2013. ]

2. **Постнов В. В., Юрьев В. Л., Старовойтов С. В., Тихонова А. А.** Исследование влияния показателей рассеяния энергии в процессе резания на интенсивность изнашивания инструмента // Авиационная промышленность. 2015. № 2. С. 35-40. [ V. V. Postnov, V. L. Yuryev, S. V. Starovoytov and A. A. Tikhonova, "Investigation in the influence of the energy dissipation factors during cutting on the tool-wear rate" (in Russian), in Aviatcionnaya promyshlennost', no 2 pp 35-40, 2015. ]

3. **Черников П. П., Старовойтов С. В., Шарипов Б. У.** Влияние внешних условий и СОТС на физико-механические свойства контакта инструментального и обрабатываемого материалов // СТН. 2011. № 11. С. 34-37. [ P. P. Chernikov, S. V. Starovoytov and B. U. Sharipov, "Influence of external conditions and lubricating cooling agent on physico-mechanical properties contact of instrumental and being processed materials" (in Russian), in STIN, no 11, pp 34-37, 2011. ]

4. **Усманов Б. Ф., Старовойтов С. В., Фомин С. Ю.** Моделирование обрабатываемости алюминиевых сплавов с помощью математических методов планирования эксперимента // В сборнике: Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий Межвузовский научный сборник. Мунасыпов Р. А. (науч. редактор). Уфа, 2015. С. 26-32. [ B. F. Usmanov, S. V. Starovoytov and S. Y. Fomin "Modeling the machinability of aluminum alloys using mathematical methods of experiment planning" (in Russian), in the collection: Modern trends in metal processing technologies and constructions of metal-processing machines and components Interuniversity scientific collection. R. A. Munasyypov (scientific editor). Ufa, pp 26-32, 2015. ]

5. **Хадиуллин С. Х., Старовойтов С. В., Тихонова А. А., Глухов И. А.** Исследование динамики тепловых процессов при токарной обработке сплава Д16Т // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2015. Т. 1. С. 446-450. [ S. K. Khadiullin, S. V. Starovoytov, A. A. Tikhonova and I. A. Glukhov "The study of the thermal processes dynamics during turning processing of the alloy D16T" (in Russian), in Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii, vol. 1, pp 446-450, 2015. ]

6. **Постнов В. В., Старовойтов С. В.** Исследование взаимосвязи размерной стойкости инструмента с показателем рассеяния энергии в процессе резания. // В сборнике: Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий Межвузовский научный сборник. В. В. Постнов (науч. редактор), Р. Г. Кудояров (отв. за выпуск). Уфа, 2014. С. 13-18. [ V. V. Postnov and S. V. Starovoytov, "Investigation of the relationship between the dimensional stability of the instrument and dissipation energy in the process of cutting" (in Russian), in the collection: Modern trends in metal-processing technologies and structures of metal-working machines and components Interuniversity scientific collection. V. V. Postnov (scientific editor), R. G. Kudoyarov (responsible for the issue). Ufa, pp 13-18, 2014. ]

### ОБ АВТОРАХ

**ГЛУХОВ Иван Андреевич**, магистр техники и технологии (УГАТУ 2017).

**СТАРОВОЙТОВ Семён Владимирович**, старший преподаватель каф. АТП. Дипл. инженер-механик (УГАТУ 2012), к. т. н. по технологии и оборудованию механической и физико-технической обработки (СТАНКИН 2017).

## METADATA

**Title:** Determination of influence tool coating on the temperature of two-force machining using the finite element analysis

**Authors:** I. A. Glukhov<sup>1</sup>, S. V. Starovoytov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Institute of Technology and Production Organization (NIIT), Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>ivan9494@mail.ru, <sup>2</sup>sv\_starov@list.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 32-36, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** For the purpose of definition an opportunity to apply computer modeling to assessment of parameters technological processes the imitating research of mathematical model process free cutting by the tool with a covering and without covering is conducted. Calculations of model were carried out on the basis of a finite element method. The analysis of their results has shown extent influence of a wearproof covering on cutting temperature. The question assessment of adequacy to the constructed model is also considered. The solution of the tasks set in work was based on basic provisions and laws of the theory cutting, thermophysics and thermodynamics.

**Key words:** Cutting tools, wear-resistant coating, finite element method, cutting temperature, aluminum alloy

**About authors:**

**GLUKHOV, Ivan Andreevich**,. Master of Technics & Technology (UGATU, 2017).

**STAROVOYTOV, Semion Vladimirovich**, Senior Lecturer., Dept. of Automation technological processes. Dipl. Mechanical engineer (UGATU 2012), PhD of technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (STANKIN 2017).

## РАСЧЕТ ВЫСОТНО-СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПВРД

Р. Р. Губайдуллина<sup>1</sup>, Н. С. Сеньюшкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>flo.jo@mail.ru, <sup>2</sup>aviastar-ufa@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В данной работе проведен расчет высотно-скоростных характеристик (ВСХ) прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД). В качестве инструмента для расчета и анализа была выбрана система имитационного моделирования DVIgW. В данной системе была собрана модель ПВРД, рассчитанная первоначально на номинальном режиме. Затем были получены расчетные точки для высот полета 100 м, 6000 м, 11000 м и для чисел Маха от 0,9 до 3,6. По полученным значениям были построены графики изменения тяги, удельной тяги, удельного расхода топлива, суммарного расхода воздуха, суммарного расхода топлива. По полученным графикам был проведен анализ работы ПВРД.

**Ключевые слова:** ракетно-космическая техника; ПВРД; ВСХ; тяга; скорость звука; реактивная струя; термогазодинамический расчет.

Интенсивное развитие авиационной и ракетно-космической техники и, в частности, создание летательных аппаратов (ЛА), осуществляющих полет в атмосфере со скоростями, превышающими скорость звука, направлено на повышение скоростей и высот полета. В связи с этим появляется необходимость рассчитывать и применять силовые установки, способные разогнать ЛА до подобных скоростей. К таким установкам относится прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД) [1].

ПВРД — реактивный двигатель, является самым простым в классе воздушно-реактивных двигателей (ВРД) по устройству. Относится к типу ВРД прямой

реакции, в которых тяга создается исключительно за счёт реактивной струи, истекающей из сопла. Необходимое для работы двигателя повышение давления достигается за счёт торможения встречного потока воздуха. ПВРД неработоспособен при низких скоростях полёта, тем более — при нулевой скорости, для выхода его на рабочую мощность необходим тот или иной ускоритель [2].

Для численного моделирования и анализа работы ПВРД в системе летательного аппарата была применена система моделирования DVIgW, которая позволяет провести термогазодинамические расчеты основных параметров двигателя.

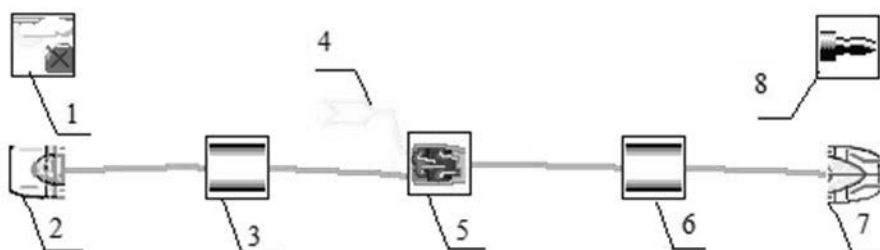


Рис. 1. Модель СПВРД в системе DVIgW:

1 – начальные условия; 2 – входное устройство; 3 – канал; 4 – вход топлива; 5 – форсажная камера; 6 – канал 2; 7 – выходное устройство; 8 – суммарные параметры

Для моделирования ПВРД была сформирована расчетная модель, изображенная на рис. 1.

Для анализа потребительских свойств двигателя в программе DVIGw были рассчитаны высотно-скоростные характеристики (ВСХ) ПВРД для высот полета: 100 м, 6000 м, 11000 м.

Законы расчета:  $G_{в.пр} = var$ ,  $F_c = const$ , при неизменной температуре газов  $T_г^* = 1928K = const$ .

Рассчитанные ВСХ приведены на рис. 2–6.

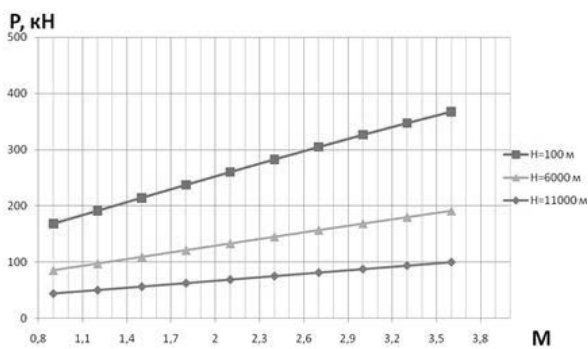


Рис. 2. График изменения тяги двигателя

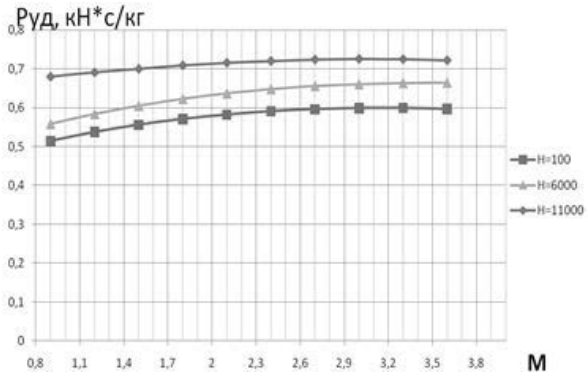


Рис. 3. График изменения удельной тяги

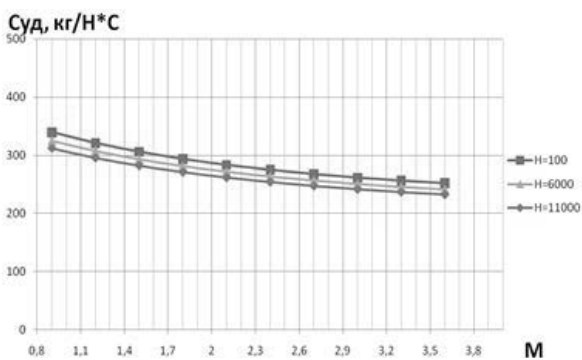


Рис. 4. График изменения удельного расхода топлива

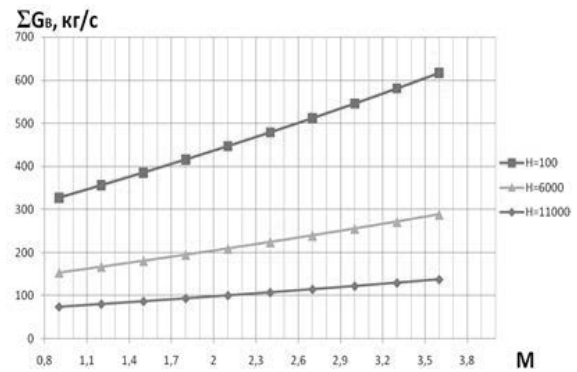


Рис. 5. График изменения суммарного расхода воздуха

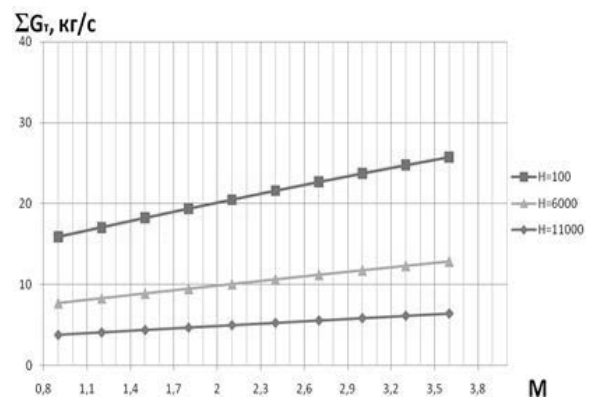


Рис. 6. График изменения суммарного расхода топлива

Тяга двигателя возрастает с увеличением скорости полета, но падает с увеличением высоты. Соответственно удельная тяга увеличится с ростом скорости и высоты, т.к. при этом будет расти расход воздуха двигателя. Удельный расход топлива при увеличении скорости и высоты полета снижается, а суммарный расход растет при увеличении скорости полета и падает при увеличении высоты. Суммарный расход воздуха увеличивается с ростом скорости и уменьшается по высоте полета.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что наиболее экономичный режим полета достигается на больших высотах, т.к. при этом наблюдается большая тяга двигателя и меньший суммарный расход потребляемого воздуха и топлива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондарюк М. М., Ильяшенко С. М.** Прямоточные воздушно-реактивные двигатели. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1958. 392 с.

2. **Газодинамический** расчет прямоточных ВРД и их характеристик: Учебное пособие / С.И. Барановский, Ю.В. Зикеева, В.В. Козляков, А.А. Степчиков, А.Г. Тихонов. – М. : Изд-во МАИ, 1988.– 55с. : ил.

## ОБ АВТОРАХ

**ГУБАЙДУЛЛИНА Римма Ринатовна**, магистрант каф. авиационной теплотехники и теплоэнергетики факультета АДЭТ, УГАТУ.

**СЕНЮШКИН Николай Сергеевич**, доцент каф. АТиТ, ст. науч. сотр. НИЛ САПР-Д, Зам. Декана ФАДЭТ. Диплом инж. по авиац. двигателям и энер. уст. (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по тепл., электроракет. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2009).

## METADATA

**Title:** Calculation of high-speed characteristics ramjet air-jet engine.

**Authors:** R. R. Gubaidullina<sup>1</sup>, N. S. Senyushkin<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>flo.jo@mail.ru; <sup>2</sup>aviastar-ufa@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 37-39, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** In this paper, the calculation of high-speed characteristics of a ramjet engine is performed. As a tool for calculation and analysis, the DWIGw simulation system was chosen. In this system, a ramjet model was compiled, initially calculated at the nominal mode. Then the calculated points were obtained for altitudes of flight 100 m, 6000 m, 11000 m and for Mach numbers from 0.9 to 3.6. Based on the obtained values, the curves of thrust, specific thrust, specific fuel consumption, total air consumption, total fuel consumption were plotted. The analysis of the operation of the ramjet was carried out according to the graphs obtained.

**Key words:** rocket and space technology; Ramjet; high-speed characteristics; traction; sound speed; jet stream; thermogasdynamic calculation.

**About authors:**

**GUBAIDULLINA, Rimma Rinatovna**, 1st year student of Magistracy of the Department of Aerospace Thermal and Power Engineering

**SENYUSHKIN, Nikolai Sergeyvich**, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Aerospace Thermal and Power Engineering

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ НАТЯГА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЕДИНЕНИИ «ПЛАСТИНА – КОЛЬЦО»

В. С. ЖЕРНАКОВ<sup>1</sup>, Т. М. МАРДИМАСОВА<sup>2</sup>, В. Р. АКБАШЕВ<sup>3</sup>, К. В. КОНЕВА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>zhvs@mail.rb.ru, <sup>2</sup>toma\_mard@mail.ru, <sup>3</sup>vadia92@mail.ru, <sup>4</sup>kseniakoneva95@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Представлено математическое моделирование процесса посадки с натягом кольца в пластину, выполненных из нанострукторного и чистого титанового сплава ВТ6 соответственно. Получены поля распределения технологических напряжений при формировании соединения. Исследовано влияние радиуса кольца, толщины и высоты конструкции и поля допуска соединения на характер распределения напряжений в соединении с натягом.

**Ключевые слова:** соединение «пластина–кольцо»; соединение с натягом; технологические напряжения; наноструктурный титановый сплав ВТ6; относительные напряжения.

В машиностроении широко применяют соединения деталей с помощью напряженных посадок (прессовые соединения). Поэтому при проектировании важно знать напряжения и деформации в соединении в процессе сборки и в эксплуатации [1].

Соединения с натягом имеют упрощенную технологию изготовления за счет отсутствия шпонки и двух пазов в сопрягаемых деталях; они не чувствительны к реверсивным нагрузкам, исключают ослабление вала шпоночным пазом. Эти соединения применяют для неразборных сопряжений.

Главным преимуществом соединений с натягом является возможность предавать значительные осевые усилия и крутящие моменты.

При передаче вращающего момента применение посадок колеса на вал с зазором недопустимо, а применение переходных посадок нежелательно, так как происходит обкатывание со скольжением поверхностей вала и отверстия, которое приводит к износу. Недостаток этих соединений - трудоемкость сборки, сложность контроля качества соединения.

В данной работе рассмотрены задачи математического моделирования процесса получения «пластина – кольцо», а так же

оценки влияния радиуса кольца, толщины конструкции и величины натяга на напряженно-деформированное состояние, возникающее в процессе создания соединения.

Актуальность данной работы заключается в исследовании напряженно-деформированного состояния соединения. Данные исследования являются важной частью общего прочностного анализа и важной предпосылкой создания оптимальных и надежных конструкций.

Для решения этой задачи были выполнены исследования пластины, ослабленные диаметром  $d_{пл} = (14...30)$  мм, с запрессованными в них кольцами толщиной  $t = (2...10)$  мм; внутренним диаметром  $d = 10$  мм, высотой соединения  $s = (5...15)$  мм и величина натяга  $e$ , которая зависит от допуска на размер внешнего диаметра кольца  $d_k$ . (обозначения  $p7\ s7, u7, v7, x7, z7$  – поля допуска).

Величину натяга выбирают согласно ГОСТ 25347-82 «Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки» [2].

Для пластины выбран материал титановый сплав ВТ6 ( $\sigma_T = 830$  МПа, коэффициент линейного расширения  $\alpha_T = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\sigma_B = 900$  МПа) для кольца – наноструктур-



ный сплав ВТ6 ( $\sigma_T = 1250$  МПа,  $\sigma_B = 1370$  МПа). Соединение представлено на рис. 1.

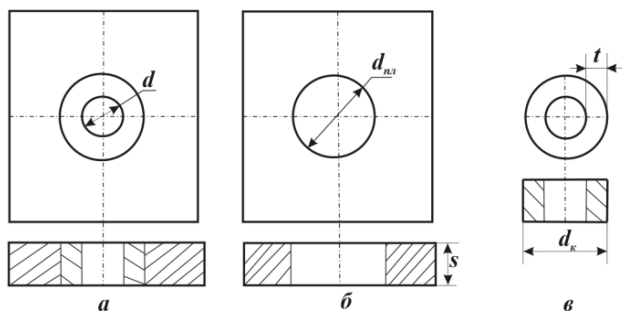


Рис. 1. Соединение с натягом «пластина – кольцо»: а – пластина; б – кольцо

На рис. 2 представлена математическая модель и сеточный аналог исследуемого соединения. Следует отметить, что для более точного решения, сетка разбита более мелко в области контакта деталей.

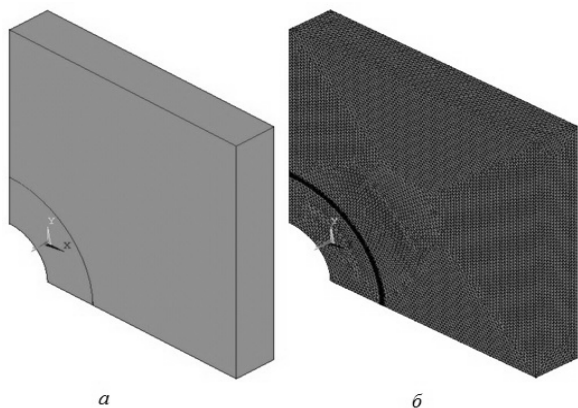


Рис. 2. Модель соединения с натягом: а – геометрическая модель; б – сеточный аналог

Численное моделирование технологического процесса соединения с натягом рассмотрено в виде двух этапов.

На первом этапе происходил нагрев пластины, обеспечивающий зазор размером  $e$  между пластиной и кольцом, достаточный для дальнейшей посадки кольца в отверстие пластины.

На рис. 3, а показан исходный контур 1/4 части пластины до нагрева, а штриховыми – после нагрева. На втором этапе процесса выполнялась установка кольца в отверстие пластины и охлаждение пластины (рис. 3, б). При остывании между кольцом и

пластиной возникает контактное давление  $p_k$ . Используя соотношение (1) можно найти  $p_k$ :

$$p_k = \frac{E \cdot \Delta (c^2 - a^2)(b^2 - c^2)}{2c^3 (b^2 - a^2)}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $\Delta$  – величина натяга,  $a$  – внутренний радиус кольца,  $b$  – половина длины пластины,  $c$  – внешний радиус цилиндра.

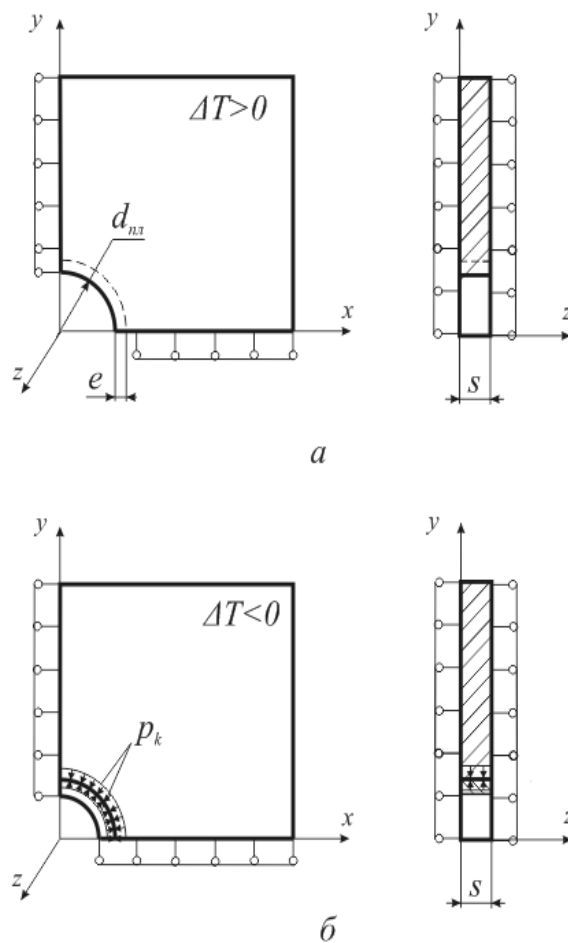
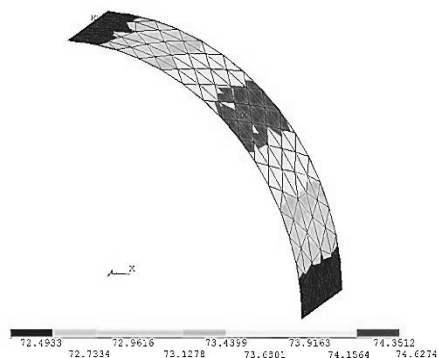


Рис. 3. Схема технологического получения соединения: а – нагрев пластины; б – охлаждение

Таким образом, в результате посадки кольцо оказывается под действием внешнего давления  $p_k$ , а пластина под действием точно такого же внутреннего давления.

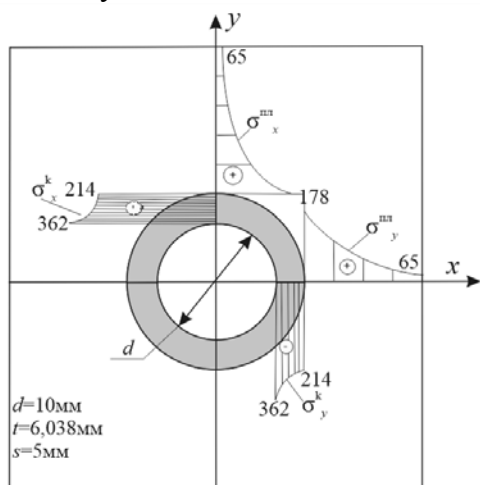
В качестве примера, на рис. 4 изображена картина распределения контактных давлений  $p_k$ , полученных при технологической операции посадки с натягом в соединении с толщиной кольца  $t = 6,018$  мм и высоте  $s = 5$  мм.



**Рис. 4.** Распределение давления по поверхности контакта в программном комплексе ANSYS

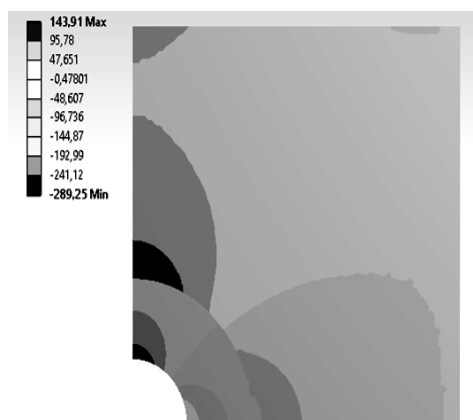
На основании расчетов представлены поля распределения технологических напряжений и деформаций при создании соединения.

В качестве примера на рис. 5 приведены эпюры распределения осевых и напряжений пластины и кольца для посадки с гарантируемым натягом. Распределение осевых напряжений неравномерно по толщине соединения. В кольце возникают сжимающие напряжения, а в пластине растягивающие. Максимальные напряжения в кольце возникают на внутренней поверхности и достигают значения 362 МПа. Минимальные напряжения в кольце достигают значения 214 МПа и наблюдаются в зоне контакта кольца и пластины. В пластине максимальные напряжения достигают 178 МПа и уменьшаются по мере удаления от зоны контакта вглубь пластины.

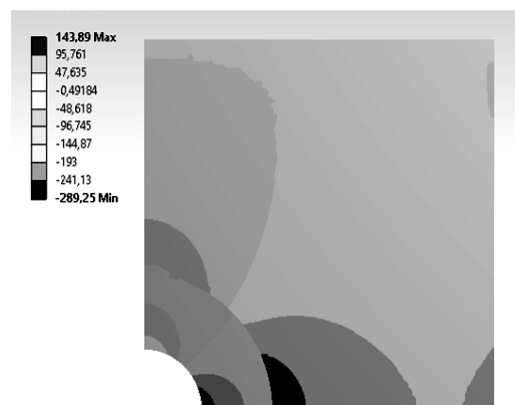


**Рис. 5.** Поля распределения осевых технологических напряжений при натяге

На рис. 6 в качестве примера, представлены поля распределения технологических напряжений  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  в пластине высотой  $s=5$  мм и толщиной кольца  $t=6,038$  мм.



а



б

**Рис. 6.** Поля распределения остаточных напряжений:  
а – напряжения  $\sigma_x$ , б – напряжения  $\sigma_y$

В результате исследований были получены зависимости относительных напряжений в кольце  $\sigma_{min}^k/\sigma_T^k$  (рисунок 7,а),  $\sigma_{max}^k/\sigma_T^k$  (рис. 7, б), и пластине  $\sigma_{max}^п/\sigma_T^п$  (рис. 7, в) от отношения толщины кольца  $t$  к внешнему диаметру кольца  $d$  для соединений с разной величиной натяга.

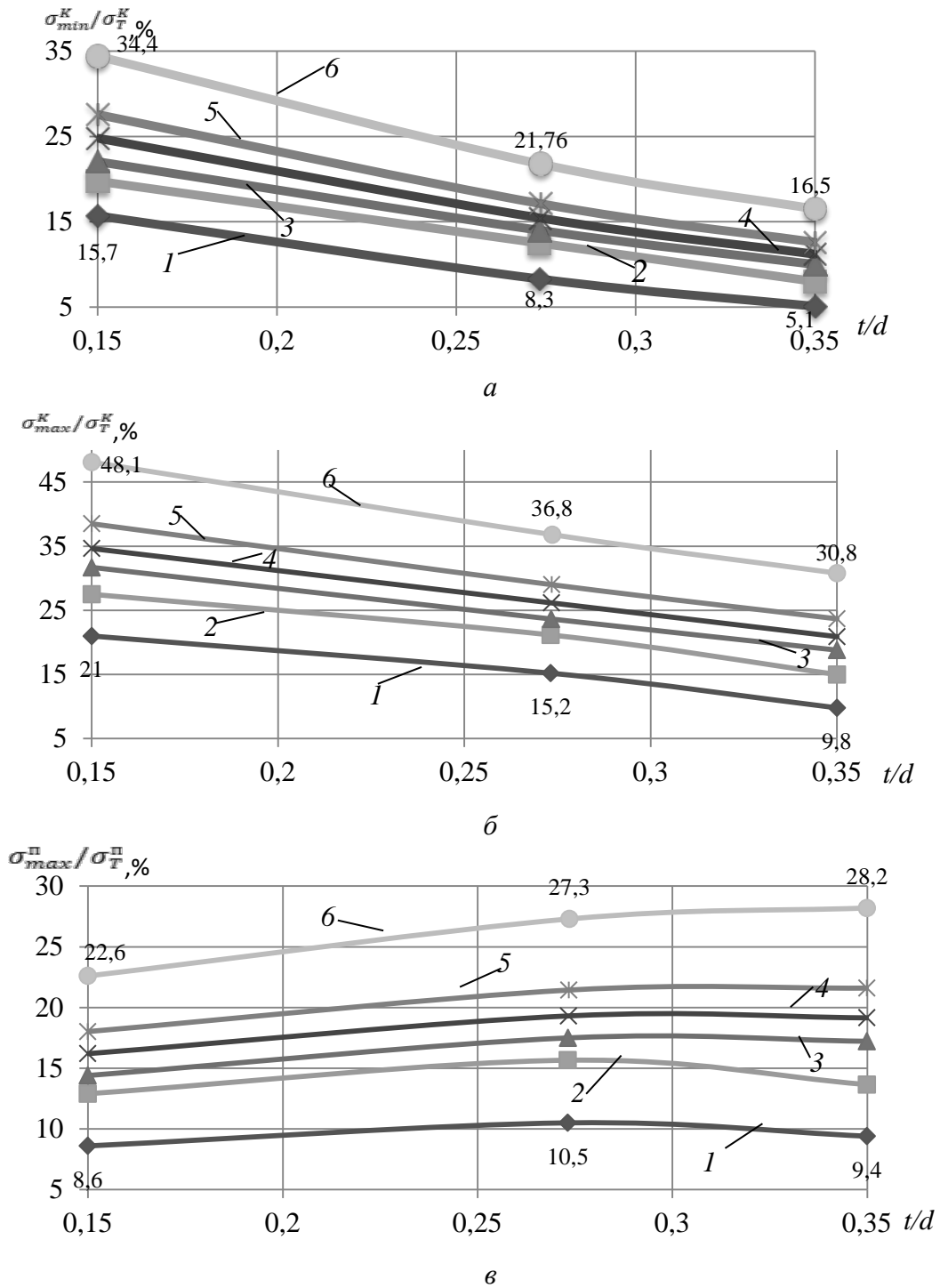
Установлено, что наибольшее значение  $\sigma_{min}^k/\sigma_T^k$  достигает значения 34,3% с полем допуска  $z7$  при  $t/d_k = 0,15$ .

При изменении поля допуска от  $p7$  до  $z7$  величина  $\sigma_{max}^k/\sigma_T^k$  увеличивается от 21% до 48% при  $t/d_k = 0,15$ . С увеличением толщины кольца относительные напряжения снижаются с 48,1% до 30,8% для соединения с полем допуска  $z7$ .

Следует отметить, что характер изменения минимального и максимального напряжения в кольце не меняется при изменении поля допуска.

Относительные напряжения  $\sigma_{max}^{\Pi}/\sigma_T^{\Pi}$  достигают своего максимума 28,2% с полем допуска  $z7$  при  $t/d_k$  равным 0,35. Для посадки с полем допуска  $p7$   $\sigma_{max}^{\Pi}/\sigma_T^{\Pi}$  достигают

максимума при  $t/d_k$  равным 0,27 и достигают значения 10,5%, с увеличением толщины кольца  $t$  значение  $\sigma_{max}^{\Pi}/\sigma_T^{\Pi}$  снижается до 9,4%. Следует отметить, что характер изменения относительных напряжений в пластине для полей допусков  $p7, s7, u7$  носит одинаковый характер.



**Рис. 7.** Зависимость относительных осевых напряжений при натяге от параметров соединения: *а* – минимальное напряжение в кольце; *б* – максимальное напряжение в кольце; *в* – максимальное напряжение в пластине: 1 –  $p7$ , 2 –  $s7$ , 3 –  $u7$ , 4 –  $v7$ , 5 –  $x7$ , 6 –  $z7$

Таблица 3

**Максимальные относительные напряжения  
в пластине, %**

Поля допуска	$t/d_k$	Высота соединения $s$ , мм		
		5	10	15
$p7$	0,15	8,6	8,4	8,3
	0,27	10,5	10,7	11,0
	0,35	9,4	9,5	9,5
$s7$	0,15	12,9	12,8	12,7
	0,27	15,7	15,3	15,4
	0,35	13,6	13,4	13,5
$u7$	0,15	14,4	14,1	14,2
	0,27	17,5	17,1	17,3
	0,35	17,2	16,9	17,1
$v7$	0,15	16,2	15,9	16
	0,27	19,3	18,9	19
	0,35	19,1	18,9	19
$x7$	0,15	18	17,7	17,8
	0,27	21,4	21	21,2
	0,35	21,6	21,3	21,5
$z7$	0,15	22,6	22,3	21,8
	0,27	27,3	26,7	27
	0,35	28,2	27,8	28

В табл. 1–3 приведены результаты расчета относительных напряжений при разной высоте соединения.

Таблица 1

**Минимальные относительные напряжения  
в кольце, %**

Поля допуска	$t/d_k$	Высота соединения $s$ , мм		
		5	10	15
$p7$	0,15	15,7	15,6	15,4
	0,27	8,3	8,8	8,6
	0,35	5,1	5	5
$s7$	0,15	19,8	21,3	21,3
	0,27	12,5	12,2	12,4
	0,35	8	7,9	7,9
$u7$	0,15	22	21,6	21,7
	0,27	14	13,7	13,8
	0,35	10	9,97	10
$v7$	0,15	24,8	24,3	24,5
	0,27	15,4	15,1	15,2
	0,35	11,2	11,1	11,1
$x7$	0,15	27,6	27,2	27,3
	0,27	17,1	16,8	16,9
	0,35	12,6	12,5	12,6
$z7$	0,15	34,4	34	34,1
	0,27	21,8	21,3	21,5
	0,35	16,5	16,3	16,4

Таблица 2

**Максимальные относительные напряжения в  
кольце, %**

Поля допуска	$t/d_k$	Высота соединения $s$ , мм		
		5	10	15
$p7$	0,15	21	20,8	20,6
	0,27	15,2	14,9	14,6
	0,35	9,8	9,8	9,7
$s7$	0,15	27,5	27,5	27,3
	0,27	21,7	20,7	20,9
	0,35	15	14,8	14,9
$u7$	0,15	31,7	30,1	30,4
	0,27	23,6	23,2	23,4
	0,35	18,8	18,6	18,7
$v7$	0,15	34,6	33,9	34,3
	0,27	26,2	25,6	25,9
	0,35	20,9	20,7	20,8
$x7$	0,15	38,5	37,8	38,1
	0,27	29	28,5	28,7
	0,35	23,7	23,4	23,5
$z7$	0,15	48,1	47,3	47,6
	0,27	36,8	36,2	26,5
	0,35	30,8	30,5	30,7

Можно сделать вывод, что величина относительных напряжений меняется незначительно. Изменение относительных напряжений составляет порядка 0,9 - 3% при увеличении высоты  $s$ .

Следует отметить, что характер относительных напряжений не меняется при изменении высоты соединения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Мягков В. Д.** Допуски и посадки: Санкт-Петербург: Машиностроение, 1982. 545 с., [V. D. Myagkov, Tolerances and implantation, (in Russian). St. Petersburg: Mashinostroyeniye, 1982.]
2. **ГОСТ 25347-82.** Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки. Требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 53 с. [Basic norms of interchangeability. Unified sistem of toierances and fits. Tolerance zones and recommendalle fils. Requirements, (in Russian), Federal standard, Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2008]
3. **Феодосьев В. И.** Сопrotивление материалов: М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. 592 с., [V.I. Feodosiev, Resistance of materials, (in Russian). Moscow: MGTU. NE Bauman, 1999.]
4. **Гречищев Е. С., Ильяшенко А. А.** Соединения с натягом: М.: Машиностроение, 1981. 247 с., [E. S. Grechishev, A. A. Ilyaashenko Connections with interference, (in Russian), Moscow: Mashinostroyeniye, 1981.]

## ОБ АВТОРАХ

**ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич**, зав. каф. сопр. материалов, д-р техн. наук, проф., засл. деят. науки РФ. Член-корреспондент АН РБ. Автор 8 монографий, 2 учебников и 8 учебных пособий, более 250 статей, 90 авторских свидетельств и патентов, им подготовлено 12 кандидатов и 8 докторов технических наук. Обл. науч. интересов - решение фундаментальных и прикладных задач теории упругости, пластичности, ползучести и механики разрушения применительно к основным элементам авиационных конструкций.

**МАРДИМАСОВА Тамара Николаевна**, кандидат технических наук, доцент. Автор 5 учебных пособий, свыше 100 публикаций, 4 авторских свидетельств и патентов. Область научных интересов – решение задач механики процессов упруго-вязкого пластического деформирования конструкций.

**АКБАШЕВ Вадим Ринатович**, асп. каф. СМ, маг. техники и технологии.

**КОНЕВА Ксения Владимировна**, магистрант ФАДЭТ УГАТУ.

**MARDIMASOVA, Tamara Nikolaevna**, candidate of technical sciences, associate professor. The author of 5 teaching aids, over 100 publications, 4 copyright certificates and patents. The field of scientific interests is the solution of the problems of the mechanics of elastic-viscous plastic deformation of structures.

**AKBASHEV, Vadim Rinatovich**, graduate student Department of Strength of Materials USATU. Master of Engineering and Technology (USATU 2015)

**KONEVA, Ksenia Vladimirovna**, student of the 2nd course of the magistracy FADET UGATU

## METADATA

**Title:** Investigation of the influence of the tension size on distribution of technological stresses in the "plastine - ring" connection

**Authors:** V.S. Zhernakov<sup>1</sup>, T. N. Mardimasova<sup>2</sup>, V.R. Akbashev<sup>3</sup>, K.V. Koneva<sup>4</sup>

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia

**Email:** <sup>1</sup>zhvs@mail.rb.ru, <sup>2</sup>toma\_mard@mail.ru, <sup>3</sup>vadia92@mail.ru, <sup>4</sup>kseniakoneva95@gmail.com

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 40-45, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** A mathematical modeling of the planting process with ring tension in a plate made of a nanostructured and pure titanium alloy VT6, respectively, is presented. The fields of distribution of technological stresses are obtained during the formation of the connection. The influence of the radius of the ring, the thickness and height of the structure and the connection tolerance field on the character of stress distribution in connection with the interference is investigated.

**Key words:** connection "plate-ring"; connection with interference; technological stresses; nanostructured titanium alloy VT6; relative stresses.

**About authors:**

**ZHERNAKOV, Vladimir Sergeevich**, Head of the Department of Strength of Materials, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation. Corresponding Member of the Academy of Sciences of RB. Author of 7 monographs, 2 textbooks, and teaching aids 15, more than 250 articles, 90 patents, they trained 12 candidates and 8 doctors of technical sciences. Research interests - the solution of fundamental and applied problems, the theory of elasticity, plasticity, creeping and fracture mechanics as applied to the basic elements of aircraft structures.

## ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ДЕФЕКТА УПАКОВКИ НА ТОЛЩИНУ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ДВОЙНИКОВ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Cu-Al, ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Л. И. Зайнуллина<sup>1</sup>, И. В. Александров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>lele4ka.06@mail.ru, <sup>2</sup>igorvalexandrov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния энергии дефекта упаковки в сплавах Cu-2.2 вес.% Al, Cu-4.5 вес.%Al и Cu-7 вес.% Al, подвергнутых равноканальному угловому прессованию и последующей прокатке при температуре жидкого азота, на толщину деформационных двойников. По полученным результатам для данных материалов показано, что снижение энергии дефекта упаковки по мере увеличения количества легирующего элемента в сплаве приводит к уменьшению толщины двойников.

**Ключевые слова:** алюминиевые бронзы; энергия дефекта упаковки; интенсивная пластическая деформация; равноканальное угловое прессование; деформационные двойники; наноматериалы; температура жидкого азота; прочность материалов.

### ВВЕДЕНИЕ

Основными конкурирующими механизмами деформации в металлах и сплавах при низких температурах являются дислокационное скольжение и деформационное двойникование [1]. При пластической деформации материалов доминирующий механизм определяется условиями деформации, такими как степень, скорость деформации и температура. Так же важна такая характеристика материала, как энергия дефекта упаковки (ЭДУ). Известно [2–4], что в гранцентрированных кубических (ГЦК) металлах и сплавах с более низкими значениями ЭДУ способность к двойникованию выше. Двойники определяют характер деформационного поведения материалов, однако, работ по установлению зависимости между значениями ЭДУ и толщиной деформационных двойников в ГЦК металлах не так много.

В последние годы растет интерес к исследованию роли двойников в наноматериалах [5–8]. Было показано, что прочность материалов увеличивается с увеличением плотности двойниковых границ. В работе [9] было обнаружено, что влияние двойниковых границ на прочность идентично воздействию обычных границ зерен даже при наноразмерах двойников.

В настоящей работе изучено влияние ЭДУ на толщину двойников в сплавах системы Cu-Al с различным содержанием Al, подвергнутых интенсивной пластической деформацией при температуре жидкого азота.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследований в данной работе были выбраны сплавы системы Cu-Al с содержанием алюминия 2.2, 4.5 и 7 вес.%, соответственно. ЭДУ этих сплавов приблизительно составила 25 мДж/м<sup>2</sup>, 12 мДж/м<sup>2</sup> и 5 мДж/м<sup>2</sup>, соответственно [10]. Заготовки в форме стержней с квадратным поперечным сечением размером 12 мм × 12 мм × 80 мм

перед интенсивной пластической деформацией отжигали в вакууме при температуре 1073 К в течение 2 ч, затем медленно охлаждали до температуры 773 К и закаливали в воду.

РКУП при криогенной температуре проводили со скоростью  $0.25 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  с внешним углом пересечения каналов в оснастке  $\psi = 0^\circ$  и внутренним углом  $\varphi = 120^\circ$ . Все заготовки подвергали одному проходу РКУП с эквивалентной степенью деформации 0.7. Образцы после РКУП были подвергнуты плоской криопротатке, общая степень обжатия составила 55% с результирующей степенью деформации 0.9. Скорость прокатки составила  $15 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

Образцы погружались в жидкий азот на время 5 - 10 минут до и после интенсивной пластической деформации. Оснастка для РКУП и прокатные валки во время пластической деформации непрерывно охлаждались жидким азотом.

Микроструктуру изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL 2100 (ПЭМ) с ускоряющим напряжением 200 кВ при увеличениях  $\times 10000$ . Образцы для исследований были вырезаны вдоль направления деформации. Фольги для исследований были подготовлены в электролите состава 33% азотной кислоты и 67% метанола при температуре  $-25^\circ \text{C}$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования тонкой структуры образцов сплавов Cu-2.2%Al, Cu-4.5%Al, Cu-7%Al показали, что интенсивная пластическая деформация и последующая прокатка при пониженных температурах приводит к образованию двойников (рис. 1–3). Статистическая обработка структурных особенностей на ПЭМ изображениях показала, что в образце с содержанием 2.2%Al средняя толщина двойников составляет около  $43 \pm 17 \text{ нм}$  (рис. 1), толщина двойников в сплаве Cu-4.5%Al в среднем составляет около  $23 \pm 10 \text{ нм}$  (рис. 2).

В то же время в образце сплава с содержанием 7%Al среднее значение тол-

щины двойников значительно ниже, чем в других исследованных сплавах, обработанных при одинаковых условиях деформации, и составила около  $18 \pm 7 \text{ нм}$  (рис. 3).

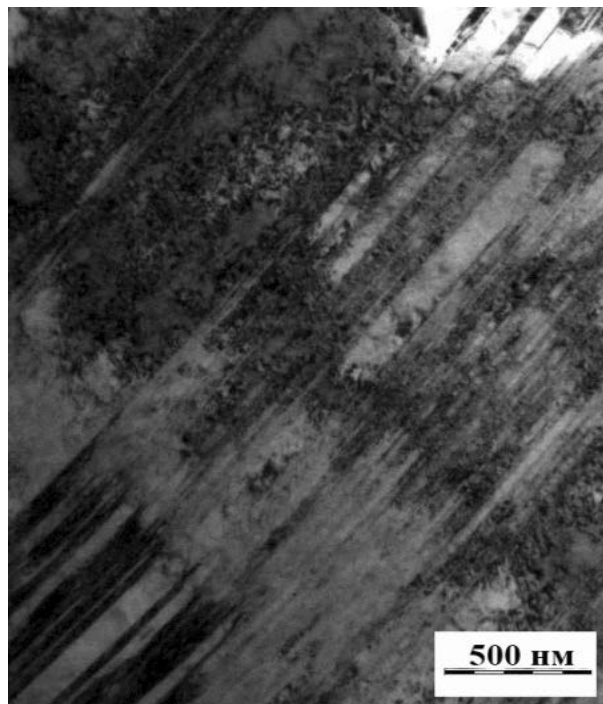


Рис. 1. Изображение деформационных двойников в сплаве Cu-2.2%Al. ПЭМ

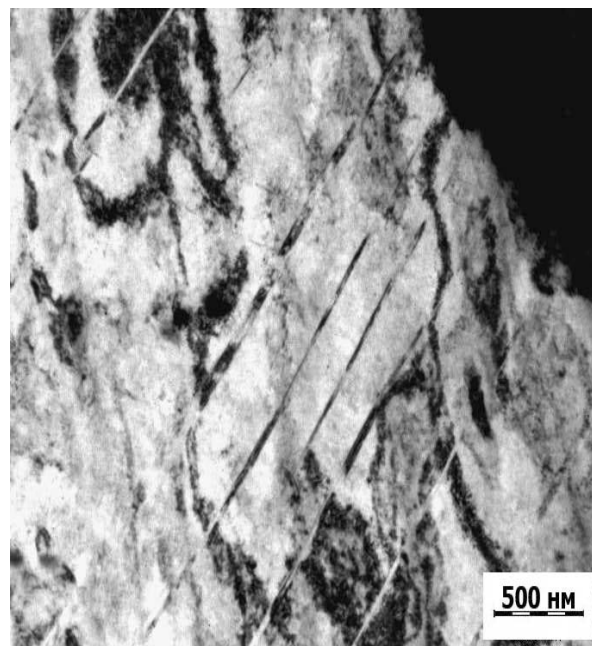


Рис. 2. Изображение деформационных двойников в сплаве Cu-4.5%Al. ПЭМ.

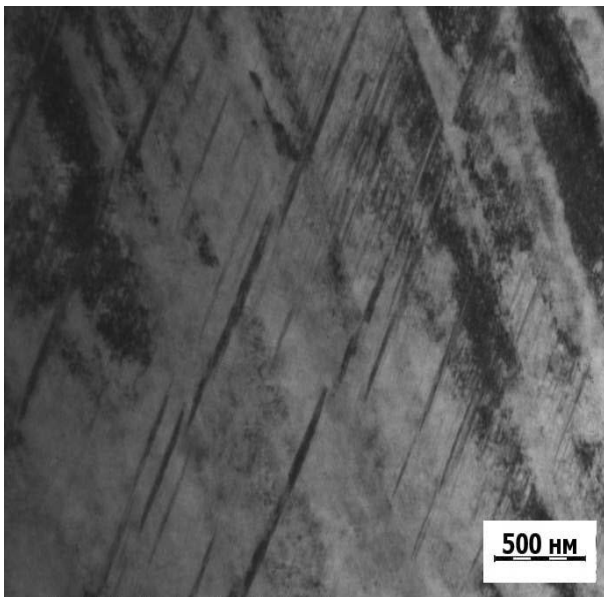


Рис. 3. Изображение деформационных двойников в сплаве Cu-7%Al. ПЭМ

Из приведенной зависимости на рис. 4, следует, что при высоких значениях ЭДУ, равных  $25 \text{ мДж/м}^2$ , средняя толщина деформационных двойников в два раза выше, чем у материала с низким значением ЭДУ, составляющим  $5 \text{ мДж/м}^2$ .

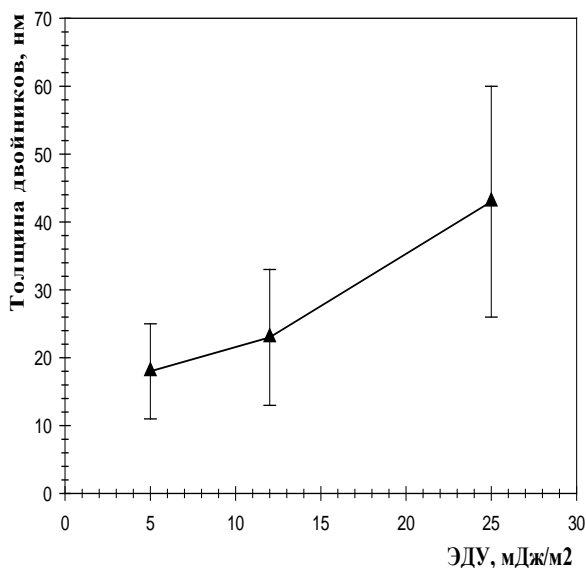


Рис. 4. Зависимость средних значений толщин деформационных двойников от значений энергии дефекта упаковки сплавов

Таким образом, толщина деформационных двойников в сплавах системы Cu-Al, подвергнутых интенсивной пластической деформации, монотонно уменьшается с увеличением концентрации Al, то есть уменьшением ЭДУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что энергия дефекта упаковки в сплавах Cu-Al, подвергнутых интенсивной пластической деформации, влияет на толщину двойников. Толщина двойников уменьшается с понижением энергии дефекта упаковки. В медном сплаве с содержанием 7%Al и значением ЭДУ в три раза ниже, чем у сплава Cu-2.2%Al толщина двойников примерно в два раза меньше и составляет  $18 \pm 7 \text{ нм}$ , в то время как у Cu-2.2%Al -  $43 \pm 17 \text{ нм}$ , соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christian J. W., Mahajan S. Deformation twinning, Prog. Mater. Sci. 39 (1995), p. 1
2. Blewitt T. H., Coltman P. R., Redman J. K. Low-temperature deformation of copper single crystals, J. Appl. Phys. 28 (1957), p. 651
3. Danaf E. E., Kalidindi S. R., Doherty R. D. Influence of grain size and stacking-fault energy on deformation twinning in fcc metals, Metall. Mater. Trans. A 30A (1999), p. 1223
4. Greulich F., Murr L. E. Effect of grain size, dislocation cell size and deformation twin spacing on the residual strengthening of shock-loaded nickel, Mater. Sci. Eng. 39 (1979), p. 81
5. Lu L., Shen Y. F., Chen X. H., Qian L. H., Lu K. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper, Science 304 (2004), p. 1096
6. Zhang X., Misra A., Wang H., Shen T. D., Nastasi M., Mitchell T. E., Hirth J. P., Hoagland R. G., Embury J. D. Enhanced hardening in Cu/330 stainless steel multilayers by nanoscale twinning, Acta Mater. 52 (2004), p. 995
7. Zhang Y., Tao N. R., Lu K. Mechanical properties and rolling behaviors of nano-grained copper with embedded nano-twin bundles, Acta Mater. 56 (2008), p. 2429
8. Zhao H., Bingert J. F., Liao X. Z., Cui B. Z., Han K., Sergueeva A. V., Mukherjee A. K., Valiev R. Z., Langdon T. G., Zhu Y. T. Simultaneously increasing the ductility and strength of ultra-fine grained pure copper, Adv. Mater. 18 (2006), p. 2949
9. Shen Y. F., Lu L., Lu Q. H., Jin Z. H., Lu K. Tensile properties of copper with nano-scale twins, Scripta Mater. 52 (2005), p. 989
10. Wei W., Wang S. L., Wei K. X., Alexandrov I. V., Du Q. B., Hu J. Microstructure and tensile properties of Cu-Al alloys processed by ECAP and rolling at cryogenic temperature, J. of All. and Comp. 678 (2016), p. 506

## ОБ АВТОРАХ

**ЗАЙНУЛЛИНА** Лилия Ильгизовна, асп. каф. физики. Дипл. инженер-физик (УГАТУ, 2014). Готовит дис. об исследовании влияния энергии дефекта упаковки на микроструктуру, кристаллографическую текстуру, механические свойства и механизмы деформации в сплавах систем Cu-Zn и Cu-Al, подвергнутых интенсивной пластической деформации.



**АЛЕКСАНДРОВ Игорь Васильевич**, проф. каф. физики. Дипл. физик (БГУ, 1976). Д-р физ.-мат. наук по развитию и применению методов рентгеноструктурного анализа для исследования структуры и свойств ультрамелкозернистых материалов (УГАТУ, 1997). Иссл. вобл. физики интенсивных пластических деформаций, физики прочности и пластичности металлов и сплавов.

#### METADATA

**Title:** Influence the stacking fault energy on the deformation twin thickness of the CU-AL alloys subjected to the severe plastic deformation.

**Authors:** L. I. Zaynullina<sup>1</sup>, I. V. Alexandrov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>lele4ka.06@mail.ru, <sup>2</sup>igorvalexandrov@yandex.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 46-49, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:**In this paper presents the results of investigations the stacking fault energy in Cu-2.2 weight.%Al, Cu-4.5 weight.% Al and Cu-7 weight.% Al alloys, subjected to equal-channel angular pressing and subsequent rolling at the liquid nitrogen temperature, on the deformation twins thickness. According to the results obtained for these materials it is shown that reducing the stacking fault energy leads to decreasing the twin thickness.

**Key words:** aluminium bronze; stacking fault energy; severe plastic deformation; equal-channel angular pressing; deformation twins; nanomaterials; liquid nitrogen temperature; strength of materials.

**About authors:**

**ZAYNULLINA, Liliya Ilgizovna**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Physics. (UGATU, 2014).

**ALEXANDROV, Igor Vasilevich**, Prof., Dept. of Physics. Dipl. Physicist (BashSU., 1976). Dr. of Phys.-Mat.Sci. (UGATU, 1997).

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Г. С. Зиннатуллина<sup>1</sup>, В. Е. Вавилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>zinnatullina95@list.ru, <sup>2</sup>s2\_88@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Решается задача повышения энергоэффективности электрических машин, а также повышение надежности работы за счет повышения интенсивности охлаждения машины, статор которой выполнен в виде интеллектуальной статорной клетки. Рассматривается конструкция и принцип действия электрической машины с интеллектуальной статорной клеткой и предлагаемым охлаждением. Объясняется конструкция статорной клетки с гидравлически закороченными трубками с обеих сторон и с возможностью перекрытия охлаждающей жидкости. Описывается материал охлаждающих трубок, расположенных на статорной клетке, а также соответствующая охлаждающая жидкость.

**Ключевые слова:** надежность электрических машин; интеллектуальная статорная клетка; энергоэффективность; интенсивность охлаждения; электропроводящие трубка; неэлектропроводящая трубка; гидравлически закороченные проводники; массивные проводники; паз-проводник; надежная система охлаждения.

### ВВЕДЕНИЕ

Производство электрических машина в настоящее время достигло больших масштабов. Трудно назвать другие промышленные изделия, которые имели бы такое массовое применение во всех отраслях производства, а также в быту. Поэтому технический прогресс в любой области техники в значительной степени зависит от качества применяемых электрических машин их энергоэффективности и надежности в эксплуатации.

### КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СТАТОРНОЙ КЛЕТКОЙ

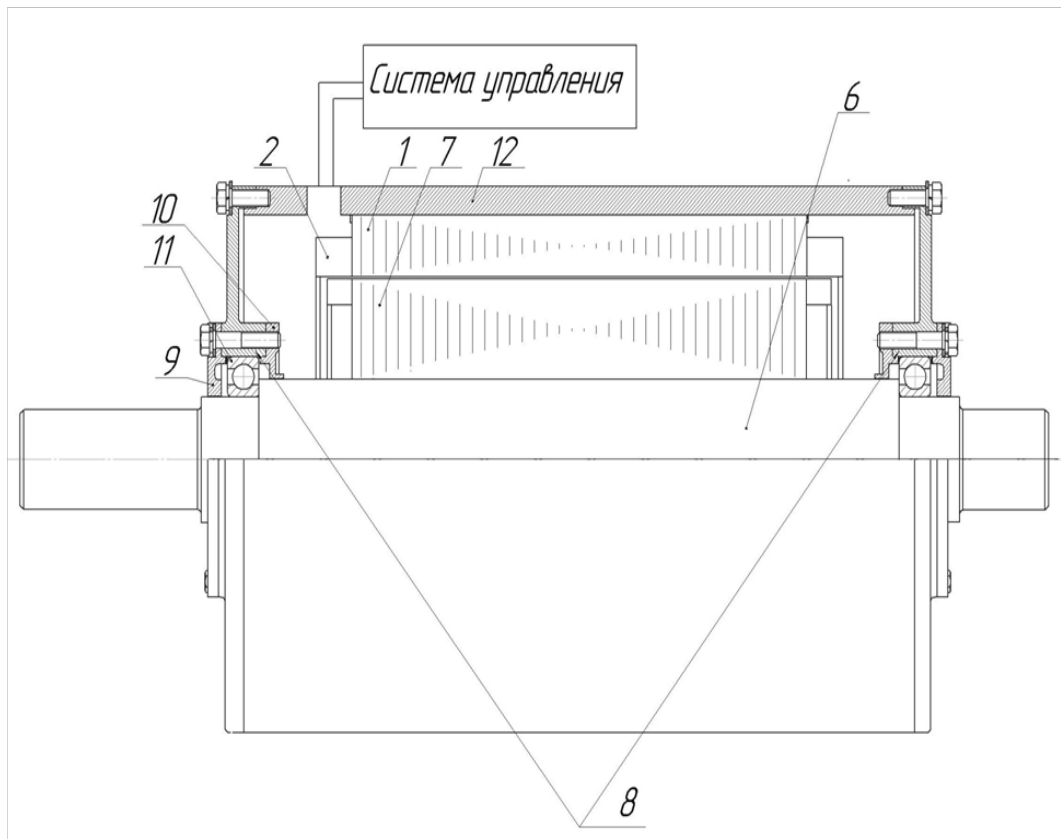
В качестве энергоэффективной и надежной электрической машины рассмотрим конструкцию «Машины со статорной клеткой» [1]. Статор состоит из листов электро-технической стали, как и в обычных

электрических машинах, но с массивными проводниками в каждом пазу, будучи закороченными в одном осевом конце машины (рис.1).



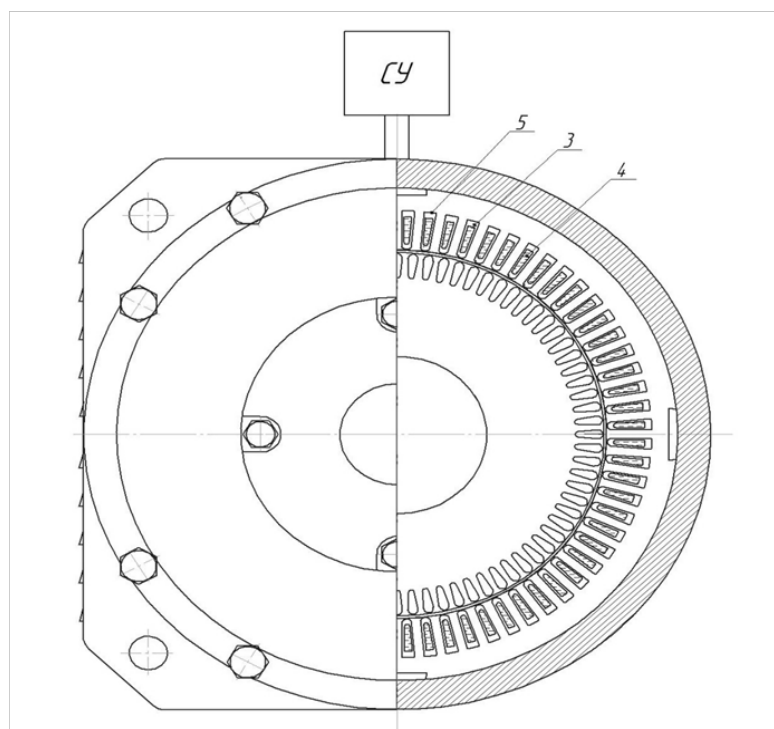
Рис. 1. Принципиальный эскиз машины со статорной клеткой

Такая электрическая машина не имеет надежную систему охлаждения и поэтому менее энергоэффективна.



**Рис. 2.** Электрическая машина с интеллектуальной статорной клеткой:

1 – статор; 2 – статорная клетка; 6 – вал; 7 – магнитопровод статора; 8 – подшипниковый щит;  
9, 10 – крышки подшипников; 11 – подшипник; 12 – станина



**Рис. 3.** Электрическая машина с интеллектуальной статорной клеткой:

3 – трубка из неэлектропроводящего материала; 4 – охлаждающая жидкость; 5 – пазы

Исходя из вышерассмотренной конструкции предлагается применять электрическую машину с интеллектуальной статорной клеткой (рис. 2, 3), представляющую из себя асинхронную машину, с массивными проводниками в каждом пазу, которые гидравлически закорочены в двух направлениях, причем в одном - с помощью электропроводящей трубки, а в другом - с помощью неэлектропроводящей трубки, заполненной жидкостью для охлаждения, с возможностью изменения количества пар полюсов во время работы машины, причем статор выполнен в виде интеллектуальной статорной клетки.

При подаче на статорную клетку напряжения, по нему начинает протекать ток, который создает вращающийся магнитный поток. Этот поток создаёт в проводниках ротора ЭДС. Так как обмотка ротора имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который в свою очередь, взаимодействуя с магнитным потоком статора, создаёт пусковой момент двигателя, стремящийся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. По гибким трубкам из неэлектропроводящего материала начинает протекать охлаждающая жидкость в каждом пазу.

#### КОНСТРУКЦИЯ СТАТОРНОЙ КЛЕТКИ С ЗАКОРОЧЕННЫМИ ТРУБКАМИ С ОБЕИХ СТОРОН И С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПЕРЕКРЫТИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Статорная клетка дополнительно гидравлически закорачивается в одном направлении с помощью трубки из электропроводящего материала 1, а в другом направлении с помощью трубок из неэлектропроводящего материала 2, с возможностью перекрытия охлаждающей жидкости 3 (рис. 4).

В качестве охлаждающей жидкости наиболее выгодно использовать тосол, так как оно является хорошей незамерзающей, охлаждающей средой. Тосол предназначен для охлаждения двигателей в любое время года в рамках температур, указанных в марках. Холодное масло поступает в статор через патрубок в нижней части корпуса, откуда по специальным каналам подводится в

трубку из неэлектропроводящего материала откуда поступает в отводящий маслопровод.

В процессе эксплуатации диэлектрические свойства масла и содержания в нем воздуха постоянно контролируется. Пузырьки воздуха значительно снижают электрическую прочность бумажно-масляной изоляции, поэтому масло периодически подвергают дегазации и очистке. Для предотвращения окисления масла его вытесняют из объема турбогенератора азотом.

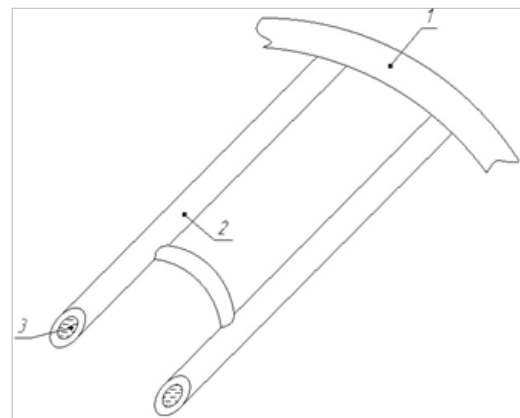


Рис. 4. Электрическая машина с интеллектуальной статорной клеткой:

- 1 – трубка из неэлектропроводящего материала;
- 2 – трубки из неэлектропроводящего материала;
- 3 – охлаждающая жидкость

Каждый проводник (паз статора) сам является фазовой обмоткой и снабжен собственным устройством подачи, как показано. Каждый паз-проводник соединен с центральным краном полумоста, так что ток в каждом пазу может быть определен индивидуально. Единственное граничное условие для тока в пазах статора - то, что сумма всего тока паза статора равна нулю. Используя ротор типа «беличья клетка», возможно изменить число пар полюсов во время эксплуатации машины. Многофазное питание может быть реализовано с использованием современных силовых электронных коммутационных устройств, таких как MOSFET или IGBT.

В противоположной стороне статора проводника клеммы подключены к устройству источника питания. Каждый проводник (паза статора) представляет собой фазную обмотку и поставляется с собственным устройством питания. Напряжение питания

на каждом этапе (проводник паз) можно охарактеризовать как, например, фазу  $k$ .

$$u_k = \hat{U} \cdot \cos(\omega t - p \cdot (k - 1) \frac{2\pi}{Q_s} + \varphi_{u,k})$$

где  $k$  – номер соответствующего паз,  $Q_s$  – количество паз статора,  $p$  – число пар полюсов.

В этом уравнении параметр  $p$  является переменной, определяющей число пар полюсов. Таким образом, от обычных обмоток, где число пар полюсов фиксировано и определяется по типу обмотки, распределению обмотки и соотношению катушки, для новой конструкции обмотки количество пар полюсов определяется по сигналам подачи стержня и может изменяться также во время работы машины. Кроме того, длина фаз обмотки для новой обмотки не всегда постоянна, но она зависит от количества пазов статора и пар полюсов.

Производство статора с новой обмоткой очень дешево и просто по сравнению с обычной обмоткой. Обмотка в клетке со всеми массивными проводниками, соединенными с одним торцевым кольцом, может быть подготовлена отдельно, а затем она может быть сдвинута в статоре. Или еще одно возможное решение заключается в использовании метода литья под давлением для изготовления обмотки обсадной колонны статора, аналогичной ротору асинхронной машины. Для обоих случаев изготовления намотки может быть реализован высокий коэффициент заполнения паз до 100%, что примерно в 2,5 раза выше, чем для обычных распределенных обмоток. Это приводит к низкому сопротивлению и низким омическим потерям для новой конструкции обмотки. Таким образом, как результат высокого коэффициента заполнения паз, вместо меди можно использовать алюминиевый материал. Это ведет к снижению веса и затрат для новой концепции машины.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая электрическая машина с интеллектуальной статорной клеткой позволяет уменьшить трудозатраты на изготовление обмотки статора, повысить энергоэффективность, упростить конструкцию по сравнению с обычной обмоткой, а также за счет применения рациональной системы охлаждения повысить надежность работы машины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герлинг Д. Электрические машины. Берлин–Гейдельберг: 2015. 471 с. [ D. Gerling, Electrical Machines (in Berlin). Heidelberg: 2015. ]

2. Извеков В. И., Серихин Н. А., Абрамов А. И. Проектирование турбогенераторов. М.: Издательство МЭИ, 2005. 440с. [ V.I. Izvekov, N.A. Serikhin, A.I. Abramov, Projecting turbogenerators. M.: (in Russian). Moscow: Moscow Power Engineering Institute “MPEI”, 2005. ]

3. Dajaku G., Gerling D. Low Costs and High Efficiency Asynchronous Machine with Stator Cage Winding // IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC 2014) (Florence–Italy, Decemder 17-19 2014). Italy: IEVC 2014 p. 54– 60. [ G. Dajaku, D. Gerling, “Low Costs and High Efficiency Asynchronous Machine with Stator Cage Winding”, in IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC 2014), (Florence–Italy, Decemder 17-19 2014). 2014 p. 54– 60. ]

### ОБ АВТОРАХ

**ЗИННАТУЛЛИНА Гузель Салаватовна**, бакалавр каф. Электромеханики (УГАТУ, 2017). Студент-магистр с 2017 г.

**ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич**, кан. тех. наук, ведущ. научн. сотр. каф. Электромеханики (УГАТУ, 2010).

### METADATA

**Title:** Improving the efficiency and reliability of electrical machines by increasing the cooling intensity

**Authors:** G. S. Zinnatullina<sup>1</sup>, V. E. Vavilov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>zinnatullina95@list.ru, <sup>2</sup>s2\_88@mail.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 50-53, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Solves the problem of increasing the efficiency of electric machines, as well as improving reliability by increasing the cooling intensity of the machine, the stator of which is made in the form of intelligent stator cage. Introduction to the design and principle of operation of electrical machines with intelligent stator cage and the cooling. Due to the design of the stator cells with hydraulically short-circuited tubes on both sides and with the possibility PE recrate coolant. Describes the material of cooling tubes located on the stator cage, as well as the corresponding coolant..

**Key words:** the reliability of the electric machines; intelligent stator cage; energy efficiency; intensity of cooling; an electrically conductive tube; the non-tube; a hydraulically short-circuited conductors; conductors are solid; the groove-guide; a reliable cooling system.

**About authors:**

**ZINNATULLINA, Guzel Salavatovna**, Bachelor of electrical engineering Department (USATU, 2017). Student-master of 2017 (UGATU, 2017).

**VAVILOV, Vyacheslav Evgenievich**, Candidate of technical Sciences, leading researcher of the Department of Electromechanics (UGATU, 2010).

## ОЦЕНКА РАБОТЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ РАБОТЕ НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Л. Н. Ибатуллина<sup>1</sup>, А. М. Бикбулатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> liana-ibatullina@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассматривается теплосиловое оборудование при эксплуатации электростанции с турбиной Т-110/120-130-4. Производится тепловой и технологический расчет схемы ТЭЦ на базе теплофикационной турбины при температурах наружного воздуха  $t_{нар} = 5... -10... -20$  °С.

**Ключевые слова:** паровая турбина; электростанция; электрическая энергия; режим работы; КПД; экономичность; выработка электроэнергии; расход топлива; температура наружного воздуха; энергетические показатели ТЭЦ.

Процесс производства электроэнергии на ТЭЦ характеризуется повышенной тепловой экономичностью и более высокими энергетическими показателями. Основным показателем экономичности турбоагрегата является его относительный электрический КПД, турбинной установки - удельный расход теплоты на выработку турбоагрегатом единицы электроэнергии, электрической станции - расход условного топлива на выработку единицы электроэнергии электростанцией.

Паровая теплофикационная турбина типа Т-110/120-130-4 с регулируемыми отопительными отборами пара предназначена для выработки электрической энергии и отпуска пара и тепла для нужд производства, и отопления.

В данной статье на основе теплового расчета проводится определение КПД станции и удельных расходов топлива при различных режимах работы.

В работе был построен график тепловых нагрузок, температурный и расходный графики сетевой воды, при котором был использован отопительный график 150/70. Коэффициент теплофикации принят равным 0,55. Исходя из графика установлено, что температура  $t_{нар} = -10$  °С является номинальной. При температуре наружного воз-

духа ниже номинальной включается в работу пиковый водогрейный котел.

Эффективность работы турбоустановки оцениваются по следующим энергетическим показателям:

1. Коэффициент полезного действия ТЭЦ по производству электроэнергии:

$$\eta_{ТЭЦ}^э = \frac{N_э}{Q_{ТГ}},$$

2. Полный коэффициент полезного действия энергоблока «брутто»:

$$\eta_{ТЭЦ}^б = \frac{N_э + Q_Т + Q_{ПВК}}{Q_{ТЭЦ}},$$

3. Коэффициент полезного действия энергоблока «нетто»:

$$\eta_{ТЭЦ}^н = \eta_{ТЭЦ}^б \cdot (1 - \overline{\mathcal{E}}_{CH}),$$

4. Расход условного топлива на производство и отпуск тепловой энергии для турбоустановки:

$$B_у^э = B_{ТЭЦ}^б - B_{ТЭЦ}^т,$$

5. Удельный расход условного топлива на производство электроэнергии:

$$b_у^э = \frac{123}{\eta_{ТЭЦ}^э},$$

В табл. 1 приведены результаты определения параметров тепловой эффективности ТЭЦ в зависимости от температуры наружного воздуха.

Таблица 1

**Параметры тепловой эффективности ТЭЦ в зависимости от температуры наружного воздуха**

Наименование параметра	Обозначение	Величина		
		+5	-10	-20
Температура наружного воздуха	$t_{нар}, ^\circ C$	+5	-10	-20
КПД ТЭЦ по производству электроэнергии	$\eta_{ТЭЦ}^э$	0,5	0,71	0,68
КПД энергоблока «брутто»	$\eta_{ТЭЦ}^б$	0,63	0,81	0,79
КПД ТЭЦ «нетто»	$\eta_{ТЭЦ}^н$	0,6	0,77	0,75
Расход условного топлива на производство и отпуск тепловой энергии для турбоустановки	$B_{\text{у.э.}}, \frac{\text{кг у.т.}}{\text{с}}$	8,42	6,36	7,05
Удельный расход условного топлива на производство электроэнергии	$b_{\text{у.э.}}, \frac{\text{г у.т.}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$	245,7 6	173,5 2	180, 6

Графическое отображение параметров тепловой эффективности ТЭЦ на базе паротурбинной установки Т-110/120-130-4 приведено на рис. 1–5.

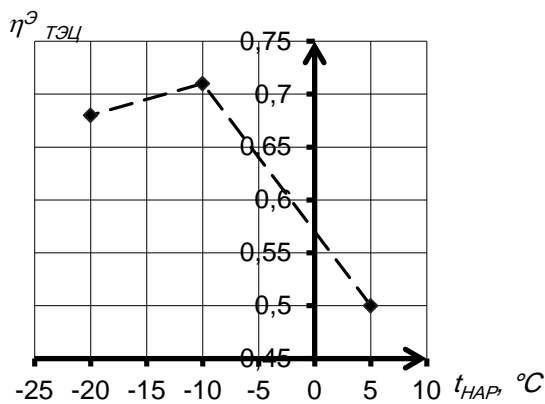


Рис. 1. Зависимость КПД ТЭЦ по производству электроэнергии от температуры наружного воздуха

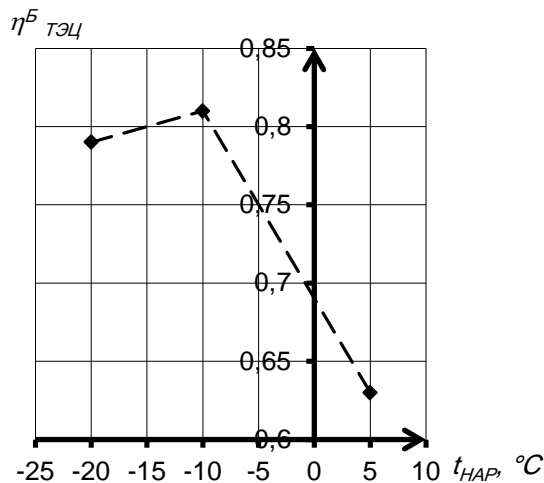


Рис. 2. Зависимость КПД энергоблока «брутто» от температуры наружного воздуха

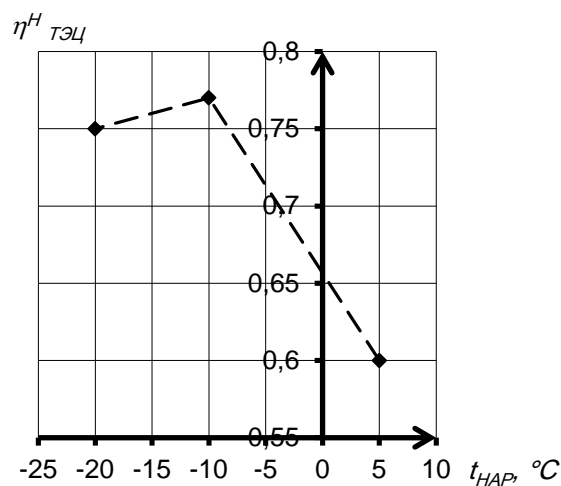


Рис. 3. Зависимость КПД ТЭЦ «нетто» от температуры наружного воздуха

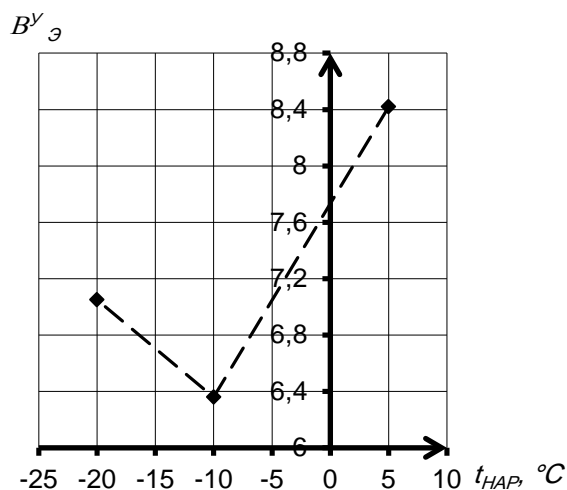
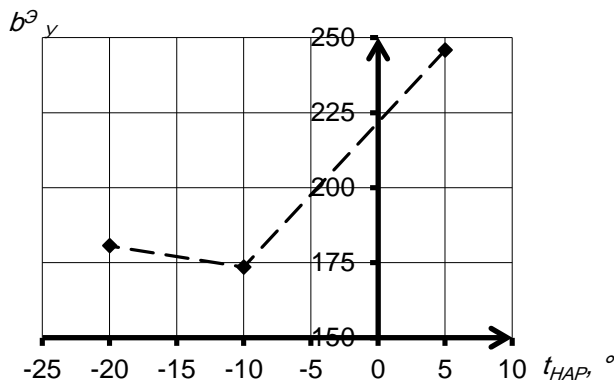


Рис. 4. Зависимость расход условного топлива на производство и отпуск тепловой энергии от температуры наружного воздуха



**Рис. 5.** Зависимость удельного расхода условного топлива на производство электроэнергии от температуры наружного воздуха

Исследование показало следующее:

- Работа турбоагрегата при температуре наружного воздуха  $t_{нар} = -10^\circ\text{C}$  является самой экономичной.
- КПД по производству электроэнергии, КПД энергоблока «брутто» и КПД ТЭЦ «нетто» достигают высокие значения при работе на номинальном режиме.
- Наименьшие значения удельного расхода условного топлива на производство электроэнергии и расхода условного топлива на производство и отпуск тепловой энергии также достигаются при  $t_{нар} = -10^\circ\text{C}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стерман Л. С., Тевлин С. А., Шарков А. Т. Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов; Под ред. Стермана Л.С. – 2-е изд., испр. и доп. – М. Энергоиздат, 1982 г. – 456 с., ил. [ L.S. Sterman, S.A. Tevlin, A.T. Sharikov, «Thermal and nuclear power plants», no., pp. 456, 1982. ]
2. Полещук И. З. Составление и расчет принципиальных тепловых схем ТЭЦ. Методические указания к курсовому проекту по дисциплине «ТЭС и АЭС», Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. – Уфа, 2003. [ I.Z. Poleshyuk, «Compilation and calculation of thermal schemes of CHP. Methodical instructions to the course project on the discipline «TPPs and nuclear power plants»», 2003 ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ИБАТУЛЛИНА Лиана Наилевна**, магистрант. каф. АТиТ.

**БИКБУЛАТОВ Ахат Митхатович**, канд. техн. наук, доцент каф. АТиТ

#### METADATA

**Title:** Assessment of the work of thermal power equipment when operating on different modes

**Authors:** L. N. Ibatullina<sup>1</sup>, A. M. Bikbulatov<sup>2</sup>

#### Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>liana-ibatullina@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 54-56, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Discusses thermal energy equipment at the plant with turbine T-110/120-130-4. Produced thermal and process design of CHP schemes on the basis of the turbine when the ambient temperature 5, -10, -20 °C.

**Key words:** steam turbine, power station, economy, power generation, fuel consumption, outdoor temperature, electrical energy, operation, efficiency, energy performance CHP.

#### About authors:

**IBATULLINA, Liana Nailevna.**, master student 2 year, Ufa state aviation technical University

**BIKBULATOV, Ahat Mitkhatovich.**, candidate of technical Sciences, Associate Professor in the Department of aviation of the thermal engineering and heat power engineering, Ufa state aviation technical University



## СРАВНЕНИЕ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ЖИЛОГО ДОМА НА ОСНОВЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА И КРЫШНОЙ ГАЗОВОЙ КОТЕЛЬНОЙ

Г. З. Ильина<sup>1</sup>, А. Н. Жилин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>gulginaovk@yandex.ru, <sup>2</sup>mr.zan57@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Приведен анализ по обоснованию выбора источника теплоснабжения для выбранного объекта. Оптимальная система теплоснабжения позволяет создать в здании комфортные условия для работы обслуживающего персонала и оборудования, а также позволяет минимизировать значительные затраты на отопление и вентиляцию. Различают два вида теплоснабжения – централизованное и децентрализованное. В качестве централизованного теплоснабжения рассматриваем индивидуальный тепловой пункт, децентрализованного – крышная газовая котельная.

**Ключевые слова:** теплоэнергетика; индивидуальный тепловой пункт; крышная котельная; теплотехнический; гидравлический расчет.

С повышением тарифов на потребление тепловой энергии, значительно возросли эксплуатационные расходы на отопление, вентиляцию зданий и сооружений. Потерю тепла при транспортировке из-за изношенности тепловых сетей также оплачивает конечный потребитель.

Оптимальная система теплоснабжения позволяет создать в здании комфортные условия, а также позволяет минимизировать значительные затраты на отопление и вентиляцию.

В качестве исследования рассмотрели 11-ти этажный жилой дом, расположенный в микрорайоне «Глумилино» Октябрьского района г. Уфы. Согласно теплотехническим расчетам выбрали теплоизоляционный материал, а именно минераловатные плиты Rockwool толщиной 150 мм для наружной стены, утеплитель из пенополистирольных плит толщиной 250 мм для кровли, конструкцию окон: двухслойный стеклопакет в деревянных или пластиковых переплетах с мягким селективным покрытием внутреннего стекла с термическим сопротивлением.

$$R_{0СП}^{np} = 0,61 \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm}.$$

Общая нагрузка на систему отопления и горячего водоснабжения составила 680440 Вт. Приняли за систему отопления жилой части двухтрубные коллекторно–лучевые (параллельное подключение к гребенке каждого отопительного прибора) с нижней разводкой магистралей, с установкой в каждой квартире шкафа с узлом присоединения квартирной системы отопления (ШКСО–1 ООО «Данфосс»), оснащенного автоматическим балансировочным клапаном и ультразвуковым теплосчетчиком.

Произвели гидравлический расчет системы отопления, выбрали диаметры трубопроводов отопительной системы. Для создания необходимого напора и преодоления гидродинамического сопротивления выбрали насосы Wilo. Построили аксонометрическую схему системы отопления с нанесенными на нее нагревательными приборами и регулирующей арматурой. Для данного объекта рассчитали два источника системы теплоснабжения: индивидуальный тепловой пункт и газовая котельная. По коммерческому предложению от ООО «Инженерная группа М–стандарт» стоимость индивидуального теплового пункта составило 2 998

799,9 руб. с НДС, стоимость газовой крышной котельной составляет 2 697 043 руб. с НДС по коммерческому предложению от ООО «Завод котельного оборудования». Цены указаны за 2014 г.

Рассмотрим основные преимущества и недостатки децентрализованного и централизованного источника теплоснабжения.

Преимущества крышных газовых котельных:

- отсутствие необходимости в отдельном здании. Для нужд крышной газовой котельной подходят обыкновенные технические помещения, подвалы и чердаки: главное, чтобы они соответствовали требованиям пожарной безопасности;

- низкие теплотери. Крышные котельные не требуют прокладки длинных тепломагистралей, на которых теряется значительное количество тепла — около 15-20%. Использование крышных конструкций исключает такие потери;

- достаточно низкие требования. Крышные котельные — тот тип установок, которые практически не требуют дополнительных монтажных работ типа прокладки дымоотводов;

- автоматизация системы. С современным оборудованием есть возможность вести взаимодействие оператора с системой к минимуму.

Недостатки крышных газовых котельных

- ограничения по весу устанавливаемого на крышу оборудования;

- проблемы с вибрацией – в котельной работают мощные циркуляционные насосы, вентиляторы, издающие шум высокой интенсивности и вибрацию. А это существенные недостатки для жильцов последнего этажа;

- ограничение по высоте здания, на которое можно установить крышную котельную;

- необходимость соблюдения правил работы с газовым оборудованием;

- необходимость установки сложной системы автоматики и пожаротушения. [1]

Индивидуальные тепловые пункты обладают следующими преимуществами:

- независимо от протяженности теплотрасс можно обеспечить одинаковые параметры отопления у всех потребителей;

- возможность обеспечить индивидуальный режим работы (например, для медицинских учреждений);

- отсутствует проблема потерь тепла на теплотрассе, вместо нее потери тепла зависят от обеспечения утепления дома домовладельцем. [2]

Недостатки индивидуального теплового пункта:

- завышение стоимости тепла;

- сложный, дорогой порядок подключения к тепловым сетям;

- невозможность жителям самостоятельно регулировать включение и отключение отопления;

- длительный срок летних отключений ГВС. [3]

Таким образом, оптимальная система теплоснабжения позволит создать в здании комфортные условия, а также минимизировать значительные затраты на отопление и вентиляцию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компания «Альянстепло»: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kotel-modul.ru/boiler/roof> (Дата обращения: 25.01.2018).

2. Компания ООО "ЭНЕРГОТЕПЛОКОМПЛЕКС-НН": [Электронный ресурс]. URL: <http://energy-etk-nn.ru/?p=91> (Дата обращения: 25.01.2018).

3. Портал «ЭнергоСовет.ру»: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energosoвет.ru/stenergo.php?idd=153> (Дата обращения: 25.01.2018).

#### ОБ АВТОРАХ

**ИЛЬИНА Гульгина Зуфаровна**, магистр каф. АТиТ (УГАТУ, 2018). Готовит дис. о современных системах теплоснабжения.

**ЖИЛИН Александр Николаевич**, доцент. каф. АТиТ, к.т.н. (УГНТУ, 2000) Экспериментальное исследование системы контроля за свайным основанием плитного фундамента при карстовых проявлениях.

#### METADATA

**Title:** Comparison of the source of heat supply for an apartment building on the basis of an individual heat point and a roof gas boiler house

**Authors:** G. Z. Ilnina<sup>1</sup>, A. N. Zilin<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>gulginaovk@yandex.ru, <sup>2</sup>mr.zan57@mail.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 57-59, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The purpose of the article is to analyze the rationale for choosing the source of heat supply for the selected facility. The optimal heat supply system allows creating comfortable conditions for the work of maintenance personnel and equipment in the building, as well as minimizing the significant costs of heating and ventilation. There are two types of heat supply - centralized and decentralized. As a centralized heat supply, we consider an individual heat station, a decentralized-roof gas boiler house.

**Key words:** Heat power engineering, individual heat point, roof boiler, heat engineering, hydraulic calculation.

**About authors:**

**ILINA, Gulgina Zufarovna**, Student, Dept. of Aviation heat engineering and heat power engineering. Master (UGATU, 2018).

**ZILIN, Alexander Nikolaevich**, Prof., Dept. of Aviation heat engineering and heat power engineering. Ph.D. (UGNTU, 2000) Experimental study of the control system for the pile foundation of the foundation foundation for karst manifestations.

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СВЯЗАННЫЕ С ЭТИМ ПРОБЛЕМЫ

С. В. Корнилин

kornilin93@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Разработка и производство авиационных турбореактивных двигателей сегодня является одной из наиболее наукоемких и высокоразвитых в научном и техническом отношении промышленных отраслей. Традиционные способы снижения удельного расхода топлива путём повышения эффективности термодинамического цикла и повышения степени двухконтурности могут обеспечить относительно небольшие улучшения экономичности, но приводят к увеличению диаметральных размеров, осложнению проблем обеспечения требуемых ресурсов основных деталей, приемлемого теплового состояния деталей «горячей» части и т. д. При этом увеличение термодинамических параметров цикла происходит более быстрыми темпами, чем создание новых материалов и совершенствование систем охлаждения.

**Ключевые слова:** авиационные двигатели; удельный расход; термодинамический цикл; степень двухконтурности; турбореактивный двигатель; газовая динамика; авиадвигателестроение; термодинамика; газодинамика; горение.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодня в России созданы или находятся в стадии доводки ряд двигателей для гражданской авиации.

На рис. 1 показаны основные направления для усовершенствования современных авиационных двигателей.

Однако даже в наш век высоких технологий существует множество факторов на каждом из этих направлений, тормозящих развитие авиационных двигателей.

### НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В области термодинамики главными задачами являются повышение экономических (топливная экономичность) и экологических (шум и эмиссия р) показателей двигателя, а также его боевой эффективности для военной авиации. Традиционные способы снижения удельного расхода топлива путем повышения эффективности термодинамического цикла (суммарной степени

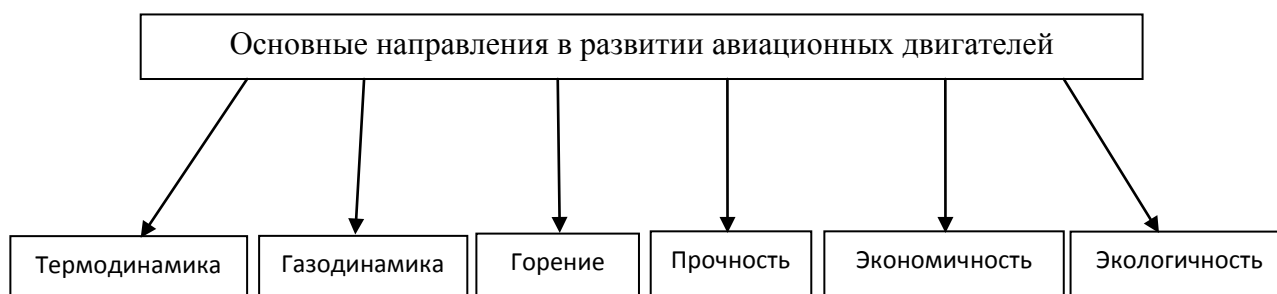


Рис. 1. Направления для усовершенствования современного двигателестроения и основные задачи, решаемые на каждом из них

повышения давления в цикле и температуры газа перед турбиной, коэффициентов полезного действия узлов и снижения потерь полного давления во входных и выходных устройствах) и повышения степени двухконтурности могут обеспечить относительно небольшие улучшения экономичности, но приводят к увеличению диаметральных размеров, усложнению проблем обеспечения требуемых ресурсов основных деталей, приемлемого теплового состояния деталей «горячей» части и т.д. В рамках традиционных подходов к повышению эффективности авиационных двигателей еще имеется некоторый резерв, связанный с совершенствованием основных узлов (газовая динамика, устойчивость, эффективность охлаждения), с расширением использования композиционных материалов в лопаточных машинах, камерах сгорания, элементах мотогондолы, что позволяет несколько снизить удельный вес и тем самым повысить топливную эффективность ЛА, а также с применением «электрифицированных» двигателей, у которых отсутствует отбор воздуха на кондиционирование кабины. [1]

Основные задачи и пути развития направления «Газовая динамика»: обеспечение высокой степени достоверности моделирования сложных газодинамических, электрофизических и магнитогазодинамических процессов; совершенные методы многопараметрической многодисциплинарной оптимизации и проектирования элементов газотурбинных двигателей и силовых установок; управление нестационарными процессами в элементах двигателя; улучшение акустических характеристик двигателя; повышение эффективности и безопасности эксплуатации.

Современные двигатели ЛА находятся на высоком уровне газодинамического совершенства. В рамках традиционных подходов к повышению эффективности АД имеется некоторый резерв, связанный с совершенствованием основных узлов. Для его реализации необходимо развитие имеющихся представлений и способов моделирования газодинамических, физико-химических и акустических процессов, создание новых методов и средств, адекватно описывающих сложные нестационарные

процессы в лопаточных машинах и внутренних каналах.

Камеры сгорания газотурбинных двигателей основаны на принципе стабилизации пламени в закрученных потоках. Однако закрутка потока сама может порождать различные виды неустойчивости горения, а также влиять на общий уровень акустического излучения двигателя. С этой проблемой борются в направлении «Горение». Сжигание бедных предварительно перемешанных смесей в настоящее время рассматривается в качестве основного метода уменьшения эмиссии загрязняющих веществ. Но горение в предварительно перемешанных смесях более подвержено развитию статической и динамической неустойчивости из-за недостатка естественных механизмов торможения. Большое разнообразие проявлений термоакустической неустойчивости остается основным препятствием в создании камер сгорания, использующих бедные, предварительно перемешанные смеси. [2]

Отечественное авиадвигателестроение в настоящее время существенно отстает от зарубежных конкурентов в части разработок и внедрения новых критических технологий, что неизбежно повышает риск проведения опытно-конструкторских работ (в частности, по созданию двигателя для перспективного ближнесреднемагистрального самолета и по созданию двигателя для перспективного комплекса фронтовой авиации). В стране мало научных баз, позволяющих создавать новые конструктивные материалы для авиационной промышленности, слабо разработаны научные основы и, соответственно, нормативные документы для системы квалификации материалов. Плохое развитие экспериментальной базы и проблемы создания комплекса лабораторий для проведения прочностных и вибрационных исследований, а также для проведения сертификационных испытаний, остаются главным препятствием на пути развития прочности деталей.

Экономические исследования в области авиационного двигателестроения в ближайшей и среднесрочной перспективе планируется проводить по следующим направлениям: технико-экономические исследова-

ния вопросов создания авиационных двигателей; технико-экономические требования к характеристикам двигателя; экономические исследования авиадвигателестроительной промышленности; экономические исследования продвижения на рынок продукции и услуг авиадвигателестроения; экономические исследования вопросов эксплуатации авиационных двигателей, в том числе интегрированной логистической поддержки. [3]

Для обеспечения конкурентоспособности отечественной авиации на мировом рынке и беспрепятственной эксплуатации на международных авиалиниях в рамках направления «Экология» необходимо предусмотреть следующие целевые показатели (индикаторы): снижение шума, эмиссии  $\text{NO}_x$  вблизи аэропортов и в полете, эмиссии  $\text{CO}_2$  в полете. Кроме этого следует обеспечить достижение новых разрабатываемых ИКАО нормативных показателей на эмиссию нелетучих частиц вблизи аэропорта и других вредных веществ, некоторых региональных норм. В планируемых работах по двигателям и их узлам необходимо предусмотреть достижение с запасом норм на шум и эмиссию  $\text{HC}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  и дыма, а также снижение эмиссии  $\text{CO}_2$  путем повышения топливной эффективности.

Для сохранения российской авиационной двигателестроительной промышленности, кроме ее реструктуризации, реализации государственной защиты отечественного рынка и проведения активной протекционистской политики в отношении отечественной авиационной техники необходимо, несмотря на все финансовые трудности, проведение работ по созданию опережающего научно-технического задела (НТЗ).

Актуальность создания высокотехнологичных авиационных двигателей ставит перед исследователями целый ряд принципиально новых задач, связанных не только с аэродинамикой таких аппаратов, но и с особенностями организации рабочего процесса в камерах сгорания двигателей таких аппаратов. Диссоциация молекул воздуха, а при больших гиперзвуковых скоростях – и их ионизация – приводят к развитию других кинетических схем сгорания топлив, которые в настоящее время мало изучены. [4]

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фалалеев С. В.** Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов. /С.В. Фалалеев; Минобрнауки России, Самара. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П.Королева (Нац. исслед. ун-т) – Самара, 2012.
2. **Перспективы** и проблемы развития авиационного двигателестроения в России [Электронный ресурс]. URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/01/page40.html> (дата обращения 20.02.2018)
3. **Кулагин В. В.** Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник для студентов вузов / В. В. Кулагин.— Москва : Машиностроение, 2002.-.
4. **Mechanical Engineers' Handbook** Third Edition. Energy and Power/Edited by Mayer Kutz – 3<sup>rd</sup> ed. - Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005

#### ОБ АВТОРЕ

**КОРНИЛИН Сергей Васильевич**, ст. каф. ДВС. Дипл. Тепло-техник-теплоэнергетик (УГАТУ, 2015). Готовит ВКР о расчете когенерационной энергетической установки на базе двигателя Стирлинга.

#### METADATA

**Title:** Ways to improve modern aircraft engines and related problems

**Author:** S. V. Kornilin

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

**Email:** kornilin93@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 60-62, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Development and production of aviation turbojet engines today is one of the most knowledge-intensive and highly developed in the scientific and technical fields. Traditional methods of reducing the specific fuel consumption by increasing the efficiency of the thermodynamic cycle and increasing the degree of double-contour can provide relatively small improvements in efficiency, but lead to an increase in the diametrical dimensions, complication of the problems of providing the required resources of the main parts, an acceptable thermal condition of the " hot " parts, etc. At the same time, the increase in thermodynamic parameters of the cycle occurs at a faster rate than the creation of new materials and the improvement of cooling systems.

**Key words:** aircraft engines, specific consumption, thermodynamic cycle, the degree of two-circuit-news, turbojet engine, gas dynamics, aircraft engine, thermodynamics, gas dynamics, combustion

**About author:**

**KORNILIN, Sergey Vasilyevich**, student, Dept. of Internal Combustion Engine. Master of Heat Engineering & Heat Power Engineering (USATU, 2015).

## АНАЛИЗ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОДОГРЕВА МАСЛА В ГТП АЛ-31СТ

В. С. КОСТРОВ<sup>1</sup>, А. С. ГИШВАРОВ<sup>2</sup>, А. В. ЗЫРЯНОВ<sup>3</sup>, А. А. КНЯЗЕВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>infiniti-kz@mail.ru, <sup>2</sup>kafedra.ad@mail.ru, <sup>3</sup>aleksfox@inbox.ru, <sup>4</sup>ArtSoull@ya.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Изменение подогрева масла в опорах газотурбинного двигателя является информативным параметром, который может сигнализировать об отклонениях от нормальной работы не только подшипников, но и других деталей (узлов) масляной системы двигателя. Предложена схема причинно-следственных связей, иллюстрирующая нарушения в работе опор ротора двигателя, которые влекут за собой рост (снижение) подогрева масла. В данной статье проведен анализ изменения подогрева масла в опоре газотурбинного привода АЛ-31СТ в процессе его наработки. Выявлен рост данного параметра по наработке. Приведены результаты дефектации двигателя при поступлении его в ремонт.

**Ключевые слова:** газотурбинный привод; масляная система; диагностика опор; подогрев масла; подшипники.

Масляная система газотурбинного двигателя (ГТД) предназначена для смазки подшипников с целью уменьшения трения возникающего между телами качения, сепаратором и кольцами, отвода продуктов износа и съема тепла, выделяемого в результате их работы. При этом необходимо отметить, что современные ГТД работают при частотах вращения порядка 10 000 – 15 000 об/мин и температуре газов перед турбиной близкой к 2000 К, что приводит к значительному тепловыделению в масло как от самих подшипников, так и от элементов двигателя (особенно в опорах турбины), формирующих масляную полость. Отвод тепла является основной функцией, выполняемой масляной системой. Для обеспечения нормального функционирования подшипников и их охлаждения требуется значительное количество масла (несколько сотен килограмм в час), в то время как для смазки – несколько капель в час [1].

Согласно закону сохранения энергии, затрачиваемая работа на преодоление всех сил сопротивления в подшипнике качения практически целиком превращается в тепло, кото-

рое нагревает подшипник, и отводится в основном прокачиваемым через него маслом.

Потери мощности на привод подшипников разделяются на две составляющие [1]:

1) потери от сил сопротивления, образующихся из-за наличия сил трения между телами качения, беговыми дорожками колец и сепаратором;

2) потери от сил гидродинамических сопротивлений, возникающих в результате перемешивания масла телами качения в подшипнике.

Следовательно, тепловой поток, эквивалентный затратам мощности на преодоление указанных выше сил, можно представить в виде суммы:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{гидр}},$$

где  $Q_{\Sigma}$  – суммарный тепловой поток, эквивалентный общим затратам мощности на привод подшипника, Вт;  $Q_{\text{тр}}$  – тепловой поток, эквивалентный мощности трения в подшипнике, Вт;  $Q_{\text{гидр}}$  – тепловой поток, эквивалентный мощности на преодоление сил гидродинамических сопротивлений в подшипнике, Вт.

При рассмотрении тепла, отводимого маслом от подшипников, особенно опоры турбины, следует учитывать дополнительный его отвод от нагретых деталей и узлов двигателя.

Таким образом, суммарный тепловой поток, отводимый маслом, омывающим подшипник и элементы масляной полости, можно представить в виде:

$$Q_M = Q_{тр} + Q_{гидр} + Q_{вн},$$

где  $Q_M$  – тепловой поток, отводимый от опоры (подшипника и элементов масляной полости) прокачиваемым маслом, Вт;  $Q_{вн}$  – внешний тепловой поток, подводимый к прокачиваемому маслу, Вт.

Для обеспечения требуемой температуры подшипника, с учетом наличия внешнего подогрева, потребная величина прокачки масла через корпус подшипника определяется по формуле:

$$q_M = \frac{3600 \cdot (Q_{\Sigma} + Q_{вн})}{C_p \cdot (t_{м.вых} - t_{м.вх})},$$

где  $q_M$  – прокачка масла через корпус подшипника, кг/ч;  $C_p$  – удельная теплоемкость

масла, Дж/(кг·°C);  $t_{м.вх}$ ,  $t_{м.вых}$  – температура масла на входе и выходе из двигателя соответственно, °C.

При этом температура подшипника на 5–20 % выше замеряемой температуры масла на выходе из него, то есть  $t_{м.вых} = (0,8 - 0,95)t_{подш.}$  [1].

Количество тепла, поступающего в масло от подшипников  $Q_{\Sigma}$ , зависит от множества факторов:

- оборотов роторов высокого (РВД,  $n_2$ ) и низкого (РНД,  $n_1$ ) давлений;
- радиального зазора в подшипнике;
- условий монтажа (соосность посадочных мест под подшипники, натяг, зазор) и других факторов.

Тепло, поступающее в масло от внешнего подогрева  $Q_{вн}$ , определяется температурой продуктов сгорания [2].

Контроль состояния подшипников имеет важное значение в обеспечении надежной работы двигателя, т.к. разрушение подшипников может привести к значительным повреждениям ГТД (рис. 1).

Контроль состояния подшипников и масляной полости в целом осуществляется



**Рис. 1.** Заклинивание шарикового подшипника ротора двигателя и его последствия:  
*а* – тела качения подшипника; *б* – наружное кольцо и сепаратор; *в* – внутреннее кольцо;  
*г* – диск турбины с рабочими лопатками



отслеживанием их температурного состояния посредством датчиков температуры, устанавливаемых на входе и выходе из опоры, а также с помощью сигнализаторов стружки, магнитных пробок и датчиков вибрации. Также применяется спектральный анализ масла, который требует выполнения постоянных отбор проб масла. Очевидно, что при этом не обеспечивается текущий контроль состояния опор в интервале между отборами проб масла.

Кроме указанных выше методов диагностики состояния подшипников и опор в целом, с целью повышения уровня контролепригодности масляной системы газотурбинного привода АЛ-31СТ, возможно применение такого показателя как подогрев масла в опорах двигателя. В данном случае изменение величины подогрева в процессе наработки двигателя будет представлять собой дополнительный диагностический па-

раметр, который может сигнализировать об отклонениях от нормальной работы (рис. 2).

Рассмотрим пример исследования подогрева масла в ГТП АЛ-31СТ.

Опора турбины ГТП является наиболее нагруженной опорой и имеет общую масляную полость для подшипников турбины низкого (ТНД) и высокого давлений (ТВД) (рис. 3).

В качестве опор используются подшипник роликовый 4-1002928РУ (для опоры ТНД) и подшипник роликовый 5-2672119Р1 (для опоры ТВД). Контроль подогрева масла осуществляется с помощью датчиков температуры П-109, установленных в трубопроводах линии подачи ( $t_{м.вх}$ ) и откачки масла ( $t_{м.вых}$ ).

На рис. 4 показана динамика изменения подогрева масла ( $\Delta t_m = t_{м.вых} - t_{м.вх}$ ) в опоре турбины в интервале наработки от 9119 до 17343 ч.



Рис. 2. Схема причинно-следственных связей изменения величины подогрева масла в двигателе

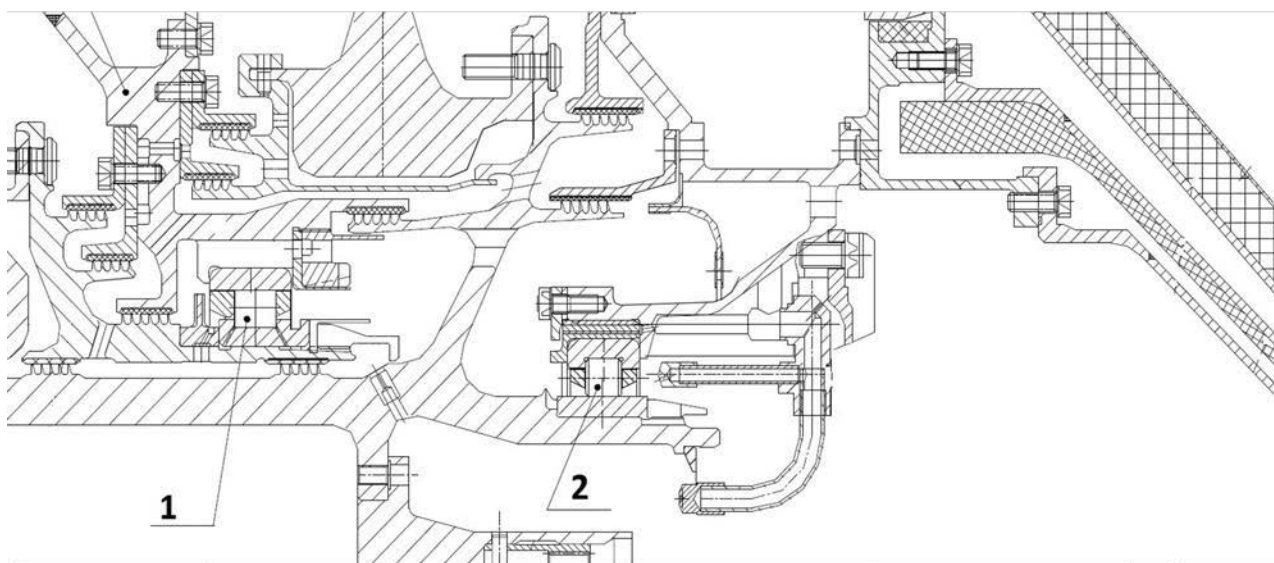


Рис. 3. Масляная полость опоры турбины ГТП АЛ-31СТ:

1 – роликовый подшипник опоры ТВД; 2 – роликовый подшипник опоры ТНД

Из представленной на рис. 4 зависимости видно, что величина подогрева масла в опоре турбины ГТП АЛ-31СТ имеет положительную тенденцию. Положительный тренд зависимости  $\Delta t_M = f(\tau)$  сопровождается скачкообразным изменением величины подогрева масла, которое обусловлено изменением режима работы двигателя, который характеризуется оборотами роторов низкого ( $n_1$ ) и высокого давлений ( $n_2$ ), а также температурой продуктов сгорания за турбиной ( $T_4$ ).

Для исключения влияния режимов работы двигателя на подогрев масла в опоре турбины  $\Delta t_M$  по статистическим данным была определена зависимость вида [3]:

$$\Delta t_M = -174,23404 + 0,00028 \cdot n_1 + 0,01728 \cdot n_2 + 0,07263 \cdot T_4 + 0,00135 \cdot \tau.$$

На рис. 5 показана динамика изменения подогрева масла в опоре турбины в интервале наработки от 9 119 до 17 343 ч. при постоянном режиме работы двигателя ( $n_1, n_2, T_4 = \text{const}$ ).

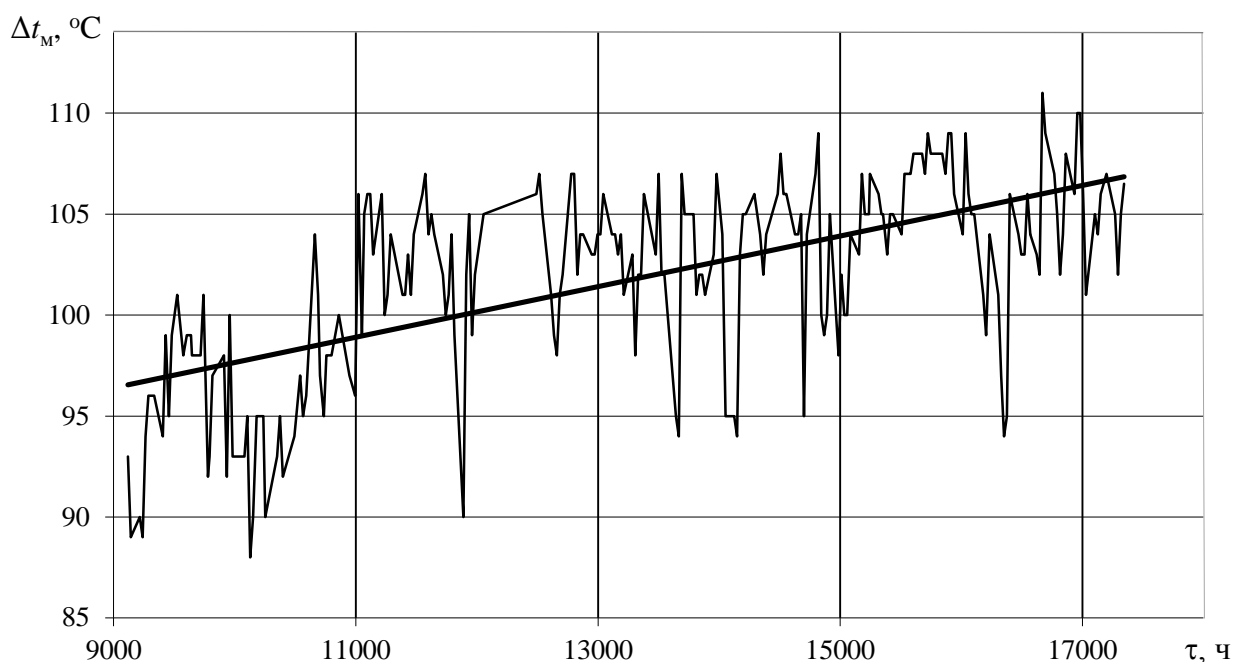


Рис. 4. Динамика изменения подогрева масла в опоре турбины ГТП АЛ-31СТ по наработке

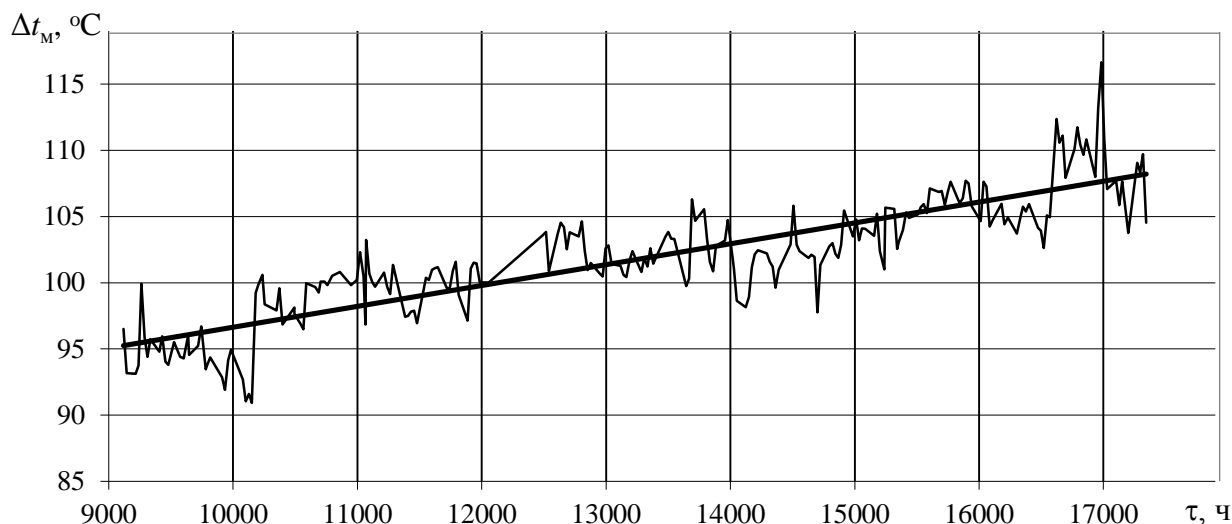


Рис. 5. Динамика изменения подогрева масла в опоре турбины ГПП АЛ-31СТ по наработке при  $n_1, n_2, T_4 = \text{const}$

Из рис. 5 видно, что подогрев масла в опоре турбины ГПП АЛ-31СТ по мере наработки возрастает.

Для выяснения причины роста подогрева была проведена дефектация опоры турбины данного двигателя при поступлении на капитальный ремонт.

Анализ проводился с использованием схемы, приведенной на рис. 2.

В качестве датчиков контроля температуры масла  $t_{\text{м.вых}}$  и  $t_{\text{м.вх}}$  используются датчики температуры П-109. С целью исключения возможности искажения замеренных значений температуры масла был выполнен входной контроль, по результатам которого они были признаны исправными.

Контроль за подачей масла в двигатель проводится путем замера давления масла за нагнетающим насосом НШ-38, причем с целью исключения забросов давления за ним установлен перепускной клапан. Давление масла в процессе наработки было практически неизменным и варьировалось в диапазоне от 3,1 до 3,2 кг/см<sup>2</sup>.

В процессе изготовления двигателя предусмотрено проведение проливок масляного коллектора, с целью определения прокачки масла через форсунки и определения попадания струй масла в заданные полости. По результатам проливок было установлено, что при сборке двигателя и отправке его в эксплуатацию суммарный расход масла че-

рез масляный коллектор был на 1,4 л/мин выше. Отклонений в попадании струй масла в заданные полости не выявлено.

Фактором, который мог повлиять на увеличение подогрева масла является увеличение параметра  $Q_{\Sigma}$ . Контроль роликовых подшипников 4-1002928РУ и 5-2672119Р1 не выявил признаков износа тел качения и беговых дорожек. Обмеры подшипников подтвердили их кондиционность.

Известно, что наличие масляной ванны, с погружением нижнего ролика подшипника приводит к увеличению  $Q_{\Sigma}$  из-за роста  $Q_{\text{гидр}}$ . Переполнение масляной полости ведет к попаданию масла в газоздушный тракт двигателя, что приводит к обмасливанию проточной части. На данном двигателе признаков переполнения масляной полости не обнаружено.

Разрушение масляных уплотнений, которое могло привести к росту  $Q_{\text{вн}}$ , также не обнаружено.

Температура масла на входе в двигатель поддерживается с помощью аппарата воздушного охлаждения масла (АВОМ). Замечаний по работе АВОМ не выявлено. Изменение температуры масла на входе в двигатель  $t_{\text{м.вх}}$  было минимальным и варьировалось в интервале 38...43 °С. Следовательно, подогрев масла в опоре турбины не связан с изменением температуры масла на входе в двигатель и изменением характеристик мас-

ла, которые влияют на теплоотвод от подшипников.

При работе подшипника температура внутреннего и наружного колец отличаются до 5 %, причем большую температуру имеет внутреннее кольцо [4]. Для исключения заклинивания подшипника по причине температурных деформаций его колец, масло подводится к внутреннему кольцу (рис. 2).

Выявленное в результате дефектации двигателя снижение прокачки масла через масляный коллектор на 1,4 л/мин явилось причиной роста подогрева масла в опоре турбины ГТТ АЛ-31СТ. Отклонение от минимально допустимой величины прокачки составило 0,1 л/мин и могло стать причиной заклинивания подшипников.

Таким образом, контроль подогрева масла по наработке позволяет повысить вероятность распознавания фактического состояния элементов (узлов) масляной системы двигателя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидович В. М. Исследование теплового режима подшипников ГТД. М.: «Машиностроение», 1978, 172 с. [ V. M. Demidovich, Research of heat rate of Gas Turbine Engine (GTE) bearings, (in Russian). Moscow, Mechanical engineering "Mashinostroenie", 1978].

2. Зырянов А. В., Костров В. С. Анализ факторов, влияющих на температуру масла в опоре турбины газотурбинного привода АЛ-31СТН. // Молодежный вестник УГАТУ, 2014, вып. 3 (12), С. 129–134. [ A. V. Zirianov, V. S. Kostrov "Analysis of factors influencing on oil temperature in gas turbine bearings AL-31STN" (in Russian), in *Molodezhnii vestnik UGATU*, no. 3 (12), pp. 129–134, 2014].

3. Зырянов А. В., Костров В. С. Разработка модели, характеризующей состояние опор газотурбинного привода АЛ-31СТН. // Молодежный вестник УГАТУ, 2015, вып. 1 (13), С. 19–23. [ A. V. Zirianov, V. S. Kostrov "Design of model describing condition of gas turbine bearings AL-31STN" (in Russian), in *Molodezhnii vestnik UGATU*, no. 1 (13), pp. 19–23, 2014].

4. Бич М. М., Вейнберг Е. В., Сурнов Д. Н. Смазка авиационных газотурбинных двигателей. М.: «Машиностроение», 1979, 172 с. [ M. M. Bich, E. V. Veinberg, D. N. Syrnov "Lubrication of aviation gas turbines engines" (in Russian), Moscow, Mechanical engineering "Mashinostroenie", 1979].

#### ОБ АВТОРАХ

**КОСТРОВ Владислав Сергеевич**, инженер-конструктор отдела главного конструктора, ПАО «ОДК-УМПО», асп. каф. авиац. двигателей. Диплом инженера по специальности «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» (УГАТУ, 2013).

**ГИШВАРОВ Анас Саидович**, д.т.н., проф., зав. кафедрой авиац. двигателей, зав. кафедрой. Диплом инженер по авиационным двигателям (УАИ, 1973). Доктор технических наук по тепл. двигателям ЛА (УАИ, 1993). Исследования в области надежности, испытаний и прогнозирования состояния технических систем.

**ЗЫРЯНОВ Алексей Викторович**, доц. каф. авиац. двигателей. Диплом инженера по технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей (УГАТУ, 2003). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам летательн. аппаратов (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. проектирования авиационных ГТД, планирования эксперимента.

**КНЯЗЕВ Артур Анатольевич**, магистрант каф. авиац. двигателей. Иссл. в обл. ресурса и надежности авиационных двигателей.

#### METADATA

**Title:** improving level of control of gas turbine AL-31ST oil system.

**Authors** V. S. Kostrov <sup>1</sup>, A. S. Gishvarov <sup>2</sup>, A. V. Zirianov <sup>3</sup>, A. A. Knyazev <sup>4</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> infiniti-kz@mail.ru, <sup>2</sup> kafedra.ad@mail.ru, <sup>3</sup> aleksfox@inbox.ru, <sup>4</sup> ArtSoull@ya.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** *Molodezhnii Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 63-68, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Oil heating changing in gas turbine is informative parameter which is able to signalize about deviation from normal work not only bearings, but also other units. Suggested cause scheme which shows abnormal work of gas turbine and linked with it increasing (decreasing) oil heating. In this article carried out analyses of oil heating changing in gas turbine AL-31ST bearings during his working. This analysis showed oil heating increase. Introduced results of defecting of gas turbine during his mending.

**Key words:** gas turbine, oil system, bearing diagnostic, oil heating, bearings

**About authors:**

**KOSTROV, Vladislav Sergeevich**, design engineer of the chief designer department, UMPO, postgraduate student, Dept. of aviation engine. Dipl. Technical exploitation of aircrafts and engines (USATU, 2013).

**GISHVAROV, Anas Saidovich**, Doctor of Technical science, Prof., head of Dept. of Aviation engine. Dipl. Engineer in aircraft engines (UAI, 1973). Doctor of Technical science in heat engines of aircrafts (UAI, 1993). Research in reliability area, test and prediction of condition of technical systems.

**ZYRYANOV, Aleksey Viktorovich**, docent, Dept. of Aviation engine, Dipl. Technical exploitation of aircrafts and engines (USATU, 2003). Candidate of technical science in heat racket engines and engines of aircrafts (USATU, 2008). Research in aviation gas turbine engines designing, experiment planning.

**KNYAZEV, Artur Anatolyevich**, master of the department. aircraft engines. Research in the field of resource and reliability of aircraft engines.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ В УРАВНЕНИИ ТЯГОВОГО БАЛАНСА

О. Ю. КУГУБАЕВ<sup>1</sup>, А. О. БОРИСОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> oleg.kugubaev@yandex.ru, <sup>2</sup> bor\_ao@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В рамках определения топливной экономичности проектируемых моделей автомобиля или их модернизации, а также с целью проверки адекватности данных, полученных при выполнении расчетов, экспериментальным данным, предлагается методика экспериментального определения коэффициента сопротивления качению, коэффициента сцепления шины с дорогой, коэффициента учета вращающихся масс и аэродинамического коэффициента в уравнении тягового баланса. Описывается последовательность проведения эксперимента, установки, используемые для определения коэффициентов.

**Ключевые слова:** коэффициенты; силы сопротивления движению; топливная экономичность; тяговый баланс; экспериментальная установка.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших показателей работы автомобиля является его топливная экономичность.

При оценке эффективности работы, выполняемой транспортным средством (ТС), вследствие постоянного роста стоимости топлива, все большее значение приобретают показатели топливной экономичности. Стоимость топлива может составлять более 30% всех затрат на эксплуатацию автомобиля, и эта часть затрат продолжает увеличиваться. В связи с ухудшением экологической обстановки в мире, повышением стоимости топлива и истощением природных запасов сырья, снижение показателей эксплуатационного расхода топлива может приобретать решающее значение.

Оценка расхода топлива при разработке новых моделей ТС, несмотря на сложность процесса, становится одной из важнейших задач, решение которой обеспечивает сопоставление эффективности использования различных двигателей или вариантов трансмиссии на стадии проектных работ, снижение издержек на доводочные работы и повышение конкурентоспособности автомобиля.

При проектировании нового автомобиля для проверки адекватности расчетов необходимо сравнение с данными, полученными в результате эксперимента. При отсутствии прототипа получение экспериментальных данных может оказаться довольно затруднительным.

Одним из этапов получения показателей топливной экономичности является тяговый расчет.

### ТЯГОВЫЙ БАЛАНС

Уравнение движение автомобиля имеет вид [1]:

$$F_{\delta} = F_{\kappa} + F_{\tau} + F_{\alpha} + F_{\delta}, \quad (1)$$

где  $F_{\tau}$  – сила тяги ТС,  $F_{\kappa}$  – сила сопротивления качению,  $F_{\alpha}$  – сила сопротивления подъему,  $F_{\delta}$  – сила сопротивления воздуха (аэродинамическое сопротивление),  $F_{\delta}$  – сила сопротивления разгону ТС (инерции).

$F_{\tau}$  и  $F_{\delta}$  – при движении ТС присутствуют всегда,  $F_{\alpha}$  и  $F_{\delta}$  – могут отсутствовать.

$$F_{\delta} = \frac{(M_e \cdot i_{\text{в}} \cdot i_0 \cdot \eta_{\text{дд}})}{r_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где  $M_e$  – крутящий момент,  $i_{кп}$  – передаточное число коробки передач,  $i_0$  – передаточное число главной передачи,  $\eta_{тр}$  – КПД трансмиссии;  $r_k$  – радиус колеса, м.

$$F_{\dot{\epsilon}} = f_{\dot{\epsilon}} G_a \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $f_k$  – коэффициент сопротивления качению колеса,  $G_a$  – полный вес автомобиля,  $\alpha$  – уклон дороги.

$$F_i = G_a \sin \alpha, \quad (4)$$

$$F_{\dot{a}} = 0,5 c_x A \rho_a V^2, \quad (5)$$

где  $c_x$  – коэффициент обтекаемости автомобиля,  $\rho_v$  – плотность воздуха,  $A$  – площадь миделева сечения автомобиля,  $V$  – скорость автомобиля.

$$F_{\dot{\epsilon}} = \delta M_a a_a, \quad (6)$$

где  $\delta$  – коэффициент учета вращающихся масс,  $M_a$  – масса автомобиля,  $a_a$  – ускорение автомобиля.

Объединим  $F_k$  и  $F_i$  в силу сопротивления дороги:

$$F_{\psi} = F_{\dot{\epsilon}} + F_i = f_{\dot{\epsilon}} G_a \cos \alpha + G_a \sin \alpha = G_a (f_{\dot{\epsilon}} \cos \alpha + \sin \alpha), \quad (7)$$

$$f_{\dot{\epsilon}} \cos \alpha + \sin \alpha = \Psi, \quad (8)$$

где  $\Psi$  – коэффициент дорожного сопротивления.

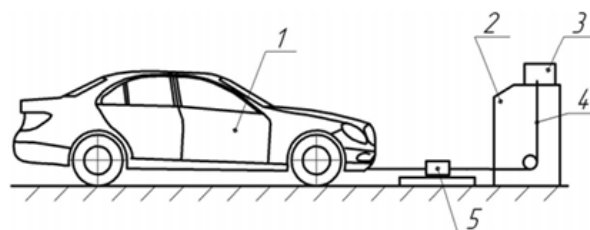
Уравнение движения ТС примет вид:

$$\frac{(M_e i_{\dot{\epsilon}i} i_0 \eta_{\dot{\epsilon}d})}{r_{\dot{\epsilon}}} = \Psi G_a + 0,5 c_x A \rho_a V^2 + \delta M_a a_a, \quad (9)$$

Экспериментальное получение коэффициентов  $f_k$ ,  $c_x$  и  $\delta$  в уравнении тягового баланса для проектируемого автомобиля затруднительно. Поэтому предлагается следующая методика получения указанных выше коэффициентов экспериментальным путем.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ

Экспериментальное определение силы сопротивления качению автомобиля выполняется устройством 2 (рис. 1), представляющим собой металлическую раму, на которую жестко закреплена лебедка 3. Протяжка испытуемого автомобиля 1 осуществляется посредством металлического троса 4. Для измерения тягового усилия в связях «автомобиль — лебедка» динамометр растяжения 5 устанавливается на специальную пластину. Она крепится к раме протяжного механизма и служит для удобства и исключения провисания троса под тяжестью динамометра. Величина усилия, необходимая для равномерной буксировки автомобиля, определяет силу сопротивления качению автомобиля [2].



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для определения силы сопротивления качению:  
1 – испытуемый автомобиль; 2 – протяжный механизм; 3 – лебедка; 4 – металлический трос; 5 – динамометр растяжения.

Эксперимент выполняется в следующей последовательности:

1. Установить и закрепить устройство, согласно схеме (рис. 1).

2. Установить испытуемый автомобиль на горизонтальный участок дороги на удалении 5...10 м от протяжного устройства и соединить буксирное устройство автомобиля с тросом лебедки.

3. Проверить давление воздуха в шинах и довести их до давления, предусмотренного программой испытаний (табл. 1).

4. Осуществляя равномерное движение испытуемого автомобиля вращением рукоятки лебедки, добиться постоянного значения усилия, необходимого для буксировки, и зафиксировать ее значение.

5. Остановить протяжку, осуществить торможение автомобиля.

Таблица 1

## Программа испытаний

Номер испытания	Внутреннее давление воздуха в шине $p_w$ , кПа	Сила сопротивления качению (усилие равной буксировки), $P_k$		Масса автомобиля $m_a$ , кг	Значение коэффициента сопротивления качению $f_k$
		кГс	Н		
1					
2					
...					
n					

6. Полученные данные занести в таблицу 1 и произвести расчет коэффициента сопротивления качению автомобиля:

$$f_{\hat{\epsilon}} = \frac{P_{\hat{\epsilon}}}{m_a g}, \quad (10)$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ

Определить коэффициент сопротивления качению можно с помощью установки, включающей опорную плиту 1, динамометр 3, и лебедку 4 (рис. 2).

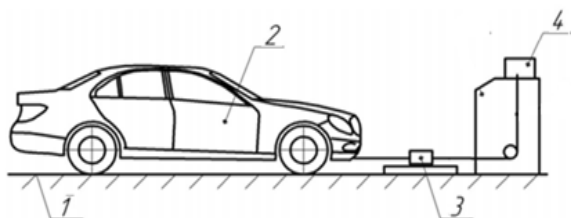


Рис. 2. Схема установки для определения коэффициента сопротивления качению и коэффициента сцепления: 1 – опорная плита; 2 – автомобиль; 3 – динамометр; 4 – лебедка

Процесс замера:

1. Установить и закрепить устройство, согласно схеме (см. рис. 1).

2. Заблокировав задние колеса автомобиля, замеряется касательная сила  $P_x$  в точке контакта заблокированных колес с опорной поверхностью, при сухом и мокром состоянии покрытия опорной плиты.

3. Производится расчет коэффициента сцепления  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{P_x}{G_a}, \quad (11)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УЧЕТА ВРАЩАЮЩИХСЯ МАСС И АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА  $C_x$ 

Уравнение движения автомобиля при свободном выбеге с малых скоростей движения (силой сопротивления воздуха пренебрегаем) имеет вид [3]:

$$\frac{G_a}{g} \delta_j \frac{dV_a}{dt} = -G_a f_0, \quad (12)$$

где  $G_a$  – вес автомобиля,  $g$  – ускорение свободно падающего тела,  $\delta_j$  – коэффициент учета вращающихся масс,  $dV_a/dt$  – замедление автомобиля при выбеге,  $f_0$  – коэффициент сопротивления качению при малых скоростях движения.

Если выбег проводится до полной остановки, то после интегрирования уравнения (12) получим:

$$f_0 = \frac{V_0 \delta_j}{gt}, \quad (13)$$

где  $V_0$  – начальная скорость в режиме свободного качения,  $t$  – время выбега автомобиля при свободном качении до полной остановки.

Коэффициент учета вращающихся масс колес автомобиля при выключенном сцеплении:

$$\delta_j = 1 + \frac{\sum I_{\hat{\epsilon}} g}{G_a r_{\hat{\epsilon}}^2}, \quad (14)$$

где  $\sum I_k$  – сумма моментов инерции всех колес автомобиля;  $r_k$  – радиус колеса.

Находим коэффициент аэродинамического сопротивления:

$$c_x = \frac{2G_a \left( -\frac{\delta_j}{g} \frac{dV_a}{dt} - f \right)}{\rho \bar{V}_a^2 F_a}, \quad (15)$$

где  $\bar{V}_a$  – средняя скорость движения автомобиля за время  $\Delta t$ .

Средняя скорость движения автомобиля и замедление автомобиля, соответственно:

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{V_{\hat{\epsilon}} - V_0}{t_2 - t_1} = -\frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (16)$$

$$\overline{V}_a = \frac{V_e + V_0}{2}, \quad (17)$$

Порядок выполнения работы:

1. Разогнать автомобиль и выключить передачу, одновременно включив тестер.
2. Определить скорости  $V_0$ ,  $V_k$  и интервал времени  $\Delta t$ .
3. Определить замедление автомобиля в этом интервале по формуле (16).
4. Определить среднюю скорость движения автомобиля в интервале времени  $\Delta t$  по формуле (17).
5. По формуле (15) подсчитать аэродинамический коэффициент  $c_x$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлена методика определения коэффициентов в уравнении тягового баланса экспериментальным путем.

Разработанная методика позволяет проверять адекватность данных, полученных расчетным способом, путем сравнения их с результатами эксперимента.

Тяговый баланс служит основой для определения показателей топливной экономичности.

Дальнейшие исследования предполагается продолжить в направлении исследования показателей расхода топлива болида «Актайлак» команды УГАТУ для участия в «Shell-eco marathon».

«Shell-eco marathon» — это международный образовательный проект, в рамках которого студенческие команды проектируют, создают и испытывают инновационные конструкции автомобилей и их двигателей с целью проехать наибольшее расстояние, используя при этом наименьшее количество энергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селифонов В. В. Теория автомобиля: учеб. пособие / Селифонов В. В., Хусаинов А. Ш., Ломакин В. В. – М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 102 с. [ V. V. Kovalev, Car theory, (in Russian). Moscow: Moscow State Technical University "MSTU", 2007. ]
2. Енаев А. А. Эксплуатационные свойства транспортных и транспортно-технологических машин: лаб. Практикум / Енаев А. А., Манфановский С. Б., Селезнев Е. А. и др. – Псков: ПсковГУ, 2015. – 92 с. [ A. A. Yenaev, Operational properties of transport and transport-technological machines, (in Russian). Pskov: Pskov State University "PskovSU", 2015. ]

3. Курочкин С. В. Конструкция и потребительские свойства автомобилей: метод. указания к лабораторным работам / Курочкин С. В., Нуждин Р. В., Тимофеева С. И. – Владимир: ВлГУ, 2013. – 40 с. [ S. V. Kurochkin, Construction and consumer properties of cars, (in Russian). Vladimir: Vladimir State University "VSU", 2013. ]

### ОБ АВТОРАХ

**КУГУБАЕВ Олег Юрикович**, магистрант каф. ДВС, дипл. бакалавра по напр. «Технология трансп. процессов» (УГАТУ, 2016). Готовит дисс. о топливной экономичности болида «Актайлак» команды УГАТУ для участия в «Shell-eco marathon».

**БОРИСОВ Александр Олегович**, доц. каф. двигателей внутреннего сгорания. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1977). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (МАМИ, 1982). Иссл. в обл. управления двигателями внутреннего сгорания.

### METADATA

**Title:** Experimental methodology of determining of the coefficients in the traction balance equation.

**Authors:** O. Y. Kugubaev<sup>1</sup>, A. O. Borisov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>oleg.kugubaev@yandex.ru, <sup>2</sup>bor\_ao@mail.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 69-72, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Within the definition of the designed car models or their modernization, and also in order to check the adequacy of the data obtained when performing calculations for the experimental data, we propose a technique for the experimental determination of the coefficient of resistance to rolling, the coefficient of adhesion of the tire to the road, the ratio of the rotating masses and the aerodynamic coefficient in the traction balance equation. The sequence of the experiment and the settings used to determine the coefficients are described.

**Key words:** coefficients; movement resistance forces; fuel economy; traction balance; experimental setup.

**About authors:**

**KUGUBAEV, Oleg Yurikovich**, Undergrad. Student, Dept. of Internal Combustion Engines. Bachelor of Transport process technology (USATU, 2016).

**BORISOV, Alexander Olegovich**, Prof., Dept. of Internal Combustion Engines. Graduate Mechanical Engineer (UAI, 1977). Cand. Of Tech. Sci. (MAMI, 1982).



## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ НАГРУЗОК НА СТЕНДЕ ИСПЫТАНИЯ ГИДРОПРИВОДОВ

А. В. МЕСРОПЯН<sup>1</sup>, Р. Р. ШАРИПОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>avm74@mail.ru, <sup>2</sup>obter@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В рамках работ по идентификации параметров гидравлического привода систем управления разработан стенд испытаний с возможностью имитировать нагрузки, близких к эксплуатационным условиям. Для обеспечения условий реальной работы привода рассчитана пневмомеханическая система. В статье рассматривается реализация позиционной и постоянной нагрузки с пневматической регулировкой, рассчитана кинематическая схема нагрузочных устройств, смоделированы статические характеристики.

**Ключевые слова:** стенд испытаний; реальные нагрузки; имитация нагрузок; статические характеристики; гидравлический привод; пневматический привод; нагрузочное устройство.

### ВВЕДЕНИЕ

Электроуправляемые следящие гидравлические привода являются составным исполнительным элементом систем управления, на которые накладываются жесткие требования к динамическим и статическим характеристикам в соответствии с реализуемым функционалом системы управления. Для подтверждения соответствия привода расчетным параметрам существует задача организации автономного экспериментального исследования с высокочувствительной и быстродействующей системой управления и сбора данных. Ввиду обширной номенклатуры представленных электрогидравлических следящих приводов создание унифицированного испытательного стенда для получения и последующей обработки и анализа статических и динамических параметров создаст методологическую основу для верификации параметров позиционных гидроприводов различных типоразмеров и назначений.

Создание унифицированного испытательного стенда позволит сократить сроки и расходы на доводочные и приемосдаточные работы в процессе проектирования и реализации следящих гидроприводов, а также в рамках учебной деятельности обеспечит лабораторно-технической базой

для научно-исследовательских работ студентов в области систем управления на гидравлической элементной базе [1].

В настоящей статье рассмотрена реализация стенда статических и динамических испытаний гидравлических приводов на кафедре прикладной гидромеханики ФГБОУ ВО «УГАТУ» с применением контроллера реального времени «CompactRIO» и реконфигурируемого шасси с ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) под управлением «LabView» Nation Instruments.

Объекты исследования: электрогидравлические привода дроссельного управления интегрального и раздельного исполнения, а также рулевые машины и гидроусилители систем управления летательным аппаратом с диапазоном питающего давления до 16 МПа и расходом рабочей жидкости до 30 л/мин.

### СТЕНД ИСПЫТАНИЙ

Стенд испытания имеет три основных функциональных блока:

1. Система гидропитания – насосная станция на основе регулируемого аксиально-поршневого насоса PV032R1K1T1NFPV фирмы Parker.

2. Нагрузочное устройство – механико-пневматическая система, реализующая

инерционные, позиционные и постоянные нагрузки с точной подстройкой параметров.

3. Центр управления и регистрации данных – SCADA система на основе программных и аппаратных решений от фирмы NI.

Насосная станция обеспечивает регулируемую подачу гидроэнергии к объекту исследования, обвязка датчиков обеспечивает контроль параметров рабочей жидкости в системе питания.

Система нагружения представляет собой станину с закреплёнными на кронштейнах объектами исследования (обобщенная схема изображена на рис.1) [2].

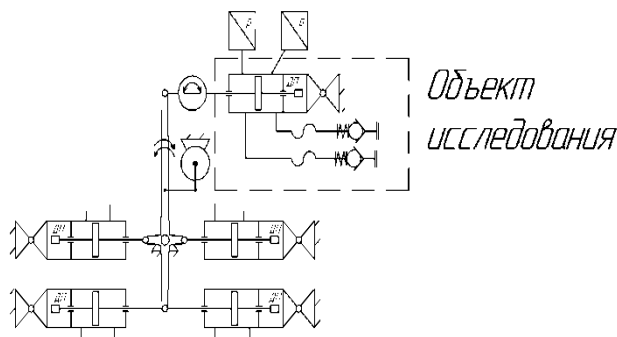


Рис. 1. Обобщенная схема нагружного устройства стенда испытания

Нагрузочные гидроцилиндры соединены с пневматической системой через разделитель сред, что позволяет контролировать давление в них редукционным клапаном. Расположение гидроцилиндров обеспечивает задание позиционной нагрузки и постоянной нагрузки [3], система съемных грузов позволяет задать инерционную нагрузку.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК**

В соответствии со схемой нагружного устройства на рис. 2 представлена кинематическая схема для определения плеча приложения усилия нагрузочного гидроцилиндра позиционной нагрузки (ЦМ).

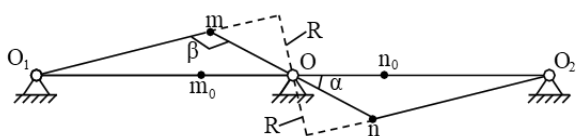


Рис. 2. Схема кинематическая для определения плеча ЦМ:

$O$  – центр вращения вала стенда;  $O_1, O_2$  – центры вращения ЦТ;

$O_1K_0 = O_2K_0 = L_0$  – длина нагрузочного ЦТ между его шарнирами;  $\alpha$  – угол поворота вала стенда

Согласно схеме, позиционная нагрузка определяется как

$$M_{\text{поз}} = 2 \cdot A \cdot P_{\text{ред}} \cdot R \cdot \text{sign}(\alpha), \quad (1)$$

где  $A$  – эффективная площадь ЦМ;  $P_{\text{ред}}$  – избыточное давление воздуха за редуктором.

Зависимость момента позиционной нагрузки от угла поворота качалки изображена на рис. 3.

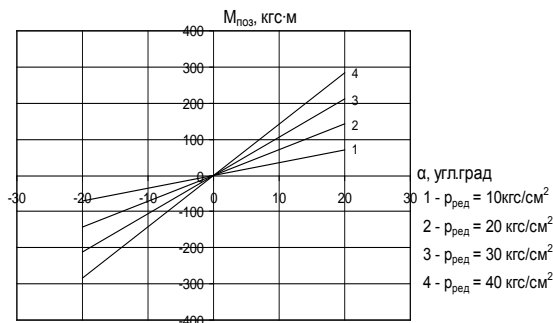


Рис. 3. График зависимости момента позиционной нагрузки от угла поворота качалки

Благодаря тому, что качалки находятся в одной плоскости с центром вращения, было достигнуто линейное изменение позиционной нагрузки, крутизна характеристики зависит от давления в полостях гидроцилиндров. Данное решение обеспечивает точную настройку позиционной нагрузки в широком диапазоне (от 0 до 300 кгс м).

В соответствии со схемой нагружного устройства, на рис. 4 представлена кинематическая схема для определения плеча приложения постоянного усилия нагрузочных гидроцилиндров ЦТ.

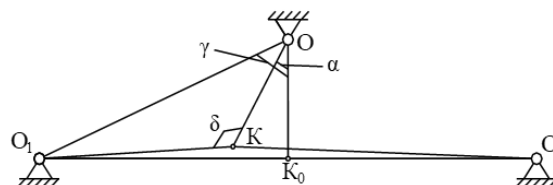


Рис. 4. Схема кинематическая для определения плеча ЦТ:  $O$  – центр вращения вала стенда;  $O_1, O_2$  – центры вращения ЦТ  $OK_0 = OK = l_1$  – рычаг;  $O_1K_0 = O_2K_0 = L_0$  – длина нагрузочного ЦТ между его шарнирами;  $\alpha$  – угол поворота вала стенда

Плечо  $R_1$  приложения усилия ЦТ определяется выражениями:

$$R_1 = l_1 \cdot \sin \delta, \quad (2)$$

$$\delta = \arccos \left[ \frac{l_1^2 + L^2 - OO_1^2}{2 \cdot l_1 \cdot L} \right] \quad (3)$$

Момент постоянной нагрузки определяется выражением

$$M_{\Pi} = A \cdot \Delta P_{\text{пк}} \cdot (R_1 + R_{11}), \quad (4)$$

где  $\Delta P_{\text{пк}}$  – перепад давления на предохранительных клапанах, имитирующих постоянную нагрузку.

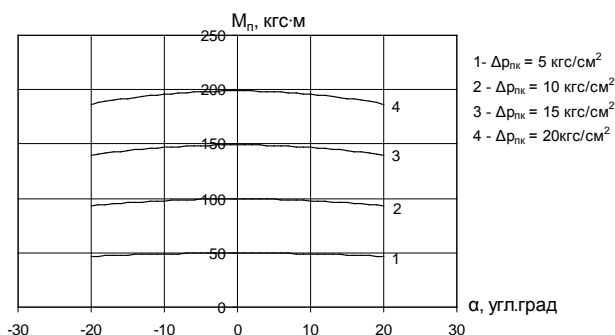


Рис. 5. График зависимости угла момента постоянной нагрузки ЦТ от угла поворота качалки

Полученные зависимости момента постоянной нагрузки, характеристики имеют незначительные нелинейные участки, ввиду ограниченного плеча действия гидроцилиндров. Для получения более линейной зависимости необходимо увеличить плечо действия сил, что повлечет увеличению габаритов нагрузочного устройства.

Реализованные кинематические схемы нагружения позволяют с достаточной точностью моделировать позиционные и постоянные составляющие реальной нагрузки при проведении испытаний гидроприводов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галлямов Ш. Р., Месропян А. В. Экспериментальный стенд для исследования рулевого привода баллистической ракеты подводной лодки // Полет. 2009. №11. С. 29-33. [S.R. Gallyamov and A.V. Mesropyan, "Experimental stand for the investigation of the steering gear of a submarine ballistic missile", (inRussian), in Poliet, no. 11, pp. 29-33, 2009]
2. Тарга С. М. Теоретическая механика //М.: "Высшая школа». – 1989.[S.M. Targa, "Theoretical mechanics", (in-Russian), 1989]
3. Шейпак А. А. Гидравлика и гидропневмопривод. – МГИУ, 2006.[A.A. Sheypac, "Hydraulics and hydro-pneumatic actuator" ", (inRussian), 2006]

#### ОБ АВТОРАХ

**МЕСРОПЯН Арсен Владимирович**, проф. той же каф. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1996). Д-р техн. наук по гидромашинам и гидропневмоагрегатам (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. гидроприводов систем управления летательн. аппаратов.

**ШАРИПОВ Руслан Рамилевич**, аспирант каф. прикладной гидромеханики. Дипл. инженера (УГАТУ, 2015). Готовит дис. о гидравлических рулевых приводах.

#### METADATA

**Title:** Simulation of real loads at the test stand of hydro actuator.

**Authors:** A. V. Mesropyan<sup>1</sup>, R. R. Sharipov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>avm74@mail.ru, <sup>2</sup>obter@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 73-75, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** As part of the identification of the parameters of the hydraulic drive of control systems, a test bench with the ability to simulate loads close to operating conditions has been developed. To ensure the conditions of the real operation of the drive, a pneumomechanical system is designed. The article deals with the implementation of the positional and constant load with pneumatic adjustment, the kinematic scheme of the load devices is calculated, and the static characteristics are modeled.

**Key words:** test bench; real loads; imitation of loads; static characteristics; hydraulic drive; pneumatic drive; load device.

**About authors:**

**MESROPYAN, Arsen Vladimirovich**, Prof., Dept. of Hydraulic Systems. Dipl. Engineer (USATU., 1996). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2010).

**SHARIPOV, Ruslan Ramilevich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Hydraulic Systems. Dipl. Engineer (USATU., 2015).

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

А. М. МИГРАНОВ<sup>1</sup>, В. Р. МУХАМАДЕЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>migranov\_art\_1993@inbox.ru, <sup>2</sup>vener\_muhamadeev@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния покрытий на режущем инструменте на триботехнические параметры процесса резания. В работе для оценки триботехнических параметров использовался экспериментальный метод, в основу которого принята физическая модель, которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания. Полученные результаты показывают многократное увеличение стойкости режущего инструмента как за счет уменьшения приработочного износа, так и за счет снижения интенсивности нормального износа.

**Ключевые слова:** покрытие; инструмент; трение; износ; эпилама; коэффициент трения; поверхность; тепловые процессы.

Широкое промышленное использование режущих инструментов с износостойкими покрытиями (ИП) позволяет [1]: повысить стойкость и надежность инструмента; сократить удельный расход дорогостоящих остродефицитных инструментальных материалов; расширить область использования твердых сплавов и сократить номенклатуру применяемых сплавов стандартных марок и т.д. Известно [1, 2], что износ любого трибосопряжения, в том числе режущего инструмента, проходит, как правило, ряд стадий, которые базируются на различных трибопроцессах. Наиболее общая классификация процессов трения разделяет их на две группы:

- стационарные, то есть с мало изменяющимися во времени трибопараметрами,
- изменяющиеся с определённой тенденцией.

Стационарному процессу в наибольшей степени соответствует нормальный износ, нестационарному - приработка и усиленный (или катастрофический) износ. Для режущего инструмента, работающего главным образом в условиях адгезионного изнашивания, усиленный износ аналогичен режиму заедания. Приработке соответствует процесс

перехода к устойчивому состоянию, а заедание проявляется как неустойчивый процесс, который характеризуется самоускоряющимся возрастанием интенсивности изнашивания. Поэтому представляется вполне рациональным разработка таких многослойных покрытий для режущего инструмента, очередной слой которых отвечал бы текущей фазе процесса изнашивания.

Нанесенные на инструментальные материалы покрытия позволяют значительно снизить силу трения [1, 2, 4]. Особенно это характерно для наиболее термодинамически устойчивых покрытий в виде окислов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Таким образом, даже при постоянном нормальном напряжении увеличиваются количество активных центров и площадь фактического контакта. Кроме того, повышение температуры способствует разрушению поверхностных пленок и образованию

химически чистых, "ювенильных" поверхностей. Последнее способствует проявлению схватывания и увеличению сил трения. Однако в результате дальнейшего повышения температуры происходит разупрочнение "узлов" схватывания и интенсивное окисление трущихся поверхностей. Эти обстоятельства зачастую приводят к снижению сил трения.

Тепловые процессы при резании металлов являются своеобразным индикатором, отражающим характер протекания целого ряда явлений, определяющих работоспособность режущего инструмента и качество формируемых поверхностей обрабатываемых деталей [4]. С повышением температуры инициируются процессы макро- и микроразрушения контактных площадок инструмента. При наличии на контактных площадках инструмента ИП снижаются работа деформации и силы резания [1, 2]. Это свидетельствует о снижении интенсивности основных источников тепла в зоне резания – деформационного и фрикционного по передней и задней поверхностям. ИП, отличаясь по своим теплофизическим характеристикам от соответствующих характеристик инструментальной матрицы, может также изменять или регулировать направление и интенсивность тепловых потоков: в сторону инструмента, детали и стружки, а также в окружающую среду. Очевидно, что в этом случае снижение интенсивности основных источников теплоты и изменение направления тепловых потоков приведет к изменению теплового состояния инструмента и температуры резания.

В данной работе в качестве приработочного слоя использован слой эпилама [1–3]. Эпиламирование заключается в нанесении на поверхность инструмента фторосодержащего поверхностно-активного вещества. Плёночное покрытие в виде плотно упакованного молекулярного монослоя располагается эквидистантно профилю макронеровности поверхности инструмента. Оно обладает высокой адсорбционной способностью, в связи с малой толщиной прочно удерживается на поверхности и заполняет её поры. Поскольку поверхностная энергия масел, присутствующих в составах

смазочно-охлаждающих жидкостей, используемых при работе инструмента, больше поверхностной энергии этой плёнки, то в результате их молекулярного взаимодействия обеспечивается нерастекаемость масел и предотвращение их сдвига с поверхности. Разделение смазкой поверхностей трения препятствует их изнашиванию и интенсивному схватыванию на начальных стадиях работы инструмента.

Таким образом, предполагалось, что если приработке инструмента отвечает эпиламированный слой покрытия, нормальному износу – слой покрытия, а катастрофическому износу – азотированный подслой, то следует ожидать существенного повышения износостойкости режущего инструмента. Чтобы проверить эту гипотезу, вначале были проведены исследования триботехнических характеристик в интервале температур 150–550°C, соответствующем температурам резания при использовании быстрорежущих инструментов. Прочность адгезионных связей на срез  $\tau_{nn}$ , предельные нормальные напряжения  $p_{rn}$  и индекс совместимости  $K_C = \tau_{nn}/p_{rn}$  оценивали по методике [3].

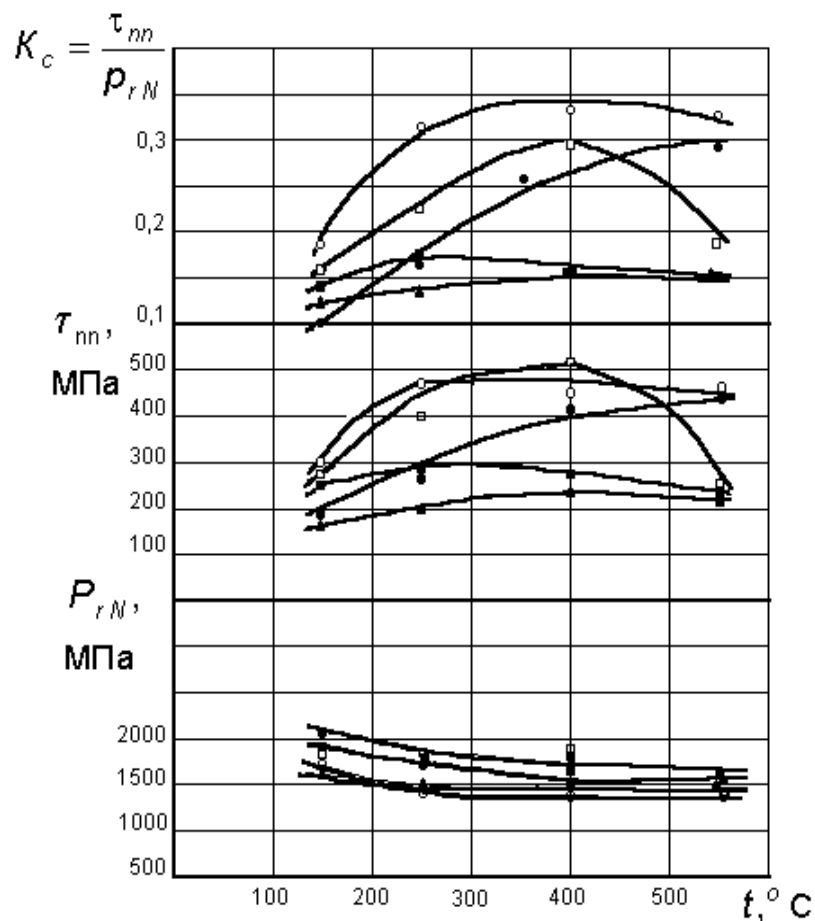
В работе для оценки триботехнических параметров ( $\tau_{nn}$ ,  $p_{rn}$ ,  $\tau_{nn}/p_{rn}$ ) использовали экспериментальный метод [3]. В основе этого метода принята физическая модель, которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте.

Индензоры изготовливаются из инструментальной стали P6M5 без покрытий, с твёрдым покрытием (Ti Cr)N (нанесённым методом PVD) и с твёрдым покрытием (Ti Cr)N + слой эпилама (фторосодержащая). Образцы изготавливали из стали 40X (HB 280–290). Исследования проводили с использованием пятипроцентной эмульсии на водной основе и без СОЖ. Результаты натурных экспериментов приведены на рис. 1. Из этого рисунка видно, что применение покрытий (Ti Cr)N и эпиламы существенно снижает прочность  $\tau_{nn}$  на срез адгезионных

связей и индекс совместимости  $K_c$  практически во всём исследованном диапазоне температур контакта.

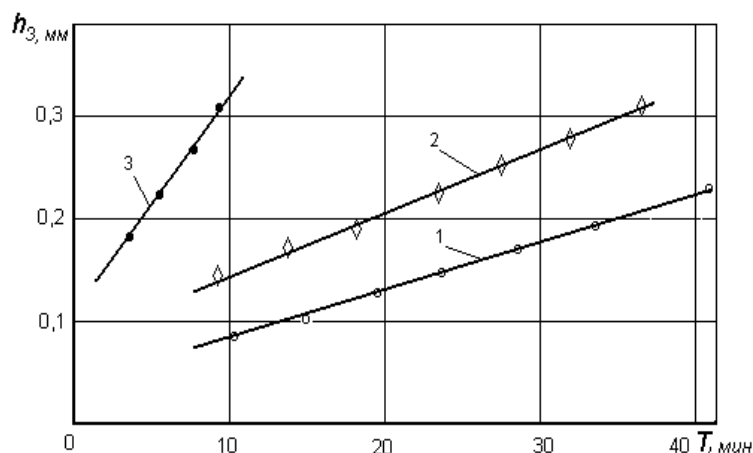
Экспериментальные исследования износостойкости режущего инструмента выполняли при попутном фрезеровании четырёхперьевыми концевыми фрезами  $\varnothing 12$  мм заготовок из стали 40Х (НВ 280–290) со скоростью резания  $V = 21$  м/мин, подачей на зуб  $S_z = 0.028$  мм/мин, шириной  $b = 10$  мм и глубиной  $t = 3$  мм на фрезерном станке HSS-400-V «HECKERT». Исследовали работоспособность фрез, выполненных из карбидостали на основе Р6М5 и прошедших ионное азотирование с

последующим нанесением покрытий методом PVD –  $(Ti\ Al)N$  (HRC<sub>3</sub> 67) или  $(Ti\ Cr)N$  (HRC<sub>3</sub> 68) и эпиламинированием. Для сравнения выполняли также стойкостные испытания цельных твёрдосплавных фрез из ВК8. Полученные результаты, приведённые на рис. 2, подтверждают многократное повышение периода стойкости режущих инструментов с многослойными покрытиями, имеющими программируемое изменение свойств. Достигается это, как видно из рис. 3, как за счёт уменьшения приработочного износа, так и за счёт снижения интенсивности нормального износа.



**Рис. 1.** Влияние температуры, состояния поверхности инструментального материала из Р6М5 и окружающей среды на трибологические характеристики контакта с обрабатываемым материалом – сталью 45 (в отожженном состоянии):

- – без покрытия с СОЖ; □ – с покрытием  $(TiCr)N$ , без СОЖ;
- – без покрытия, с СОЖ; ◆ – с покрытием  $(TiCr)N$ , без СОЖ;
- ▲ – с покрытием  $(TiCr)N$  + эпилама, с СОЖ



**Рис. 2.** Графики износа концевых фрез диаметром 12 мм при фрезеровании стали 40X (HB 280-290); скорость резания  $V = 21$  м/мин; ширина фрезерования  $b = 10$  мм; глубина фрезерования  $t = 3$  мм; подача на зуб  $S_z = 0,028$  мм:

- 1 – фреза карбидостальная с покрытием (TiAl)N (HRC 67);  
 2 – карбидосталь с покрытием (TiCr)N (светложелтый цвет HRC68);  
 3 – фреза твердосплавная

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Верещака А. С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с [ A. S. Vereschaka, "Working capacity of the cutting tool with an antiwear coatings". (in Russia). Moscow: Mashinostroenie, 1993. ]

2. **Мигранов М. Ш., Шустер Л. Ш.** Интенсификация процесса механообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. – М.: Машиностроение. 2005. – 202с. [ L. Sh. Shuster, M. Sh. Migranov. "Intensification of the machining process based on the use of self-organization effect in friction." (in Russia). Moscow. Mashinostroenie. 2005 ]

3. **Шустер Л. Ш., Мигранов М. Ш.** Прибор для исследования адгезионного взаимодействия. Патент на полезную модель № 34249 от 24.06.2003 г. [ L. Sh. Shuster, M. Sh. Migranov, "The device for probe of adhesive interaction". The patent for useful model № 34249 from 24.06.2003 y. (in Russia) ]

4. **Шустер Л. Ш., Криони Н. К., Шолом В. Ю., Мигранов М. Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. – М.: Машиностроение, 2008.- 318 с. [ L. Sh. Shuster, N. K. Krioni, V. Ju Sholom, M. Sh. Migranov, "Coverings and lubricant in high-temperature mobile interfaces and metal working." (in Russia). Moscow: Mashinostroenie, 2008. ]

5. **Криони Н. К., Мигранов М. Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. – М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2016. 377с. [ N. K. Krioni, M. Sh. Migranov, "Coatings and lubricants for high-temperature friction units". (in Russia). Moscow. Innovative mechanical engineering. 2016. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**МИГРАНОВ Артур Марсович**, асп. каф. ОКМиМ. Дипл. магистр техники и технологии (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2017). Иссл. в обл. триботехнических параметров смазочных жидкостей.

**МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович**, ст. преподаватель каф. ОКМиМ. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. износостойкости режущего инструмента.

#### METADATA

**Title:** The study of composite coatings for cutting tool

**Authors:** A. M. Migranov<sup>1</sup>, V.R. Muhamadeev<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> migranov\_art\_1993 @inbox.ru, <sup>2</sup> vener\_muhamadeev@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 76-79, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** As part of this work, the influence of coatings on the cutting tool on the tribotechnical parameters of the cutting process was investigated. In the work for evaluating tribological parameters were used experimental method, which is based on accepted physical model that in a first approximation reflects the real conditions of friction and wear. The results show a manifold increase in tool life due to reduce initial wear, and by reducing the intensity of normal wear and tear.

**Key words:** coating, tool, friction, wear, epilama, coefficient of friction, surface, thermal processes.

**About authors:**

**МИГРАНОВ, Артур Марсович**, postgraduate student of the sub-department "Bases of the designing of mechanism and machines" USATU. Mag.-ing. (Gubkin University, 2017). Area of research in tribotechnical parameters of lubricating fluids.

**МУХАМАДЕЕВ, Венер Рифкатович**, senior lecturer of the department of bases of constructing of mechanisms and machines of USATU. Mag.-ing. (USATU, 2007). Area of research in the field of wear resistance of the cutting tool.

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТУРБОДЕТАНДЕРА НА ЗАТОНСКОЙ ТЭЦ

Э. Р. МУСТАФИНА

elvina-elle@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В ряде промышленно развитых стран уже в течение длительного времени используется энергия избыточного давления природного газа, поступающего из магистральных трубопроводов к конечным потребителям через дроссельные устройства газораспределительных станций и пунктов (ГРС и ГРП, соответственно). Описывается предложенный для Затонской ТЭЦ в рамках технико-коммерческого предложения энергосберегающий турбодетандерный агрегат по блокам согласно схеме. Исследуются параметры экономической эффективности, такие как ЧДД, индекс прибыльности и внутренняя норма доходности.

**Ключевые слова:** турбодетандер; турбогенератор; термогазодинамический расчет; ГРП; энергосбережение; природный газ; эффективность; ЧДД; индекс прибыльности; внутренняя норма доходности.

### ВВЕДЕНИЕ

Затраты на транспортировку природного газа в нашей стране составляют 8-10% от стоимости всего добываемого газа. Одним из основных энергосберегающих мероприятий в этой области является использование энергии избыточного давления природного газа при его распределении на газораспределительных пунктах потребителей. Использование для этой цели детандер-генераторных агрегатов нашло широкое применение за рубежом.

Наша страна является одной из основных газодобывающих стран и обладает большим потенциалом использования энергии избыточного давления природного газа для выработки электричества. По оценкам специалистов на территории РФ существует около 600 объектов – ГРС и ГРП, располагающих условиями для строительства и эксплуатации турбодетандерных агрегатов, которые могут выработать до 15 млрд кВт·ч энергии в год.

Согласно исходным данным, представленным в табл. 1, Затонская ТЭЦ получила технико-коммерческое предложение на поставку энергосберегающего турбодетандерного агрегата ЭТДА-1500 от разработчика ООО «ТурбоДЭн». [1]

Турбодетандером называется утилизирующая (т.е. не потребляющая топлива) расширительная турбина, механически связанная с потребителем ее мощности, например, электрогенератором, компрессором и т.п.

Таблица 1

Исходные данные ГРП

Данные ГРП, ед.изм.	Значение данных
Давление газа на входе в пункт подготовки газа, атм. (изб.)	50
Давление газа на выходе из пункта подготовки газа, атм. (изб.)	22
Расход газа, млн м <sup>3</sup> /год	803,2
Средний расход газа, м <sup>3</sup> /час	91689,5

В соответствии с результатами выполненного термогазодинамического расчета проточной части турбодетандера, на ГРП Затонской ТЭЦ целесообразно сооружение одного энергосберегающего турбодетандерного агрегата разработки ООО «ТурбоДЭн» (Патент на изобретение № 2208170 от 20.09.2002 г.) мощностью 1500 кВт – ЭТДА-1500, параметры которого представлены в табл. 2.



Таблица 2

## Параметры ЭТДА (в случае его сооружения)

Параметры ЭТДА-1500, ед. изм.	Значения параметров ЭТДА
Тип турбодетандера	Осевой
Количество ступеней, шт	3-6
Частота вращения ротора турбодетандера и турбогенератора, об/мин	3000
Передача мощности от турбодетандера к турбогенератору	Безредукторная
Тип турбогенератора	Синхронный, трехфазный, с воздушным охлаждением по разомкнутому циклу
Напряжение, кВ	6,3 (10,5)
Номинальная мощность ЭТДА, кВт	1500
Электрическая мощность ЭТДА, соответствующая усредненным данным режима работы ГРП, кВт	1420

При выполнении расчетов приняты следующие допущения:

1) Величина расхода газа, проходящего через турбодетандеры ЭТДА, составляет не более 85 % суммарного расхода газа через ГРП. Это определено условием обеспечения абсолютного, бесперебойного газоснабжения потребителей. Часть газа, составляющая не менее 15 % (из практики эксплуатации турбодетандерных установок) суммарного расхода газа через ГРП, должна постоянно проходить через ГРП. Это обеспечивает поддержание регуляторов давления газа ГРП в рабочем состоянии. При останове ЭТДА регуляторы давления газа ГРП должны быстро открыться и пропустить весь расход газа.

2) Вследствие того, что процесс расширения газа в турбодетандере сопровождается довольно значительным понижением его температуры, то, во избежание гидратообразования и обмерзания газопроводов, а также удовлетворения требований СНиП обеспечивается подогрев газа на входе в турбодетандер до +70 °С. При этом температура газа на выходе из ЭТДА составит не менее +5 °С.

3) При прохождении газа через теплообменник и клапаны системы регулирования, расположенные до турбодетандера, его давление снижается на 1 атм.

Принципиальная схема ЭТДА представлена на рис. 1. Природный газ с давлением P1, расходом Q из входного коллектора, пройдя узел очистки, поступает в газоподогреватель (теплообменный аппарат). Затем из газоподогревателя (теплообменного аппарата) газ поступает через отключающую задвижку, стопорный клапан (СК) и дозирующий клапан (ДК) в турбодетандер, где, расширяясь до давления P2, совершает работу, направленную на привод генератора. Выработанная генератором электроэнергия направляется в электрическую сеть.

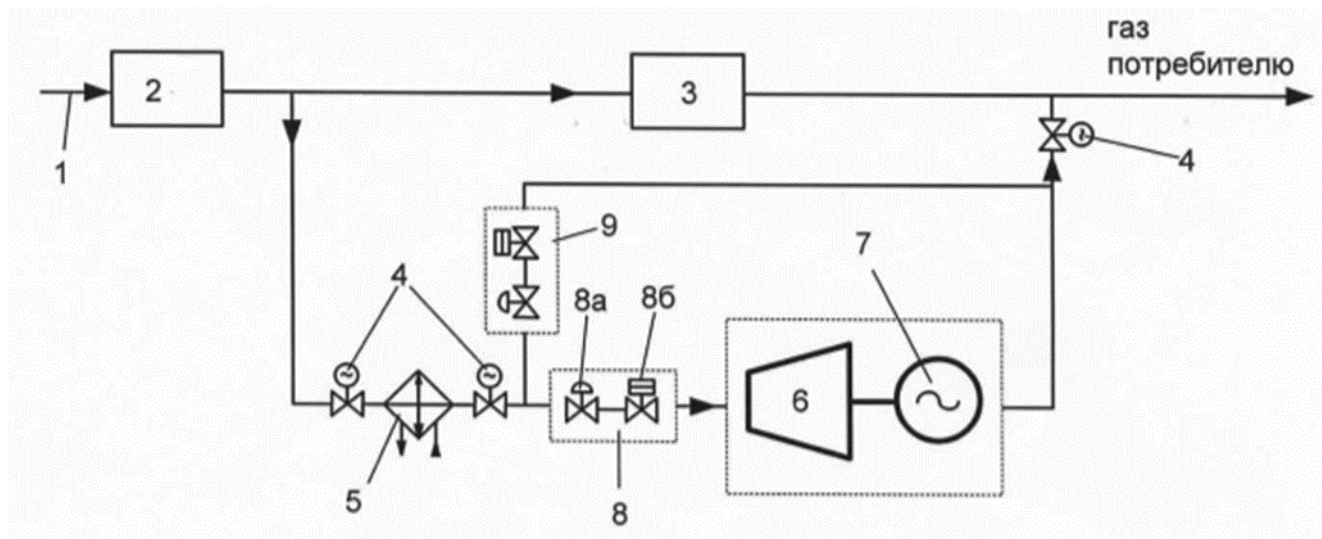
После расширения в турбодетандере газ через отключающую задвижку направляется в выходной коллектор ГРП.

Для обеспечения бесперебойной подачи газа потребителю ЭТДА снабжен байпасной линией, в состав которой входит клапан защиты (КЗ) и регулятор давления газа (РДГ).

В случае аварийной остановки агрегата срабатывает стопорный клапан (СК), который перекрывает подачу газа на ЭТДА. Одновременно с закрытием СК открывается быстродействующий клапан защиты КЗ (время закрытия СК и открытия КЗ составляет 0,3 сек) и газ в обход ЭТДА поступает в выходной коллектор ГРП.

Давление в газопроводе после ЭТДА в это время обеспечивается работой РДГ. В случае невозможности продолжения дальнейшей работы ЭТДА начинают автоматически открываться редуцирующие клапаны ГРП и постепенно закрываться РДГ. После полного закрытия клапана РДГ и КЗ ГРП переходит в штатную работу. [3]

Блок детандер-генераторный представляет собой совокупность сагрегатированного на одной раме оборудования, включающего: турбодетандер, генератор, трансмиссию, соединяющую турбодетандер и генератор, разделяющую газонепроницаемую перегородку между турбодетандером и генератором.



**Рис. 1.** Принципиальная схема ЭТДА:

1 – подвод газа к ГРП; 2 – узел очистки газа; 3 – узел редуцирования газа ГРП; 4 – электрозадвижка; 5 – газоподогреватель (теплообменник); 6 – турбодетандер; 7 – электрогенератор; 8 – блок стопорно-дозировочный, где: 8а – стопорный клапан (СК); 8б – дозирующий клапан (ДК); 9 – блок байпасный, где: 9а – клапан защиты (КЗ); 9б – регулятор давления газа (РДГ)

Также в блоке размещено оборудование системы маслоснабжения (гидроаккумулятор, поплавковые камеры, масляные фильтры, клапаны поддержания постоянного давления масла, подогреватель масла, арматура подвода смазочного материала и масла уплотнения «масло-газ», маслобак, насосы масла смазки и насосы масла автоматики, контрольно-измерительные приборы).

Турбодетандер предназначен для преобразования энергии избыточного давления и тепла природного газа в механическую энергию.

В конструкции ЭТДА применен осевой многоступенчатый турбодетандер. Турбодетандер имеет наружный (силовой) и внутренний легкоъемный корпус («вставку»), в котором размещены ротор, подшипниковые узлы, диафрагмы сопловых аппаратов и узлы уплотнений. Ротор установлен на подшипниках скольжения сегментного типа. Подобная конструкция корпуса весьма удобна при монтажных работах, сборке и проведении регламентных работ.

Турбогенератор предназначен для выработки электроэнергии за сет использования механической работы турбодетандера.

В качестве турбогенератора в ЭТДА-1500 используется двухполюсный синхрон-

ный турбогенератор мощностью 1,5 МВт, типа ТК, трехфазного тока 50 Гц, напряжением 6,3 (10,5) кВ, с бесщеточной системой возбуждения, с разомкнутым (замкнутым) циклом вентиляции.

Блок стопорно-дозировочный состоит из смонтированных на одной раме стопорного клапана (СК) и дозирующего клапана (ДК).

ДК предназначен для поддержания частоты вращения на холостом ходу генератора и заданного давления газа за агрегатом.

СК предназначен для быстрого прекращения подачи газа на турбодетандер в случаях возникновения аварийных ситуаций.

Блок байпасный состоит из смонтированных на одной раме клапана защиты (КЗ) и регулятора давления газа (РДГ).

КЗ предназначен для быстрого открытия байпасной линии подачи газа потребителям при срабатывании СК.

РДГ предназначен для поддержания заданного выходного давления газа до входа в работу клапанов регулирования ГРП (ГРС) и закрытия отсечных задвижек подачи и отвода газа от агрегата.

Блок системы охлаждения масла представляет собой смонтированное на одной раме оборудование: теплообменники «масло-газ» и трубопроводы с запорнорегули-

Таблица 4

## Анализ чувствительности проекта

Результулирующий показатель	Изменение эффекта						
	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%
Чистый дисконтированный доход (NPV), тыс.руб.	-5138	3646	12429	21213	29996	38779	47563
Индекс прибыльности (PI)	0,97	1,02	1,08	1,13	1,19	1,24	1,30
Внутренняя норма доходности (IRR), %	11,57%	12,79%	13,98%	15,15%	16,29%	17,40%	18,50%
Результулирующий показатель	Изменение объема инвестиционных затрат						
	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%
Чистый дисконтированный доход (NPV), тыс.руб.	44148	36503	28858	21213	13568	5923	-1722
Индекс прибыльности (PI)	1,32	1,25	1,19	1,13	1,08	1,03	0,99

рующей арматурой подвода газа и масла смазки к теплообменникам.

Программно-технический комплекс АСУ ТП (ПТК АСУ ТП) ЭТДА представляет собой двухуровневую систему контроля и управления. Нижний уровень ПТК состоит из локальных программно-технических комплексов ЛПТК, реализованных в шкафах напольного исполнения, расположенных непосредственно у технологического оборудования и обеспечивающих сбор и обработку информации от датчиков, а также формирование команд управления и регулирующих воздействий. Верхний уровень ПТК состоит из автоматизированных рабочих мест (АРМ), предназначенных для оперативного управления объектом, визуализации технологических процессов, сигнализации и регистрации параметров, событий и действий персонала.

В системе подогрева газа на входе в турбодетандер предполагается использовать специально разработанные для агрегатов мощностного ряда ЭТДА теплообменники типа «пар-газ» или «вода-газ». Конструкция теплообменников – витые трубы, оребренные медной проволокой.

Теплообменник представляет собой цилиндрический кожух, в котором заключены витые оребренные трубы, образующие теплообменную поверхность. В трубах проходит водяной пар или вода.

В настоящей статье также рассматривается экономическая эффективность применения ЭТДА-1500 на Затонской ТЭЦ, г. Уфа. Дата начала инвестиционного проекта: 2018 год; длительность: 10 лет. Показатели эффективности инвестиций представлены в табл. 3. Анализ чувствительности проекта отобран в табл. 4. [2]

Таблица 3

## Показатели эффективности инвестиций

№	Показатель	Значение
1.	Чистый дисконтированный доход (NPV), тыс.руб.	21 213
2.	Внутренняя норма доходности (IRR), %	15%
3.	Индекс прибыльности (PI)	1,13
4.	Период окупаемости (РВР), лет	6,38
5.	Дисконтированный период окупаемости (dРВР), лет	9,46

Окончание табл. 4

## Анализ чувствительности проекта

Внутренняя норма доходности (IRR), %	19,04	17,6	16,3	15,1	14,0	13,0	12,0
	%	3%	3%	5%	5%	3%	8%
Результующий показатель	Изменение нормы дисконта						
	-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%
Чистый дисконтированный	37246	31673	26333	21213	16302	11589	7066
Индекс прибыльности	1,23	1,20	1,16	1,13	1,10	1,07	1,04
Внутренняя норма доходности	15,5%	15,1%	15,1%	15,1%	15,1%	15,1%	15,15%

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты применения энергосберегающего турбодетандерного агрегата ЭТДА-1500 на Затонской ТЭЦ г. Уфы.

Проведен термогазодинамический расчет проточной части турбодетандера, в результате которого выяснено, что на рассматриваемой Затонской ТЭЦ целесообразно применение одного турбодетандера, а именно ЭТДА-1500.

Полученные результаты расчетов показателей энергетической эффективности применения турбодетандера показали, что рассмотренные варианты имеют положительные показатели экономической эффективности проекта, так как почти для каждого варианта ЧДД > 0, индекс прибыльности > 1, внутренняя норма доходности превышает

норму доходности, принятую в расчетах, а также дисконтированный срок окупаемости имеет вполне приемлемые значения (менее 10 лет). Следовательно, проект внедрения ЭДГА на Затонской ТЭЦ эффективен. Во всем исследованном диапазоне возможного изменения параметров внешней среды эти показатели остаются в пределах, обеспечивающих эффективность проекта.

Дальнейшие исследования предполагаются продолжить в направлении исследования показателей энергетической эффективности применения турбодетандера на ТЭЦ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технико-коммерческое** предложение от Турбодэн для Затонской ТЭЦ Technical and commercial offer from TurboDen for Zatonkaya TPP
2. **Степанец А. А.** Энергосберегающие турбодетандерные установки. М.: Недра, 1999. 258 с. [ А.А. Stepanets, Energy-saving expansion turbines, (in Russian). Moscow: Publishing House Недра, 1999. ]
3. **Сметные** нормы и расценки на эксплуатацию Затонской ТЭЦ, Estimated norms and quotations for the operation of Zatonkaya TPP

## ОБ АВТОРЕ

**МУСТАФИНА Эльвина Рафаиловна**, ст. каф. АТИТ. Дипл. Бакалавр-теплоэнергетик (УГАТУ, 2016).

## METADATA

**Title:** The possibility of using the turboexpander at Zatonkaya TPP

**Author:** E. R. Mustafina

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** elvina-elle@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 80-84, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** In a number of industrially developed countries, the energy of excess pressure of natural gas coming from the main pipelines to end users for a long time through throttling devices of gas distribution stations and points (GDS and GRP, respectively) has been used for a long time. The energy-saving turboexpander unit proposed for Zatonkaya CHPP in the framework of the technical and commercial offer is described in blocks according to the scheme. The parameters of economic efficiency, such as BHD, profitability index and internal rate of return, are investigated.

**Key words:** turboexpander; turbogenerator; thermogasdynamic calculation; Hydraulic fracturing; energy saving; natural gas; efficiency; BHD; profitability index; internal rate of return.

**About author:**

**MUSTAFINA, Elvina Rafailovna**, Student. Bachelor of Thermal Power Engineering (USATU, 2012).

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСХОДНОЙ МОРФОЛОГИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ НА ГЕОМЕТРИЮ СВАРНОГО ШВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

О. В. Муругова<sup>1</sup>, Р. В. Никифоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>murugova.oxana@mail.ru, <sup>2</sup>nikiforov\_svarka@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Изучено моделирование тепловых процессов при дуговой сварке в защитном газе высокопрочной стали 08Г2ФБТ в сварном шве и околошовной зоне в пакете ANSYS/Mechanical с учетом структурно-фазовых превращений. Сварной источник моделировался с помощью математической модели двойного полуэллипсоида Голдака. По результатам численного моделирования была выявлена взаимосвязь между исходной морфологией микроструктуры стали и параметрами геометрии сварного шва.

**Ключевые слова:** предварительный подогрев; структурно-фазовые превращения при сварке; численное моделирование дуговой сварки; кинетика фазовых превращений; высокопрочная сталь; 08Г2ФБТ.

### ВВЕДЕНИЕ

Увеличение рабочего давления в магистральных трубопроводах и усложнение условий их эксплуатации обусловило необходимость применения высокопрочных низкоуглеродистых микролегированных сталей категорий прочности X70 (K60) и X80 (K65). Основной технологической операцией при изготовлении труб и строительстве трубопроводов является сварка. В связи с этим успешное применение высокопрочных трубных сталей для строительства газопроводов в значительной мере определяется наличием рациональных процессов их сварки, обеспечивающих требуемый уровень качественных показателей, характеризующих эксплуатационную надежность, хладостойкость, низкотемпературную вязкость, свариваемость стали и др.

Основной проблемой изготовления сварной конструкции с точки зрения эксплуатационной надежности сварных соединений является поведение околошовной зоны (ОШЗ). Металл ОШЗ более подвержен разрушению чем основной металл трубы, в

связи с наибольшими структурными изменениями, происходящими в зоне, нагреваемой выше температуры начала интенсивного роста зерна аустенита (выше 1250°C), что определяет и весь объем образовавшейся аустенитной фазы. Исходное состояние микроструктуры труб в состоянии поставки также влияет как на конечную микроструктуру сварного шва и ОШЗ, так и на вероятность образования холодных трещин. При этом одним из наиболее важных материаловедческих направлений является переход от феррито-перлитной структуры к феррито-бейнитной [1].

В большинстве нормативных документов (DNV-OS-F101, API 5L, ISO 3183), регламентирующих технические условия, предъявляемые к прокату труб для магистральных трубопроводов, для обеспечения свариваемости не указана исходная морфология микроструктуры трубной стали в состоянии поставки.

Использование современных компьютерных технологий для комплексной автоматизации всех аспектов сварки, включая

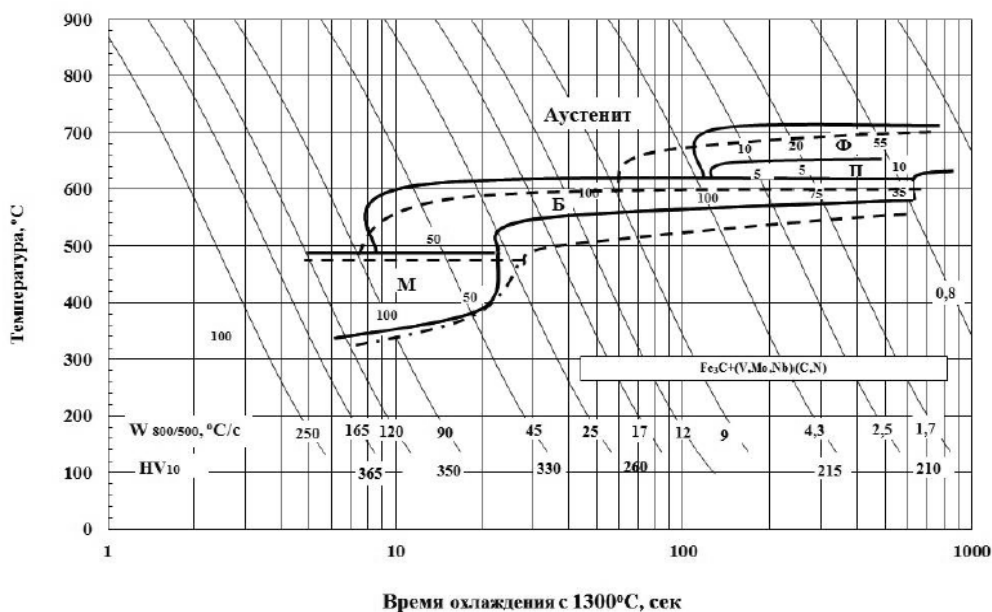


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма в металле ОШЗ стали 08Г2ФБТ [1]

моделирование протекающих в свариваемом металле процессов, позволит находить оптимальные технологические решения при значительном снижении ресурсоемкости, а также значительно расширит возможности вычислительного эксперимента для прогнозирования поведения материалов при воздействии термического цикла сварки.

При таком подходе наиболее актуальными окажутся численные эксперименты на моделях, построенных на наиболее распространенных и адаптированных под решение широкого круга сварочных задач программных оболочках, обладающих открытым программным кодом на основе линейного программирования, и которые могут быть использованы в качестве инструментов для решения прикладных сварочных задач и для обучения студентов машиностроительных специальностей. К таким пакетам, в частности, относятся программные комплексы ANSYS и ABAQUS.

**Цель исследования** – изучить влияние исходной морфологии микроструктуры стали в состоянии поставки на распределение температурных полей с помощью разработанной термической модели при дуговой сварке кольцевых сварных швов образцов из высокопрочной трубной стали класса прочности K65 с учетом структурно-фазовых превращений.

#### ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СТАЛИ 08Г2ФБТ

Сталь 08Г2ФБТ, микролегированная ванадием, ниобием и молибденом в сумме  $\approx 0,26\%$ , обладает повышенной устойчивостью аустенита. В результате экспериментальных исследований [1] было установлено, что область ферритных превращений смещается к более медленным скоростям охлаждения (от 90 °C/c до 4,5 °C/c) за счет микролегирующих добавок. Это также выражено тем, что смещается область мартенситного превращения для скорости охлаждения от 90 до 25 °C/c.

Фазовые превращения зависят от структурообразования металла околошовной зоны при скоростях охлаждения, характеризующих тот или иной вид сварки труб и трубопроводов. Поэтому необходимо иметь представление об уровне значений ключевой характеристики структурообразования – скорости охлаждения.

Фазовый состав структуры при заданном химическом составе стали определяется параметрами сварочного термического цикла: скоростью нагрева  $w_H$ ; максимальной температурой нагрева  $T_{max}$ ; длительностью пребывания при температуре выше температуры интенсивного роста зерна аустенита при нагреве и охлаждении  $t_{>1000}$  (или длительностью пребывания металла выше 1000 °C).

сварного шва<sup>I</sup> и металла ОШЗ –  $t^{II}$ ); скоростью охлаждения или длительностью охлаждения в диапазоне 850-500°C –  $w_{8/5}$  и  $t_{8/5}$ [1].

Металл зоны термического влияния подвержен наибольшим структурным изменениям, что связано с ростом зерен аустенита, степени его гомогенизации и растворением легирующих компонентов. Эти факторы обуславливают низкие значения показателей хладноломкости ЗТВ, что потребовало исследования микроструктуры и кинетики превращения аустенита при охлаждении с температур 1300°C, как показано на рис. 1 [1].

Анализ влияния длительности  $t^{II}$  пребывания околошовной зоны выше  $A_{c3}$  в период охлаждения при малой длительности  $t^I$  по данным работы [2] показывает, при  $t^{II}$  до 10 сек рост зерна при  $T_{max}=1300^\circ\text{C}$  незначителен. С увеличением  $t^{II}$  от 20 до 70 сек размер зерна резко возрастает, а при дальнейшем увеличении  $t^{II}$  размер зерна изменяется мало и в численных расчетах им можно пренебречь.

В металле ЗТВ наблюдается эффект роста аустенитных зерен до размеров 50-60 мкм и размераейрита в пределах 10-20 мкм для режимов однопроходной сварки листов толщиной не более 5-8 мм на малых погонных энергиях [2].

Фазовое превращение начинается при температуре  $A_{c1}$  и ускоряется по мере роста температуры. В интервале  $A_{c1} - A_{c3}$  превращение заканчивается при равновесной концентрации аустенита, которая растет с повышением температуры и достигает условно 100% (как правило, доля остаточного аустенита 10-15%) при температуре  $A_{c3}$ . Чем выше скорость нагрева  $w_n$ , тем больше  $\Delta A$  - отклонение температуры превращения от равновесного состояния. В работе [2] приведены температуры начала и конца превращения в зависимости от скорости нагрева образцов для стали 08Г2ФБТ. Они относятся к группе сталей, менее подверженных к росту зерна при сварке, поскольку содержат элементы (Mo, V), образующие устойчивые карбиды и повышающие энергию активации.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ СТАЛИ К65

Модель структурно-фазовых превращений строилась на термической задаче моделирования дуговой сварки плавящимся электродом.

Численное моделирование проводилось на следующих режимах -  $I_{ce}=190$  А;  $U_d=20,3$  В; Защитный газ – Аргон; Расход газа – 12 л/мин. В качестве образца для сварки выбрали заготовку из трубы  $\varnothing 89 \times 3$  мм по ГОСТ ISO 3183-2012 [3]. В соответствии с нормативной документацией [4] данная сталь 08Г2ФБТ хорошо сваривается, однако в некоторых случаях допускается подогрев до 150-200°C.

В качестве некоторого упрощения при разработке прототипа численной модели структурно-фазовых превращений рассмотрели следующие варианты подогрева – без подогрева, подогрев 100°C, подогрев 200°C.

Разработанная на базе кода *APDL* численная модель структурно-фазовых превращений учитывала:

- 1) скорость нагрева  $w_n$ ;
- 2) рост аустенитного зерна;
- 3) скорость охлаждения  $w_{8/5}$  на стадии распада аустенита;
- 4) скрытую теплоту плавления фазовых переходов.

Используя данные работы [5], была принята температура начала мартенситного превращения ЗТВ в 456°C. Температура окончания мартенситного превращения для основного металла и металла сварного шва составила 200°C.

В расчетах учитывалось превращение феррит / перлита в аустенит. Преобразование начиналось в точке  $A_{c1}$  (760°C) и заканчивалось в точке  $A_{c3}$  (920°C). В соответствии с данными работы [6] скрытая теплота для мартенситного превращения основного металла была определена в 75,07 кДж/кг, а при аустенитном превращении для металла сварного шва - 25,35 кДж/кг.

При моделировании структурно-фазовых превращений численная задача разбивалась на несколько стадий.

**Стадия нагрева.** Во время нагрева источник тепла проходил от одной кромки

пластины до другой с использованием техники смерти и рождения элементов. Источник нагрева представлял собой двойной эллипсоид Голдака (рис. 2).

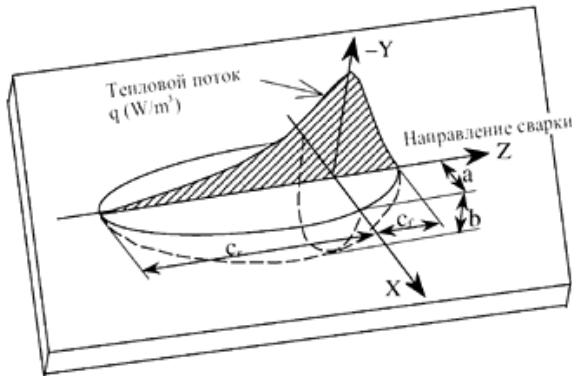


Рис. 2. Распределение теплового потока в модели двойного эллипсоида Голдака

Модель Голдака состоит из системы из двух уравнений, где для точки внутри первого полуэллипсоида, расположенной в передней части сварочной ванны, тепловой поток вычисляются по следующему выражению:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_f^2}\right), x \geq 0,$$

где  $f_f$  – часть теплового потока в передней части ванны (Вт),  $Q$  – вводимая мощность (Вт).

Для точек  $(x, y, z)$  внутри второго полуэллипсоида в задней части сварочной ванны, тепловой поток описывается выражением:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c_r^2}\right), x < 0,$$

где  $f_r$  – тепловой поток в задней части сварочной ванны (Вт).

Далее, для моделирования сварочного процесса был задан объемный тепловой поток HGEN по следующим формулам:

1) для передней части двойного эллипсоида ( $x \geq 0$ ):

$$HGEN = A_1 \exp\left(-3\left(\frac{z^2}{0.0001} + \frac{x^2}{0.0001} + \frac{y^2}{0.0001}\right)\right);$$

2) для задней части двойного эллипсоида ( $x < 0$ ):

$$HGEN = A_2 \exp\left(-3\left(\frac{z^2}{0.0002} + \frac{x^2}{0.0001} + \frac{y^2}{0.0001}\right)\right);$$

где  $A_1$  и  $A_2$  подбираются исходя из режимов сварки.

Полуоси двойного полуэллипсоида  $a, b, c_f$  и  $c_r$  подбирались эмпирически так, чтобы объемный тепловой источник на стадии квазистационарного распределения тепла максимально близко соответствовал размерам поперечного шлифа обечайки со сварным швом.

Также в задаче учитывалась теплоотдача с поверхности. Величина теплоотдачи была задана равной  $5 \text{ Вт/м}^2$ .

Во время нагрева на каждом подшаге определялись элементы феррита, нагретые до температуры начала аустенитного превращения. В диапазоне аустенитного преобразования в соответствии с данными термодинамической диаграммы происходило превращение из феррита в аустенит.

**Стадия охлаждения.** На стадии охлаждения определялись скорости охлаждения элементов  $w_{8/5}$ , соответствующие скоростям распада переохлажденного аустенита в диапазоне температур  $850 \dots 500^\circ\text{C}$ . После определения конкретных скоростей превращения для каждого элемента аустенита стадия остывания пересчитывалась. На каждом подшаге определялись элементы аустенита, подлежащие структурно-фазовым превращениям в соответствии с данными термодинамической диаграммы.

В первом приближении можно не учитывать изменение химического состава вследствие окислительно-восстановительных реакций в металле сварочной ванны. При этом допущении содержание легирующих элементов в шве легко оценить по долям наплавленного электродного металла и свариваемых кромок в металле шва. Как показывают результаты большого количества экспериментов, доля участия наплавленного электродного металла в металле шва примерно колеблется в соотношении



40/60. Для нашего случая при оценке структурно-фазовых превращений при сварке стали 08Г2ФБТ приняты усредненное значение доли наплавленного электродного металла и свариваемых кромок в металле шва в соотношении 50/50.

По результатам моделирования структурно-фазовых превращений в стали 08Г2ФБТ при дуговой сварке были получены результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

**Определение геометрических параметров сварного шва в зависимости от различных вариантов технологии сварки**

Исходная морфология микроструктуры	Сопутствующий подогрев, °С	Ширина шва $b$ , мм	Ширина обратного валика $b'$ , мм	Отклонение ширины шва, %	Отклонение ширины обратного валика, %
Феррит 100%	200	8,00	5,84	0	0
	100	6,90	4,65	13,8	20,3
	без подогрева	6,87	4,23	14,1	27,6
Феррит 50% + Бейнит 50%	200	7,65	5,71	4,4	2,2
	100	6,90	4,79	13,8	18,0
	без подогрева	6,81	4,13	14,9	29,3
Феррит 25%+Бейнит 75%	200	7,71	5,67	3,6	2,9
	100	6,90	4,60	13,8	22,6
	-	6,81	4,52	14,9	22,6
Бейнит 100%	200	7,66	5,53	4,3	5,30
	100	6,97	4,60	12,9	21,9
	без подогрева	6,90	4,56	13,8	21,9

Изменение ширины сварного шва в зависимости от исходных структурных составляющих в варианте поставки стали 08Г2ФБТ не превышает 15%, что прежде всего связано с близкими значениями теплофизических свойств феррит-перлитной смеси. По результатам численного моделирования было определено, что размер ширины обратного валика более зависит от температуры подогрева (отклонение до 29,28% от варианта сварки с подогревом в

200°С), чем от исходной картины распределения фаз в металле до сварки (отклонение до 5,3% от варианта сварки с подогревом в 200°С), поскольку именно предварительный подогрев влияет на скорость охлаждения элементов в нижней части сварочной ванны на границе «твердое тело-жидкость». При этом ширина сварного шва практически не изменяется в зависимости от различной исходной морфологии микроструктуры стали в состоянии поставки как для варианта технологии сварки с подогревом в 200°С, так и без него.

### ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного исследования была разработана численная модель дуговой сварки трубной заготовки из стали 08Г2ФБТ с присадочной проволокой Св-08ГСМТс учетом структурно-фазовых превращений в металле сварного шва и ОШЗ.

2. По результатам численных экспериментов было выявлено, что изменение ширины сварного шва в зависимости от исходных структурных составляющих в варианте поставки стали 08Г2ФБТ в соответствии с ГОСТ ISO 3183-2012, не превышает 15%, а размер ширины обратного валика больше зависит от температуры подогрева (отклонение до 29% от варианта сварки с подогревом в 200°С при исходной морфологии с содержанием 100% ферритной фазы), чем от исходной морфологии микроструктурыв металле до сварки (отклонение до 5% от варианта сварки с подогревом в 200°С при исходной морфологии с содержанием 100% ферритной фазы). При этом ширина сварного шва практически не изменяется в зависимости от различной исходной морфологии микроструктуры стали в состоянии поставки как для варианта технологии сварки с подогревом в 200°С, так и без него.

3. Существенный научный интерес и прикладное значение может представлять собой разработка термомодеформационной модели дуговой сварки стали 08Г2ФБТ на базе численной модели дуговой сварки с учетом структурно-фазовых превращений, представленной в статье.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Величко А. А.** Роль тепловых параметров сварки в формировании морфологии микроструктуры и свойств зоны термического влияния при производстве прямошовных труб: дисс...канд. техн. наук. 05.16.01. Москва, 2014. 164 с.
2. **Шоршоров М. Х.** Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке / В.В. Белов. – М: Наука, 1962. – 219 с.
3. **ГОСТ ISO 3183-2012.** Трубы стальные для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия. М: Стандартинформ, 2013. 122 с.
4. **СТО 0220368-011-2007.** Сварка разнородных соединений сосудов, аппаратов и трубопроводов из углеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высоколегированных сталей и сплавов на железоникелевой и никелевой основах. Волгоград: ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры», 2007. 35 с.
5. **Науменко А. А.** Формирование структуры и комплекса свойств хладостойкой стали для труб класса прочности К65 при термомеханической обработке: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01. Москва, 2012. 24 с.
6. **Darmadi, Djarot B.** Residual stress analysis of pipeline girth weld joints: Dissertation submitted for the Degree of Doctor of Philosophy thesis, School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering. University of Wollongong, 2014. 289 p.

## ОБ АВТОРАХ

**МУРУГОВА Оксана Владимировна**, асп. каф. МиТЛП. Дипл. Магистра по направлению 15.04.01 Машиностроения (УГАТУ, 2017). Готовит дис. об исследовании напряженно-деформируемого состояния при сварке.

**НИКИФОРОВ Роман Валентинович**, доцент каф. МиТЛП, канд. техн. наук.

## METADATA

**Title:** Modeling of structural-phase transformations in the welding of high-strength pipe steels taking into account various options for the supply of steel.

**Authors:** O. V. Murugova<sup>1</sup>, R.V. Nifiriv

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>murugova.oxana@mail.ru, <sup>2</sup>nikiforov\_svarka@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 85-90, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print).**

**Abstract:** The article is devoted to the modeling of structural-phase transformations during arc welding in protective gas of high-strength steel X80 in a welded seam and a welded zone in the ANSYS / Mechanical package. Based on the results of numerical modeling, the relationship between the initial morphology of the steel microstructure and the parameters of the weld geometry was revealed.

**Key words:** pre-heating, structural-phase transformations during welding, numerical simulation arc welding, kinetics of phase transformations, steel of strength class X80.

**About authors:**

**MURUGOVA, Oxana Vladimirovna**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Machines and technologies of foundry production. Master of mechanical engineering (UGATU, 2017).

**NIKIFOROV, Roman Valentinovich**, Associate Professor of the Department of Machines and technologies of foundry production, candidate of technical sciences

## Триботехнические свойства покрытий с различными технологиями их нанесения

В. Р. Мухамадеев<sup>1</sup>, А. М. Мигранов<sup>2</sup>, Р. Р. Кутлубаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>vener\_muhamadeev@mail.ru, <sup>2</sup>migranov\_art\_1993@inbox.ru, <sup>3</sup>imperial\_1997@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Приведены результаты триботехнических испытаний покрытий при трении с антифрикционными материалами на основе фторопласта. Описывается оценка влияния материалов покрытий и технологий их нанесения на свойства основного материала. Показано положительное влияние функциональных наполнителей на эксплуатационные характеристики исходных материалов с одновременным сохранением исходных свойств. Результаты исследований показали вероятность эффективности применения различных видов упрочняющей обработки, влияющих на многие структурные поверхностные факторы.

**Ключевые слова:** трение; износостойкость; покрытие; антифрикционный материал; фторопласт; наполнители; сталь; закалка; коэффициент трения.

### ВВЕДЕНИЕ

Экстремальные условия эксплуатации машин и агрегатов не позволяют использовать в узлах трения материалы со смазкой вследствие выгорания последней, либо загрязнения ею технологических продуктов и многих других отрицательных эффектов. Отсюда и возникла острая необходимость в создании новых классов антифрикционных материалов, способных работать без смазки в узлах трения или так называемые самосмазывающиеся материалы.

Особое место в этом ряду занимают модифицированные наполнителями антифрикционные самосмазывающиеся материалы на основе политетрафторэтилена (фторопласта-4). Эти материалы получили наибольшее распространение благодаря целому комплексу уникальных свойств чистого фторопласта-4, а именно: его исключительной химической стойкости, тепло-, термо- и водостойкости, чрезвычайно высоким антифрикционным характеристикам, эластичности, способности оставаться работоспособным в широком интервале температур (от  $-269$  до  $+260$  °С) [1].

Введение функциональных наполнителей позволяет направленно улучшать эксплуата-

ционные характеристики композиционных материалов с одновременным сохранением ценных свойств чистого полимера – ПТФЭ. Варьируя наполнителем (его видом, количеством) можно значительно улучшить физико-механические, теплофизические, технологические, триботехнические и другие свойства композиционных материалов, а именно: повысить усталостную и механическую прочность, теплопроводность, твердость, износостойкость и предельно допустимые нагрузки, уменьшить термический коэффициент линейного расширения [2–4].

Нагрузочно-температурный диапазон применения всех выпускаемых антифрикционных самосмазывающихся материалов на основе фторопласта-4 широк, и составляет по температуре от  $-200$  до  $+250$  °С, по нагрузкам от 1,5 до 5,0 МПа (в зависимости от марки материала), при этом линейные скорости допускаются в условиях сухого трения до 5 м/с, а в режиме гидродинамического – до 30 м/с. В качестве сопряженного металлического контртела при эксплуатации графитофторопластовых материалов используют стали без покрытия, стали с хромированным покрытием, бронзу, титан, оксидированный титан.

Целью работы была оценка влияния материалов покрытий и технологий их нанесения на свойства основного металла деталей поршневых компрессоров для нефтехимических (нефтегазовых) предприятий.

Испытания проводились на образцах, изготовленных из стали 30X13. Структурное состояние образцов соответствовало термической обработки: закалка + высокий отпуск.

Исследование триботехнических характеристик и определение предела выносливости материалов были проведены в лаборатории ЦКП УГАТУ в соответствии с «Методикой исследования триботехнических характеристик антифрикционных материалов «№ 000-84-ПМ51» и ГОСТ 25.502-79.

Для исследования влияния материалов покрытий и технологий их нанесения на коэффициент трения и износостойкость основного металла образцов использовался высокотемпературный трибометр «Nanovea» TRB. Испытания были проведены при комнатной и повышенной до 80 °С температурах. Взвешивание образцов и контртел до и после экспериментальных исследований осуществлялось на лабораторных весах XR26 Analytic с точностью  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  г. Контртела представляли собой полусферу из стали 30X13, а также полусферу из материала АФГ80ВС, диаметром 6 мм. Образцы для трибологических испытаний из стали 30X13, имели форму пластин с размерами 20×35×3 мм. После нанесения покрытий часть образцов подвергалась повторной шлифовке для получения требуемых параметров шероховатости поверхности. Объем исследований представляет собой 144 проведенных эксперимента, длительностью 8 часов 53 минуты 20 секунд каждый.

Эксперименты проводились в условиях сухого трения при возвратно – поступательном движении со скоростью перемещения 0,025 м/с при длине пути 800 м. Переменными параметрами являлись:

- давление, оказываемое на контртело в процессе движения, (0,5 МПа и 1 МПа). Контролируемая разность давлений осуществлялась в результате прикладывания нагрузок в виде гирек с определенной массой,
  - температура окружающей среды.
- Наблюдаемые образцы исследовались в

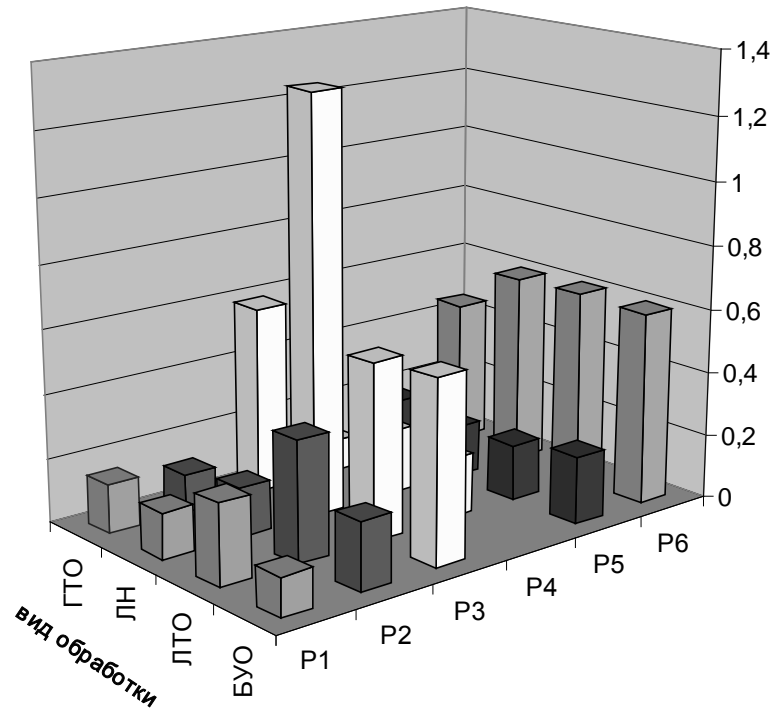
двух состояниях: при комнатной температуре и температуре 80 °С. Температура поддерживалась на протяжении всего эксперимента.

Сводные результаты триботехнических испытаний представлены на рис. 1 и 2, где в части виды обработки приняты следующие сокращения: БУО – без упрочняющей обработки, ЛН – лазерная наплавка (шлифованный), ЛТО – лазерная термическая обработка, ГТО – HVOF АСО дробь (шлифованный).

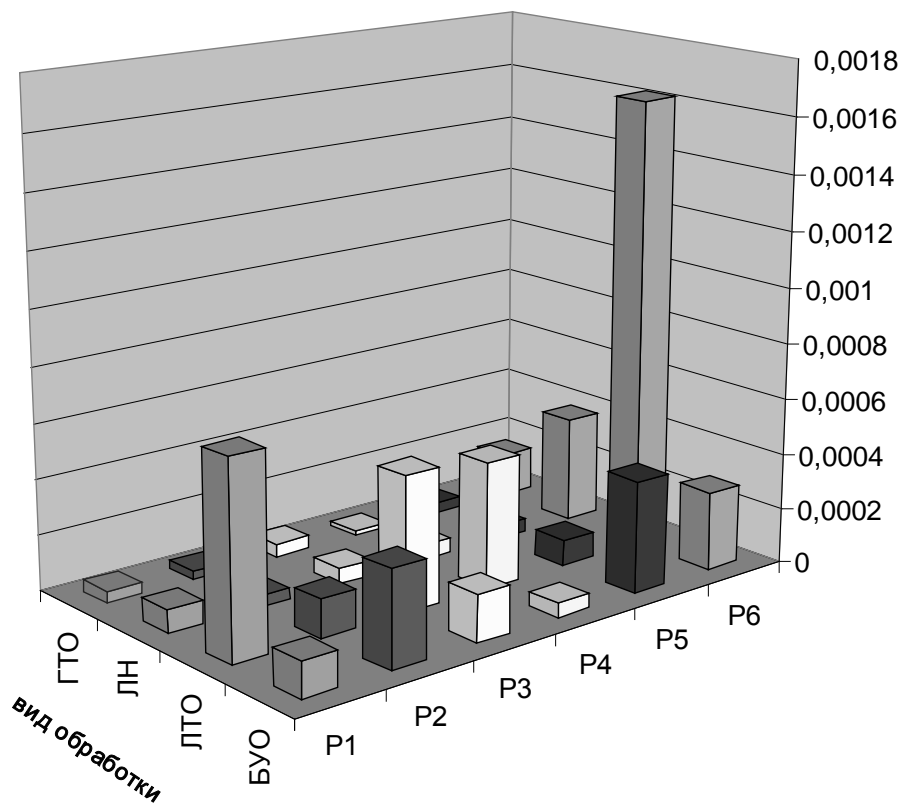
Результаты экспериментальных исследований триботехнических характеристик пары «контртело АФГ80ВС – образец» при различных температурах и давлениях позволили установить, что:

- наименьший коэффициент трения обеспечивает ГТО, чуть хуже – при ЛН, причем как при различных температурах, так и давлениях. Это связано с меньшей шероховатостью и уменьшением диапазона приработочного износа; наибольшим значением коэффициента трения обладает ЛТО ( $f_{тр} = 0,377$  при  $t = 20$  °С,  $p = 0,5$  МПа), что связано с шероховатостью поверхности образца после обработки ввиду исключения шлифования;
- наибольшее количество случаев налипания материала контртела на образец наблюдается при температуре  $t = 80$  °С и давлении  $p = 0,5$  МПа. Уменьшение налипания материала контртела при давлении  $p = 1$  МПа происходит вследствие отслаивания и удаления его из контактной зоны, при этом было установлено, что вид упрочняющей термообработки не оказывает существенного влияния на налипание.

Вероятность эффективности применения того или иного вида упрочняющей обработки зависит от многих факторов, в частности от возможной дальнейшей финишной обработки поверхности после ЛТО; от структурно-фазового состояния поверхности образца после термообработки; от микротопографии поверхности; от серийности выпускаемой детали, области ее применения (например, ответственные узлы и агрегаты в авиационной технике, обеспечивающие ее безопасность и живучесть) и технологической себестоимости этого вида упрочнения.



**Рис. 1.** Сравнительная зависимость коэффициента трения от вида упрочняющей обработки:  
*P1 – АФГ80ВС;  $p = 1$  МПа;  $t = 20$  °С; P2 – АФГ80ВС;  $p = 0.5$  МПа;  $t = 20$  °С;  
P3 – сталь 30Х13;  $p = 1$  МПа;  $t = 20$  °С; P4 – АФГ80ВС;  $p = 1$  МПа;  $t = 80$  °С;  
P5 – АФГ80ВС;  $p = 0.5$  МПа;  $t = 80$  °С; P6 – сталь 30Х13;  $p = 1$  МПа;  $t = 80$  °С*



**Рис. 2.** Сравнительная зависимость уменьшения массы контртела при трении от вида упрочняющей обработки:  
*P1 – АФГ80ВС;  $p = 1$  МПа;  $t = 20$  °С; P2 – АФГ80ВС;  $p = 0.5$  МПа;  $t = 20$  °С;  
P3 – сталь 30Х13;  $p = 1$  МПа;  $t = 20$  °С; P4 – АФГ80ВС;  $p = 1$  МПа;  $t = 80$  °С;  
P5 – АФГ80ВС;  $p = 0.5$  МПа;  $t = 80$  °С; P6 – сталь 30Х13;  $p = 1$  МПа;  $t = 80$  °С*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чичинадзе А. В.** Полимеры в узлах трения машин и приборов: справочник. М.: Машиностроение, 1988. 327 с. [A. V. Chichinadze. "Polymer materials in machines friction units and equipments: reference manual". (in Russia). Moscow: Mashinostroenie. 1988 ]

2. **Новиков И. И., Захаренко В. П., Ландо Б. С.** Бесмасляные поршневые уплотнения в компрессорах. Л.: Машиностроение, 1981. 238 с. [I. I. Novikov, V. P. Zakharenko, B. S. Lando. "Oil-free piston seals in compressors". (in Russia). Leningrad: Mashinostroenie. 1981 ]

3. **Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Колмаков А. Г., Рыбакова Л. М.** Методы испытаний на трение и износ. Интернет инженеринг. 2001. 152 с. [A. G. Kolmakov, L. M. Rybakova, L. I. Kuksenova and, V. G. Lapteva, "Friction and Wear Tests", Moscow: Internet Inzhiniring, 2001.. (in Russia) ]

4. **Петровская А. В.** Трибологические свойства наномодифицированных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / А.В. Петровская, С.А. Хатилов. // Материаловедение. – 2011. – № 4. – С. 49 – 53. [A. V. Petrovskaya, S. A. Khatipov, "Tribological properties of nanomodified composite materials based on polytetrafluoroethylene", (in Russia), in Materialovedenie, №4, pp. 49-53, 2011. ]

## ОБ АВТОРАХ

**МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович**, ст. преподаватель каф. ОКМиМ. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. износостойкости режущего инструмента.

**МИГРАНОВ Артур Марсович**, асп. каф. ОКМиМ. Дипл. магистр техники и технологии (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2017). Иссл. в обл. триботехнических параметров смазочных жидкостей.

**КУТЛУБАЕВ Рафаэль Рустамович**, студент каф. АТП (УГАТУ). Исследование триботехнических свойств наноструктурных покрытий.

## METADATA

**Title:** Tribotechnical properties of coatings with different technologies of their application

**Authors:** V.R. Muhamadeev<sup>1</sup>, A. M. Migranov<sup>2</sup>, R. R. Kutlubaev<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> vener\_muhamadeev@mail.ru, <sup>2</sup> migranov\_art\_1993@inbox.ru, <sup>3</sup> imperial\_1997@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 91-94, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The results of tribological tests of the coatings at friction with anti-friction material based on PTFE. The assessment of the influence of coating materials and technologies of their application on the properties of the base material is described. The positive influence of functional fillers on the performance characteristics of the initial materials while maintaining the initial properties is shown. The results of studies have shown the probability of effective application of various types of hardening treatment, affecting many structural surface factors.

**Key words:** friction, wear, coating, friction material, PTFE, fillers, steel, hardening, coefficient of friction.

**About authors:**

**MUHAMADEEV, Vener Rifkatovich**, senior lecturer of the department of bases of constructing of mechanisms and machines of USATU. Mag.-ing. (USATU, 2007). Area of research in the field of wear resistance of the cutting tool.

**MIGRANOV, Artur Marsovich**, postgraduate student of the sub-department "Bases of the designing of mechanism and machines" USATU. Mag.-ing. (Gubkin University, 2017). Area of research in tribotechnical parameters of lubricating fluids.

**KUTLUBAEV, Rafael Rustamovich**, student of the sub-department "Technological process automation" USATU. Area of research in tribotechnical properties of nanostructured coatings.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТУРБОПРИВОДА ПИТАТЕЛЬНОГО НАСОСА ДЛЯ БЛОКА ПГУ-220 В ПРОГРАММЕ BOILER DESIGNER

И.И. Мухаметдинов<sup>1</sup>, В. М. Кудоярова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>m\_ilgiz@mail.ru, <sup>2</sup>ya\_vilina@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Актуальность работы, в данной статье, заключается в том, что в настоящее время одним из наиболее эффективных методов выработки тепловой и электрической энергии является парогазовая технология с использованием комбинированных парогазовых установок (КПГУ). Вопрос повышения эффективности данных установок все еще остается открытым, поэтому в работе предлагается использовать турбопривод питательного насоса вместо электрического привода и проанализировать его эффективность. В качестве расчетной модели выберем ПГУ-220 и составим в программном комплексе Boiler Designer.

**Ключевые слова:** КПГУ; КПД; турбопривод; питательный насос; ПГУ-220; расчетная модель; электродвигатель; котел-утилизатор; теплообменник; Boiler Designer.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее эффективной технологией выработки тепловой и электрической энергии является парогазовая технология с использованием комбинированных парогазовых установок (ПГУ). Однако, возможности для модернизации ПГУ и экономии топлива остаются предметом поисков инженеров и ученых.

Большое внимание еще 50-х годов прошлого столетия уделяется вопросу сравнения эффективности и экономичности электропривода питательного насоса (ПН) и турбопривода, на который подается пар из отбора паровой турбины. Например, в [1–5] указано соотношение КПД указанных приводов, согласно которым турбопривод является наиболее эффективным. В той же работе показано, что эффективность будет в большой степени зависеть от внутреннего относительного КПД приводной турбины. А значит, при выборе турбопривода предпочтение следует отдавать наиболее совершенным агрегатам, внутренний относитель-

ный КПД которых выше, чем тот же КПД для отсека, который «минует» отбираемый на привод пар.

Турбоприводы ПН, применяемые для паровых блоков высокой мощности, редко применяются для парогазовых блоков. Поэтому целью настоящей работы является анализ эффективности применения турбопривода ПН на примере блока ПГУ-220.

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТУРБОПРИВОДА ПН

В состав рассматриваемого блока входит газотурбинная установки типа ГТЭ-160, паровая турбина Т-60/73-7,8/0,04 и котел-утилизатор типа Е-220/50. Котел и турбина двух давлений, контур высокого давления котла-утилизатора питается электронасосом типа ПЭ-240-110 с установленной мощностью привода электродвигателя порядка 1,6 МВт. Суммарная номинальная электрическая мощность составляет 220 МВт, тепловая – 145 Гкал/ч. Упрощенная схема энергоблока приведена на рис. 1.

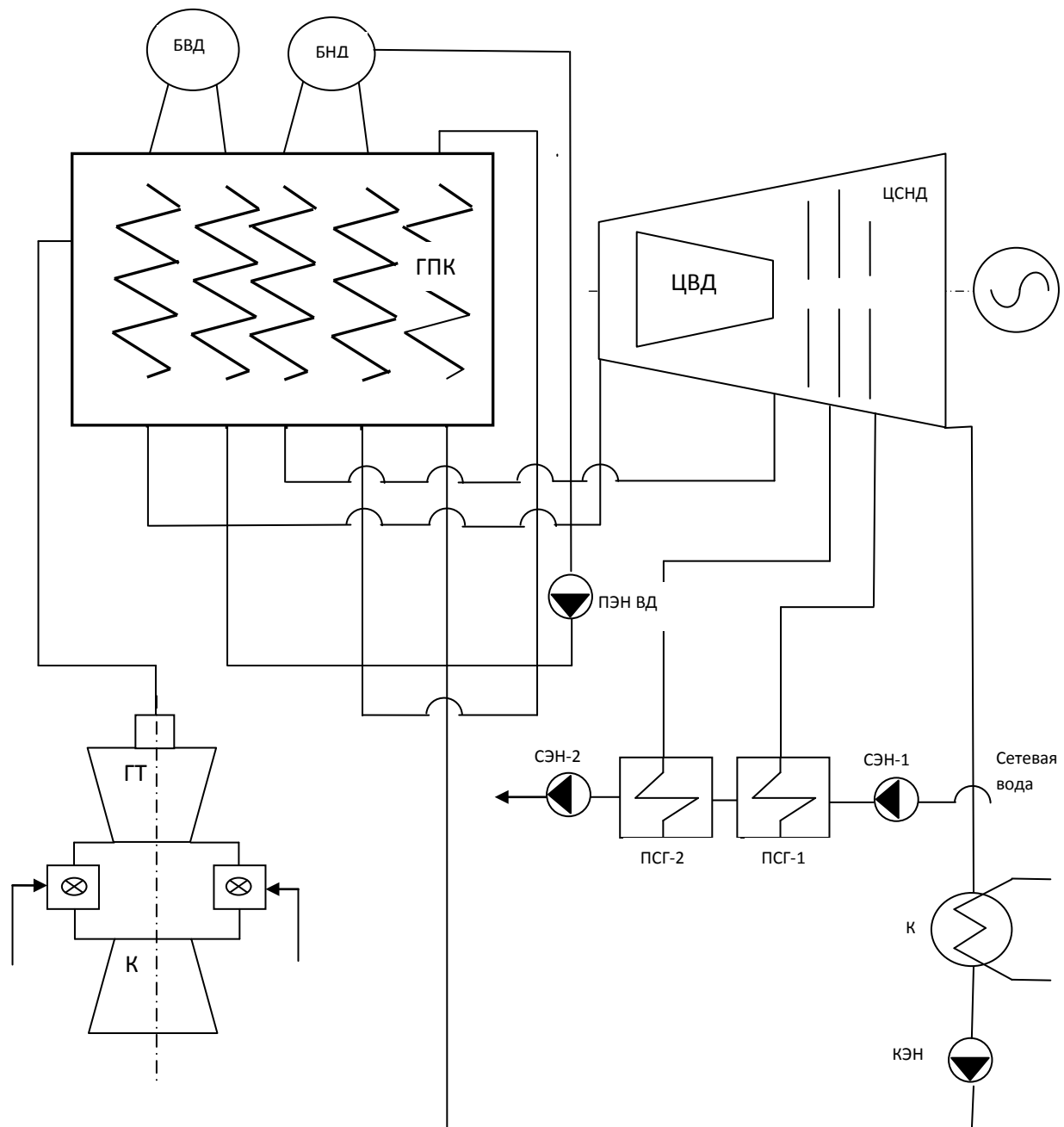


Рис. 1. Упрощенная схема энергоблока ПГУ-220

Расчетная модель ПГУ-220 была составлена в программном комплексе Boiler Designer. При моделировании наибольшую сложность представляет создание модели котла-утилизатора, и эта тема заслуживает отдельного обсуждения. В итоге для модели ПГУ-220 спроектированы:

- газовая турбина с электрогенератором;
- газоход котла-утилизатора;
- пароводяные тракты контуров низкого и высокого давления котла-утилизатора;

- модели для определения гидравлического сопротивления трактов котла-утилизатора;

- модель паротурбинной части с двумя контурами давлений, подогревателями сетевой воды, водо-водяным теплообменником котла-утилизатора и питательным насосом с приводом от электродвигателя и аналогичная модель с приводом ПН от турбопривода.

Изменение эффективности работы схем оценивается по изменению удельных расхо-

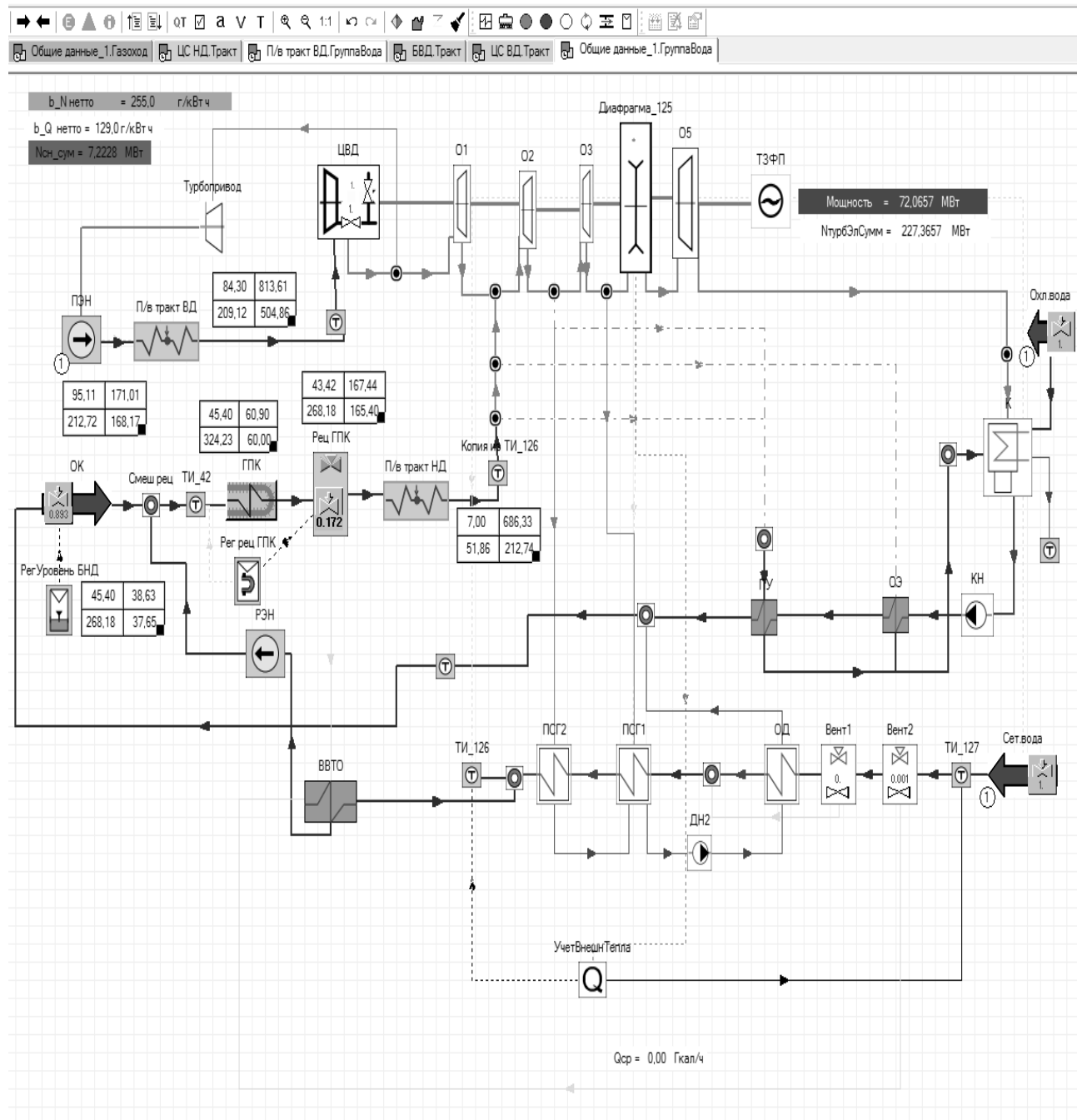


дов условного топлива на выработку электрической и тепловой энергии при работе с теплофикационной нагрузкой и без нее.

В расчете так же не участвуют некоторые механизмы собственных нужд – такие как циркуляционные насосы систем охлаждения конденсатора, насосы маслосмазки ГТУ и паровой турбины – указанные собственные нужды не изменяются при введении турбопривода.

Расчетная схема с применением турбопривода приведена на рис. 2.

Необходимо отметить, что расчет удельных расходов топлива в программе производится по физическому методу, более корректно было бы производить расчет по нормативному методу, однако для отражения возможной эффективности схемы это не играет большой роли.



**Рис. 2.** Расчетная схема контура паровой турбины в программе Boiler Designer с турбоприводом питательного насоса

Ниже приведена таблица удельных расходов топлива, полученных для двух схем на разных режимах работы (табл. 1).

Таблица 1  
Удельные расходы топлива для различных схем и режимов работы

Параметр	Вид схемы	
	С турбоприводом ПН	С электроприводом ПН
Теплофикационный режим		
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии, г/кВт*ч	165,7	167,4
Удельный расход топлива на выработку тепловой энергии, г/кВт*ч	129,0	129,0
Конденсационный режим		
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии, г/кВт*ч	256,9	255,0
Удельный расход топлива на выработку тепловой энергии, г/кВт*ч	-	-

Из табл. 1 видно, что при использовании турбоприводной установки происходит снижение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии на теплофикационном режиме на 1,7 г/кВт\*ч, на конденсационном – на 1,9 г/кВт\*ч. Таким образом, установка турбопривода способна дать заметную экономию топлива – при работе на конденсационном режиме вплоть до 418 кг.у.т/час, а значит – повышение эффективности работы ПГУ примерно на 2,7%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты анализа применения турбопривода питательного насоса, которым предлагается заменить электрический привод.

Изменение эффективности работы схем оценивалось по изменению удельных расхо-

дов условного топлива на выработку электрической и тепловой энергии при работе с теплофикационной нагрузкой и без нее.

Расчетная модель ПГУ-220 была составлена в программном комплексе Boiler Designer, были спроектированы все основные компоненты КПУ и получено значение удельных расходов топлива для различных схем и режимов работы.

Выяснилось, что замена электропривода питательного насоса на турбопривод способна дать заметную экономию топлива и повышение эффективности работы ПГУ примерно на 2,7%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагин В. А. Тепловая экономичность привода питательных насосов электростанций. Известия Томского политехнического университета – Томск: Издательство ТПУ, 1962. [ V. A. Bragin. Thermal efficiency of the drive feed pumps of power plants. News of Tomsk Polytechnic University-Tomsk: Publishing house "TPU", 1962. ]
2. Клименко А. В., Зорин В. М. Теплоэнергетика и теплотехника: Справочник.– М.: Издательство МЭИ, 2000. [ A. V. Klimenko, V. M. Zorin. Heat power Engineering and heat engineering: Reference book.– Moscow: Publishing house "MPEI", 2000. ]
3. Стерман Л. С. Тепловые и атомные электростанции: Учебник для вузов – М.: Энергоиздат, 1982. [ L.S. Sterman. Thermal and nuclear power plants: Textbook for universities – Moscow: "Energoizdat", 1982. ]
4. Доброхотов В. И., Жгулев Г. В. Эксплуатация энергетических блоков.-М:Энергоатомиздат. 1987. 256с. [ V. I. Dobrokhотов, G. V. Shulev. Operation of power units.- Moscow: "Energoatomizdat". 1987. 256 p. ]
5. Гиршфельд В. Я., Князев А. М., Куликов В. Е. Режимы работы и эксплуатации ТЭС. Учебник для вузов. М.: Энергия. 1980. 288с. [ Y.V. Hirschfeld, A.M. Knyazev, V.E. Kulikov. Operation Modes and operation. Textbook for high schools. Moscow: "Energya". 1980. 288 p. ]

### ОБ АВТОРАХ

**МУХАМЕТДИНОВ Илгиз Илдусович**, магистрант каф. АТИТ. Дипл. Инженер по наладке и испытаниям (АГНИ, 2016). Готовит дис. о замене турбопривода ПН и модернизации АСУ ТП Затонской ТЭЦ.

**КУДОЯРОВА Вилина Маратовна**, доцент, канд. техн. наук каф. АТИТ. Дипл. Инженер по авиационной и ракетно-космической теплотехнике (УГАТУ, 2001). Канд. техн. наук по математическому моделированию, численным методам и комплексам программ (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. тепловых процессов внутри теплозащитных полимерных композиционных материалов при высоких температурах.

**METADATA**

**Title:** The analysis of the efficiency of the turbo-feed pump for the unit PGU-220 at the boiler designer software.

**Authors:** I. I. Mukhametdinov<sup>1</sup>, V. M. Kudoyarova<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>m\_ilgiz@mail.ru, <sup>2</sup>ya\_vilina@mail.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 95-99, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The relevance of the work, in this article, lies in the fact that at present one of the most effective methods of generating thermal and electrical energy is the steam and gas technology using combined steam and gas plants (KSPU). The question of increase of efficiency of these units is still open, therefore this paper proposes to use turbopro-water feed pump instead of the electric drive and to perform its effectiveness. As the estimated model will choose the PGU-220 and put in the software package Boiler Designer.

**Key words:** Combined steam and gas plant, efficiency, turbine drive, feed pump, SGU-220, computational model, electromotor, recovery boiler, cooler, Boiler Designer.

**About authors:**

**MUHAMETDINOV, Ilgiz Ildusovich**, undergraduate of the Department. AHPEHE. Dipl. Engineer on adjustment and tests (AGNI, 2016). Cooks dis. about replacement of the PTN turbine drive and modernization of APCS of Zatonkaya PP.

**KUDOYAROVA, Vilina Maratovna.**, associate Professor, Ph. D., DEP. AHPEHE. Dipl. Engineer for aviation and space-rocket heat engineering (UGATU, 2001). Cand. tech. of science in mathematical modelling, numerical methods and complexes of programs (USATU, 2005). Issl. in the region of thermal processes inside heat-protective polymer composite materials at high temperatures.

## СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

С. П. Павлинич<sup>1</sup>, И. И. Шайхутдинова<sup>2</sup>

peacelife@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Технологическая подготовка производства на этапе реализации проекта создания центра технологической компетенции алюминиевого и титанового литья является актуальной задачей. В практике литейного производства исторически сложилась ситуация, когда освоение и запуск производства требует привлечения значительных временных и трудовых ресурсов. При этом специалистами единодушно признается факт отсутствия иных эффективных вариантов, применимых в качестве альтернативы. На этом фоне все более обостряется проблема использования интеллектуальных систем, позволяющих формализовать процесс выбора способа литья и соответственно вида технологической подготовки производства.

**Ключевые слова:** литейное производство; технологическая подготовка производства; алюминиевые сплавы; интеллектуальная система; многомерная модель; нечеткая логика; матрица знаний; многономенклатурное производство; искусственный интеллект; многокомпонентная интеллектуальная система.

### ВВЕДЕНИЕ

В современном авиационном машиностроении применяется большой процент деталей полученных литьем из алюминиевых сплавов. Поэтому номенклатура таких предприятий может составлять более тысячи наименований. Отсюда автоматизация процесса технологической подготовки производства (ТПП) является актуальной задачей литейного производства.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА

Совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства называют ТПП. [1–3] ТПП - вид производственной деятельности предприятия (группы предприятий), обеспечивающей технологическую готовность производства к изготовлению изделий, отвечающих требованиям заказчика или рынка данного класса изделий.

Целью ТПП является оптимальное по срокам и ресурсам обеспечение технологической готовности производства к изготов-

лению изделий в соответствии с требованиями заказчика или рынка данного класса изделий.[4] Сложность периода технологической подготовки производства состоит в том, что все работы должны вестись в кратчайшие сроки с минимальной трудоемкостью и стоимостью.

Длительность и объем технологической подготовки производства определяется сложностью изготавливаемого изделия, характером применяемых технологических процессов и типом производства. Чем больше количество и сложность используемого оборудования, тем больше объем и длительность подготовки. Общая схема ТПП адаптированная к алюминиевому литью была разработана в [5].

### КРАТКИЙ ОБЗОР ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ

В рамках реализации проекта создания центра технологической компетенции алюминиевого и титанового литья предполагается сконцентрировать производство отли-

вок из алюминиевых сплавов для предприятий, входящих в состав АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» производственной мощностью 375 тонн годного литья, с возможностью выхода на 600 тонн. Номенклатура по алюминию составляет 1210 позиций.

Анализ номенклатуры показал, что основные детали представлены заготовками из следующих сплавов на основе алюминия: АК7пч; АК5М; АК12М2; АК12М2МгН; АК9ч; AS7G.

Более 80% заготовок изготавливаются из сплава АК9ч. Для обеспечения производства алюминиевых отливок ЦТК АТ из сплава АК9ч максимально эффективно подходит газовая плавильная печь шахтного типа фирмы. Печь способна одновременно выдать до 1000 кг расплава. Газовые плавильные печи шахтного типа отвечают всем требованиям современного литейного производства.

Шихта подаваемого алюминиевого сплава должна соответствовать требованиям технологического процесса по качеству без загрязнений. При хранении чушек сплава под открытым небом значительно снижается его качество. В печах шахтного типа происходит испарение влаги в зоне предварительного прогрева. Закрытая конструкция печи снижает излишний контакт расплавленного металла с кислородом воздуха. Горелка в зоне плавки размещена так, что исключается непосредственный контакт «пламя – металл» и тем самым удается снизить образование оксидов. Предварительно прогретая шихта бестурбулентно стекает в ванну термостатирования. Твердые остатки оседают в зоне плавки и затем удаляются из неё. Кроме того, преимуществом печи с двумя отдельными зонами для плавки и выдержки является постоянная температура сплава в зоне термостатирования. Конструкция печи гарантирует непрерывность плавки с возможностью одновременного отбора расплава.

Данная газовая печь соответствует объему производства ЦТК АТ и обеспечивает:

- оптимальные показатели по потреблению энергии в расчете на тонну металла;

- высокий выход металла (минимальный угар и другие потери);
- долговечность;
- соответствие требованиям охраны окружающей среды;
- низкие эксплуатационные расходы;
- длительный срок службы футеровки.

Приготовление расплавов из сплавов АК7пч; АК5М; АК12М2; АК12М2МгН; AS7G; потребность в которых невелика, производится на двух станциях плавения на базе электрических плавильно-раздаточных тигельных печей. Станции расположены на нижнем уровне производственного корпуса, оснащены полуавтоматической системой замены раздаточных печей, которая позволяет оперативно менять тигельные раздаточные печи на машинах литья под низким давлением (МЛНД), не загромождая производственные площади. Замена происходит при помощи механизмов и приводов транспортной тележки. Пустая печь заменяется на заполненную свежим, дегазированным расплавом с закрытой крышкой и установленным металлопроводом. При перемещении нагревательные элементы печи находятся в подключенном состоянии посредством контактной электрической сети. Пустая печь доставляется на станцию плавения для очистки, плавления, обработки расплава.

Для обеспечения качества сплава и снижения количества металлургических дефектов заготовок, в техпроцессе применяется дегазация расплава в ковше инертным газом, данный метод очистки позволяет значительно уменьшить обработку расплава флюсами. Эффективность процесса повышается за счет вращения задувающего ротора и обеспечивает высокую степень очистки расплава при низком расходе газа. Все операции по дегазации производятся в автоматическом режиме по заданной программе в соответствии требованиями технологического процесса. Этапы дегазации расплава:

- Ротор с небольшой подачей инертного газа вводится в ковш с расплавом;
- После погружения на заданную глубину автоматически увеличивается подача

инертного газа, и запускается вращение ротора для распределения газа в расплаве;

- Через заданное время подача газа постепенно прекращается, ротор выводится из ковша, и обработка завершается.

Плавильное отделение оборудовано установками подогрева ковшей, которые позволяют поддерживать технологическую температуру в ковше при минимальном расходе газа. Установка предназначена для подогрева и сушки ковшей вместимостью до 1000 кг. Позволяет экономить природный газ за счет автоматической регулировки подачи газа в горелку и воздуха в зону горения. Горелка разжигается только при наличии ковша. В корпус горелки встроены запальный и ионизационный электроды, которые обеспечивают её надежную работу (розжиг и контроль).

Стержни изготавливаются по холодной стержневой оснастке по технологии «колд-бокс амин процесс». В проекте реализован производственный комплекс на базе двух стержневых автоматов с надувной головкой объемом 80 литров для крупногабаритных стержней и 10 литров для средних и мелких стержней. Оба автомата имеют общую систему смесеприготовления производительностью 5т/ч. Подача стержневой смеси осуществляется пневмотранспортом по запросу от самого стержневого автомата. Данное оборудование позволяет применять стержневую оснастку, изготовленную из любых конструкционных материалов, в том числе из пластмассы, дерева и комбинаций из этих материалов.

Формовочное отделение предназначено для изготовления разовых форм и стержней из песчаных смесей, а также регенерации использованных смесей с целью повторного использования песка в производственном цикле. Изготовление разовых форм производится по технологии PER-SET, особенность которой заключается в использовании холодной оснастки. При использовании технологии PER-SET можно изменять временной интервал затвердевания смеси, регулируя количество вводимого в формовочную смесь катализатора. Формовочное отделение оборудовано смесителями непрерывного действия для подготовки

формовочной смеси. Заполнение форм происходит на вибростолах, что позволяет получить необходимые параметры по степени уплотнения формовочной смеси, позволяет равномерно заполнять форму, не деформируя формообразующую модельной оснастки, обеспечивая высокую производительность труда работников. Для изготовления деталей опытного производства, при изготовлении единичных деталей без оснащения, по чертежу, (3D-модели) применяется установка быстрого прототипирования.

Согласно проработанной номенклатуре отливок планируется изготовление небольшого количества алюминиевых заготовок массой более 150 кг и габаритами более 1000 мм. Для изготовления больших песчаных форм используется смеситель для больших форм. Для изготовления таких деталей в проекте предусмотрено изготовление отливок методом гравитационной заливки в разовые песчаные формы.

Для повышения качества заготовок, уменьшения засоров, улучшения чистоты поверхности деталей применяется покраска формообразующих песчаных форм с последующим обжигом.

Формовочные линии крупных и средних форм оборудованы кантователями форм для спаривания половинок разовых песчаных форм. Для крупных форм применяется цепной кантователь, для средних форм используется гидравлический кантователь. Цепной кантователь более универсален, что позволяет использовать формы различных типоразмеров, преимущество гидравлического кантователя – более точное позиционирование форм.

Выбор технологии литья под низким давлением обусловлен высокими требованиями по всем основным параметрам, определяющим качество литых заготовок (макроструктуре, механическим свойствам, герметичности). Литьё возможно в металлические формы и в разовые разрушаемые формы, изготовленные по традиционным технологиям или методом быстрого прототипирования.

Для литья мелких заготовок под низким давлением предусмотрена одна МЛНД с двумя постами для постановки форм. Тигельная печь объемом 300 кг подается в

установку полуавтоматической системой замены раздаточных печей. Для подачи форм под заливку используются короткие рольганги. Формы подготавливаются по одной справа и слева. Залитые формы выкатываются обратно. Система оборудована прижимом с автоматическим распознавателем высоты форм. Производительность установки 5-10 форм в час (в зависимости от толщины стенки и металлоемкости отливки).

Для изготовления средних заготовок в проекте предусмотрена установка двух МЛНД, что позволит получить производительность по заливке 12 форм в час. Это оборудование предназначено для изготовления отливок с массой заливаемого сплава от 0,5 до 100 кг.

Для заливки заготовок большой массы применяется одна МЛНД производительностью 1 форма в час. Машина работает с тигельными печами вместимостью 1100 кг, доставка которых осуществляется при помощи полуавтоматической челночной системы. Машина оборудована стационарными прижимами для песчаных форм и пакетов и автоматическими распознавателями высоты форм.

Для литья в постоянные формы предусмотрено две МЛНД. Машины обеспечивают сплавом тигельными печами вместимостью 1100 кг. Замена тигельных раздаточных печей осуществляется также при помощи полуавтоматической челночной системы.

После заливки формы по рольгангам выкатываются в зону охлаждения. Остывшие до температуры, заданной технологическим процессом, формы помещаются в кабину с выбивной решеткой. Выбивка форм происходит на выбивной решетке. После выбивки формовочная смесь поступает на установку регенерации. После регенерации и охлаждения песок возвращается в производственный цикл. Производительность линии регенерации:

- Производительность по песку дробилки комьев - 25 тн/ч;
- Производительность по песку охладителя регенерации - 25 тн/ч;
- Производительность по песку термической регенерации - 3 тн/ч;

- Производительность формовочного оборудования мелких заготовок - 20 шт/ч;
- Производительность формовочной линии средних заготовок - 12 шт/ч;
- Производительность формовочной линии крупных заготовок - 1 шт/ч.

На первой ступени детали будут проходить через отдельную молотковую станцию для предварительной разбивки стержней. После этого формы загружаются в вибрационную станцию, где частично разрушенные стержни под действием вибрации окончательно разрушаются и удаляются из внутренних полостей отливки. После выбивки формовочная смесь поступает на установку регенерации.

Для обработки поверхности отливок проектом предусмотрено использование дробемётных установок. С их помощью можно удалить окалину, заусенцы, улучшить шероховатость поверхности, очистить заготовки от остатков песка, упрочнить поверхность детали, удалить окисную пленку, улучшить адгезию для последующего покрытия, улучшить внешний вид литья. Для мелких и средних заготовок используется дробемёт лоткового типа с резиновой лентой, для крупных заготовок - с Y-образной подвесной дорогой.

В проекте предусмотрена установка шести термических камерных печей, которые позволяют проводить термообработку, в соответствии с требованиями технологического процесса для каждой конкретной заготовки.

#### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРИ ТПП

В практике литейного производства исторически сложилась ситуация, когда освоение и запуск производства требует привлечения значительных временных и трудовых ресурсов. При этом специалистами единодушно признается факт отсутствия иных эффективных вариантов, применимых в качестве альтернативы. На этом фоне все более обостряется проблема использования интеллектуальных систем, позволяющих формализовать процесс выбора способа литья и соответственно вида ТПП.

Для достижения заданных целей разработана комплексная многомерная модель в которой рассмотрены основные факторы,

влияющие на выбор способа литья и позволяющие учесть налагаемые технологические ограничения для отливок из алюминиевых сплавов [1]. Для каждого из рассмотренных видов литья построена многомерная модель, отражающая его возможности. Построена комплексная многомерная модель, которая отражает возможность получения любой отливки из алюминиевых сплавов альтернативными способами литья. Построенные многомерные модели позволяют учесть специфику конкретного производства путем наложения дополнительных ограничений (например, мощность установок, габаритные размеры формы, опоки и т.д.) Разработанная многомерная модель адаптирована для конкретного производства ЦТК АТ и может быть применена при работе в ручном режиме. Это позволит сократить время выбора способа литья для новой отливки и более полно использовать имеющееся в цехе оборудование. На данный момент ЦТК приобретен современный литейный комплекс для изготовления отливок методом литья под низким давлением в постоянные металлические и разовые песчаные формы. Комплекс включает в себя плавильную печь, формовочные линии с системой пневмотранспорта и термической регенерацией песка, литейные машины с двумя транспортными системами доставки и замены раздаточных печей.

На следующем этапе исследования в [2] рассмотрена возможность применения одного из методов искусственного интеллекта – нечеткой логики в формализации процесса выбора наиболее рационального способа получения отливки: по размерным характеристикам детали, техническим условиям конструктора и параметрам бизнес-требований. Показан пример формирования матрицы знаний на основе требований нечеткой логики для работы компьютерной программы выбора способа литья в условиях многономенклатурного производства отливок различного назначения.

Таким образом, рассмотрена возможность применения элементов искусственного интеллекта (ИИ), а именно алгоритмов нечеткой логики при решении задачи выбора наиболее рационального способа изго-

товления отливки. Дальнейшее развитие применения алгоритмов нечеткой логики возможно при рассмотрении процесса управления качеством отливки на основных этапах ее получения. Оптимизация технологических процессов получения качественной отливки, а также их исследование, весьма затруднительны, так как эмпирическое выявление закономерностей их протекания, зачастую, является задачами регрессионного анализа. Задачи такого рода уже при двадцати влияющих параметрах в значительной мере стохастические и находятся за пределами возможностей аналитических методов решения.

Для такого класса систем в середине шестидесятых годов начал развиваться новый подход, названный гибридными системами. [6] Под гибридной интеллектуальной системой (ГиИС) принято понимать систему, в которой для решения задачи используется более одного метода имитации интеллектуальной деятельности человека. Практическое применение таких систем на машиностроительных предприятиях позволяет повысить качество и сократить время принятия решений, а также способствует росту эффективности работы и повышению квалификации специалистов.

ГиИС относятся к многокомпонентным ИС, которые объединяют в себе различные средства искусственного интеллекта в единую вычислительную модель. Многокомпонентные ИС представляют собой архитектурно более сложные системы, с компонентами, обладающими собственной функциональностью и объединенными в иерархическую многослойную модель. Корректная работа такой системы, таким образом, зависит от правильной работы всех слоев, ошибка в работе одного из слоев может распространяться на другие слои и отражаться на работе всей системы. Многокомпонентные ИС совмещают различные средства ИИ, которые взаимодействуют между собой для получения решения поставленной задачи. Гибридные ИС позволяют более эффективно соединять формализуемые и неформализуемые знания за счет интеграции традиционных средств искусственного интеллекта [6].



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен краткий обзор оборудования и технологии для алюминиевого литья.

Разработана многофакторная модель возможности получения отливок из алюминиевых сплавов всеми применяемыми способами литья, позволяющая формировать модели получения отливок любого реального литейного цеха, выпускающего сложные отливки с учетом возможности данного предприятия и ее загруженности производственной программы.

Рассмотрена возможность применения элементов искусственного интеллекта, а именно алгоритмов нечеткой логики при решении задачи выбора наиболее рационального способа изготовления отливки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюхин А. С., Гайнцева Е. С., Шайхутдинова И. И. Многомерная модель выбора способа литья получения отливок из алюминиевых сплавов // Вестник УГАТУ. 2015. Т.19, №2(68). С.3–6. [ A. S. Gorukhin, E. S. Gayntseva, and I. I. Shayhutdinova, "Multivariate model selection method for production of casting of aluminum alloys.," (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 19, no. 2 (68), pp. 3-6, 2015. ]
2. Шайхутдинова И. И. Нечеткая логика при выборе способа литья // Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике. Сборник материалов I Международной школы-конференции молодых ученых – Саратов: ООО «Издательство «Научная книга»», 2017. С.102-104. [ Shayhutdinova I. I. «Fuzzy logic in the choice of casting method» in Dynamics of complex networks and their application in intelligent robotics. The collection of materials of I International school-conference of young scientists – Saratov: LLC "Publishing house "Scientific book", 2017. pp. 102-104. ]
3. ГОСТ 14.004-83 Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартиформ, 2009. 33 с. [ Technological preparation of production. Terms and definitions of basic concepts, (in Russian), Federal standard R ISO/IEC 14.004-83, Moscow, Standatrinform, 2009 ]
4. ГОСТ Р 50995.3.1-96. Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства. М.: Издательство стандартов, 1997. 16 с. [ Technological support for products development and production. Technological preparation of production, (in Russian), Federal standard R ISO/IEC 50995.3.1-96, Moscow, Standards publisher, 1997 ]
5. Гайнцева Е. С., Шайхутдинова И. И. Проблемы автоматизированного управления литейным производством. // Мавлютовские чтения: всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. УГАТУ – Уфа: УГАТУ, 2015. С.102-104. [ E. S. Gayntseva, I. I. Shayhutdinova, "Problems of automated foundry management.// Mavlutova reading: national youth conference," (in Russian), in Mavlutova reading: national youth conference (SAIT-2009), Ufa, Russia, 2015), pp. 102-104. ]

6. Батыршин И. З. Нечеткие гибридные системы. М.: Физматлит, 2007. 207 с. [ Bатыrshin I. Z. Fuzzy hybrid system, (in Russian). Moscow: Fizmatlit, 2011. ]

## ОБ АВТОРАХ

**ПАВЛИНИЧ Сергей Петрович**, зав. каф. МитЛП. Дипл. инж. по сварочному произв. (УАИ,1976). Д-р техн. наук по литейному производству (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. технологии производства литых деталей для авиамоторостроения.  
**ШАЙХУТДИНОВА Ирина Ириковна** асп. каф. МитЛП. Дипл. инж. (УГАТУ, 2012). Готовит дис. в обл. автоматизации и управления технологическими процессами.

## METADATA

**Title:** A modern approach to the production of castings from aluminium alloys.

**Authors:** S. P. Pavlinich, I. I. Shaikhutdinov

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** peacelife@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 100-105, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Technological preparation of production at the stage of implementation of the project of creating a center of technological competence of aluminum and titanium casting is an urgent task. In practice of foundry production historically there was a situation when development and start-up of production demands attraction of significant temporary and labor resources. While experts unanimously to know about the lack of other effective options are useful as an alternative. Against this background, the problem of the use of intellectual systems that allow formalizing the process of choosing a casting method and, accordingly, the type of technological preparation of production becomes more acute.

**Key words:** foundry; manufacturing; aluminum alloys; intelligent system; multidimensional model; fuzzy logic; matrix knowledge; diversified manufacturing; artificial intelligence; multi-component intelligent system.

**About authors:**

**PAVLINICH, Sergey Petrovich**, Dr. (Habil.) Tech. Sci, Head, Dept. of machines and technology of foundry production. Studies in the production technology of castings for aviation engine building.

**SHAYHUTDINOVA, Irina Irikovna**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Machinery and technology foundry (UGATU, 2012).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОТЯГИВАНИЯ ПУТЕМ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ МНОГОСЕКЦИОННЫХ ПРОТЯЖЕК

А. С. Политов

altair1976politov@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Основываясь на ранее разработанной концепции проектирования протяжного режущего инструмента, представлен анализ влияния профилирования протяжки для обработки сложнопрофильных деталей ГТД из труднообрабатываемых материалов, предложено направление повышения эффективности процесса протягивания в конструктивной оптимизации схемы обработки на основе силовой модели резания многосекционными протяжками, рассмотрена эволюция корригирования профиля зуба протяжки и изложена методика проектирования протяжки с корригированным профилем зуба на основе 3D-моделирования.

**Ключевые слова:** протяжка; схемы резания; детали ГТД; профиль зуба протяжки; протягивание; моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс протягивания на сегодняшний день является одним из прогрессивных в области обработки резанием по причине высокой производительности и обеспечения обработки высокой точности (7 – 6 качества) и малой шероховатости ( $Ra = 1,25 \dots 2,5$  мкм) [1].

Глубокое исследование процесса протягивания при изготовлении деталей ГТД в начале прошлого десятилетия охарактеризовало перспективу повышения эффективности данного вида обработки в многократном увеличении скоростей резания за счет применения твердосплавных протяжек [2]. Наилучшая результативность этого направления получена на операциях предварительной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей ГТД из титановых и жаропрочных сплавов, таких как компрессорные и турбинные диски и лопатки.

Актуальность развития процесса протягивания в отечественном производстве помимо экономических и оборонных интересов обуславливается объективной необходимостью изготовления деталей и узлов ряда ГТД в рамках реализации программы импортозамещения. Так на сегодняшний день в производственном центре ПАО «ОДК-УМПО» по

производству вертолетных двигателей реализуется программа по серийному выпуску компонентов двигателя ВК-2500.

### УПРАВЛЕНИЕ СИЛАМИ РЕЗАНИЯ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ

Такие виды пазов как «ласточкин хвост» в компрессорных и «ёлочный» в турбинных дисках ГТД требуют повышенного внимания к обработке, что обусловлено их эксплуатационной динамикой.

Особенность «ёлочных» пазов турбинных дисков и замков лопаток ГТД ВК-2500 характеризуется миниатюрностью формы и относительно повышенной точностью (рис. 1).

Термодинамические нагрузки работающего двигателя, центробежные силы от вращения ротора, высокое давление и температура газового потока, многоцикловые колебания в системе – в значительной степени отражаются на состоянии замковых соединений дисков с лопатками. В процессе совершенствования и улучшения эксплуатационных характеристик ГТД показатели нагрузок растут, что обуславливает высокие требования разработчиков ГТД к этим элементам [2].

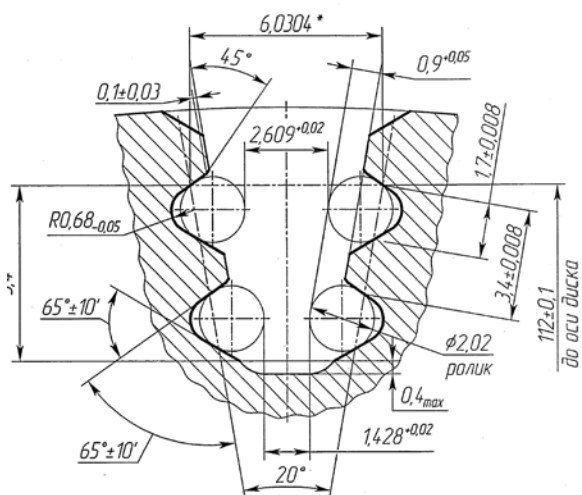


Рис. 1. Операционный эскиз «ёлочного» паза турбинного диска двигателя ВК-2500

При этом по причине высокой хрупкости и трудной обрабатываемости твердого сплава не все операции выполнимы твердосплавными протяжками.

Управление силами резания, т.е. их оптимальное распределение к уменьшению равнодействующей, является объективной необходимостью на современном этапе развития технологии машиностроения. В первую очередь это обусловлено физико-механическими свойствами и силами молекулярных взаимосвязей материалов, которые интенсивно усложняются с целью повышения надежности деталей ГТД, чем в свою очередь ухудшают обрабатываемость и увеличивают составляющие силы резания.

В поисках решения этой задачи зарубежные исследователи разработали силовую модель, позволяющую моделировать силы резания в процессе протягивания с использованием В-сплайнового изображения режущей кромки (рис. 2) [4].

Возможность интерполяции линии режущей кромки на основе силовой модели определяет оптимальное распределение сил резания в процессе обработки, т.е. обеспечивает управление механикой резания.

По методике расчета протяжек с скорректированным профилем зубьев для обработки шлицевых отверстий [1], в отечественном производстве выполнялись расчеты протяжек для обработки пазов типа «ласточкин хвост» и «ёлочный» в дисках ГТД.



Рис. 2. Интерполяция режущей кромки зуба протяжки

### ЭВОЛЮЦИЯ КОРРИГИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ЗУБА ПРОТЯЖКИ

Позднее они были изложены в методике генераторно-ступенчатой схемы резания фасонных пазов (рис. 3), обладающей значительными преимуществами в сравнении с профильной и генераторной схемой [3], т.к. расположение обрабатываемых и обрабатывающих поверхностей под углами  $\alpha$  и  $\tau$  генераторно-ступенчатой схемы способствует снижению трения и создает наиболее благоприятные условия для резания без налипания стружки и уменьшает тепловые нагрузки.

Поскольку данная методика позволяет выполнить расчеты фасонных профилей только с прямолинейными образующими, криволинейные поверхности представляют собой более сложную задачу, состоящую в расчете искаженного профиля, с учетом обеспечения бокового угла  $\tau$  к касательной в каждой точке криволинейного профиля.

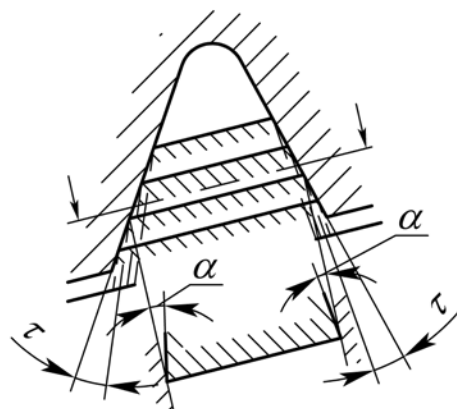


Рис. 3. Генераторно-ступенчатая схема резания фасонных пазов

В конце 60-х годов XX в. конструкторским отделом технологической оснастки и отделом главного технолога ПАО «ОДК-УМПО» был разработан расчетно-графический способ расчета скорректированного профиля зубьев протяжек для обработки фасонных поверхностей с образующей по дуге окружности.

Способ основывается на построении увеличенного в 100 раз скорректированного профиля зубьев протяжки. По построенной схеме обработки определяется высота скорректированного профиля  $A$ , затем вычисляется шаг  $d$  координаты  $y'$  по оси профиля обработки:

$$d = \frac{A}{n-4}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество точек профиля, определяемое аналитически.

Координаты скорректированного профиля зубьев протяжки на прямолинейном участке и величина коррекции  $K$  вычисляются по методике генераторно-ступенчатой схемы.

Координата  $y'$  точек профиля обработки на участке по дуге окружности вычисляется по формулам:

$$y'_n = y'_1 + d(n-1)/4, \quad (2)$$

для первых четырех точек;

$$y'_n = y'_4 + d(n-4), \quad (3)$$

после четвертой точки.

По построению, применяя уравнение Пифагора, вычисляется координата  $x$ :

$$x_n = \sqrt{R^2 - (R - y'_n)^2} = \sqrt{y'_n(2R - y'_n)}, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус дуги окружности профиля обработки. Величина коррекции на каждую точку вычисляется:

$$k = \frac{K}{n-4}, \quad (5)$$

Координата  $y$  точек скорректированного профиля зуба протяжки на участке по дуге окружности вычисляется:

$$y_n = y'_n + kn/4, \quad (6)$$

для первых четырех точек;

$$y_n = y'_n + kn, \quad (7)$$

после четвертой точки.

В конце прошлого столетия расчет по формулам (1)–(7) скорректированного профиля зубьев протяжек для обработки фасонных поверхностей с образующей по дуге окружности в ПАО «ОДК-УМПО» был оптимизирован по точности. В соответствии с этим способом координаты  $y'$  точек профиля обработки на участке по дуге окружности вычисляются по геометрической прогрессии:

$$y'_n = y'_1 q^{n-1}, \quad (8)$$

где  $q$  – величина дискретности построения профиля выбирается в пределах 2,0...2,8 (получено экспериментально);  $y'_1$  – координата первой точки принимается в пределах 0,005...0,010 мм, как минимально необходимая для построения и возможная для изготовления в протяжке величина.

Расчет координаты  $y'$  точек профиля обработки на прямом участке преобразован в вычисления по арифметической прогрессии:

$$y'_n = y'_{R_{max}} + y'_{R_{max}}(n - n_{R_{max}})/2, \quad (9)$$

где  $y'_{R_{max}}$  – координата последней точки в расчете на участке по дуге окружности;  $n_{R_{max}}$  – порядковый номер координаты последней точки в расчете на участке по дуге окружности.

Координаты  $y$  точек скорректированного профиля зуба протяжки на участке по дуге окружности вычисляется:

$$y_n = y'_n k' / q^{n_{R_{max}} - n},$$

где  $k'$  – величина распределения коррекции на  $n_l$  точках прямого участка, вычисляется:

$$k' = K / n_l.$$

При этом координаты скорректированного профиля зубьев протяжки на прямолиней-

ном участке и величина коррекции  $K$  также вычисляются по методике генераторно-ступенчатой схемы.

#### ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ РАСЧЕТА КОРРИГИРОВАННОГО ПРОФИЛЯ

Интенсивное развитие систем автоматизированного проектирования к настоящему времени способствовало решению множества технологических проблем.

Следует отметить, что при решении творческих задач наиболее эффективен диалоговый режим обмена информацией с ЭВМ, когда требуется эвристический подход (распознавание геометрических образов деталей, размерных и топологических связей между элементарными геометрическими образами с целью оптимального выбора схем базирования, проектирование маршрута обработки, сборки и др.).

Эти и многие другие задачи могут быть решены эффективно лишь путем синтеза творческих процессов человека и "способностей" машинных программ. Вместе с тем при диалоговом режиме значительно увеличиваются затраты на создание программного обеспечения, возрастают затраты на проектирование. Можно создавать пакеты программ, позволяющих накапливать опыт проектирования и формировать алгоритмы классификации, генерирования понятий, поведения.

Поэтому возникла и решается задача создания автоматизированных систем проектирования технологических процессов в режиме диалога с последующим переходом к пакетному (автоматическому) режиму более высокого уровня путем использования программ обучения.

САПР разрабатывают продолжительное время, поэтому экономически целесообразно вводить ее в эксплуатацию по частям по мере готовности. Созданный базовый вариант системы может расширяться.

Кроме того, возможно появление новых, более совершенных математических моделей и программ, изменяются также и объекты проектирования. САПР создается как иерархическая система, реализующая комплексный подход к автоматизации на всех уровнях проектирования.

Так, в САПР технологических процессов обычно включают подсистемы структурного, функционально-логического и элементного проектирования (разработки принципиальной схемы технологического процесса, проектирования маршрута, проектирования операции, разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ).

На платформе системы T-Flex CAD-3D в ПАО «ОДК-УМПО» разработана модель расчетно-графического способа вычисления корригированного профиля зубьев протяжек для обработки фасонных поверхностей. По величине коррекции  $K$  рассчитывается угол коррекции  $T$ :

$$T = \arctg(K). \quad (10)$$

В 3D-модели построенной с поверхностью обработки, которая для удобства расчета профиля зуба протяжки выполняется наружной, строится рабочая плоскость под углом коррекции  $T$  к плоскости резания (рис. 5).

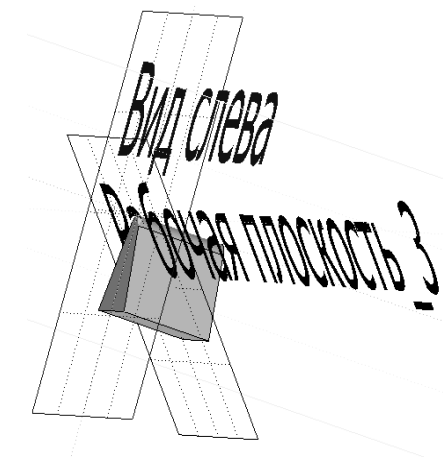


Рис. 5. 3D-модель обрабатываемого профиля

В сечении рабочей плоскостью получаем корригированный профиль. Для определения координат точек профиля на графическом отображении сечения рабочей плоскостью строятся линии с координатами  $y'$ , рассчитываемым по формулам (8), (9).

Формулы (8)–(10) и переменные координат вводятся в редактор переменных T-Flex CAD-3D для параметризации системы проектирования (рис. 7).

С помощью функций параметризации также вводятся в редактор переменных координаты  $x$  точек корригированного профиля, определяемых системой на пересечении полилинии профиля и линий по координатам  $y'$  (рис. 6).

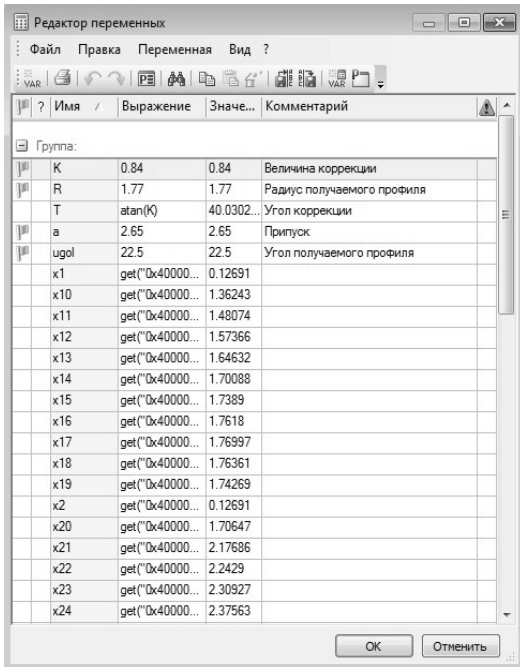


Рис. 6. Параметры в редакторе переменных

**ВЫВОДЫ**

Точность профиля сложной формы и прочностные характеристики элементов деталей ГТД, получаемых в процессе протягивания, зависят от оптимальности схемы резания и профилирования зубьев протяжек.

Выявлено, что с помощью параметрической системы типа T-Flex CAD-3D на основе 3D-модели обработки с параметризацией выполняются высокоточные расчеты значений координат корригированного профиля зубьев протяжки, что позволяет управлять распределением сил резания при использовании силовых моделей обработки и оптимизировать процесс протягивания, повышая стойкость и ресурс эксплуатации протяжек.

Кроме того, данный способ позволяет выполнить расчет корригированного профиля зубьев протяжки для обработки поверхности любой криволинейной формы.

Шлифование профиля протяжки на современных станках с ЧПУ по электронному профилю и 3D-модели повышает качество и точность изготовления деталей ГТД, формируя систему оперативной подготовки и быстрой переналадки производства.

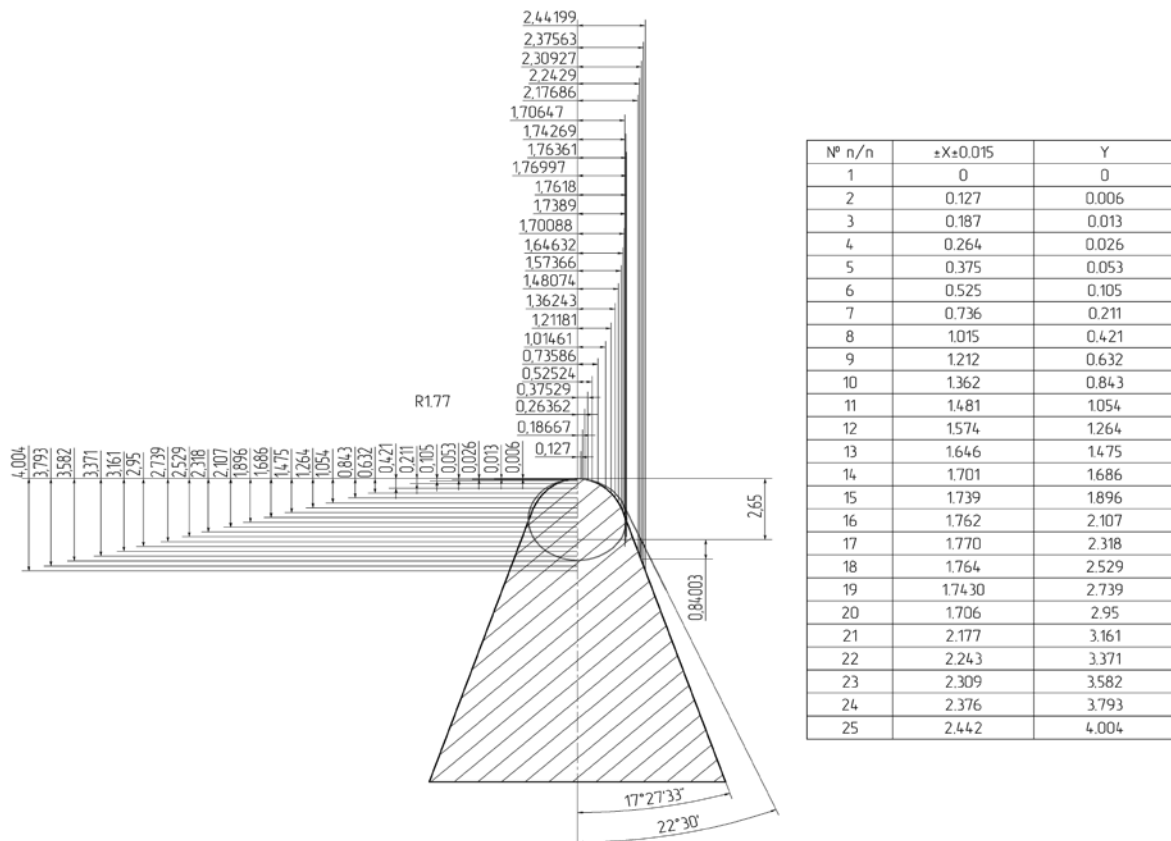


Рис. 6. Графическое построение параметризованного корригированного профиля в T-Flex CAD-3D

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**1. Протяжки** для обработки отверстий/ Д.К. Маргулис [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. 232 с. [D.K. Margulis, *et al.* Broaches for hole machining, (in Russian). Moscow: Mechanical engineering, 1986.]

**2. Макаров В.Ф.** Оптимизация протягивания трудно-обрабатываемых материалов: монография. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2014. 440 с. [V.F. Makarov. Optimization of broaching of hard machining materials: monograph, (in Russian). Stary Oskol: Fine science-intensive technologies, 2014.]

**3. Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А.** Металлорежущие инструменты: справочник конструктора. Минск: Новое знание, 2009. 1039 с. [E.E. Feldshtein, M.A. Kornievich. Metal cutting tools: designer reference (in Russian). Minsk: New knowledge, 2009.]

**4. Hosseini A., Kishawy H.A.** Prediction of cutting forces in broaching operation/ A. Hosseini, H.A. Kishawy// Journal of Advanced Manufacturing Systems: World Scientific Publishing Company, 2013, Vol. 12, No. 1, pp.1-14. DOI: 10.1142/S0219686713500017.

## ОБ АВТОРЕ

**ПОЛИТОВ Александр Сергеевич**, асп. каф. АТП. Дипл. технолог (УГАТУ, 2004). Готовит дис. о повышении эффективности протягивания деталей ГТД на станках с ЧПУ путем конструктивной оптимизации многосекционной протяжки.

## METADATA

**Title:** Optimization of broaching process by tooth profile interpolation of multi-section broach.

**Author:** A.S. Politov

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** altair1976politov@gmail.com

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 106-111, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** An analysis of broach profiling methods in the processing of hard machining materials profile composite GTE components and a technique for a broach designing with a corrected profile based on 3D-modeling are presented.

**Key words:** broach; cutting schemes; GTE components; broach tooth profile; broaching; modeling.

**About author:**

**POLITOV, Alexander Sergeevich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Automatization of Technological Processes. Engineer-technologist (UGATU, 2004).

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВГТД

Ж. С. РАЭРИНДЗАТУВУ<sup>1</sup>, А. С. ГИШВАРОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>jules.zaza@bk.ru, <sup>2</sup>kafedra.ad@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассматривается задача повышения эффективности параметрической диагностики состояния вспомогательного газотурбинного двигателя (ВГТД), основанная на нейросетевом моделировании рабочего процесса. Исследовано влияние на погрешность параметрической диагностики состояния ВГТД следующих параметров нейросетевой диагностической модели: количества нейронов в однослойном персептроне, вида функции активации в скрытом и выходном слоях.

**Ключевые слова:** двигатель; параметрическая диагностика; нейросетевая (НС) диагностическая модель; функция активации; скрытый слой; эффективность; погрешность; многослойный персептрон.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений диагностики состояния двигателей на борту летательного аппарата является применение искусственных нейронных сетей (ИНС), которые позволяют решать задачи диагностики в условиях неполноты и зашумленности входных данных и обладают мгновенным откликом. При этом использование ИНС позволяет существенно сократить количество контролируемых параметров и соответственно количество датчиков [1].

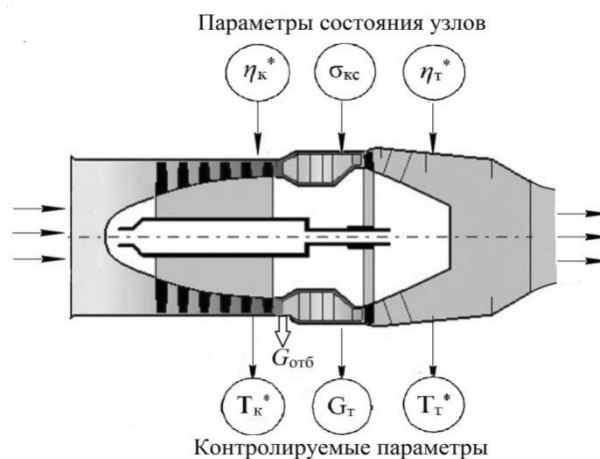
Задача диагностирования с применением ИНС сводится к выбору типа сети, определению параметров архитектуры и ее обучению.

В данной статье объектом исследования являлся авиационный ВГТД, диагностика которого проводилась в следующей последовательности:

- предварительный анализ данных на этапе постановки задачи и выбора архитектуры НС;
- преобразование данных для построения более эффективной процедуры настройки сети;
- выбор архитектуры НС;
- выбор структуры НС;
- выбор алгоритма обучения;
- обучение и тестирование НС;

- анализ точности нейро - сетевого решения;
- принятие решения на основе полученных результатов [2–3].

Исходные данные для проведения исследования были получены с применением программного обеспечения GASTURB и модели рабочих процессов ВГТД с отбором воздуха за компрессором (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема авиационного ВГТД с отбором воздуха за компрессором

Эффективность диагностики состояния ВГТД с применением нейро - сетевого моделирования рабочих процессов зависит от многих факторов (рис. 2).



Построение НС-модели для диагностики ВГТД проводилось с применением ПО STATISTICA Neural Networks.

Обобщенная структура обработки данных с применением ПО STATISTICA приведена на рис. 3.



Рис. 2. Факторы, влияющие на эффективность диагностики состояния ВГТД с применением нейро - сетевого моделирования рабочих процессов

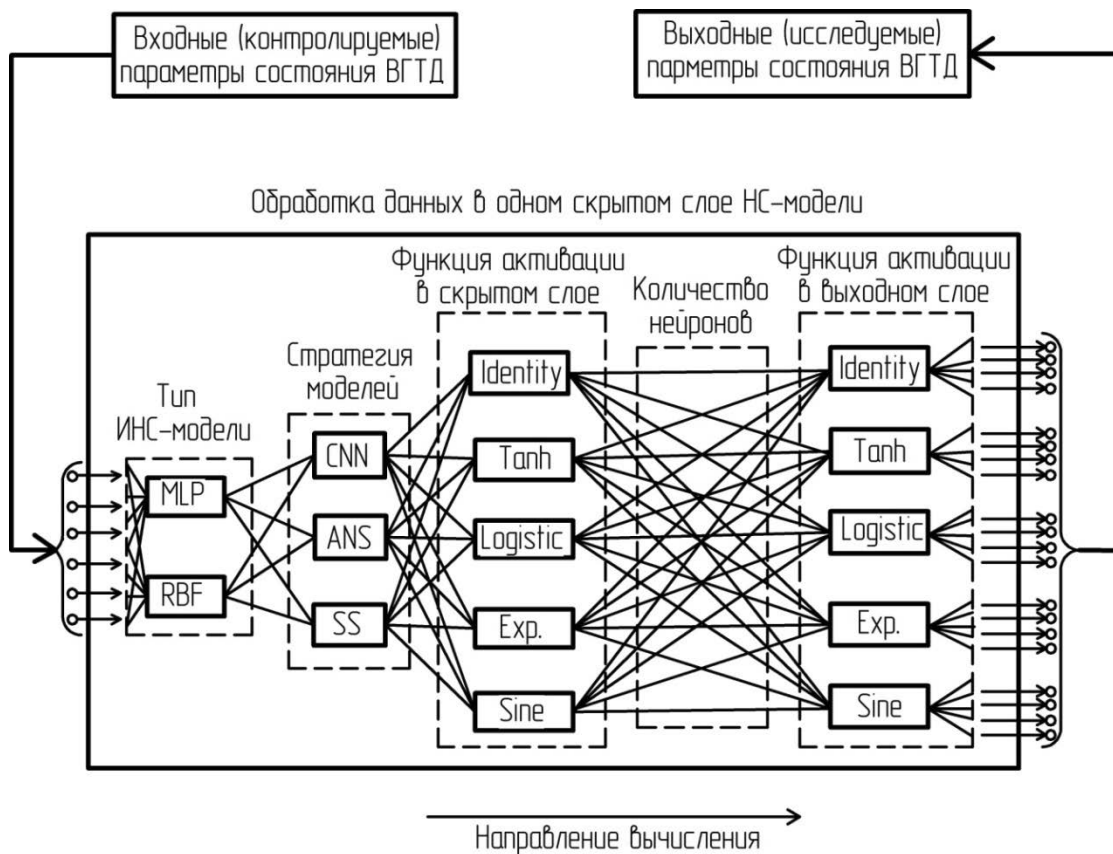


Рис. 3. Обобщенная структура обработки данных

Исследование эффективности проводилось с учетом влияния следующих факторов:

- количества нейронов в скрытом слое;
- вида функции активации (ФА) в скрытом слое ( идентичность – Identity, гиперболический тангенс – Tanh, сигмовидная функция – Logistic, экспоненциальная функция – Exponential, синус активации – Sine);
- вида функции активации в выходном слое ( идентичность – Identity, гиперболический тангенс – Tanh, сигмовидная функция – Logistic, экспоненциальная функция – Exponential, синус активации – Sine);
- размерности и вида НС - диагностической модели  $Y_{i,j,z}$ ;
- количества контролируемых параметров  $X_{i,j,z}$  ВГТД.

Ранее авторами было установлено [1–3], что для решения задачи параметрической диагностики состояния ВГТД наиболее приемлема НС–модель вида многослойного перцептрона (MLP), а стратегия создания прогнозируемых моделей – ANS (автоматизированный поиск). Структура НС–модели ВГТД приведена на рис. 4.

Оценка погрешности диагностики состояния ВГТД проводилась следующим образом.

Погрешность оценки дефектного состояния узла двигателя в интервале значений  $G_{Xi,j} = X_{i,j,0} \dots X_{i,j,mp}$  оценивалась относительной величиной «невязки» между значением  $X_{3,1}$ , соответствующим дефектному состоянию, и его значением  $X_{i,j,HC}$ , определенным по НС-ой диагностической модели [2–4]:

$$\delta = \delta X_{i,j,d} = \frac{|X_{i,j,d} - X_{i,j,HC}|}{X_{i,j,d}} \cdot 100 \in \left\{ 0 \dots \left( \frac{|X_{i,j,d} - X_{i,j,gr}|}{X_{i,j,d}} \cdot 100 \right) \right\}, \% \quad (1)$$

Из (1) следует, что наиболее точно определяются состояния узлов двигателя при  $X_{i,j,d} = X_{i,j,HC}$ , т.е при  $\delta X_{i,j,d} = 0$ . Если в интервале значений  $G_{Xi,j} = X_{i,j,0} \dots X_{i,j,mp}$  рассматриваются  $m$  дискретных значений дефектного состояния двигателя, то оценивается средняя погрешность диагностики для данного интервала по формуле:

$$\delta X_{i,j,d,ср} = \frac{1}{m} \sum_{\epsilon=1}^m \frac{|X_{i,j,d,\epsilon} - X_{i,j,HC,\epsilon}|}{X_{i,j,d,\epsilon}} \cdot 100, \% \quad (2)$$

Средняя интегральная оценка погрешности определялась по формуле:

$$\delta X_{\Sigma} = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z \frac{1}{K_i} \sum_{j=1}^{K_i} \frac{1}{m} \sum_{\epsilon=1}^m \frac{|X_{i,j,d,\epsilon} - X_{i,j,HC,\epsilon}|}{X_{i,j,d,\epsilon}} \times 100, \% \quad (3)$$

где  $Z$  – количество узлов двигателя;  $K_i$  – количество состояний  $z$  узлов двигателя;  $m$  – количество параметров состояния двигателя;  $X_{i,j,d,\epsilon}$  – дефектное состояние двигателя;  $X_{i,j,HC,\epsilon}$  – дефектное состояние, определенное по НС-ой диагностической модели.

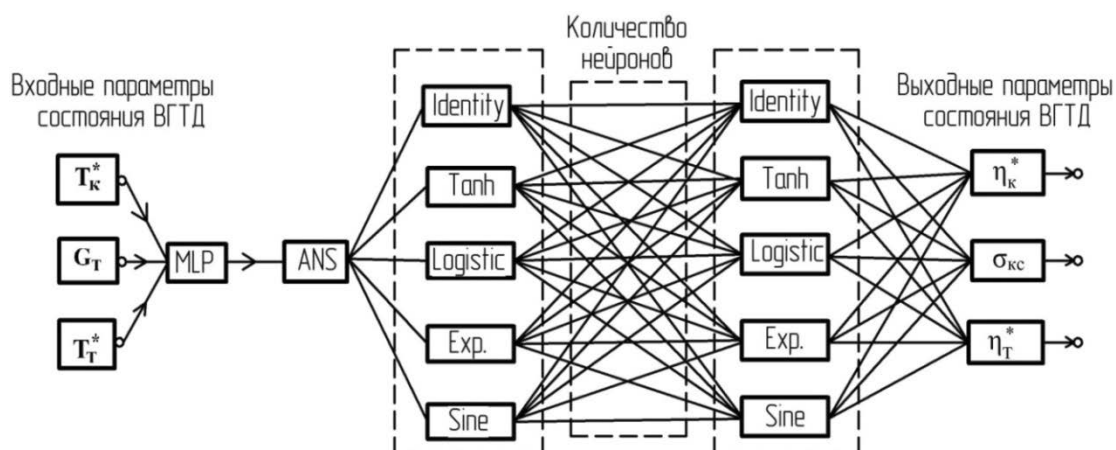


Рис. 4. Структура НС-модели ВГТД

В соответствии с (2) эффективность диагностики состояния ВГТД оценивалась величиной  $\mathcal{E}_{i,j,d,cp}$ , обратной величине погрешности  $\delta X_{i,j,d,cp}$  (чем меньше погрешность, тем выше эффективность диагностики):

$$\mathcal{E}_{i,j,d,cp} = 100 - \delta X_{i,j,d,cp}, \% \quad (4)$$

или

$$\mathcal{E}_{i,j,d,cp} = \left( 1 - \frac{1}{m} \sum_{\varepsilon=1}^m \frac{|X_{i,j,d,\varepsilon} - X_{i,j,nc,\varepsilon}|}{X_{i,j,d,\varepsilon}} \right) \times 100, \%$$

Тогда с учетом  $Z$  узлов двигателя ( $i = \overline{1, z}$ ) и  $K_z$  параметров состояния ( $i = \overline{1, K_u}$ ), где  $K_u = \sum_{i=1}^z K_i$ , эффективность диагностики двигателя определится по формуле:

$$\mathcal{E}_\Sigma = 100 - \delta X_\Sigma, \% \quad (5)$$

или

$$\mathcal{E}_\Sigma = \left( 1 - \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z \frac{1}{K_i} \sum_{j=1}^{K_i} \frac{1}{m} \sum_{\varepsilon=1}^m \frac{|X_{i,j,d,\varepsilon} - X_{i,j,nc,\varepsilon}|}{X_{i,j,d,\varepsilon}} \right) \times 100, \%$$

Условия проведения исследования были следующие:

- объект исследования – одновальный ВГТД;

- контролируемые параметры состояния ГТД: расход топлива в двигателе ( $G_T$ ); температура воздуха за компрессором ( $T_K^*$ ); температура газа за турбиной ( $T_T^*$ );

- диагностируемые параметры (параметры состояния узлов двигателя):  $X_{1,1}$  – КПД компрессора ( $\eta_K^*$ ),  $X_{2,1}$  – коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания ( $\sigma_{kc}$ ),  $X_{3,1}$  – КПД турбины ( $\eta_T^*$ );

- значения  $\Delta X_{i,j,d}$  варьировались в интервале  $[0...-5] \%$ , внутри которого выбирались  $N_\Sigma = 24390$  значений дефектного состояния узлов ВГТД:

$$\Delta X_{i,j,d} = [-0,00021; \dots; -4,99979; -5], \%$$

- обучение НС-моделей проводилось с использованием объема выборки равной  $N_{об} = 17075$  ( $N_{об} = 0,7 \cdot N_\Sigma$ ). Данные для обучения НС-моделей формировались моделированием дефектов узлов двигателя в интервале значений  $[X_{i,j,0} \dots X_{i,j,10}]$ :

$$\eta_K^* = [0,74 \dots 0,78]; \quad \sigma_{kc} = [0,91 \dots 0,97];$$

$$\eta_T^* = [0,81 \dots 0,85].$$

Бездефектное состояние двигателя соответствовало значениям  $X_{i,j,0}$ :

$$X_{1,1,0} = \eta_K^* = 0,78; \quad X_{2,1,0} = \sigma_{kc} = 0,97;$$

$$X_{3,1,0} = \eta_T^* = 0,85.$$

Количество нейронов ( $N_e$ ) варьировалось от 1 до 10.

Рассматривались следующие варианты представления отклика  $Y_{ij,z}$  НС-модели:

- в виде одномерных откликов:

$$\eta_K^* = f(G_T, T_T^*, T_K^*); \quad \sigma_{kc} = \text{idem}; \quad \eta_T^* = \text{idem}; \quad (6)$$

$$\sigma_{kc} = f(G_T, T_T^*, T_K^*); \quad \eta_K^* = \text{idem}; \quad \eta_T^* = \text{idem}; \quad (7)$$

$$\eta_T^* = f(G_T, T_T^*, T_K^*); \quad \eta_K^* = \text{idem}; \quad \sigma_{kc} = \text{idem}. \quad (8)$$

- в виде двумерных откликов:

$$(\eta_K^*, \sigma_{kc}) = f(G_T, T_T^*, T_K^*); \quad \eta_T^* = \text{idem}; \quad (9)$$

$$(\eta_T^*, \sigma_{kc}) = f(G_T, T_T^*, T_K^*); \quad \eta_K^* = \text{idem}; \quad (10)$$

$$(\eta_K^*, \eta_T^*) = f(G_T, T_T^*, T_K^*); \quad \sigma_{kc} = \text{idem}. \quad (11)$$

- в виде трехмерного отклика:

$$(\eta_K^*, \sigma_{kc}, \eta_T^*) = f(G_T, T_T^*, T_K^*). \quad (12)$$

В качестве примера результаты исследования влияния количества нейронов в скрытом слое, вида функции активации в скрытом и в выходном слоях на погрешность диагностики состояния ВГТД для случая одномерных откликов (6)–(8) приведены в таблице и показаны на рис. 5.

Исследование показало, что при параметрической диагностике состояния узлов ВГТД с применением НС-модели рабочих процессов и одномерными откликами (6), (7) и (8) и контролем состояния по параметрам  $T_K^*$ ,  $G_T$  и  $T_T^*$  (табл. 1):

- оптимальное количество нейронов в скрытом слое равно 2;

- для скрытого слоя в качестве функции активации рекомендуется идентичность (Identity);

• для выходного слоя в качестве функции активации рекомендуется идентичность (Identity);

• сочетание функций активации вида (identity – identity) позволяет обеспечить максимальную эффективность диагностики состояния ВГТД ( $\Xi \approx 100\%$ ), при этом погрешность диагностики состояния минимальна

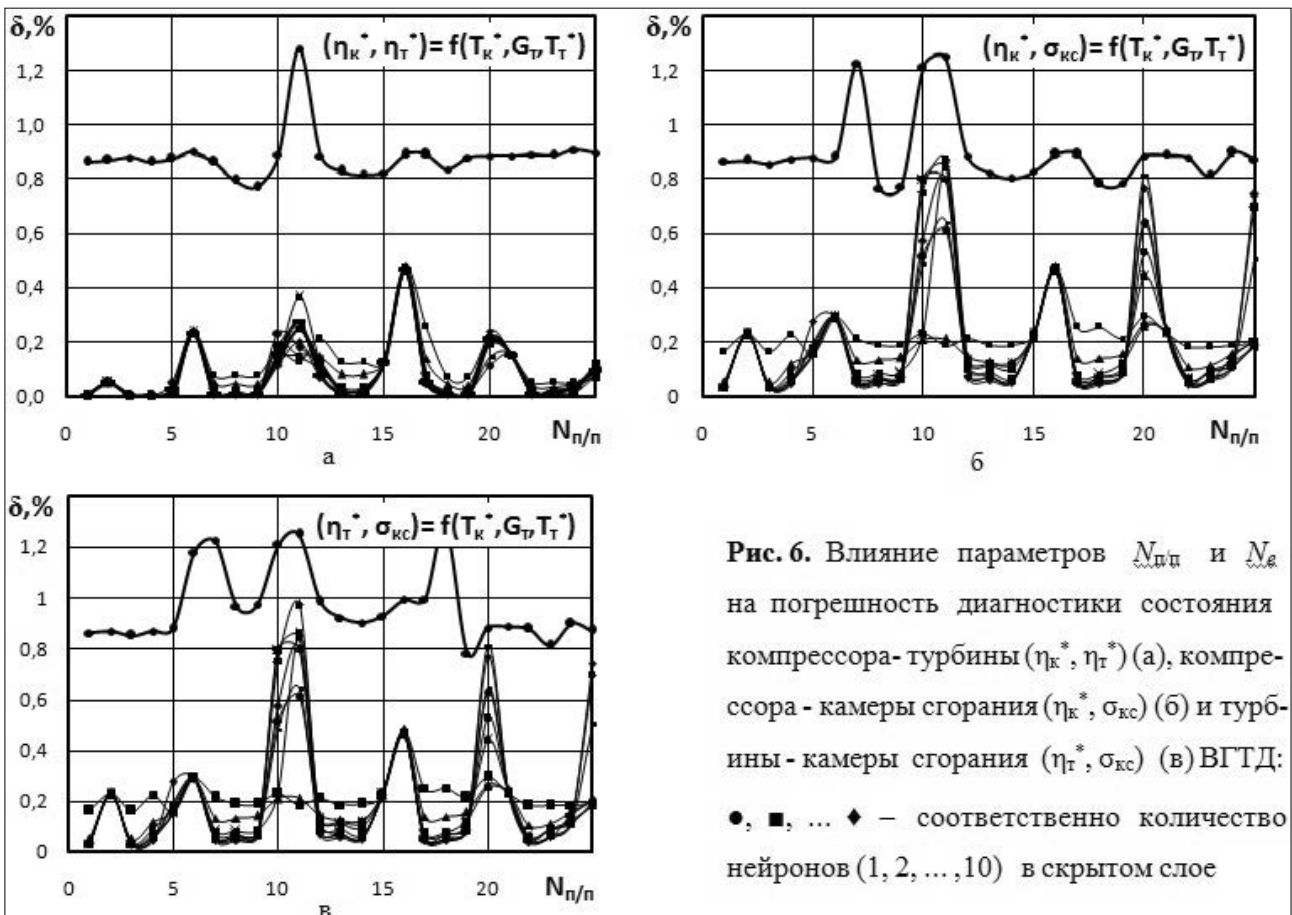
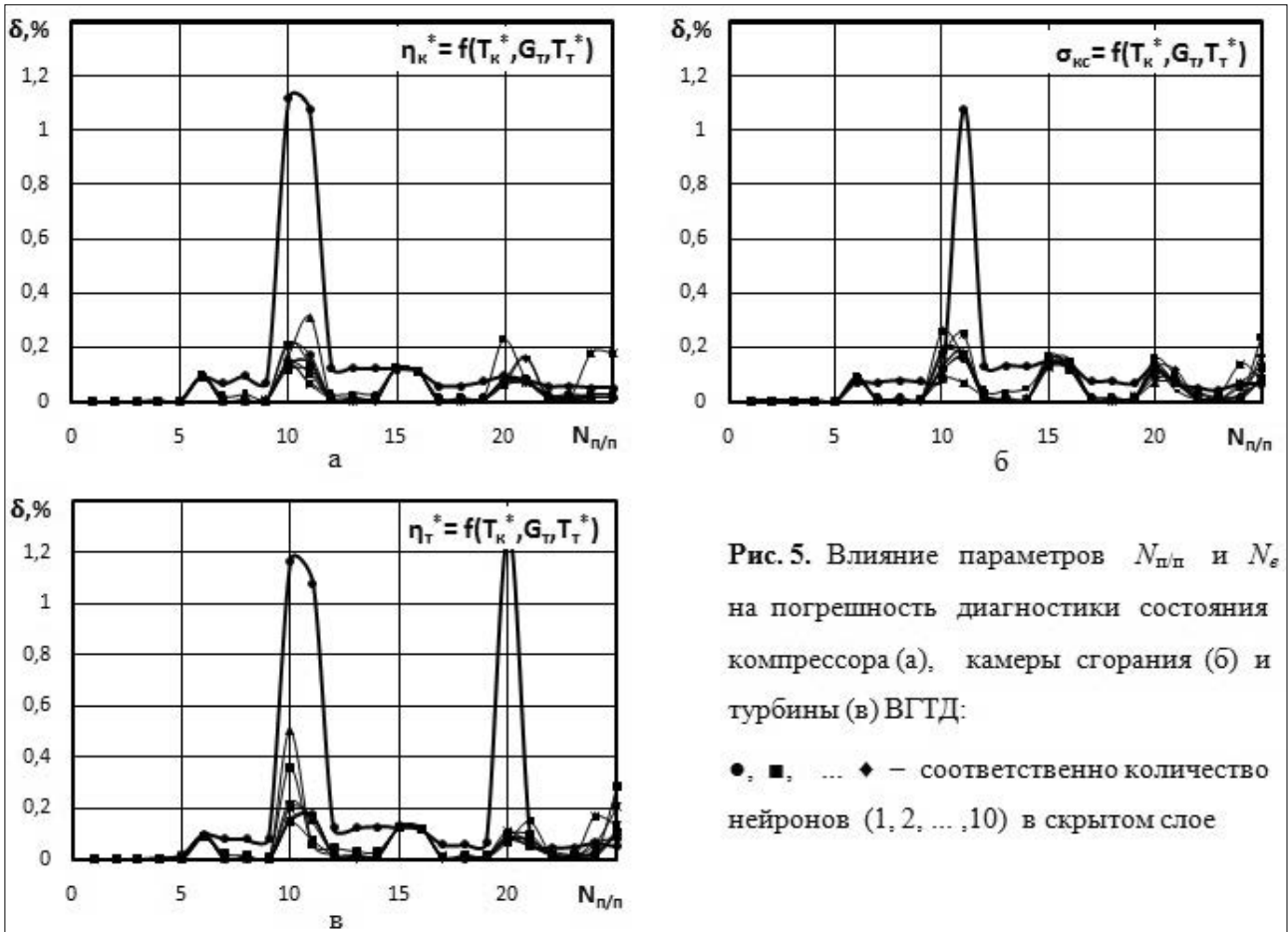
( $\delta = 1 \cdot 10^{-14}\%$ ). В качестве примера результаты исследования влияния количества нейронов в скрытом слое, вида функции активации в скрытом и в выходном слоях на погрешность диагностики состояния ВГТД для случая двухмерных откликов  $Y_{i,j,z}$  (9), (10) и (11) приведены на рис. 6.

Таблица 1

Погрешность диагностики состояния ВГТД ( $\delta$ , %) для случая одномерного отклика  $Y_{i,j,z}$

НС-модели типа $\eta_k^* = f(T_k^*, G_T, T_T^*)$												
ANS (стратегия создания прогнозирующей модели)												
№ п/п	ФА в скрытом слое	ФА в выходном слое	Погрешность диагностики ( $\delta$ , %) при различных количествах нейронов ( $N_e$ )									
			$N_e = 1$	$N_e = 2$	$N_e = 3$	$N_e = 4$	$N_e = 5$	$N_e = 6$	$N_e = 7$	$N_e = 8$	$N_e = 9$	$N_e = 10$
1	Tanh	Identity	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
2	Identity	Identity	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-14}$
3	Logistic	Identity	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,0035	$3 \cdot 10^{-5}$	0,003	$2 \cdot 10^{-4}$
4	Exponential	Identity	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$
5	Sine	Identity	$5 \cdot 10^{-5}$	0,001	0,021	0,012	0,009	0,017	0,013	0,014	0,014	0,015
6	Identity	Tanh	0,094	0,088	0,094	0,088	0,088	0,091	0,089	0,099	0,091	0,096
7	Tanh	Tanh	0,079	0,020	0,009	0,007	0,004	0,003	0,003	0,004	0,002	0,004
8	Logistic	Tanh	0,077	0,012	0,008	0,004	0,005	0,003	0,003	0,004	0,002	0,007
9	Exponential	Tanh	0,080	0,009	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,002	0,003	0,004
10	Sine	Tanh	1,168	0,356	0,500	0,144	0,198	0,149	0,148	0,159	0,227	0,145
11	Sine	Logistic	1,080	0,060	0,059	0,076	0,165	0,172	0,166	0,166	0,149	0,169
12	Exponential	Logistic	0,121	0,041	0,016	0,014	0,011	0,013	0,015	0,012	0,013	0,012
13	Logistic	Logistic	0,124	0,031	0,017	0,017	0,013	0,005	0,003	0,014	0,003	0,005
14	Tanh	Logistic	0,125	0,030	0,016	0,006	0,010	0,004	0,015	0,005	0,005	0,018
15	Identity	Logistic	0,123	0,128	0,124	0,124	0,123	0,129	0,125	0,124	0,126	0,124
16	Identity	Exponential	0,115	0,116	0,114	0,114	0,114	0,114	0,115	0,121	0,120	0,115
17	Tanh	Exponential	0,058	0,009	0,010	0,012	0,011	0,004	0,004	0,004	0,004	0,010
18	Logistic	Exponential	0,058	0,010	0,009	0,015	0,007	0,003	0,003	0,012	0,007	0,004
19	Exponential	Exponential	0,063	0,016	0,009	0,007	0,012	0,012	0,007	0,011	0,010	0,010
20	Sine	Exponential	1,288	0,095	0,070	0,077	0,109	0,080	0,063	0,087	0,087	0,072
21	Identity	Sine	0,071	0,093	0,053	0,080	0,056	0,053	0,147	0,077	0,052	0,076
22	Tanh	Sine	0,046	0,013	0,014	0,016	0,014	0,014	0,014	0,024	0,029	0,016
23	Logistic	Sine	0,046	0,017	0,018	0,015	0,007	0,006	0,013	0,008	0,014	0,010
24	Exponential	Sine	0,062	0,01	0,019	0,057	0,164	0,064	0,026	0,011	0,019	0,011
25	Sine	Sine	0,051	0,284	0,095	0,205	0,133	0,079	0,097	0,101	0,119	0,111

Примечание: ФА – функция активация;  $N_e$  – количество нейронов в скрытом слое; № п/п – номер варианта ( $N_{п/п}$ ) сочетания параметров функции активации в скрытом и выходном слоях.



Исследование показало (рис. 6), что при параметрической диагностике состояния узлов ВГТД с применением НС-модели рабочих процессов и двумерными откликами  $Y_{i,j,z}$  (9)–(11) и контролем состояния по параметрам  $T_k^*$ ,  $G_T$  и  $T_T^*$  (табл.):

- оптимальное количество нейронов в скрытом слое равно 3;
- для скрытого слоя в качестве функции активации рекомендуется гиперболический тангенс (Tanh);
- для выходного слоя в качестве функции активации рекомендуется идентичность (Identity);
- сочетание функций активации вида (Tanh – identity) позволяет обеспечить максимальную эффективность диагностики состояния ВГТД ( $\Xi = 99, 91 \%$ ), при этом погрешность диагностики состояния минимальна ( $\delta = 0,09 \%$ ).

В качестве примера результаты исследования влияния количества нейронов в скрытом слое, вида функции активации в скрытом и в выходном слоях на погрешность диагностики состояния ВГТД для случая трехмерного отклика (12) приведены на рис. 7. Для случая трехмерного отклика (12) исследование показало, что:

- оптимальное количество нейронов в скрытом слое равно 4;
- для скрытого слоя в качестве функции активации рекомендуется гиперболический тангенс (Tanh);

- для выходного слоя в качестве функции активации рекомендуется идентичность (Identity).
- сочетание функций активации вида (Tanh – identity) позволяет обеспечить максимальную эффективность диагностики состояния ВГТД ( $\Xi = 99, 45 \%$ ), при этом погрешность диагностики состояния минимальна ( $\delta = 0,55 \%$ ).

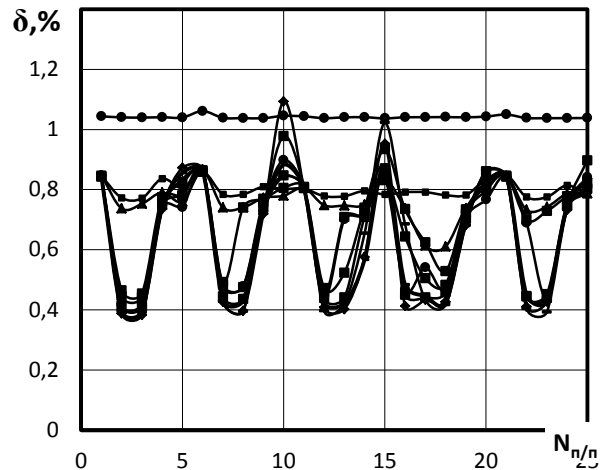


Рис. 7. Влияние параметров  $N_{сп}$  и  $N_e$  на погрешность диагностики состояния компрессора, камеры сгорания и турбины ВГТД: ●, ■, ... ◆ – соответственно количество нейронов (1, 2, ..., 10) в скрытом слое

По результатам исследования построена структура обработки данных при диагностике ВГТД с новыми параметрами программного обеспечения STATISTICA NEURAL NETWORKS (рис. 8).

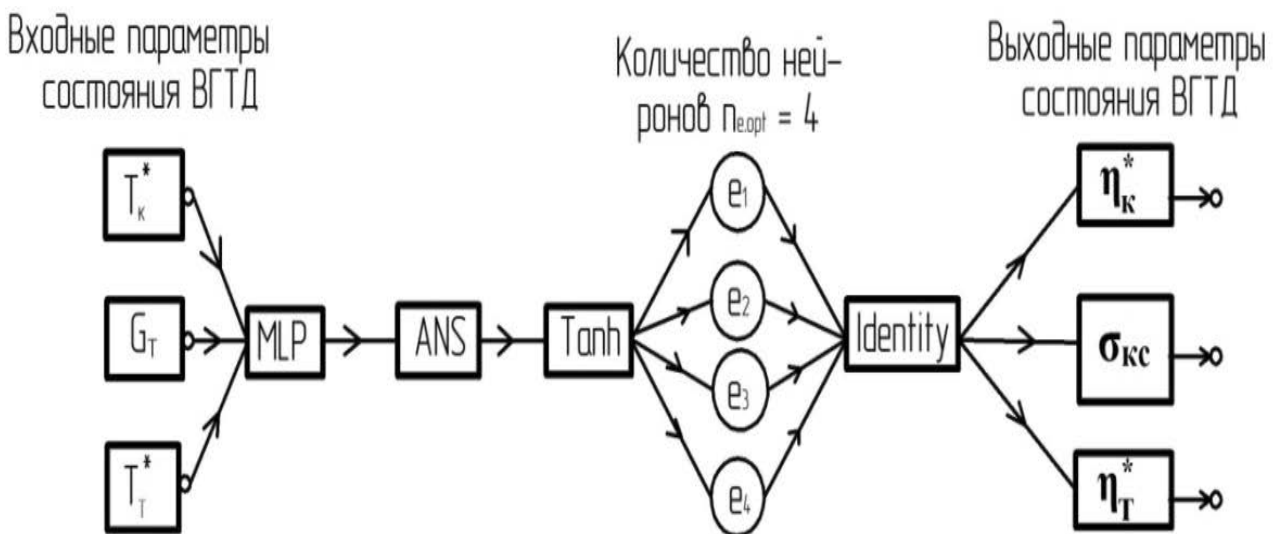


Рис. 8. Структура обработки данных с применением по Statistica Neural Networks

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование эффективности параметрической диагностики состояния ВГТД на основе нейро - сетевого моделирования рабочих процессов показало следующее:

- оптимальное количество нейронов  $N_e$  в скрытом слое превышает на единицу размерность отклика НС-модели ( $N_e \geq m + 1$ );
- для скрытого слоя в качестве функции активации рекомендуется гиперболический тангенс (Tanh);
- для выходного слоя в качестве функции активации рекомендуется идентичность (Identity);
- эффективность диагностики состояния ВГТД возрастает с увеличением количества контролируемых параметров (например, при контроле только  $T_k^*$ ,  $\Xi = 98,32\%$ , а при контроле ( $T_k^*, G_T, T_T^*$ ),  $\Xi = 99,54\%$  и т.д.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. S. Gishvarov, J. C. Raherinjatovo Parametric Diagnostic State of Gas Turbine Power Plant, *Procedia Engineering* 206 (2017), pp. 1819–1824. [ Раэриндзатуву Ж.С., Гишваров А.С. *Параметрическая диагностика состояния газотурбинной силовой установки* // *Procedia Engineering*, 2017, т.206, с. 1819–1824 ].
2. Раэриндзатуву Ж. С., Гишваров А. С. Параметрическая диагностика одновального ГТД на основе нейро-сетевого моделирования рабочих процессах // *Вестник УГАТУ*, 2017, т.21, №4. с. 86–96. [ J. C. Raherinjatovo, A. S. Gishvarov, "Parametric diagnostics of single-head gas turbine engine based on neural network modeling of work processes", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, № 4. pp. 86-96, 2017 ].
3. Раэриндзатуву Ж. С. Выбор нейросетевой модели для параметрической диагностики состояния авиационной силовой установки // тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Научно-технические проблемы современного двигателестроения» – Уфа: УГАТУ, 2016. С. 45–48. [ J. C. Raherinjatovo, A. S. Gishvarov, "Selection of neural network models for parametric diagnostics of the state of aviation powerplant", (in Russian), in *Nauchno-tekhnicheskije problem sovremennogo dvigatelestroeniya*, pp. 45-59, 2016 ].
4. Раэриндзатуву Ж. С., Гишваров А. С. Диагностика газоздушного тракта ГТУ с применением нейро-сетевого моделирования рабочих процессов // Тр. Всерос. науч. техн. конф. «Научно-технические проблемы современного двигателестроения» – Уфа: УГАТУ, 2016. С. 49–52. [ J. C. Raherinjatovo, A. S. Gishvarov, *Selection of neural network models for parametric diagnostics of the state of aviation powerplant*, (in Russian), in *Nauchno-tekhnicheskije problem sovremennogo dvigatelestroeniya*, pp. 49-52, 2016 ].
5. Раэриндзатуву Ж. С., Гишваров А. С. Исследование эффективности нейро-сетевого моделирования при решении задач параметрической диагностики состояния ГТД // Тр. X Всерос. науч. техн. конф. «Мавлютовские чтения» –

Уфа: УГАТУ, 2016. С. 391–395. [ J. C. Raherinjatovo, A. S. Gishvarov, "Investigation of the efficiency of neural network modeling in solving problems of parametric diagnostics of the state GTE", (in Russian), in Tr. X Vseros. sci. tech. Conf. "Mavlyutovskie readings" USATU, UFA, pp. 391–395, 2016 ]

## ОБ АВТОРАХ

**РАЭРИНДЗАТУВУ Жюльен Селестин**, асп. каф. АД. Дипл. инженер по тех. экспл. ЛА и АД (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. диагностики и прогнозирования состояния технических систем.

**ГИШВАРОВ Анас Саидович**, зав. каф. АД, Дипл. инженер по авиационным двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УАИ, 1993). Иссл. в обл. надежности, испытаний и прогнозирования состояния технических систем.

## METADATA

**Title:** Increasing the efficiency of parametric diagnostics of the state of an auxiliary gas turbine engine (TGTD) based on neural network modeling

**Authors:** J. C. Raherinjatovo<sup>1</sup>, A. S. Gishvarov<sup>2</sup>

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>jules.zaza@bk.ru, <sup>2</sup>gas-rb@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** *Molodezhnyj Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 112–119, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print)**.

**Abstract:** The problem of increasing the efficiency of parametric diagnostics of the state of an auxiliary gas turbine engine (TGTD) based on neural network modeling of the working process is considered. The influence of the following parameters of the neural network diagnostic model on the error of parametric diagnostics of the IGTD state was investigated: the number of neurons in a single-layer perceptron, the type of activation function in the hidden and output layers.

**Key words:** engine, parametric diagnostics, neural network diagnostic model, activation function, hidden layer, efficiency, error, multilayer perceptron.

## About authors:

**RAHERINJATOVO, Julien Celestin**, Postgrad. (PhD) student, Department of Aircraft engines. Dipl. Engineer those. Par. FD and AE (USATU 2013). Research in the domain diagnosis and prognosis of the state of technical systems.

**GISHVAROV, Anas Saidovich**, Head. dep. of Aircraft engines, Dipl. Engineer Aircraft engines (AIM, 1973), Dr. Sc. Science for heat. Aircraft engines (AIM 1993). Research in the domain of reliability, testing and forecasting of technical systems.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРЕВАЕМОГО ТЕЛА ПРИ ТОРЦОВОМ ТОЧЕНИИ МЕТАЛЛА

Н. Г. РЕКА<sup>1</sup>, Г. Н. КОУРОВ<sup>2</sup>, А. Г. ЛЮТОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kourova.89@mail.ru, <sup>2</sup>Kourov\_GN@mail.ru, <sup>3</sup>Lutov1@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Основным параметром, определяющим качество поверхности и эффективность процесса резания, является температура в зоне резания металла. Температура в зоне резания может быть определена с применением понятия «нагреваемого тела». Рассматривается нагреваемое тело при торцовом точении металла. Определены форма, объем и масса нагреваемого тела. Произведено сравнение массы нагреваемого тела, рассчитанной по объему параллелепипеда, с массой нагреваемого тела, рассчитанной по закону сохранения энергии с использованием результатов натурального эксперимента. Подтверждена возможность аппроксимации нагреваемого тела параллелепипедом при торцовом точении.

**Ключевые слова:** температура в зоне резания; нагреваемое тело; процесс торцового точения металла; закон сохранения энергии.

Основным параметром, определяющим качество поверхности обрабатываемой детали, а в некоторых случаях – эффективность процесса резания, является температура в зоне резания металла.

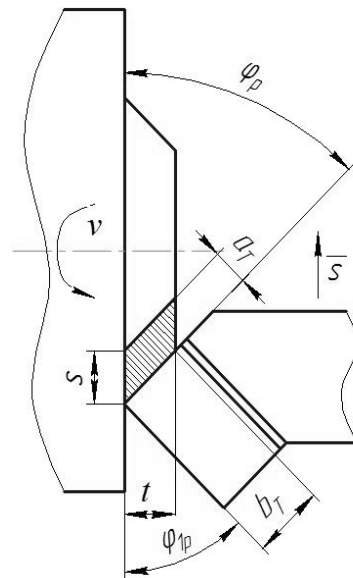
Температура в зоне резания может быть определена с применением понятия «нагреваемого тела» (НТ) [1]. При различных видах точения НТ имеет различную форму. При торцовом точении НТ имеет форму параллелепипеда, сечение которого представлено на рис. 1 (заштрихованная область).

В связи с оригинальностью представления формы НТ необходимо произвести проверку массы НТ, рассчитанной по объему параллелепипеда (рис. 1), и массы нагреваемого тела неопределенной формы, рассчитанной с использованием экспериментальных данных [2, 3] при одних и тех же условиях резания.

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя (площадь поперечного сечения НТ) при торцовом точении определяется по выражению (1):

$$F = a_T \cdot b_T = s \cdot t, \quad (1)$$

где  $a_T$  – толщина слоя, срезаемого при точении,  $a_T = s \cdot \sin \varphi_p$ ;  $b_T$  – ширина слоя, срезаемого при точении,  $b_T = t / \sin \varphi_p$ .



**Рис. 1.** Схема процесса торцового точения:  $a_T$  – толщина слоя, срезаемого при точении;  $b_T$  – ширина слоя, срезаемого при точении,  $v$  – скорость резания;  $s$  – величина подачи за оборот заготовки;  $t$  – глубина резания;  $\varphi_p$  – угол в плане резца;  $\varphi_{p1}$  – вспомогательный угол в плане резца



При торцовом точении объем нагреваемого тела определяется зависимостью (2):

$$V_T = v \cdot s \cdot t \cdot \tau_T. \quad (2)$$

Время  $\tau_T$  выхода НТ из-под действия силы  $P_Z$  (тангенциальная составляющая силы резания) при торцовом точении определяется выражением (3):

$$\tau_T = \frac{s}{v}. \quad (3)$$

Масса НТ при торцовом точении рассчитывается по выражению (4):

$$m = V_T \cdot \rho, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала.

Произведем сравнение массы НТ, рассчитанной по объему параллелепипеда (4), с массой НТ, рассчитанной по закону сохранения энергии (5) [1].

$$P_{рез} \cdot d\tau = c \cdot m \cdot d\lambda + F_T \cdot K_T \cdot \lambda \cdot d\tau, \quad (5)$$

где  $P_{рез} \cdot d\tau$  – механическая энергия, поступающая в зону резания от привода главного движения;  $c \cdot m \cdot d\lambda$  – тепловая энергия, нагревающая массу  $m$ ;  $c$  – удельная теплоемкость НТ;  $\lambda$  – разность температур НТ и охлаждающей среды (среднее значение), определяется по выражению (6) (охлаждающей средой являются деталь, стружка, инструмент, воздух или СОЖ);  $F_T \cdot K_T \cdot \lambda \cdot d\tau$  – тепловая энергия, отдаваемая НТ в охлаждающую среду;  $F_T$  – площадь теплоотдачи НТ;  $K_T$  – коэффициент теплоотдачи НТ в охлаждающую среду.

$$\lambda = \theta - \theta_{oc}, \quad (6)$$

где  $\theta$  – температура в зоне резания металла;  $\theta_{oc}$  – температура охлаждающей среды.

Сравнение масс НТ, рассчитанных по уравнениям (4) и (5), позволит сделать вывод о возможности представления объема НТ в виде параллелепипеда при определении температуры в зоне резания по закону сохранения энергии при торцовом точении.

Масса НТ, определенная по уравнению (4) названа «гипотетической»  $m_T$ . Гипотетическая масса НТ  $m_T$  представляет собой массу параллелепипеда, которым аппроксимировано НТ и рассчитана на основании предложенной гипотезы.

Масса НТ, определенная по уравнению (5), не зависит от формы НТ. Данная масса названа «экспериментальной»  $m_Э$ . В этом

случае расчетное значение массы НТ приближенное.

Из уравнения (5) выражена  $m_Э$  (7). При этом допускается, что вся механическая энергия  $P_{рез} \cdot d\tau$ , поступающая в зону резания от привода главного движения, расходуется на нагрев НТ, без учета теплоотдачи в охлаждающую среду.

$$m_Э = \frac{P_{рез} \cdot \tau_T}{c \cdot \lambda}, \quad (7)$$

В выражении (7) значение  $\tau_T$  определяется по выражению (3), а значение  $\lambda$  определяется по выражению (6) для величины оптимальной температуры [2].

Условия проведения расчетного эксперимента: материал резца – ВК6М, материал детали – ХН77ТЮР.

Свойства материала заготовки: удельная теплоемкость материала  $c = 0,495$  кДж/(кг·°С) [5]; плотность  $\rho = 0,008$  г/мм<sup>3</sup> [4]; предел прочности при растяжении  $\sigma_B = 900$  МПа [3].

Углы инструмента [2]: передний  $\gamma = 0^\circ$ ; задний  $\alpha = 10^\circ$ ; в плане  $\varphi_p = 45^\circ$ .

Режимы резания: глубина резания  $t = 1$  мм [2]; подача  $s$  изменяется в пределах от 0,06 до 1 мм/об; скорость резания  $v$  определена из уравнения (8) [2] при оптимальной температуре  $\theta_0 = 700$  °С и значениях  $C_0 = 267$ ,  $z = 0,384$ ,  $y = 0,132$ ,  $x = 0,098$ , приведенных в [2].

$$\theta = C_0 \cdot v^z \cdot s^y \cdot t^x, \quad (8)$$

Температура охлаждающей среды в данном случае  $\theta_{oc} = 20$  °С, так как точение производится без применения СОЖ [2].

Произведено сравнение величины «экспериментальной»  $m_Э$  и «гипотетической»  $m_T$  масс НТ при постоянных значениях глубины резания и температуры в зоне резания и различных значениях подачи. По результатам сравнения получены графики зависимостей масс  $m_T$  и  $m_Э$  от подачи  $s$ , представлены на рис. 2.

Визуальный анализ полученных графиков указывает на сходство характера кривых.

Качественное сходство графиков подтверждает возможность аппроксимации НТ параллелепипедом при торцовом точении.

При изучении данного вопроса следует иметь в виду, что использованное уравне-

ние определения температуры в зоне резания (8) [2] является эмпирическим и имеет ряд величин, полученных в результате эксперимента. Это может являться причиной расхождения графиков экспериментальной и гипотетической масс НТ.

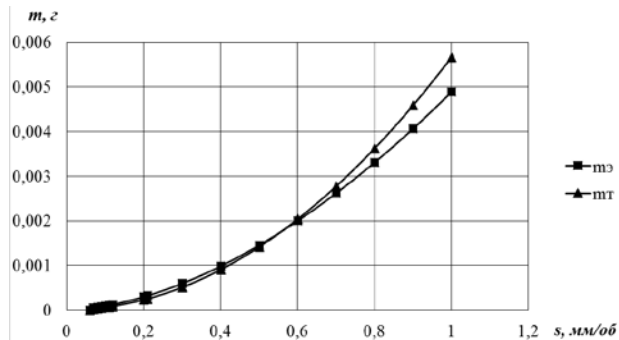


Рис. 2. Графики зависимостей гипотетической  $m_T$  и экспериментальной  $m_{\text{Э}}$  масс НТ от подачи  $s$  при торцовом точении

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Река Н. Г., Коуров Г. Н., Лютов А. Г. Измерение температуры в зоне резания металла при токарной обработке / Н. Г. Река, Г. Н. Коуров, А. Г. Лютов // СТН. – 2015. – №7. – С. 31–35. [ N. G. Reka, G. N. Kourov, A. G. Lutov, "Temperature measurement in the metal-cutting zone of a lathe" (in Russian), in *STN*, no. 7, pp. 31-35, 2015. ]
2. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с. [ A. D. Makarov, *Optimization of cutting processes*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 278 p., 1976. ]
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т.; справочник / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2003. – Т.2. – 944 с. [ A. M. Dalskiy, A. G. Kosilova, R. K. Mesheriakov, A. G. Suslov, *Handbook of the technologist-machine builder: in 2 vol.*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, vol. 2, 944 p., 2003 ]
4. Марочник стали и сплавов [электронный ресурс]. URL: [http://www.splav-kharkov.com/choose\\_type.php](http://www.splav-kharkov.com/choose_type.php) (дата обращения 04.02.2018). [ (2018, Feb. 4). Stamp steel and alloys [Online]. Available: [http://www.splav-kharkov.com/choose\\_type.php](http://www.splav-kharkov.com/choose_type.php) ]
5. Теплоемкость стали [электронный ресурс]. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/metally-i-splavy/teploemkost-stali> (дата обращения 04.02.2018). [ (2018, Feb. 4). Heat capacity of steel [Online]. Available: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/metally-i-splavy/teploemkost-stali> ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЛЮТОВ Алексей Германович**, проф., зав. каф. автоматизации технологич. процессов. Дипл. инженер-электроник (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по системн. анализу, упр. и обработке информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. автоматизации и упр. сложн. техн. объектами и процессами.

**КОУРОВ Георгий Николаевич**, доц. каф. автоматизации технологических процессов. Дипл. инженер по автоматизации технологич. процессов и производств (СГИ, 1968). Канд. техн. наук по автоматизации технологич. процессов и производств (СГИ, 1976). Иссл. в обл. автоматизации технологич. процессов и производств.

**РЕКА Надежда Георгиевна**, ст. преподаватель каф. автоматизации технологических процессов. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 2012). Канд. техн. наук по автоматизации технологич. процессов и производств (ИжГТУ, 2017). Иссл. в обл. автоматизации технологич. процессов и производств.

#### METADATA

**Title:** Determination of parameters of a heating body at the face metal turning.

**Authors:** N. G. Reka<sup>1</sup>, G. N. Kourov<sup>2</sup>, A. G. Lutov<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> Kourova.89@mail.ru, <sup>2</sup> Kourov\_GN@mail.ru, <sup>3</sup> Lutov1@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 120-122, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The main parameter determining the quality of the surface and the efficiency of the cutting process is the temperature in the cutting zone of the metal. The temperature in the cutting zone can be determined using the concept of a "heated body". In the article the heated body is considered at face metal turning. The shape, volume and mass of the body being heated are determined. The mass of the heated body calculated by the volume of the parallelepiped is compared with the mass of the heated body calculated according to the law of conservation of energy using the results of the full-scale experiment. The possibility of approximating a heated body with a parallelepiped at face turning is confirmed.

**Key words:** temperature in the cutting zone, heated body, the process of face metal turning, the law of conservation of energy

**About authors:**

**LYUTOV, Aleksey Germanovich**, Prof., head of a Dept. of Automation of technological processes. Dipl. electronic engineer (UAI, 1985), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2005).

**KOUROV, Georgiy Nikolaevich**, Assoc., Dept. of Automation of technological processes. Dipl. engineer of Automation of technological processes and manufactures (UAI, 1985), Cand. of Tech. Sci. (SGI, 1976).

**REKA, Nadezhda Georgievna**, Senior Lecturer, Master of Engineering technology (UGATU, 2012), Cand. of Tech. Sci. (IzhGTU, 2017)

## РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ СТАНКОВ-РОБОТОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ

А. Р. САЙДУГАНОВ<sup>1</sup>, Р. Г. КУДОЯРОВ<sup>2</sup>, О. К. АКМАЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>andrewsai@mail.ru, <sup>2</sup>kats10@mail.ru, <sup>3</sup>olakm@rambler.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассмотрена классификация станков-роботов с учетом назначения, характерных признаков принципиальных, конструктивных и схемных решений. Установлены варианты станков-роботов с механизмами параллельной структуры, характеризующиеся повышенными технологическими возможностями.

**Ключевые слова:** станок-робот; повышение технологических возможностей; параллельная кинематика; механизм с 6 степенями свободы.

Основным отличием станка-робота является применение механизма с параллельной структурой (МПС), состоящего из неподвижного основания (рис. 1), подвижной платформы рабочего органа (выходного звена) и связывающих их приводных штанг с шарнирами (1, 2, 3...). Перемещение рабочего органа относительно обрабатываемой заготовки по любой из трех линейных и трех поворотных осей осуществляется путем движения нескольких штанг одновременно или раздельно, с помощью системы числового программного управления. Учет данной схемы позволяет обеспечить работу станка-робота с шестью степенями свободы в целях расширения его технологических возможностей.

К основным преимуществам станка-робота с параллельной кинематикой относятся [1]: высокая жесткость; высокие динамические показатели; простота конструкции с однотипными деталями, низкая металлоемкость и масса.

При разработке конструкции данного оборудования необходимо обеспечивать: возможность обработки деталей сложной геометрии; достижение высокой производительности путем применения технологии высокоскоростной обработки; повышенную жесткость; согласованное управление по 5-7 координатам; высокое быстродействие. На рис. 2 согласно результатам анализа станков с МПС представлены варианты со-

отношений параметров. По данным [2], существует некий баланс параметров, согласно, которому увеличение одной характеристики приводит к ухудшению другой. Варьирование геометрическими параметрами (вылетами, размерами направляющих, длинами ходов узлов, штанг)

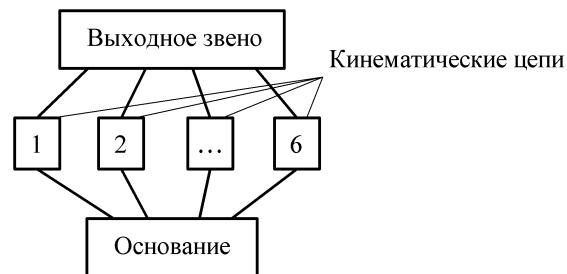


Рис. 1. Принципиальная схема станка-робота

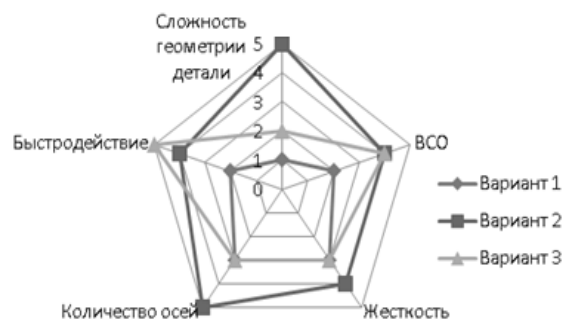


Рис. 2. Варианты соотношений параметров станка-робота с МПС

позволяет добиться оптимального сочетания объемной точности, жесткости конструкции, минимизации ее габаритов и, как следствие, минимума затрат. В ряде слу-

чаев, некоторые параметры (сложность геометрии, ВСО, жесткость, количество осей, быстродействие) могут регламентироваться техническим заданием на разработку конструкции станка.

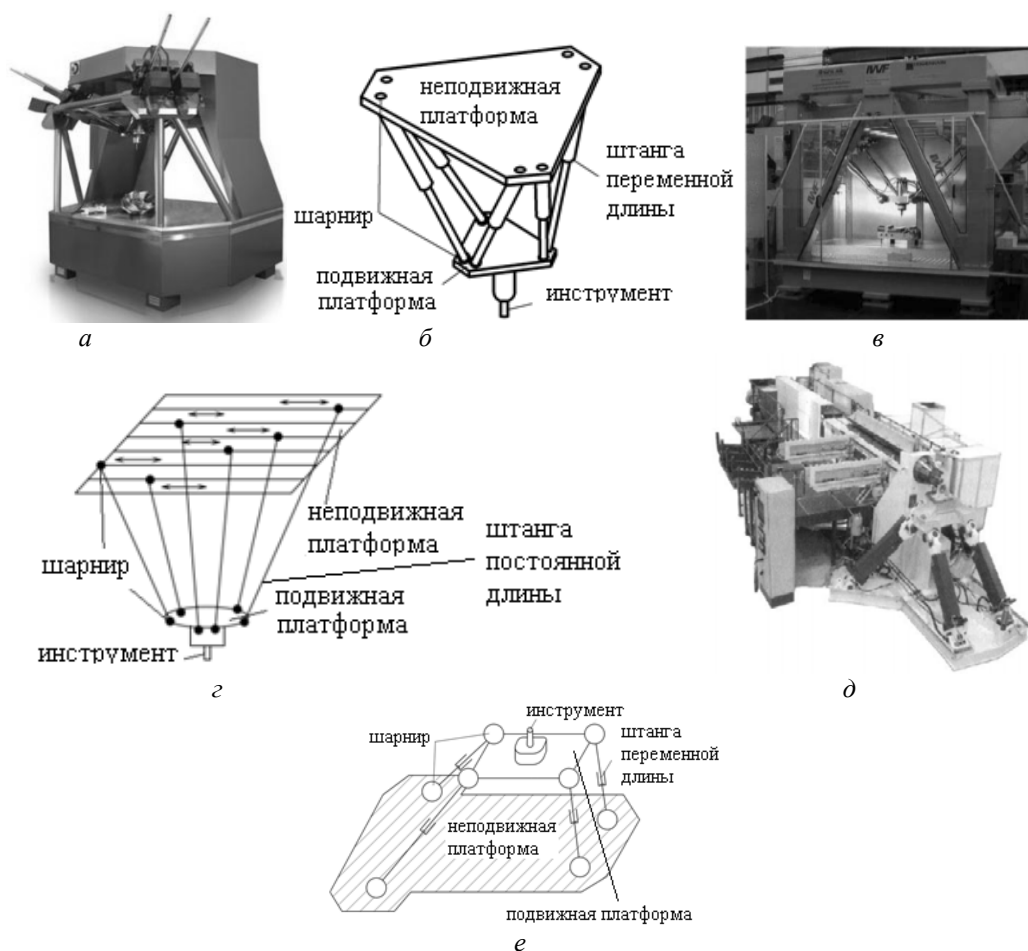
Механизмы с параллельной и гибридной структурой, применяемые в металло-режущих станках [3, 4], можно классифицировать: по виду штанг; по количеству штанг; по расположению шпинделя и др.

На основе выполненного анализа предложена классификация станков-роботов по конструктивному признаку (рис. 4) с возможностью ее описания с помощью структурной формулы. Принят следующий порядок данной формулы: на первом месте – станок-робот  $СР_x$ , где  $x$  – количество осей; на втором - кинематика станка параллельная

или гибридная: П; Г; третья позиция – вид штанг: штанги с постоянной длиной -  $П_{ст}(y)$ , штанги с переменной длиной -  $П_p(y)$ , где  $y$  – количество штанг; комбинация штанг  $ахb$ , где  $a$  - штанга переменной длины;  $b$  - штанга постоянной длины; последней позицией является объект управления: шпиндельный узел - Ш; обрабатываемая деталь - О; шпиндельный узел и обрабатываемая деталь - ШО.

На рис. 3 представлены примеры станочного оборудования с 6 степенями свободы:  $СР_6 П П_p(6) Ш$  (рис. 3, а, б);  $СР_6 П П_{ст}(6) Ш$  (рис. 3, в, г);  $СР_6 Г П_p(4) Ш$  (рис. 3, д, е).

Применение данного оборудования позволяет изготавливать детали со сложными фасонными поверхностями.



**Рис. 3.** Оборудование с МПС: а – КИМ - 750; б – схематичное изображение КИМ - 750; в – Hexaglide; г – схематичное изображение станка Hexaglide; д – МПС для пластического деформирования; е – схематичное изображение МПС

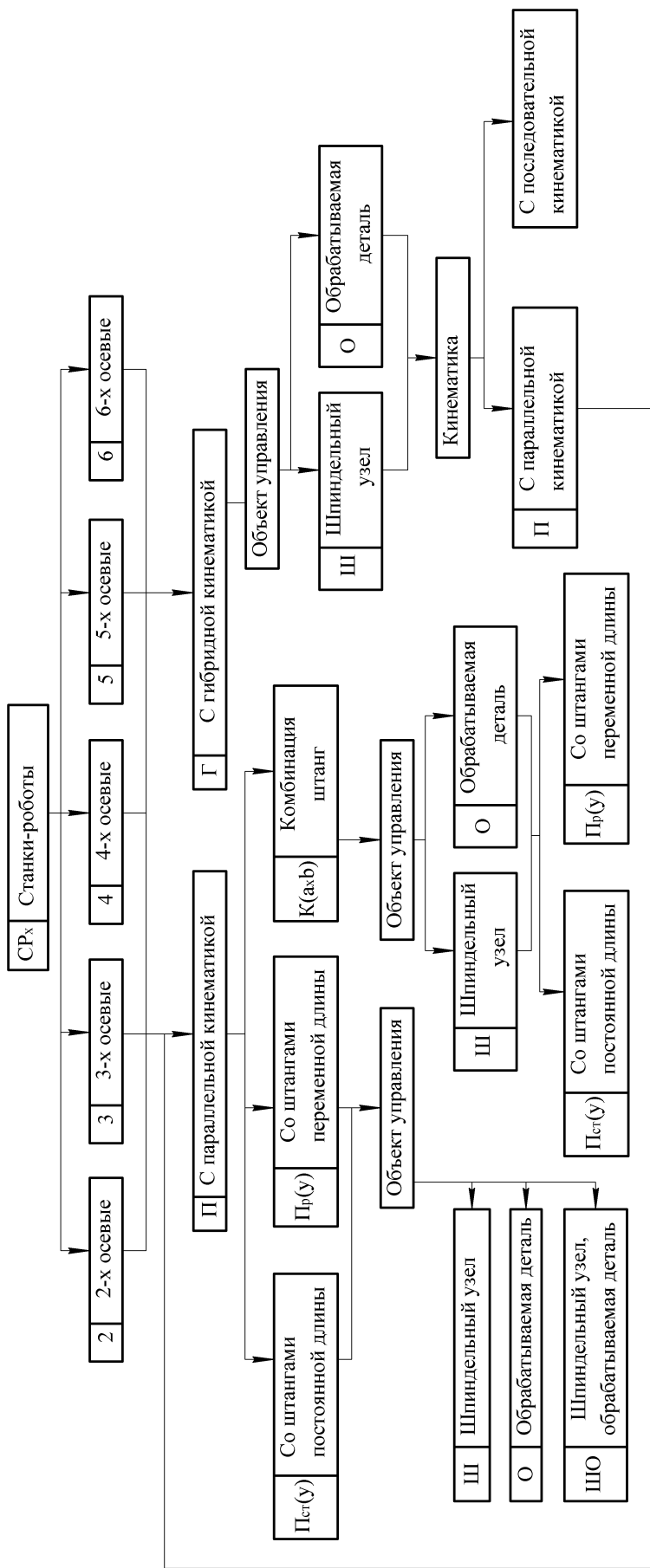
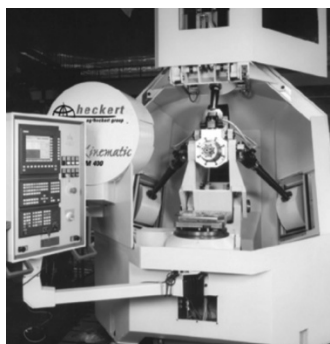
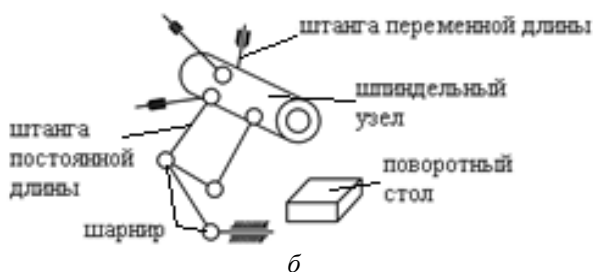


Рис. 4. Классификация станка-робота

Примером станка с гибридной структурой является станок мод. SKM (рис. 5), структура которого соответствует СР<sub>3</sub> Г К (3х5) Ш.



а



б

**Рис. 5.** Механизм с гибридной кинематикой: а – станок SKM 400; б – схематичное изображение станка SKM 400.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены следующие выводы:

1. На основе анализа станков с параллельной кинематикой предложена классификация станков-роботов, отличающаяся учетом вариантов с гибридной кинематикой.

2. При проектировании станков-роботов необходим поиск и обоснование оптимального сочетания его основных параметров и показателей работы с учетом технологического назначения.

3. Для повышения технологических возможностей станков-роботов является целесообразной их разработка на основе гибридной структуры с использованием механизмов с шестью степенями свободы.

Дальнейшие исследования предполагаются продолжить в направлении исследования повышения технологических возможностей станка-робота с параллельной кинематикой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сравнительный анализ жесткостных характеристик станка классической компоновки и станка с параллельной кинематикой/ Акмаев О. К., Еникеев Б. А., Юсупов А. Ф.** // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий Межвузовский научный сборник. Уфа, 2014. С. 135-140. [О. К. Akmaev, B. A. Enikeev, A. F. Yusupov, "Comparative Analysis of the Stiffness Characteristics of the Classical Assembly Machine and the Machine with Parallel Kinematics", (in Russian), Modern trends in metalworking technologies and structures of metalworking machines and components. Interuniversity scientific collection. Ufa, Russian, 2014. pp. 135-140. ]

2. **Альтшуллер Г. С.** Теория решения изобретательских задач как основа формирования творческого мышления учащихся // Новые ценности образования: ТРИЗ-педагогика. М.: Народное образование, 2003. С. 3-12. [G. S. Altshuller, Theory of the solution of inventive problems as a basis for the formation of students' creative thinking, (in Russian), New values of education: TRIZ-pedagogy. M.: Narodnoe obrazovanie, 2003. pp. 3-12. ]

3. **Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках / Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Самар Е. В.** // Ученые записки комсомольского-на-амуре государственного технического университета (г. Комсомольский-на-Амуре, 2012 г.). Комсомольский-на-Амуре: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет", 2012. Т. 1. №12. С. 52-61. [E. B. Shchelkunov, S. V. Vinogradov, M. E. Shchelkunova, E. V. Samar., "Mechanisms of parallel structure in metal-cutting machines", (in Russian), Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure State Technical University (Komsomolsk-na-Amure, 2012). Komsomolsk-na-Amure: Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Komsomolsk-na-Amure State Technical University", 2012. Vol. 1. No. 12. pp. 52-61. ]

4. **Кузнецов Ю. Н., Дмитриев Д. А., Диневиц Г. Е.** Компоновки станков с механизмами параллельной структуры/ Под ред. Ю. Н. Кузнецова. – Херсон: ППВишемирский В. С., 2010. – 471 с. [Yu. N. Kuznetsov, D. A. Dmitriev, G. E. Dinevich, "Compositions of machines with parallel structure mechanisms", (in Russian) Ed. N. N. Kuznetsova. - Kherson: V. S. PPVishemirsky, 2010. - 471 pp. ]

## ОБ АВТОРАХ

**САЙДУГАНОВ Андрей Радионович**, асп. каф. АТП. Дипл. магистр (УГАТУ, 2017). Готовит дис. о разработке и исследовании станка-робота с повышенными технологическими возможностями.

**КУДОЯРОВ Ринат Габдулхакович**, проф. каф. АТП. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1963). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию мех.и физ.-техн. обработки (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. разработки мехатронных станочных систем.

**АКМАЕВ Олег Кашафович**, доц. каф. АТП. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по техн. произв. летательн. аппаратов и двигателей (УГАТУ, 1983). Иссл. в обл. обработки точных деталей и в обл. разработки мехатронных станочных систем.

## METADATA

**Title:** Development classification of machines-robot with elements parallel kinematics.

**Authors:** A. R. Sayduganov<sup>1</sup>, R. G. Kudoyarov<sup>2</sup>, O. K. Akmaev<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>andrewsai@mail.ru, <sup>2</sup>kats10@mail.ru,

<sup>3</sup>olakm@rambler.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 123-127, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print).**

**Abstract:** The classification of machine-robots is considered taking into account the purpose, characteristic features of principal, constructive and circuit solutions. Variants machine-robots with mechanisms of parallel structure, characterized by increased technological capabilities, are established.

**Key words:** machine-robot; increase of technological capabilities, parallel kinematics, mechanism with 6 degrees of freedom.

**About authors:**

**SAYDUGANOV, Andrey Radionovich**, Postgrad., Dept. of Automation technological processes. Master of Technics & Technology (UGATU, 2017).

**KUDOYAROV, Rinat Gabdulhakovich**, Prof., Dept. of Automation technological processes. Dipl. Mechanical engineer (UAI, 1963). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2003).

**AKMAEV, Oleg Kashafovich**, Associate Professor, Dept. of Automation technological processes. Dipl. Mechanical engineer (UAI, 1971). Candidate of Tech. Sci. (UGATU, 1983).

## ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ВАЗ-21124 ПРИ ПОМОЩИ МЕХАНИЧЕСКОГО НАДДУВА

М. М. САЛИМГАРЕЕВ<sup>1</sup>, Ю. Р. ВАХИТОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>salimgareev\_maks@mail.ru, <sup>2</sup>vakhitov51@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассматриваются возможности применения механического нагнетателя для двигателя ВАЗ-21124 с приводом от коленчатого вала и с приводом от электродвигателя. Приводятся результаты расчета показателей двигателя с разными вариантами привода в системе имитационного моделирования. Показано, что привод нагнетателя от электродвигателя по сравнению с приводом от коленчатого вала позволяет улучшить показатели двигателя на низких и средних частотах вращения коленчатого вала. Увеличение нагрузок на детали двигателя при применении нагнетателя не приводит к существенному снижению запаса прочности деталей двигателя.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания; механический наддув; имитационное моделирование; система имитационного моделирования «Альбея»; центробежный нагнетатель; нагнетатель с электроприводом.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в двигателестроении наблюдается тенденция увеличения доли двигателей с наддувом. У ряда фирм доля двигателей с наддувом в объеме производства достигает 50...100% [1]. Особенно заметна эта тенденция в сегменте двигателей для легковых автомобилей.

Мощность двигателя напрямую связана с рабочим объемом цилиндров и количеством подаваемой в них топливо-воздушной смеси. То есть, чем больше в цилиндрах сгорает топлива, тем более высокую мощность развивает силовой агрегат. Количество подаваемой рабочей смеси можно увеличить за счет применения наддува, то есть повышения давления перед впускными органами.

При наддуве улучшается наполнение цилиндров свежим зарядом, что позволяет сжигать в цилиндрах большее количество топлива и получать за счет этого более высокую агрегатную мощность двигателя. В современном двигателестроении очень ши-

роко используется наддув и выполняется он различными способами, для реализации которых применяют основанные на разных принципах действия нагнетатели и турбокомпрессоры.

Как известно, наибольшую эффективность обеспечивает газотурбинный наддув, однако ему присущи недостатки, в первую очередь связанные с отсутствием жесткой механической связи с коленчатым валом.

Приводные нагнетатели требуют затрат части мощности двигателя, поэтому эффективность их применения ниже, однако их существенным преимуществом является малая инерционность срабатывания системы наддува при изменении нагрузки или частоты вращения двигателя, поэтому такие системы применяются там, где необходима высокая приемистость двигателя.

В данной работе проводится сравнительный анализ параметров двигателя ВАЗ-21124, оснащенного нагнетателем с приводом от коленчатого вала и с приводом от электродвигателя.



### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ С НАГНЕТАТЕЛЕМ С ПРИВОДОМ ОТ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

Исследование проводилось с использованием системы имитационного моделирования (СИМ) «Альбея» [2]. СИМ «Альбея» позволяет рассчитать двигатель в целом, включая течение газа во впускном тракте, процессов в цилиндре двигателя, течения газа в выпускных трубопроводах и глушителе, а также механических потерь.

В СИМ «Альбея» был разработан проект двигателя ВАЗ-21124 и рассчитаны его характеристики при атмосферных параметрах на впуске двигателя.

Затем был рассчитан двигатель с нагнетателем ПК-23 (рис. 1) с приводом от коленчатого вала.



Рис. 1. Приводной нагнетатель ПК 23-1

Характеристика нагнетателя приведена на рис. 2.

Передаточное отношение между валом нагнетателя и коленчатым валом двигателя было принято равным 10. Таким образом, при частоте вращения коленчатого вала 5000 об/мин частота вращения вала нагнетателя составляла 50000 об/мин.

Режим совместной работы двигателя и нагнетателя находился из условия равенства расхода воздуха через двигатель и нагнетатель по соответствующей характеристике нагнетателя.

По характеристике компрессора при выбранном первом приближении расхода воздуха  $G_k$  и частоте вращения вала нагнетателя были определены степени повышения давления  $\pi_k$  и КПД компрессора  $\eta_k$ , по которым проводился расчет параметров воздуха на впуске двигателя.

Удельная адиабатная работа нагнетателя

$$l_{k,ад} = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_0 \left( \pi_k^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right),$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты воздуха;  $R$  – газовая постоянная воздуха;  $T_0$  – температура окружающей среды.

Температура воздуха после компрессора

$$T_k = \frac{l_{k,ад}}{\eta_k c_p} + T_0,$$

где  $c_p = 1005$  Дж/(кг·град) – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

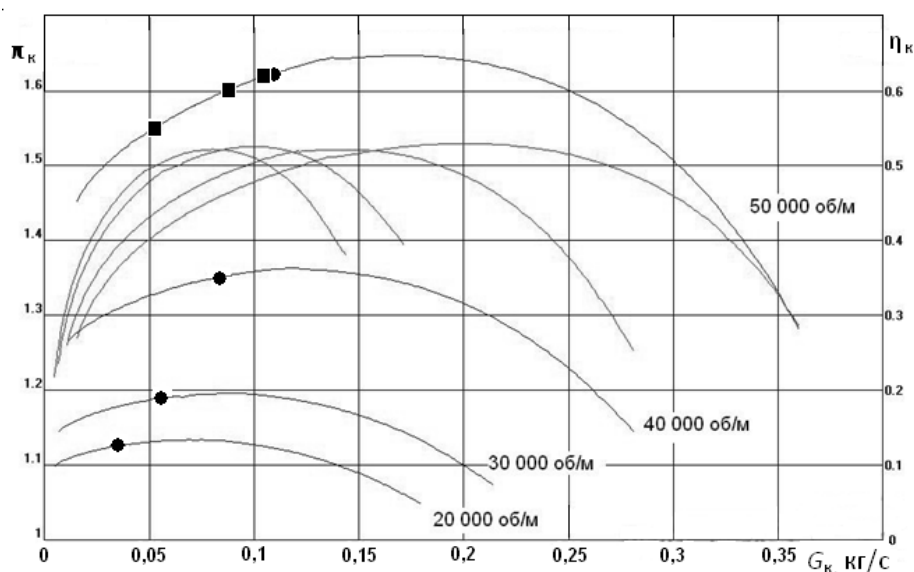


Рис. 2. Характеристика компрессора ПК-23

Давление воздуха после компрессора

$$p_k = p_0 \pi_k.$$

При заданных параметрах на впуске проводился расчет двигателя в СИМ «Альбея», и полученное значение расхода воздуха через двигатель  $G_d$  сравнивалось с первым приближением расхода  $G_k$ . Если разница в расходах превышала 3%, на характеристике компрессора выбиралась другая точка с новыми значениями  $G_k$ ,  $\pi_k$  и  $\eta_k$ . Расчеты повторялись до тех пор, пока разница между  $G_d$  и  $G_k$  достигала менее 1%.

Мощность на привод компрессора

$$N_k = \frac{G_k l_{k ад}}{\eta_k \eta_m},$$

где  $\eta_k$  – механический КПД привода компрессора.

Так как мощность на привод нагнетателя снимается с коленчатого вала двигателя, то мощность двигателя с наддувом уменьшалась на величину затрат мощности на привод нагнетателя

$$N_{ен} = N_{еп} - N_k,$$

где  $N_{еп}$  – мощность поршневой части двигателя, полученная расчетом в СИМ «Альбея».

Аналогично находились режимы совместной работы на других частотах вращения вала двигателя. При этом передаточное отношение оставалось постоянным: частоте вращения коленчатого вала 4000 об/мин соответствовала частота вращения вала нагнетателя 40000 об/мин и т.д.

На рис. 2 режимы совместной работы двигателя и нагнетателя отмечены круглыми маркерами. Результаты расчеты приведены в таблице.

Таблица 1

Параметры двигателя с нагнетателем с приводом от коленчатого вала

$n_d$ , об/мин	$\pi_k$	$G_d$ , кг/час	$N_{ен}$ , кВт
5000	1,62	397	104,7
4000	1,35	265	71
3000	1,19	165	45,0
2000	1,12	92	24,2

Таким образом, применение механического наддува позволяет повысить мощность двигателя ВАЗ-21124 на 38%.

По результатам имитационного моделирования двигателя были проведены расчеты ременного привода нагнетателя, расчет деталей кривошипно-шатунного механизма на прочность и схематическая компоновка двигателя.

Для размещения компрессора в непосредственной близости от коленчатого вала двигателя автомобиля ВАЗ, бачок стеклоомывателя может быть перенесен на место воздушного фильтра, который, в свою очередь, устанавливается на место бачка (рис. 3). Такое решение позволило реализовать ременный привод (рис. 4) с меньшим количеством доработок.

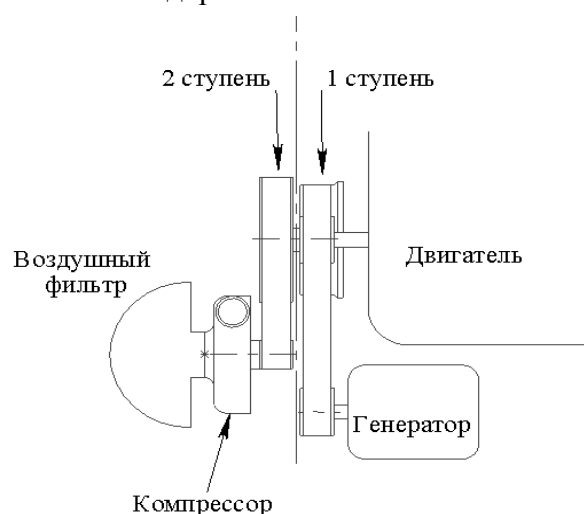


Рис. 3. Расположение компрессора относительно двигателя

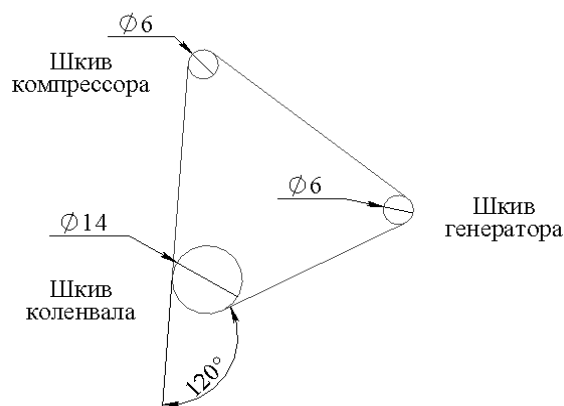


Рис. 4. Расположение ремня и шкивов для привода генератора и компрессора

Недостатком рассмотренного вида привода является жесткая связь между валом нагнетателя и коленчатым валом двигателя, что не позволяет при необходимости регулировать расход воздуха при заданной частоте вращения коленчатого вала.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ С НАГНЕТАТЕЛЕМ С ПРИВОДОМ ОТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Одним из наиболее эффективных способов повышения мощности двигателя на низких частотах вращения коленчатого вала, а также уменьшения вредных выбросов в атмосферу является установка нагнетателя с электрическим приводом, который является разновидностью механического наддува.

В отличие от турбонагнетателя, который аналогичным образом повышает производительность двигателя, электрический нагнетатель работает независимо от частоты вращения двигателя. Такая технология идеально подходит для поддержания переходных характеристик транспортного средства и управляемости, что уменьшает количество вредных выбросов, помогая эффективнее использовать топливо.

Наддув с электроприводом также позволяет избежать огромных затрат и сложности интеграции электродвигателя непосредственно в трансмиссию для создания мягкого или полного гибридного электромобиля.

Проблему низкого КПД может решить установка нагнетателя с электрическим приводом. Это решение позволит частоте вращения колеса нагнетателя меняться более гибко, что приведет к повышению мощности. Нагнетатель с электрическим приводом позволяет на низких и средних частотах

вращения коленчатого вала двигателя реализовывать высокие степени повышения давления и увеличить подачу воздуха в двигатель, что позволяет добиться значительного повышения мощности двигателя.

Для обеспечения необходимых показателей нагнетателя ПК-23 с двигателем ВАЗ могут использоваться электрические двигатели Turnigy RotoMax 100cc с плавным регулированием частоты вращения вала, подключенные к нагнетателю через редуктор с передаточным отношением, равным 10.

Аналогично тому, как проводился расчет двигателя с нагнетателем с приводом от коленчатого вала, был проведен расчет двигателя с нагнетателем, оснащенный электроприводом. При этом не сохранялось постоянное передаточное отношение между валами нагнетателя и коленчатого вала: нагнетатель работал при постоянной частоте вращения вала, равной 50000 об/мин, обеспечивая более высокие степени повышения давления при расходе воздуха в 1,5-1,8 раза выше, чем в варианте с приводом от коленчатого вала в диапазоне низких и средних скоростных режимов работы двигателя.

На рис. 2 режимы совместной работы двигателя и нагнетателя с электроприводом отмечены квадратными маркерами.

Результаты расчета двигателя представлены на рис. 5, где  $N$  – мощность двигателя без наддува,  $N_{ен}$  – мощность двигателя с нагнетателем с приводом от коленчатого

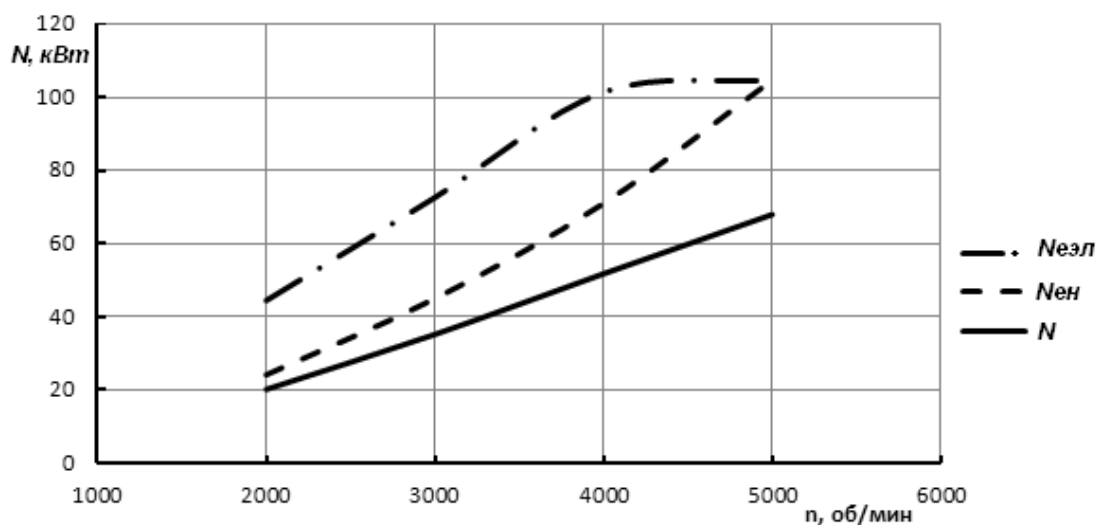


Рис. 5. Зависимости мощности двигателя при различных вариантах наддува от частоты вращения коленчатого вала

вала,  $N_{\text{ээл}}$  – мощность двигателя с нагнетателем, оснащенный электроприводом.

Зависимости показывают, что мощность двигателя наддувом с электрическим приводом в сравнении с наддувом с приводом от коленчатого вала существенно больше во всем скоростном диапазоне. В частности, прирост мощности на частоте 2000 об/мин составляет 120%, что втрое больше, чем максимальный прирост мощности при наддуве с приводом от коленчатого вала. При этом удельный эффективный расход топлива в варианте наддува с электроприводом уменьшился на 2-4% по сравнению с приводом от коленчатого вала.

Расчет на прочность деталей кривошипно-шатунного механизма проводился по результатам моделирования работы двигателя в СИМ «Альбея». В результате расчетов установлено, что максимальные напряжения в деталях двигателя лежат в пределах допустимых значений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье приведены результаты исследования возможности применения механического наддува на двигателе ВАЗ-21124.

Рассмотрены два варианта привода нагнетателя ПК-23: от коленчатого вала двигателя и электропривод.

Моделирование двигателя в СИМ «Альбея» показало, что максимальная мощность двигателя в обоих вариантах увеличивается на 38%. Но применении электропривода нагнетателя позволяет существенно повысить мощность двигателя и улучшить экономичность по сравнению с приводом от коленчатого вала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вахитов Ю. Р.** Агрегаты наддува двигателей: учебное пособие. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2012. – 158 с.
2. **Система** имитационного моделирования "Альбея" (ядро). Руководство пользователя. Руководство программиста: Учебное пособие / В.Г. Горбачев, С.А. Загайко, Н.В. Рудая, Б.П. Рудой, С.Б. Щербаков; Уфимск. госуд. авиац. техн. ун-т. Уфа. 1995. – 112 с.

### ОБ АВТОРАХ

**САЛИМГАРЕЕВ Максим Маратович**, магистрант каф. ДВС УГАТУ. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2016). Готовит ВКР об электрическом наддуве ДВС.

**ВАХИТОВ Юрий Рашитович**, доцент каф. ДВС. Дипл. инженер-механик (Уфимск. авиац. институт, 1975). К-т техн. наук (Ижевский механич. институт, 1988). Иссл. в обл. шума ДВС.

### METADATA

**Title:** Increase of VAZ-21124 engine power with the aid of mechanical charging.

**Authors:** M. M. Salimgareev<sup>1</sup>, J.R. Vakhitov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>salimgareev\_maks@mail.ru, <sup>2</sup>vakhitov51@mail.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 128-132, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print).**

**Abstract:** The possibilities of using a mechanical supercharger for a VAZ-21124 engine driven by a crankshaft and by an electric motor are considered. There are given the results of calculation of the engine parameters with different variants of the drive in the simulation modeling system. It is shown that the drive of the supercharger from the electric motor in comparison with the drive from the crankshaft makes it possible to improve the engine performance at low cranking speeds. The increase of the loads on the engine parts while using the supercharger does not lead to a significant reduction in the safety margin of the engine parts.

**Key words:** internal combustion engine, mechanical supercharging, simulation simulation, «Albea» simulation system, centrifugal supercharger, supercharger with electric drive

**About authors:**

**SALIMGAREEV, Maxim Maratovich**, graduate student of the department ICE USATU. Graduated Bachelor's Degree (USATU, 2016). Prepares the SRS for the electric supercharging of ICE.

**VAKHITOV, Yuri Rashitovich**, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines. Graduated Mechanical Engineer (Ufa Aviation Institute, 1975). Candidate of technical. Sciences (Izhevsk Mechanics Institute, 1988). Studies in the field of noise ICE.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОХЛАЖДАЕМОЙ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. А. Салимзянова<sup>1</sup>, А. А. Князев<sup>2</sup>, А. А. Рахимов<sup>3</sup>, А. С. Гишваров<sup>4</sup>

<sup>1</sup>nikaxa@inbox.ru, <sup>2</sup>ArtSoull@ya.ru, <sup>3</sup>mr.abdusattor@list.ru, <sup>4</sup>kafedra.ad@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Проведено исследование прочности охлаждаемой рабочей лопатки турбины высокого давления ТРДД, используемого в качестве наземного газотурбинного привода.

**Ключевые слова:** рабочая охлаждаемая лопатка турбины; температурное состояние; жаропрочный сплав; прочность.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ досрочно снятых двигателей показывает, что основными причинами их выхода из строя являются:

- 1) несовершенство конструкции;
- 2) неудачная технология или нестабильность производства;
- 3) низкое качество или нестабильность материала;
- 4) дефекты комплектующих изделий (изделий смежников);
- 5) нарушение правил эксплуатации и обслуживания двигателей.

Это, в свою очередь, у 80 % досрочно снятых двигателей приводит:

- а) к повышенной вибрации;
- б) к усталостным разрушениям лопаток;
- в) к дефектам маслосистем по опорам;
- г) к исчерпанию длительной прочности лопаток;
- д) к разрушению элементов камеры сгорания.

В НЛГС «основными деталями» ГТД называют детали, разрушение, или последствия разрушения, которых могут привести к катастрофическим последствиям. К таким отказам относятся:

- 1) разрушение элементов ротора, обломки которых не удерживаются внутри корпуса;
- 2) нелокализованные пожары;
- 3) невозможность выключения двигателя.

Помимо вышеуказанных дефектов и неисправностей у всех авиационных двигателей, проблема заключается в турбине высокого давления (ТВД), а именно рабочие лопатки ТВД подвергаются поломке или разрушению из-за высоких температур, центробежных воздействий на лопатку, а также влиянию аэродинамических и вибрационных сил.

При этом длительная статическая прочность является одним из важных факторов определяющих ресурс турбины.

В связи с этим при проектировании лопаток большое внимание уделяется способам обеспечения надежности (рис. 1).

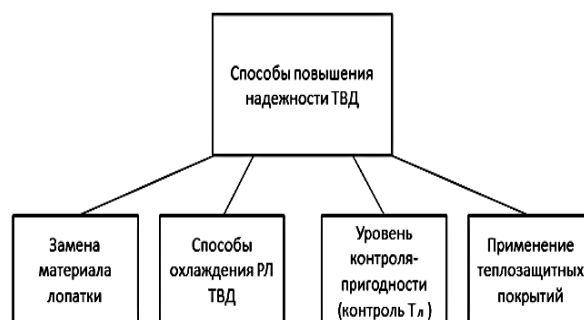


Рис. 1. Способы обеспечения надежности ТВД

В настоящее время для лопаток турбин двигателей применяют жаропрочные сплавы ЖС 55 и ВЖМ 4, позволяющие снизить теплонагруженность лопатки и

обеспечить требуемый запас прочности. В данной работе проводилось исследование влияния данных материалов на запас прочности охлаждаемых лопаток 1 ступени турбины ТРДД (рис. 2).

Расчет теплового и прочностного состояния лопатки ТВД проводился с применением программного комплекса ANSYS.

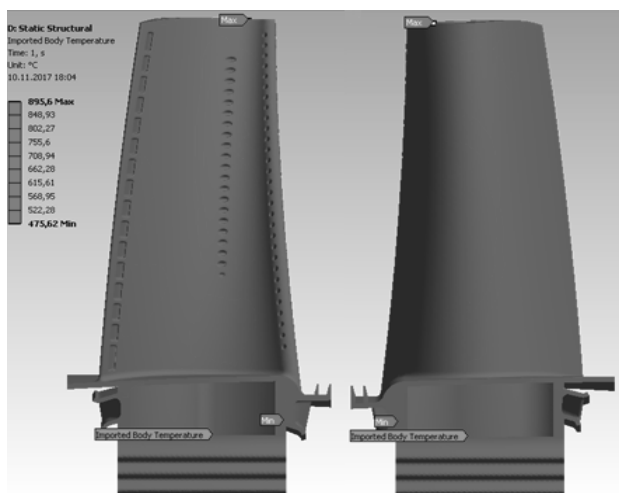


Рис. 2. Температурное поле охлаждаемой рабочей лопатки турбины

Результаты расчета теплового состояния рабочих лопаток, выполненных из сплава ЖС 55 и ВЖМ 4 для крейсерского и максимального режимов нагружения, приведены в табл. 1–4. Результаты расчета прочности лопатки приведены в табл. 5 и показаны на рис. б.

Таблица 1  
Результаты расчета теплового состояния лопатки на крейсерском режиме нагружения (сплав ЖС 55)

Радиус, мм	Температура лопатки, К		
	(режим «крейс»)		
	Тл.min	Тл.max	Тл.ср
209	769	1058	914
217	771	1014	893
228	777	1043	910
239	793	1017	905
250	817	1037	927
256	849	1066	958

Таблица 2

Результаты расчета теплового состояния лопатки на максимальном режиме нагружения (сплав ЖС 55)

Радиус, мм	Температура лопатки, К		
	(режим «макс»)		
	Тл.min	Тл.max	Тл.ср
209	808	1420	1114
217	842	1407	1125
228	876	1408	1142
239	927	1415	1171
250	992	1421	1207
256	1040	1422	1231

Таблица 3

Результаты расчета теплового состояния лопатки на крейсерском режиме нагружения (сплав ВЖМ 4)

Радиус, мм	Температура лопатки, К		
	(режим «крейс»)		
	Тл.min	Тл.max	Тл.ср
209	769	1053	911
217	770	1035	903
228	777	1041	909
239	794	1013	904
250	821	1038	929
256	853	1072	963

Таблица 4

Результаты расчета теплового состояния лопатки на максимальном режиме нагружения (сплав ВЖМ 4)

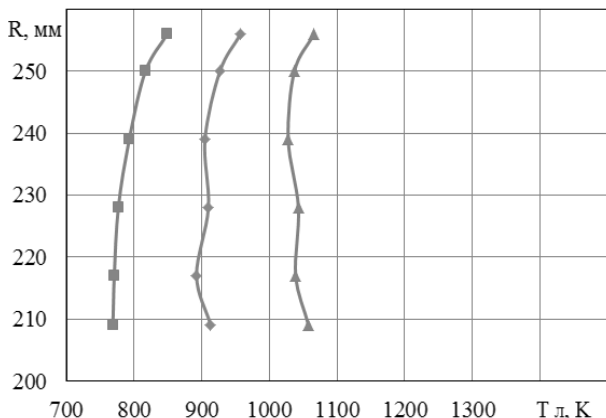
Радиус, мм	Температура лопатки, К		
	(режим «макс»)		
	Тл.min	Тл.max	Тл.ср
209	805	1390	1098
217	836	1389	1113
228	869	1383	1126
239	914	1398	1156
250	975	1404	1189
256	1033	1387	1210

Таблица 5

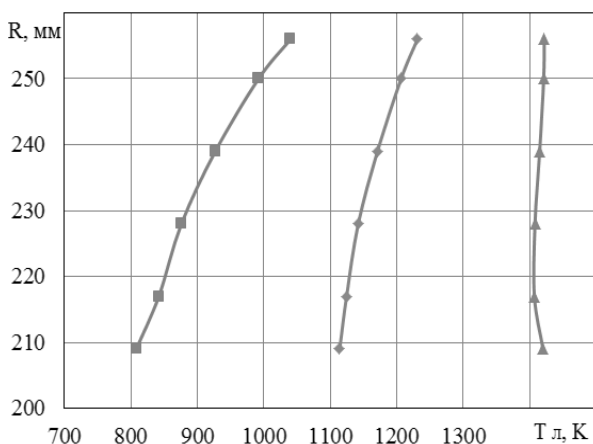
**Результаты расчета на прочность лопатки на максимальном режиме**

Рад, мм	$\sigma_{\Sigma}$ , МПа		R, мм	$\sigma_{\Sigma}$ , МПа	
	ВЖМ 4	ЖС 55		ВЖМ 4	ЖС 55
209	1026	999	239	829	783
212	983	989	244	803	761
217	943	951	250	786	767
222	876	885	253	789	676
228	829	833	256	596	378
234	832	803			

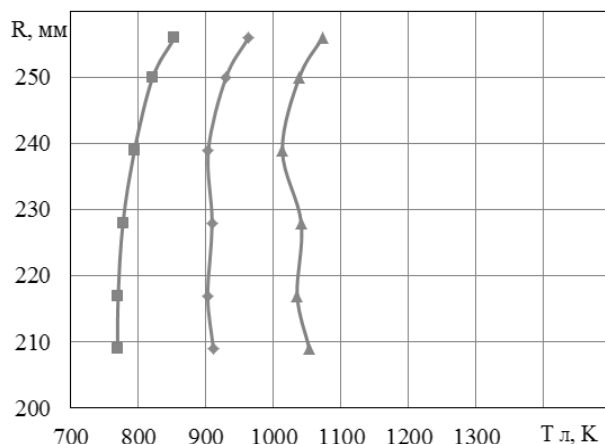
Построенные по результатам расчета на крейсерском и на максимальном режимах графики распределения температуры лопаток, выполненных из сплавов ВЖМ 4 и ЖС 55, приведены на рис. 3–7.



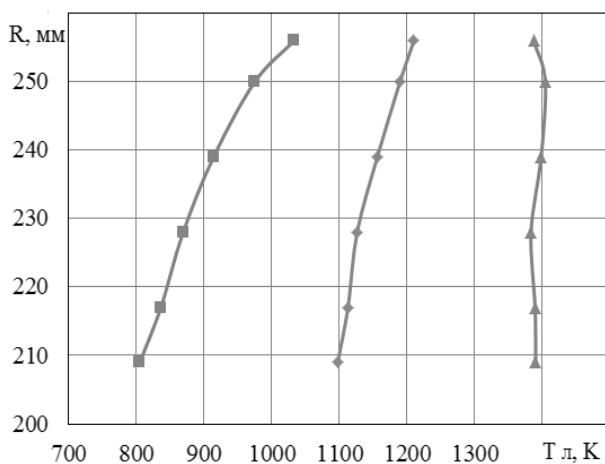
**Рис. 3.** Распределение температуры по высоте лопатки на крейсерском режиме (сплав ЖС 55): ■ – минимальная температура; ◆ – средняя температура; ▲ – максимальная температура



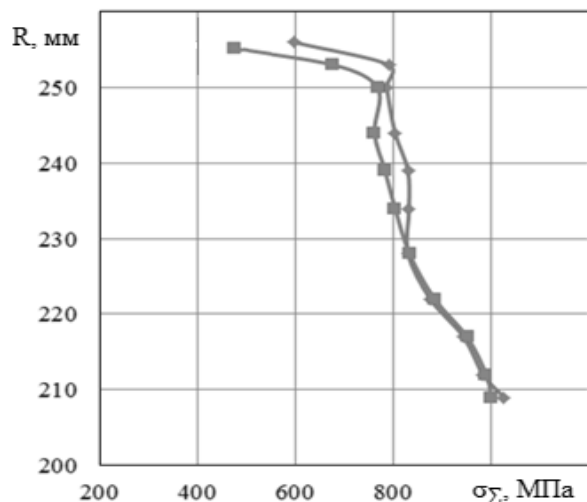
**Рис. 4.** Распределение температуры по высоте лопатки на максимальном режиме (сплав ЖС 55): ■ – минимальная температура; ◆ – средняя температура; ▲ – максимальная температура



**Рис. 5.** Распределение температуры по высоте лопатки на крейсерском режиме (сплав ВЖМ 4): ■ – минимальная температура; ◆ – средняя температура; ▼ – максимальная температура



**Рис. 6.** Распределение температуры по высоте лопатки на максимальном режиме (сплав ВЖМ 4): ■ – минимальная температура; ◆ – средняя температура; ▲ – максимальная температура



**Рис. 7.** Распределение напряжения лопатки по радиусу на максимальном режиме для сплавов: ■ – ЖС 55; ◆ – ВЖМ 4

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчётов видно, что более предпочтительным для лопатки 1 ступени ТВД является сплав ЖС 55 ( $[\sigma] = 1405$  Мпа), запас прочности по которому ( $n_{\sigma} = 1,4$ ) в 1,2 раза превышает запас прочности для сплава ВЖМ 4 ( $[\sigma] = 1220$  Мпа,  $n_{\sigma} = 1,19$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гишваров А.С., Рахимов А. Х.** Влияние параметров охлаждающего воздуха на температурное состояние рабочей лопатки турбины ГТД // Материалы XIII международной научно-практической конференции «Тенденции в современной науке-2017», Великобритания, Шеффилд, 2017 С.28-29. [Gishvarov A. S., Rakhimov A. H. The influence of the parameters of the cooling air on the temperature state of the rotor blade of the turbine GTD // Proceedings of XIII International Scientific-Practical Conference "Trends in contemporary science-2017", UK, Sheffield, 2017 p.28-29].
2. **Рахимов А.Х., Гишваров А.С.** Оценка и интенсификация теплоотдачи в охлаждающих каналах рабочих лопаток турбин ГТД // XIII межд. науч. практ. конф. "Тенденции в современной науке – 2017", Великобритания, Шеффилд, 2017. С.28 – 29.[ Rakhimov A. H., Gishvarov A. S. Evaluation and intensification of heat transfer in cooling channels of working blades of GTE turbines // XIII Int. sci. Pract. Conf. "Trends in modern science - 2017", Great Britain, Sheffield, 2017. P.28 - 29].

## ОБ АВТОРАХ

**ГИШВАРОВ Анас Саидович**, проф., зав. каф. авиац. двиг. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двиг. летательных аппаратов (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. надежности, ресурса, испытаний и прогнозирования состояния техн. систем.

**КНЯЗЕВ Артур Анатольевич**, магистрант каф. авиац. двигателей. Исследование в области ресурса и надежности авиационных двигателей.

**РАХИМОВ Абдусаттор Хасанович** асп. каф. авиационных двигателей. Дипл. маг. по авиастр. (УГАТУ, 2017). Иссл. в обл. надежности и ресурса авиац. двиг.

**САЛИМЗЯНОВА Айгуль Альфировна** асп. каф. авиационных двигателей. Дипл. маг. по энер. машин. (УГАТУ, 2014). Иссл. в обл. надежности и ресурса ГТД.

## METADATA

**Title:** Studies strength cooled rotor blade of high pressure turbine.

**Authors:** A. A. Salimzyanova, A.A. Knyazev, A. A. Rakhimov, A S. Gishvarov.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** nikaxa@inbox.ru, ArtSoull@ya.ru, mr.abdusattor@list.ru, kafedra.ad@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 133-136, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print).****Abstract:** studied strength cooled high pressure turbine rotor blade turbofan used as a ground drive turbine.

**Key words:** The working cooled turbine blade, the temperature state, the high-temperature alloys, the strength

**About authors:**

**GISHVAROV, Anas Saidovich**, Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer (USATU, 1973). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 1993).

**KNYAZEV, Artur Anatolyevich**, master of the department. aircraft engines. Research in the field of resource and reliability of aircraft engines.

**RAHIMOV, Abdusattor Hasanovich**, PhD Stud., Dept. of Aircraft Engines. Accident (USATU, 2017).

**SALIMZYANOVA, Aigul Alfirovna**, PhD Stud., Dept. of Aircraft Engines. Power Engineering (USATU, 2014).



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА ВЕРТОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. А. Салимзянова<sup>1</sup>, А. А. Князев<sup>2</sup>, А. А. Рахимов<sup>3</sup>, А. С. Гишваров<sup>4</sup>

<sup>1</sup>nikaxa@inbox.ru, <sup>2</sup>ArtSoull@ya.ru, <sup>3</sup>mr.abdusattor@list.ru, <sup>4</sup>kafedra.ad@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Исследуется влияние геометрических параметров пылезащитного устройства (ПЗУ) вертолетного двигателя на его эффективность: степень очистки воздуха ( $\eta$ , %), потери давления в ПЗУ ( $\Delta P$ , мм.вод.ст.) и объем (масса) ПЗУ ( $V$ , мм<sup>3</sup>). В качестве оптимизируемых параметров ПЗУ рассматриваются: угол закрутки лопаточного аппарата ( $\alpha$ , град), внешний диаметр центрального обтекателя ( $D_A$ , мм), внутренний диаметр центральной трубки ( $d$ , мм) и внутренний диаметр внешней трубки ( $D$ , мм). Значения  $\eta$ ,  $\Delta P$  и  $V$  определяются моделированием двухфазного потока «воздух – частицы пыли» с применением программного комплекса (ПК) ANSYS CFX.

**Ключевые слова:** пылезащитное устройство (ПЗУ); эффективность; геометрические параметры; выходные параметры ПЗУ; пылевая среда; ANSYS CFX; вертолетный ГТД; оптимизация; граничные условия; уравнения регрессии.

### ВВЕДЕНИЕ

В вертолетные двигатели частицы пыли поступают как в результате естественной запыленности воздуха вблизи земли, так и вследствие того, что потоки от несущего винта поднимают с поверхности земли твердые частицы, создающие вокруг вертолета пылевое облако с резко увеличенной концентрацией частиц пыли в воздухе.

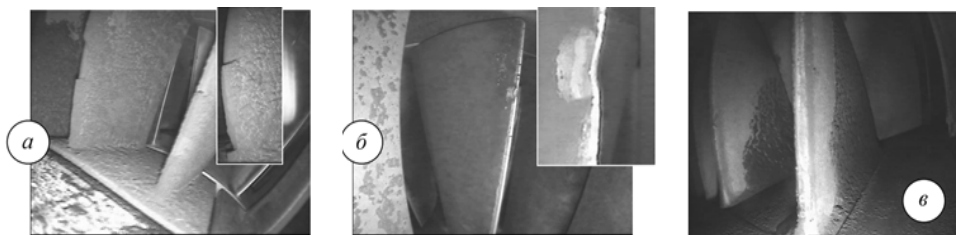
Пылевая эрозия элементов проточной части ГТД и отложения пыли вызывают такие отказы, как снижение мощности, недопустимый рост температуры газа перед турбиной, поломки ослабленных эрозией лопаток, помпаж. Вследствие больших относительных скоростей воздуха, поступающего на лопатки, и больших окружных скоростей, столкновение их даже с мелкими твердыми частицами может приводить к значительному износу.

Интенсивность эрозии зависит главным образом от твердости и химического состава частиц пыли, в меньшей степени зависит от фракционного состава этих частиц (известно

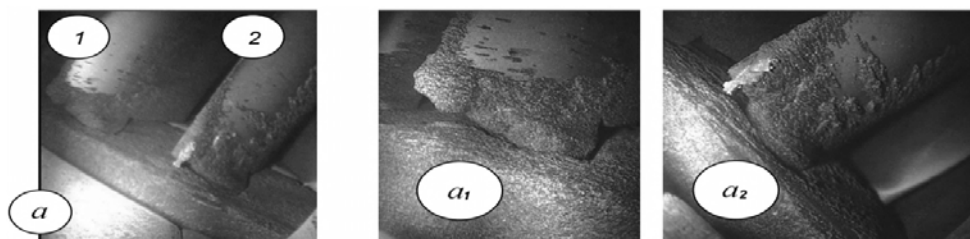
что частицы размером до 20 мкм не вызывают значительной эрозии).

Попавшие в двигатель частицы пыли не только изменяют форму профилей лопаток, но и оседают во входной части компрессора, что затрудняет надежную работу двигателя вертолета (рис. 1, 2). В результате налипания пыли на лопатках компрессора их собственная частота колебаний может уменьшиться на 45 %, что приводит к недопустимому увеличению действующих в лопатках напряжений и к их обрыву.

На практике в настоящее время используются в основном пылезащитные устройства инерционного типа (рис. 3): для отделения пыли от воздуха используется ее инерционность. Обычно в ПЗУ имеется один или несколько циклонов с завихрителями воздуха или ряд сужающихся спрофилированных по принципу трубки Вентури каналов с резким изменением направления. Отделенная, по причине инерционности, пыль чаще всего выбрасывается наружу при помощи эжектора или дополнительного вентилятора.

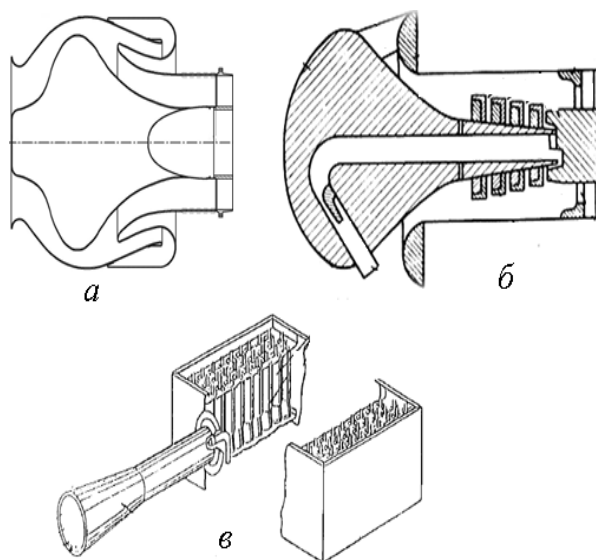


**Рис. 1.** Влияние на работу ГТД пылевой среды: *а* – секция ряда направляющих лопаток (вид в направлении передних кромок); *б* – вмятина в передней кромке от удара материала одной из лопастей первой ступени; *в* – пыль, накопленная на спинках лопаток первой ступени



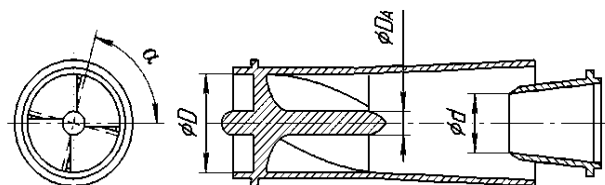
**Рис. 2.** Влияние на работу газотурбинного двигателя пылевой среды: *а* – секция регулируемых лопаток компрессора первой ступени (вид в направлении входных кромок); *а<sub>1</sub>* и *а<sub>2</sub>* – отрыв осажденного пылевого слоя; *1* и *2* – лопатки компрессора первой ступени

ПЗУ не всегда полностью очищают воздух. Мультициклонные устройства могут очистить его до 98 %, но они громоздки. Моноциклонные или многоканальные ПЗУ очищают воздух до 75...80 %. При этом, естественно, на работу этих устройств затрачивается часть мощности двигателя.



**Рис. 3.** Виды пылезаститных устройств: *а* –  $\lambda$ -образное ПЗУ; *б* – ПЗУ грибового типа; *в* – ПЗУ циклонного типа

В данной работе проводилось исследование эффективности циклонного ПЗУ, принципиальная схема которого приведена на рис. 4 [1].



**Рис. 4.** Принципиальная схема циклонного ПЗУ с кольцевым лопаточным направляющим аппаратом

Сепарация пыли в циклонах и их гидравлическое сопротивление зависят от основных конструктивных параметров, к которым относятся угол закрутки лопаточного аппарата  $\alpha$ , диаметр корпуса циклона  $D$  и ряд линейных размеров, характеризующихся относительными величинами (отнесенными к диаметру  $D$ ): внутренним диаметром центральной трубки  $d$ , внешним диаметром центрального обтекателя  $D_A$  и др.

При увеличении угла закрутки  $\alpha$  возрастают тангенциальные скорости воздуха и твердых частиц. Вследствие этого увеличиваются центробежные силы и радиальные скорости частиц. Ввиду того, что центробежная сила пропорциональна  $v^2$  ( $v$  – скорость твердых частиц), степень очистки  $\eta$  находится в обратной зависимости от  $tg^2\alpha$ . Однако, увеличение угла закрутки  $\alpha$  приводит к увеличению турбулентности потока внутри циклона, что, в свою очередь, приводит к потерям давления за циклоном.

С увеличением диаметра корпуса  $D$  циклона при постоянном расходе воздуха уменьшаются осевые скорости воздуха и твердых частиц, что ведет к пропорциональному увеличению продолжительности пребывания частиц в поле центробежных сил и способствует сепарации. Однако при этом уменьшается тангенциальная скорость воздуха, влияющая на силы инерции.

Уменьшение диаметра центральной трубки  $d$  приводит к уменьшению степени очистки воздуха  $\eta$ , так как при этом меньшая часть траекторий твердых частиц заканчивается в пределах входного сечения трубки. Это приводит к значительному уменьшению поступающего в ГТД воздуха и потерям давления на выходе из циклона.

В процессе исследования эффективность рассматриваемого ПЗУ оценивалась тремя параметрами: степенью очистки воздуха ( $\eta$ , %), потерей давления в ПЗУ ( $\Delta P$ , мм.вод.ст.) и объемом, пропорциональным массе ПЗУ ( $V$  мм<sup>3</sup>) [2]. Значения  $\eta$ ,  $\Delta P$  и  $V$  определялись с применением программного комплекса (ПК) *ANSYS CFX*.

После создания расчетной сетки в *Ansus CFX-Pre* задавались граничные условия. изображены стрелками (рис. 5).

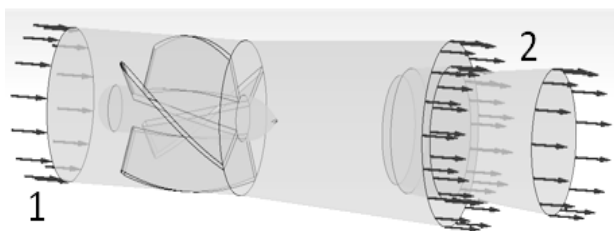


Рис. 5. Обозначения граничных условий:  
1 – вход (*inlet*); 2 – выход (*outlet*)

Стрелки, направленные внутрь области, представляют собой граничное условие типа *Inlet*, то есть через данную границу осуществляется вход непрерывной фазы в расчетную область. Также на этой границе задавалось равномерное появление частиц в

заданном количестве точек и с заданным суммарным массовым расходом.

Стрелки на выходе из расчетной области означают граничное условие типа *Outlet*, то есть через данную границу осуществляется выход непрерывной фазы из расчетной области. В качестве варьируемых рассматривались геометрические параметры циклона:

- угол закрутки лопаточного аппарата  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ;
- внешний диаметр центрального обтекателя  $6 \leq D_A \leq 12$  мм;
- внутренний диаметр центральной трубки  $18 \leq d \leq 24$  мм;
- внутренний диаметр внешней трубки  $16 \leq D \leq 30$  мм.

Зависимости вида  $\eta = f_1(\alpha, D_A, d, D)$ ,  $\Delta P = f_2(\alpha, D_A, d, D)$  и  $V = f_3(\alpha, D_A, d, D)$  определялись методом регрессионного анализа. Исходные данные для построения регрессионных моделей определялись расчетом значений  $\eta$ ,  $\Delta P$  и  $V$  для ПЗУ различной геометрии (табл. 1).

В регрессионном анализе в качестве независимых факторов рассматривались:

- $x_1$  (соответствует углу закрутки лопаточного аппарата  $\alpha$ , град);
- $x_2$  (соответствует внешнему диаметру центрального обтекателя  $D_A$ , мм);
- $x_3$  (соответствует внутреннему диаметру центральной трубки  $d$ , мм);
- $x_4$  (соответствует внутреннему диаметру внешней трубки  $D$ , мм).

Выходными (зависимыми) параметрами являлись:

- $y_1$  (соответствует  $\eta$ , %);
- $y_2$  (соответствует  $\Delta P$ , мм.вод.ст.);
- $y_3$  (соответствует  $V$ , мм<sup>3</sup>);

Нормированные значения параметров  $\alpha$ ,  $D_A$ ,  $d$  и  $D$  соответствовали области, задаваемой ограничениями вида:

$$\begin{aligned} -1 \leq x_1 \leq 1; & \quad -1 \leq x_2 \leq 1; \quad -1 \leq x_3 \leq 1; \\ & \quad -1 \leq x_4 \leq 1. \end{aligned}$$

Таблица 1

## План и результаты эксперимента по моделированию течения двухфазного потока в ПЗУ

№	$x_1$ ( $\alpha$ , град.)	$x_2$ ( $D_A$ , мм)	$x_3$ ( $d$ , мм)	$x_4$ ( $D$ , мм)	$y_1$ ( $\eta$ , %)	$y_2$ ( $\Delta P$ , мм.вод.ст)	$y_3$ ( $V$ , мм <sup>3</sup> )
1	-1	-1	-1	-1	91,33	121,28	7318,12
2	0	-1	-1	-1	97,65	122,69	7318,86
3	1	-1	-1	-1	99,22	125,78	7318,78
4	-1	0	-1	-1	92,01	124,23	7565,23
5	0	0	-1	-1	98,11	127,35	7565,35
6	1	0	-1	-1	98,54	131,89	7565,53
7	-1	1	-1	-1	97,65	131,86	7949,98
8	0	1	-1	-1	98,98	135,45	7949,13
9	1	1	-1	-1	99,4	1385	7949,8
10	-1	-1	0	-1	85,9	642	7441,7
11	0	-1	0	-1	94,5	669	7441,7
12	1	-1	0	-1	96,8	680	7441,7
...	...	...	...	...	...	...	...
28	-1	-1	-1	0	99,41	141,13	7949,72
29	0	-1	-1	0	85,98	65,76	7441,28
30	1	-1	-1	0	94,53	68,43	7441,36
31	-1	0	-1	0	96,87	69,25	7441,71
32	0	0	-1	0	89,65	69,12	7688,16
33	1	0	-1	0	92,98	73,78	7688,65
34	-1	1	-1	0	97,41	76,36	7688,46
35	0	1	-1	0	92,32	76,78	8072,78
36	1	1	-1	0	99,6	1582	11109,3
37	-1	-1	0	0	84,5	672	10739,5
38	0	-1	0	0	92,8	720	10739,5
39	1	-1	0	0	98,4	779	10739,5
...	...	...	...	...	...	...	...
70	-1	1	0	1	93,8	853	15269,5
71	0	1	0	1	99,9	996	15269,5
72	1	1	0	1	100,0	1174	15269,5
73	-1	-1	1	1	74,5	365	14669,2
74	0	-1	1	1	82,64	48,39	14669,21
75	1	-1	1	1	94,53	58,47	14669,35
76	-1	0	1	1	75,41	41,28	14997,35
77	0	0	1	1	85,52	55,27	14997,12
78	1	0	1	1	96,74	71,12	14997,25
79	-1	1	1	1	83,93	49,23	15384,36
80	0	1	1	1	93,77	70,45	15384,78
81	1	1	1	1	100	91,78	15384,35

В процессе исследования рассматривались уравнения регрессии вида:

$$\eta = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{34}x_3x_4 + a_{11}x_1^2 + \dots + a_{44}x_4^2; \quad (1)$$

$$\Delta P = \epsilon_0 + \epsilon_1x_1 + \dots + \epsilon_4x_4 + \epsilon_{12}x_1x_2 + \epsilon_{34}x_3x_4 + \epsilon_{11}x_1^2 + \dots + \epsilon_{44}x_4^2; \quad (2)$$

$$V = c_0 + c_1x_1 + \dots + c_4x_4 + c_{12}x_1x_2 + c_{34}x_3x_4 + c_{11}x_1^2 + \dots + c_{44}x_4^2; \quad (3)$$

где  $a_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$  и  $c_{ij}$  – коэффициенты уравнений регрессии.

После исключения незначимых факторов, оцененных по критерию Стьюдента, уравнение регрессии (1) приняло вид:

$$\eta = 94,0481 - 1,366x_4 - 0,563x_1x_2 + 2,825x_1x_3 + 0,805x_1x_4 + 0,786x_2x_3 - 2,879x_2x_4 + 3,698x_1^2 - 3,446x_2^2 - 0,874x_3^2; \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = 104,369 - 1,012 \cdot D - 1,035 \cdot a \cdot D_A + 1,8964 \cdot a \cdot d + 0,01 \cdot a \cdot D + \\ \quad + 56,984 \cdot D_A \cdot d + 0,906 \cdot D_A \cdot D - 0,006 \cdot a^2 + 76,27 \cdot D_A^2 - 150,051 \cdot d^2; \\ \Delta P = 12230,296 - 20,319 \cdot a - 1681,147 \cdot D_A - 26355,866 \cdot d + 21,185 \cdot a \cdot D_A + \\ \quad + 12,556 \cdot a \cdot d + 0,447 \cdot a \cdot D + 36,435 \cdot D_A \cdot D - 41,097 \cdot d \cdot D + 15424,074 \cdot d^2; \\ V = 1861,495 + 3124,473 \cdot D_A + 167,817 \cdot D + 44,051 \cdot d \cdot D + 6,865 \cdot D^2. \end{array} \right. \quad (7)$$

Система уравнений (7) использовалась для выбора оптимальных значений параметров  $\alpha$ ,  $D_A$ ,  $d$  и  $D$  из условия:

$$\eta \Rightarrow \max; \Delta P \Rightarrow \min; V \Rightarrow \min. \quad (8)$$

В качестве окончательного было выбран циклон ПЗУ с параметрами:  $\alpha_{opt} = 90^\circ$ ,  $D_{Aopt} = 6$  мм,  $d_{opt} = 15$  мм и  $D_{opt} = 25$  мм. При этом  $\eta_{opt} = 98,4$  %,  $\Delta P_{opt} = 76$  мм.вод.ст.,  $V_{opt} = 7688$  мм<sup>3</sup>.

Вес ПЗУ, включающего 1000 отдельных циклонов, равен 40 кг.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ПО *Ansys CFX* позволяет удовлетворительно моделировать течение

(погрешность оценки  $\eta$  по уравнению (4) равна 1,35 %).

Аналогично были уточнены значения коэффициентов регрессии уравнений (2) и (3)

$$\Delta P = 629,592 - 737,878x_1 - 772,685x_2 - 372,723x_3 + 1275,534x_1x_2 + 11441,277x_1x_3 + 1252,683x_1x_4 + 1103,212x_2x_4 - 1172,124x_3x_4 + 1750,575x_3^2; \quad (5)$$

(погрешность оценки  $\Delta P$  по уравнению (5) равна 1,43 %);

$$V = 9856,68 + 157,848x_2 + 4434,316x_4 - 30,283x_3x_4 + 645,601x_4^2 \quad (6)$$

(погрешность оценки  $V$  по уравнению (6) равна 0,5 %).

В натуральных единицах измерения  $\alpha$ ,  $D_A$ ,  $d$  и  $D$  была получена система уравнений, описывающая связь выходных параметров ПЗУ ( $\eta$ ,  $\Delta P$  и  $V$ ) с его геометрией ( $\alpha$ ,  $D_A$ ,  $d$  и  $D$ ):

двухфазного потока (воздух-твердые частицы) в ПЗУ и количественно определять его основные параметры (степень очистки ( $\eta$ ), потери давления ( $\Delta P$ ) и вес).

Результаты модельных экспериментов по исследованию двухфазного потока позволяют построить регрессионные модели, описывающие зависимость основных показателей эффективности ПЗУ от его геометрических размеров. Получаемая при этом система уравнений (7) является основой для выбора геометрических размеров ПЗУ из условия:

$$\eta_{opt} = \max \eta; \Delta P_{opt} = \min \Delta P; V_{opt} = \min V.$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Г. Ю., Цицер И. М. Инерционные воздухоочистители. М.: Машиностроение, 1986. 184 с. [ G. Y. Stepanov, I. M. Zicer, *The inertial air cleaner*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1986].

2. Гишваров А.С., Аитов Р.Р., Айтумбетов А.М. Исследование эффективности пылезащитных устройств вертолетных газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ, 2015. т. 19, № 2 (68). С. 100 – 110. [ A. S. Gishvarov, R. R. Aitov, A. M. Aytumbetov, *Modeling and optimization features dustproof device helicopter turboprop*, (in Russian). Ufa: USATU, 2014].

3. Гишваров А.С., Салимзянова А.А., Рахимов А. Х. Исследование влияния геометрии вертолетного пылезащитного устройства на его эффективность // Мавлютовские чтения: материалы XI Всероссийский молодежной научной конференции УГАТУ, 2017 т. 7. С. 62 – 67. [Gishvarov A. S., Salimzyanova A. A., Rakhimov A. A. Investigation of the influence of the geometry of a helicopter dustproof device on its effectiveness // Mavlyutov Readings: Materials of the XI All-Russian Youth Scientific Conference UGATU, 2017, vol. 7. 7. P. 62-67].

## ОБ АВТОРАХ

**ГИШВАРОВ Анас Саидович**, проф., зав. каф. авиац. двиг. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двиг. летательных аппаратов (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. надежности, ресурса, испытаний и прогнозирования состояния техн. систем.

**КНЯЗЕВ Артур Анатольевич**, магистрант каф. авиац. двигателей. Исследование в области ресурса и надежности авиационных двигателей.

**РАХИМОВ Абдусаттор Хасанович** асп. каф. авиационных двигателей. Дипл. маг. по авиастр. (УГАТУ, 2017). Иссл. в обл. надежности и ресурса авиац. двиг.

**САЛИМЗЯНОВА Айгуль Альфировна** асп. каф. авиационных двигателей. Дипл. маг. по энер. машин. (УГАТУ, 2014). Иссл. в обл. надежности и ресурса ГТД.

## METADATA

**Title:** Study the effectiveness of the dust devices.

**Authors:** A. A. Salimzyanova, A.A. Knyazev, A. A. Rakhimov, A. S. Gishvarov.

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:**

nikaxa@inbox.ru, ArtSoull@ya.ru, mr.abdusattor@list.ru, kafedra.ad@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 137-142, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The study of the effectiveness of the dust devices helicopter gas turbine engines. Based on the numerical simulation of two-component flow assessed the effectiveness of various design options.

**Key words:** mathematic modeling; helicopter gas turbine engines; dust devices; flow; two-component flow.

**About authors:**

**GISHVAROV, Anas Saidovich**, Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer (USATU, 1973). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 1993).

**KNYAZEV, Artur Anatolyevich**, master of the department. aircraft engines. Research in the field of resource and reliability of aircraft engines.

**RAHIMOV, Abdusattor Hasanovich**, PhD Stud., Dept. of Aircraft Engines. Accident (USATU, 2017).

**SALIMZYANOVA, Aigul Alfirovna**, PhD Stud., Dept. of Aircraft Engines. Power Engineering (USATU, 2014).

## РАСЧЕТ СООСНЫХ НЕСУЩИХ ВИНТОВ НА РЕЖИМЕ ВИСА В ANSYS CFX

Н. Б. Симонов

sventigo@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Произведен аэродинамический расчет легкого многоцелевого соосного вертолета. Подобраны и смоделированы трехмерные модели основных несущих винтов. Произведены аэродинамические продувки несущих винтов и определены их характеристики. Проведена верификация результатов расчета по параметрам на режиме виса.

**Ключевые слова:** соосный несущий винт, модель, верификация.

### ВВЕДЕНИЕ

На этапе эскизного проектирования вертолетов выполняют основную часть расчетных и экспериментальных исследований аэродинамики и динамики несущего винта (НВ), рулевого винта (РВ) и вертолета в целом. Для повышения достоверности расчетов и снижения количества экспериментальных исследований целесообразно применять несколько (в идеале - все) теорий и методов аэродинамического расчета. Но прежде чем разрабатывать, приобретать или осваивать методики аэродинамического расчета (включая новые и известные компьютерные программы их реализации), конструктор вертолета должен четко представлять суть, возможности, особенности и сложности известных теорий и методов определения аэродинамики вертолета.

При разработке нового вертолета ключевое место занимает задача расчёта аэродинамических характеристик его НВ, так как он является элементом конструкции, в значительной степени определяющим практически все лётно-технические и маневренные характеристики вертолётa. Рассматриваемый вертолет Ка-226 предназначен для выполнения

работ в труднодоступных условиях высокогорья, жаркого климата и над морскими акваториями, транспортировки грузов (до 800 кг), перевозки пассажиров и служебного персонала. Максимальная взлётная масса по разным источникам составляет 3600 кг [1,2].

Соосная схема несущих винтов и отсутствие рулевого винта в конструкции не только повышает безопасность в воздухе и на земле, но и позволяет эксплуатировать вертолет с площадок небольшого размера и малотоннажных судов: габариты фюзеляжа с оперением не выходят за пределы площади, ометаемой несущими винтами.

Вертолет способен осуществлять полеты днем и ночью, в простых и сложных метеоусловиях, над сушей и обширной водной поверхностью, в ветреную погоду.

Эксплуатационный диапазон температур составляет от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  при относительной влажности до 100%. Вертолет не требует ангарного хранения.

За основу, как было сказано ранее, взят аэродинамический профиль *NACA – 230*, который представлен на рисунке 1. В системе NX получена трехмерная модель соосных несущих винтов – рис. 2.

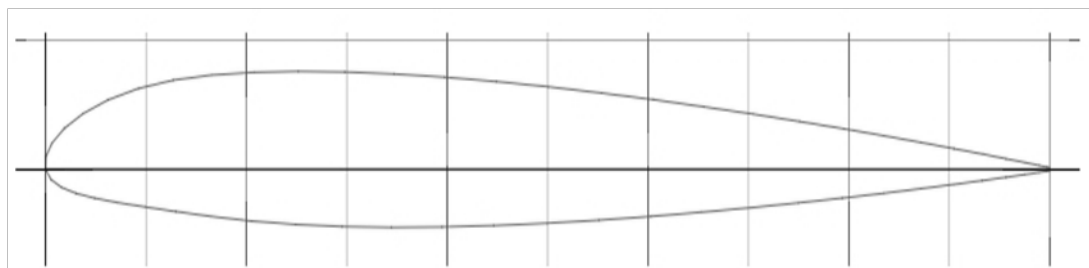


Рис. 1. Профиль NACA – 230

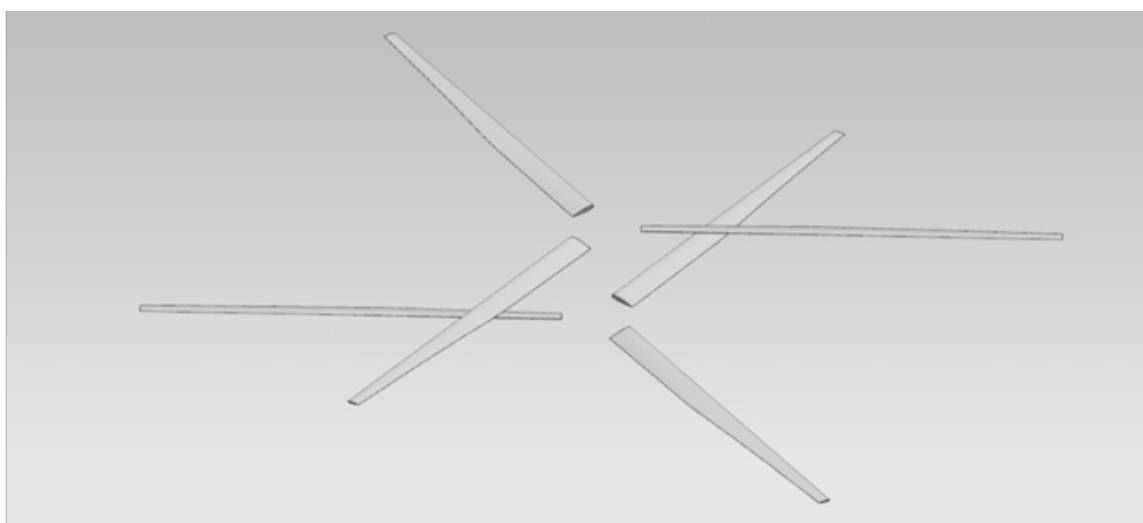


Рис. 2. Трехмерная модель соосных несущих винтов

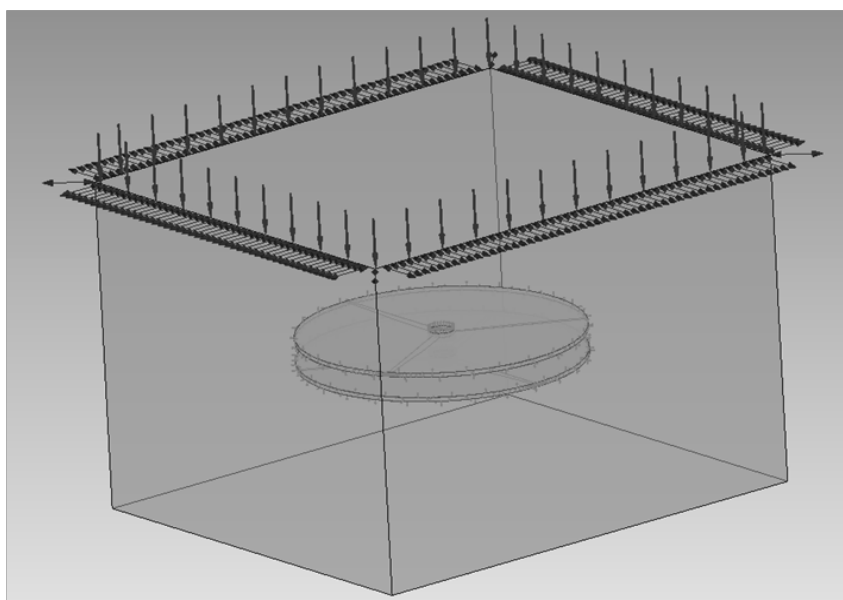


Рис. 3. Расчётная сетка с граничными условиями



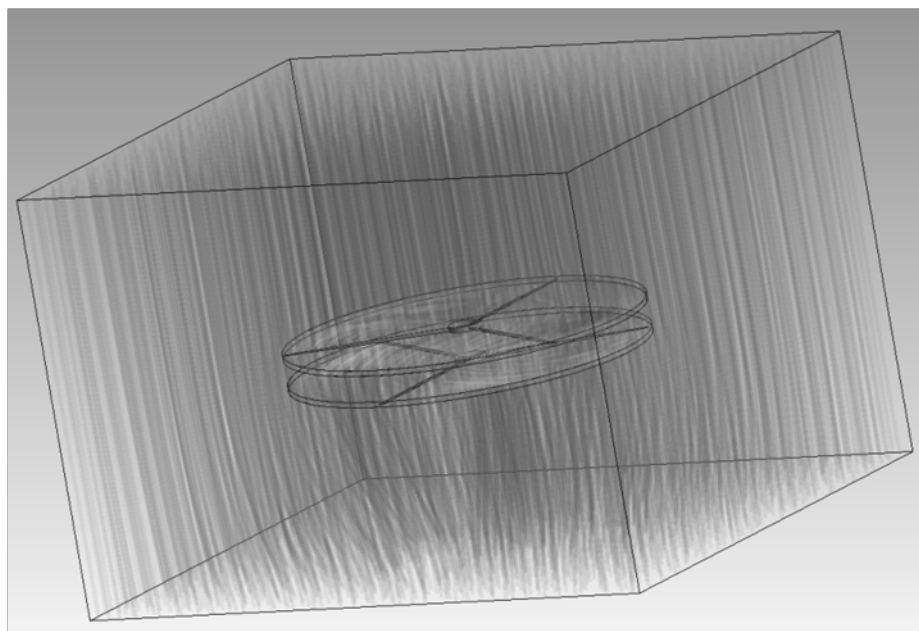


Рис. 4. Картина течения рабочего тела через соосные винты на режиме вися

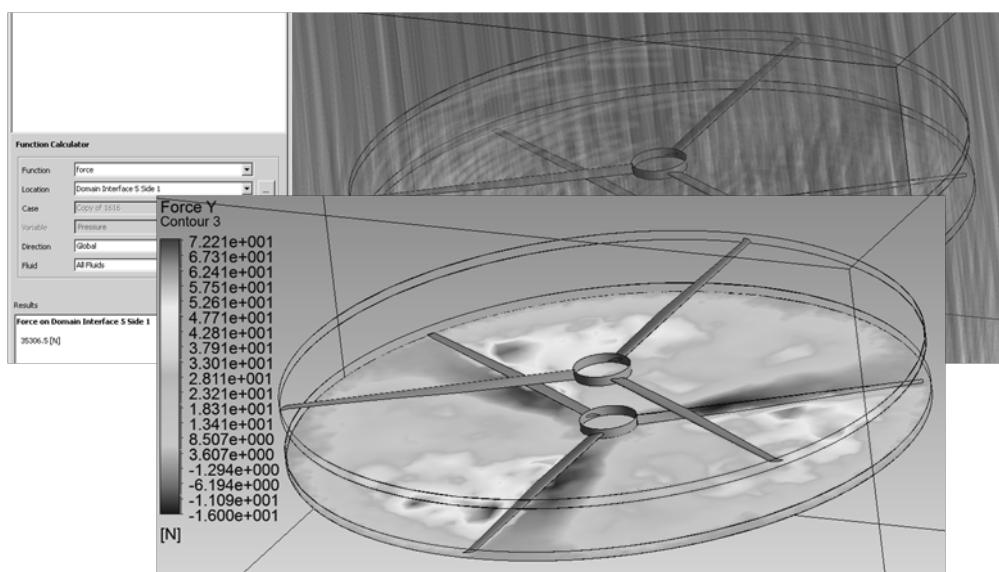


Рис. 5. Распределение силы на круговой площади под нижним винтом и численное значение величины создаваемого усилия

В ANSYS CFX была сформирована модель для расчета соосных несущих винтов. Она представлена на рис. 3.

Расчет сошёлся за 1185 итераций. На рис. 4 приведена картина течения рабочего тела через лопасти на режиме вися.

С помощью внутренних функций пост-процессора, можно оценить усилие, создаваемое винтами на круговую площадь под

нижним винтом. На рис. 5 показано численное значение величины создаваемого усилия и распределение силы на круговой площади под нижним винтом.

Необходимая на режиме вися тяга соосных несущих винтов составляет - 35280 Н. Расчет в ANSYS CFX показал, что соосные несущие винты развивают тягу - 35306,5 Н. Погрешность составляет 0,075 процента.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена верификация результатов численного моделирования соосных винтов на режиме виса, получена картина течения в зазорах между лопастями соосных винтов, получена картина распределения силы на круговой площади под нижним винтом. Погрешность составила 0,075 процента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шайдаков В. И., Маслов А. Д. Аэродинамическое проектирование лопастей воздушного винта. Учебное пособие. -М.: МАИ, 1995. – с. 68.[ SHajdakov V.I., Maslov A.D. Aehrodynamiccheskoe proektirovanie lopastej vozdushnogo vinta. Uchebnoe posobie. -M.: MAI, 1995. – s. 68.]
2. [www.russianhelicopters.aero/ru/helicopters/civil/ka-226t.html](http://www.russianhelicopters.aero/ru/helicopters/civil/ka-226t.html)

### ОБ АВТОРЕ

**СИМОНОВ Николай Борисович**, асп. каф. авиац. двигателей. Маг.-инж. (УГАТУ, 2014). Готовит дис. в обл. моделир. раб. процессов лопаточных машин.

### METADATA

**Title:** Calculation of main rotor on the static mode in Ansys Cfx.

**Author:** N. B. Simonov

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** sventigo@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 143-146, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The aerodynamic calculation of the light multi-purpose coaxial helicopter has been made. Three-dimensional models of the main rotors were selected and modeled. Aerodynamic blowdown of the main rotors was made and their characteristics were determined. Verification of calculation results by parameters at the static mode was carried out..

**Key words:** model, verification.

**About author:**

**SIMONOV, Nikolay Borisovich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Aircraft Engines, Master of Technics & Technology (UGATU, 2014).

## ВЫБОР И РАСЧЕТ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ВНЕПЛОЩАДОЧНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПАО «ОДК-УМПО»

Е. Г. Ступникова

kn.stupnikova@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Согласно Энергетической стратегии до 2035 года определены основные приоритеты научно-технической политики: разработка новых энергосберегающих технологий и оборудования; использование вторичных энергетических ресурсов; использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. В качестве объекта исследования изучена система теплоснабжения внеплощадочных очистных сооружений. В связи с наличием низкопотенциального источника тепла на территории внеплощадочных очистных сооружений принято решение о реконструкции системы теплоснабжения с применением теплонасосной установки.

**Ключевые слова:** тепловой насос; термодинамический расчет; теплонасосная установка; промежуточный теплообменник; переохладитель; промышленные стоки; очистные сооружения; ИТП; R134a; эксергетический КПД ТНУ.

### ВВЕДЕНИЕ

Тепловой насос - это установка для переноса теплоты от более холодного теплоносителя к более горячему за счет подвода внешней энергии или затраты работы. Тепловые насосы по виду рабочего агента разделяются на три типа: парокompрессионные, абсорбционные и термоэлектрические. Компрессионные тепловые насосы являются самыми распространенными.

Тепловые насосы могут использоваться для следующих целей.

- Индивидуально-бытовое теплоснабжение жилых и общественных зданий. При этом холодным теплоисточником является теплота окружающей среды (в основном водных источников, земли и, очень редко, воздуха) и теплота геотермальных источников. При использовании теплового насоса экономится электроэнергия или топливо, которых потребляется меньше, чем при использовании электронагревателей или водогрейных котлов.

- Применение в системах вентиляции для нагрева нового холодного воздуха или получения воды на отопление за счет теплоты теплого воздуха, удаляемого из помещения.

- Получение горячей воды для технического водоснабжения промышленных предприятий за счет низкопотенциальных тепловых отходов, например, оборотной системы охлаждения компрессоров, систем кондиционирования и охлаждения оборудования, замена градирен и других охлаждающих устройств на оборотных системах водоснабжения предприятий.

- Подогрев оборотной воды тепловых сетей.

- Использование для выработки теплоты в системах централизованного теплоснабжения с пиковым догревом подаваемой воды в обычных котельных [1].

Тепловые насосы (теплонасосные установки) позволяют нагревать воду для отопления и горячего водоснабжения путем отбора теплоты из окружающей среды или от низкотемпературных бытовых и промышленных отходов. Они не производят тепловую энергию, а за счет использования внешней работы переносят теплоту от теплоносителя, имеющего температуру 0...40°C (называемого низкопотенциальным) к теплоносителю, применяемому для отопления и горячего водоснабжения

(называемого высокочастотным), нагревая его до 50...80 °С. Преимущество применения теплонасосных установок (ТНУ) в системах теплоснабжения по сравнению с другими способами теплоснабжения состоит в значительной экономии затрат энергии. Тепловые насосы можно отнести к отдельному виду теплоэнергетического оборудования, для них нельзя использовать понятие коэффициента полезного действия так как ТНУ позволяют вырабатывать тепловой энергии больше, чем в них затрачивается электроэнергия. Отношение выработанной теплоты к затраченной энергии на осуществление цикла теплонасосной установки называется коэффициентом преобразования теплоты  $\mu$ , значение которого в тепловом насосе составляет от 2,5 до 8 [2].

**Ключевые идеи.** В настоящее время теплоснабжение внеплощадочных очистных сооружений осуществляется от тепломагистрали ТМ-28, протяженность трубопроводов теплофикации от сетей БашРТС до пл. «Л» составляет примерно 700 п.м. Высокие ежегодные затраты на ремонт тепломагистрали составляют порядка 250-280 тыс. руб. Всё это подталкивает к поиску альтернативных источников тепловой энергии. Один из перспективных путей экономии энергии - использование вторичных энергоресурсов (ВЭР). На пл. «Л» вторичный энергоресурс – промстоки, поступающие с производственных площадок. После необходимой очистки стоки накапливаются в погружной емкости с очищенными промышленными стоками и далее насосами подаются на выпуск в реку Белая.

Уходящие со сточными водами отходы теплоты в большинстве случаев можно довольно хорошо перевести с помощью тепловых насосов на полезный температурный уровень. Особый интерес в качестве источника теплоты для теплового насоса представляют сточные воды с температурой ниже 30°С.

Однако при использовании сточных вод в тепловых насосах необходимо проводить анализ, чтобы определить содержание загрязняющих и вредных веществ с целью обеспечения безупречной и надежной работы испарителя. Во многих случаях поступ-

ление сточных вод не бывает равномерным. Поэтому в целях обеспечения равномерного поступления сточных вод или, иными словами, для приведения в соответствие количества потребляемой и поступающей теплоты применяются сборные резервуары для сточных вод. Для загрязненных сточных вод рекомендуется подключать промежуточный теплообменник. С учетом условий эксплуатации чаще всего находят применение следующие виды теплообменников: кожухотрубные, спиральные, пластинчатые, иногда в коррозионностойком исполнении или из нержавеющей стали [3].

Как известно, одним из эффективных энергосберегающих устройств является тепловой насос (ТН), в котором низкопотенциальная теплота различных природных и промышленных источников преобразуется в теплоту, пригодную для использования на нужды теплоснабжения.

В период с 07.12.2016 по 27.04.2017 были проведены замеры температуры промстоков в погружной емкости с очищенными промышленными стоками в зависимости от температуры наружного воздуха. На рис. 1 представлена зависимость температуры промстоков от температуры наружного воздуха в период 07.12.17-27.04.17



**Рис. 1.** Зависимость температуры промстоков от температуры наружного воздуха в период 07.12.17–27.04.17

Средняя температура промстоков за данный период составила 15°С, минимальная температура промстоков равна 5°С. Для определения необходимой тепловой нагрузки ТНУ был выполнен расчет часовых нагрузок отопления зданий при помощи нормативных документов [4]–[7].

Часовая тепловая нагрузка отопления отдельного здания по укрупненным показателям [4]:

$$Q_{o.p.} = \alpha \cdot V \cdot q_0 \cdot (t_e - t_{н.р.о}) \cdot (1 + K_{и.р.}) \cdot 10^{-3},$$

где  $\alpha$  - поправочный коэффициент, учитывающий отличие расчетной температуры наружного воздуха для проектирования отопления  $t_{н.р.о}$  в местности, где расположено здание, от  $t_{н.р.}^0 = -30^0 C$ , при которой определено соответствующее значение  $q_0$ ;

$t_{н.р.о}$  - расчетная температура воздуха для проектирования отопления в местности, где расположено здание, согласно СП 131.13330.2012 [6],  $^0C$ ;  $V$  - объём здания по наружному обмеру,  $m^3$ ;  $q_0$  - удельная отопительная характеристика здания при  $t_{н.р.}^0 = -30^0 C$ ,  $ккал/m^3ч^0C$ , принимается по табл. в [4];  $t_e$  - расчетная температура воздуха в отапливаемом здании,  $^0C$ ; принимается в соответствии с СП 131.13330.2012 [6];  $K_{и.р.}$  - расчетный коэффициент инфильтрации, обусловленной тепловым и ветровым напором, т.е. соотношение тепловых потерь зданием с инфильтрацией и теплопередачей через наружные ограждения при температуре наружного воздуха, расчетной для проектирования отопления.

Расчетный коэффициент инфильтрации  $K_{и.р.}$  определяется по формуле [4]:

$$K_{и.р.} = 10^{-2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L \cdot \left(1 - \frac{273 + t_{н.р.о}}{273 + t_e}\right) + w_p^2},$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $L$  - свободная высота здания,  $m$ ;  $w_p$  - расчетная для данной местности скорость ветра в отопительный период,  $m/c$ , принимается по СП 131.13330.2012 [6].

Рассмотрим технологический комплекс утилизации тепла промышленных стоков с помощью ТНУ типа «вода-вода», предлагаемый для эксплуатации на пл. «Л» (рис. 2). Если тепла, вырабатываемого тепловым насосом, недостаточно для отопления в сильные морозы, практикуется эксплуата-

ция насоса в паре с дополнительным источником тепла (в таких случаях говорят об использовании бивалентной схемы отопления), то в работу включается второй источник тепла (тепловая энергия с горячей водой на теплофикацию от БашРТС). Причем планируется подключение очистных сооружений ПАО «ОДК-УМПО» к тепловым сетям БашРТС от тепломагистрали ТМ-30 с установкой индивидуального пункта в здании насосной станции химочищенных стоков. Протяженность предполагаемой трассы составит около 100 п.м.

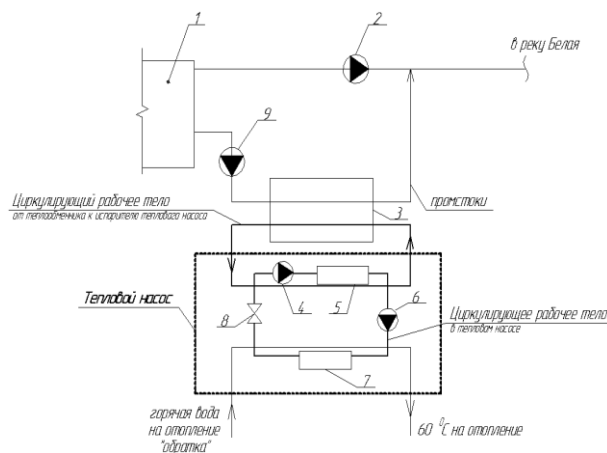


Рис. 2. Схема теплоснабжения площадки «Л» с применением теплового насоса:

1 – ёмкость с промстоками; 2, 9 – насосы; 3 – теплообменник промежуточный; 4 – насос для циркуляции хладагента к испарителю; 5 – испаритель; 6 – насос для перекачки хладагента от испарителя к конденсатору; 7 – конденсатор; 8 – дросселирующий вентиль

По результатам расчетов максимальная часовая нагрузка в отопительный период по зданиям и сооружениям площадки «Л» составила 0,26 Гкал/ч. Для подбора ТНУ необходимой тепловой производительности принята максимально-часовая нагрузка на отопление площадки «Л» равная 0,5 Гкал/ч (581,5 кВт). В результате изучения каталогов заводов-изготовителей ТНУ был выбран тепловой насос НТ-360 ЗАО «Энергия» (Россия). Технические характеристики теплового насоса представлены в табл. 1.

Выбор наиболее оптимальной конструкции теплового насоса требует сравнения множества вариантов по схемам насосов, фреонам, задаваемым температурным перепадам в теплообменниках.

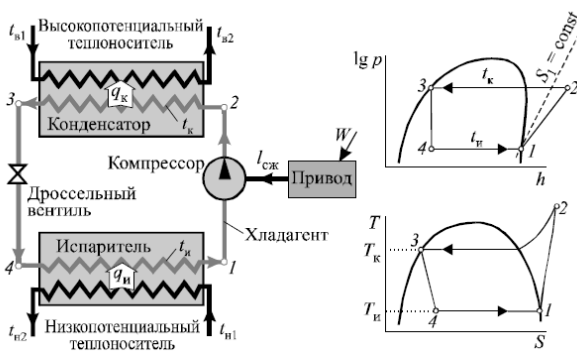
Таблица 1

**Технические характеристики теплового насоса НТ-360**

Наименование оборудования	Страна-изготовитель	Номинальная теплопроизводительность, кВт	Максимальная потребляемая мощность, кВт	Тепловой коэффициент
НТ-360	Россия, ЗАО «Энергия»	550...850	180...200	4,6

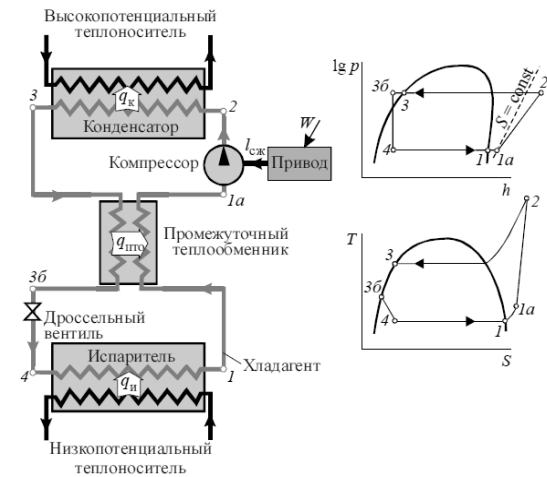
Расчет тепловых насосов традиционно проводится с помощью  $T,s$  или  $p,h$  – диаграмм, заимствованных из [1], рабочих тел (фреонов). В работе согласно методике [1] рассчитана ТНУ тепловой нагрузкой 600 кВт с хладагентами: R12, R22, R114, R152a, R500, R134a по трём схемам: без регенерации теплоты и переохладителя (№ 1) (рис. 3), с регенерацией теплоты (№ 2) (рис. 4), с регенерацией теплоты и переохладителем (№ 3) (рис. 5).

Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

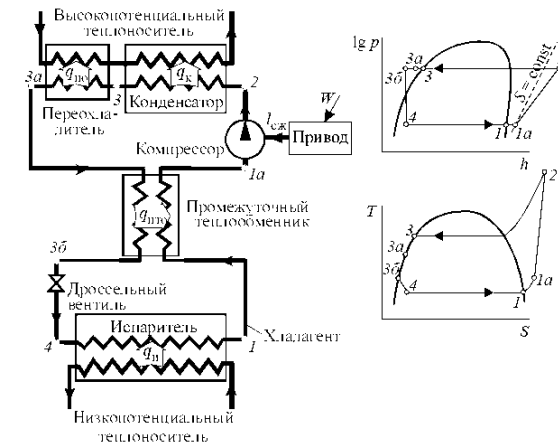


**Рис. 3.** Схема (№ 1) и цикл парокompрессионного теплового насоса:

$t_{a1}, t_{a2}, t_{n1}, t_{n2}$  – температуры высокопотенциального и низкопотенциального теплоносителя на входе и выходе; процесс 1–2 – необратимый политропный процесс сжатия паров хладагента в компрессоре; процесс 2–3 – изотермическая конденсация хладагента в конденсаторе и отдача теплоты высокопотенциальному теплоносителю; процесс 3–4 – необратимый адиабатический процесс расширения хладагента в дроссельном вентиле; процесс 4–1 – изотермическое испарение хладагента в испарителе за счет теплоты, отобранной у холодного



**Рис. 4.** Схема (№ 2) и цикл теплового насоса с промежуточным теплообменником: процесс 1–1a – процесс нагрева хладагента в промежуточном теплообменнике; процесс 1a–2 – необратимый политропный процесс сжатия паров хладагента в компрессоре; процесс 3–3б – процесс охлаждения хладагента в промежуточном теплообменнике; процесс 3б–4 – необратимый адиабатический процесс расширения хладагента в дроссельном вентиле



**Рис. 5.** Схема (№ 3) и цикл теплового насоса с промежуточным теплообменником и переохладителем: процесс 3–3a – процесс охлаждения хладагента в переохладителе; процесс 3a–3б – процесс охлаждения хладагента в промежуточном теплообменнике; процесс 3б–4 – необратимый адиабатический процесс расширения хладагента в дроссельном вентиле

Выбор наилучшего варианта производится по термодинамическим показателям циклов или экономическим показателям ТНУ. Из расчета исключаются варианты, степень сжатия в которых более 17 и не может обеспечиваться имеющимися компрессорами.

Таблица 2

## Исходные данные для расчета

Параметр	Величина	Ед. измерения
Тепловая нагрузка ( $Q_{ТН}$ )	600	кВт
Температура низкопотенциального теплоносителя на входе в ТНУ ( $t_{Н1}$ )	12	°С
Температура низкопотенциального теплоносителя после ТНУ ( $t_{Н2}$ )	8	°С
Температура высокопотенциального теплоносителя на входе в ТНУ ( $t_{В1}$ )	35	°С
Температура высокопотенциального теплоносителя после ТНУ ( $t_{В2}$ )	60	°С
Перепады температура на выходе из теплообменников: испарителя ( $\Delta t_{исп}$ ), конденсатора ( $\Delta t_{к}$ ), переохладителя ( $\Delta t_{по}$ )	4	°С
Температура окружающей среды ( $t_{oc}$ )	-20	°С
Температура перегрева пара в промежуточном теплообменнике ( $\Delta t_{п}$ )	20	°С
Хладагент	R12, R22, R114, R152a, R500, R134a	
КПД эл/двигателя	95	%
КПД первичной энергии	95	%
КПД Э.С.	50	%

Удельная тепловая нагрузка теплового насоса  $q_{тн}$  характеризует расход фреона, а значит, и влияет на стоимость компрессора и теплообменников. Степень сжатия в компрессоре определяет его стоимость. Коэффициент преобразования энергии и удельный расход первичной энергии характеризуют экономичность работы теплового насоса. Эксергетический КПД показывает термодинамическое совершенство процессов в тепловом насосе.

Таким образом, наилучший вариант будет с наибольшим  $\mu$ . Для вариантов с близ-

ким  $\mu$  наилучшим будет тот, который обеспечивает наименьшую степень сжатия  $\varepsilon$  и наибольшие эксергетический КПД  $\eta_{э}$  и удельную тепловую нагрузку  $q_{тн}$ . Показатели энергетической эффективности наилучших вариантов для каждого фреона представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Показатели энергетической эффективности наилучших вариантов для каждого фреона

Схема	№1		№3			
	R500	R134a	R12	R22	R114	R152a
Удельная тепловая нагрузка ТНУ	144	198,02	158,11	208,61	133,62	316,98
Степень сжатия в компрессоре	4,88	5,47	4,72	4,74	6,41	5,42
Коэффициент преобразования теплоты	3,62	3,41	3,29	3,39	3,37	3,45
Коэффициент преобразования эл. энергии	2,43	2,29	2,21	2,24	2,26	2,31
Удельный расход первичной энергии	0,87	0,92	0,95	0,94	0,93	0,91
Эксергетический КПД	0,47	0,49	0,46	0,48	0,47	0,47

Наилучшие варианты компоновки ТНУ: ТНУ с фреоном R500 (схема №1) и ТНУ с фреоном R134a (схема №3). Необходимо отметить, что фреон R500 относится к группе CFC (хлорфторуглероды), которые обладают высоким озоноразрушающим потенциалом и способствуют глобальному потеплению. Фреон R134a относится к группе HFC (гидрофторуглероды), в настоящее время они рассматриваются в промышленности как перспективные альтернативные хладагенты. Для дальнейшего расчета тепловых нагрузок в узлах установки и эксергетического баланса ТНУ выбрана ТНУ с фреоном R134a с регенерацией и переохладителем (рис. 6).

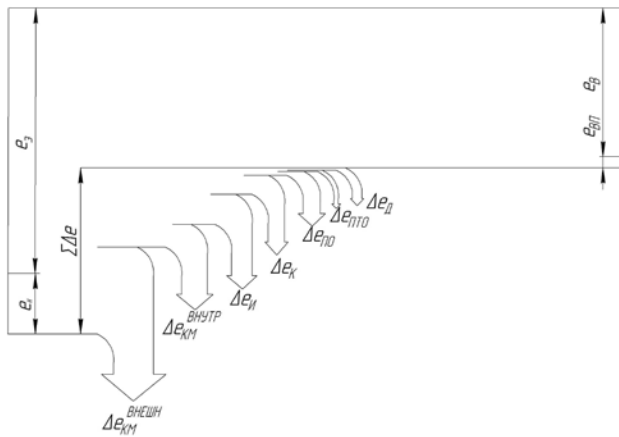


Рис. 6. Эксергетический баланс в тепловом насосе

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены системы теплоснабжения производственных корпусов на площадке «Л». В результате анализа существующей системы теплоснабжения был сделан вывод о необходимости модернизации отопления, а именно переход на альтернативный источник тепловой энергии – тепловой насос. Данное решение обусловлено наличием на очистных сооружениях низкопотенциального источника тепла – промстоков с производственных площадок.

По результатам расчетов максимальная часовая нагрузка в отопительный период по зданиям и сооружениям площадки «Л» составила 0,26 Гкал/ч. Для подбора ТНУ необходимой тепловой производительности примем максимально-часовую нагрузку на отопление площадки «Л» равную 0,5 Гкал/ч (581,5 кВт). В результате изучения каталогов заводов-изготовителей ТНУ в качестве прототипа был выбран тепловой насос НТ-360 ЗАО «Энергия», Россия.

Эффективность и свойства тепловых насосов значительно зависят от условий их использования, определяемых температурой горячего и холодного теплоносителей. При увеличении разности температур горячего и холодного теплоносителей тепловая мощность тепловых насосов уменьшается, действительный коэффициент преобразования снижается, что ухудшает термодинамическую эффективность теплового насоса.

Термодинамический расчет трех компонентов ТНУ с использованием хладагентов

R12, R22, R114, R134a, R152a, R500 показал, что наивысший коэффициент преобразования теплоты и электроэнергии, и наименьший расход первичного топлива в схеме ТНУ с регенерацией теплоты и переохладителем с использованием фреона R134a.

В результате эксергетического расчета установлено, что наибольшие эксергетические потери в компрессоре и электродвигателе, вызванные механическим трением. Эти потери обусловлены необратимостью процесса сжатия в компрессоре. Для повышения эксергетического КПД необходимо интенсивно охлаждать фреон в компрессоре, тем самым приближаться к изотермическим условиям сжатия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубаев П. А., Гришко Б. М. Тепловые насосы: Учеб. Пособие. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 142 с. [P. A. Trubaev, *Heat pumps*, (in Russian). Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2009.-142 s.]
2. Амерханов Р. А. Тепловые насосы. М.: Энергоатомиздат, 2005. – 160 с., ил. [R.A. Amerkhanov, *Heat pumps*, (in Russian). Moscow: Energoatomizdat, 2005.-160 s.]
3. Янтовский Е. И., Левин Л. А. Промышленные тепловые насосы. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с., ил. [E.I. Yantovskiy, L.A. Levin, *Industrial heat pumps*, (in Russian). Moscow: Energoatomizdat, 1989.-128 s.]
4. МДС 41-4.2000 Методика определения количеств тепловой энергии и теплоносителя в тепловых системах коммунального теплоснабжения. [Method for determining the amounts of heat energy and heat carrier in heat systems of municipal heat supply. (in Russian). MDS 41-4.2000, Moscow, 2000.]
5. Приказ Минстроя России от 31.07.2014 N414/пр. [Order of the Ministry of Construction of Russia № 414 of 31.07.2014, Moscow, 2000]
6. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* (с Изменением N2). [Set of rules 131.13330.2012 Building Climatology. Updated edition of Sanitary Norms and Rules 23-01-99\*. Moscow, 2012]
7. СП 60.13330.2012 «СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха». [Set of rules 60.13330.2012 «Sanitary Norms and Rules 41-01-2003. Heating, ventilation and air conditioning». Moscow, 2012]

### ОБ АВТОРЕ

СТУПНИКОВА Екатерина Геннадьевна, магистрант каф. АТиТ. Дипл. бакалавра по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» (УГАТУ, 2016). Готовит выпускную квалификационную работу по реконструкции системы теплоснабжения с применением теплового насоса.



## METADATA

**Title:** reconstruction of the heat supply system of off-site treatment facilities of Ufa Engine Industrial Association PJSC with the use of a heat pump.

**Author:** E.G. Stupnikova

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

**Email:** kn.stupnikova@yandex.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 147-153, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print)**.

**Abstract:** According to the Energy Strategy until 2035, the main priorities of scientific and technical policy are defined: the development of new energy-saving technologies and equipment; use of secondary energy resources; use of non-traditional and renewable energy sources. The system of heat supply of off-site treatment facilities was studied as an object of research. In connection with the presence of a low-potential heat source in the territory of off-site treatment facilities, a decision was made to reconstruct the heat supply system using a heat pump plant.

**Key words:** Heat pump; thermodynamic calculation; heat pump plant; intermediate heat exchanger; subcooler; industrial effluents; treatment facilities; individual heat point; R134a; exergy efficiency.

**About author:**

**STUPNIKOVA, Ekaterina Gennad'evna**, Student, Dept. of Aviation Heat Engineering and Heat Power Engineering. Master of heat power engineering & heat engineering (USATU, 2016).

## МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

А. А. Субхангулов

aydar\_subkhangulov@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассматриваются традиционные и новые методы проектирования основных и форсажных камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) с учетом все ужесточающихся требований по допустимому уровню выбросов вредных веществ. Показано, что для снижения уровня токсичности выбросов авиационных ГТД используются концепции камер сгорания «сухого типа» *RQL* и *LPP*, а также т.н. «мокрые» методы, переход от ГТД (где реализуется цикл Брайтона) к альтернативным ПуДД (с организацией пульсирующего процесса с детонационным горением). Достоинство ПуДД заключается в том, что параметры рабочего процесса, такие как давление и температура выше чем у ГТД. Рассмотрены и другие, более экологически чистые виды топлива (горючего), в т.ч. водород.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель; основная и форсажная камера сгорания; эмиссия вредных выбросов.

### ВВЕДЕНИЕ

Авиaperезовки уже с 20-го века зарекомендовали себя как надёжный и быстрый способ доставки, как пассажиров, так и полезных грузов. Несмотря на все преимущества, у этого вида транспорта есть и свои недостатки. Одним из таких важных недостатков является то, что работающий авиационный двигатель (АД) выбрасывает в окружающую среду вредные загрязняющие вещества (ЗВ).

Международной организацией гражданской авиации ИКАО (*ICAO – International Civil Aviation Organization*) активно ведутся работы по охране окружающей среды. Это подтверждается сводным отчетом о продолжающейся политике и методах, связанных с охраной окружающей среды, который пересматривается и обновляется Советом каждые три года [1]. Более того, отказ выполнять требования ИКАО двигательными предприятиями может повлечь к отказу в сертификации новых двигателей. Поскольку основные позиции в ИКАО занимают представители США, они используют этот орган для недобросовестной конкуренции. Например, таким образом они действовали против программы «*КОН-*

*КОРД*» (по ограничению шума, вызываемого ударной волной от летящего на сверхзвуковом режиме пассажирского самолета).

Выброс вредных ЗВ от авиадвигателей часто определяют одним словом – эмиссия. Эмиссия – это процесс выброса в атмосферу с отработавшими газами авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) прямых и побочных продуктов сгорания топлива, которые могут быть причиной нежелательного воздействия летательного аппарата (ЛА) на окружающую среду.

Таким нежелательным воздействием на окружающую среду можно считать образование фотохимического смога, который отрицательно действует на человека. Данный процесс возникает в результате того, что отдельные компоненты продуктов сгорания топлива особо токсичны. К этим компонентам относятся оксиды азота ( $NO_x$ ), дым, оксиды серы ( $SO_x$ ), оксид углерода ( $CO$ ), сернистые соединения ( $H_2S$ ), несгоревшие углеводороды ( $UHC$ ), а также мелкодисперсные частицы сажи [1].

Если рассматривать к примеру самый сложный (с точки зрения снижения эмиссии) компонент  $NO_x$ , то нормы по его снижению принятые в 2014 году были ужесто-

чены на 15% по отношению к 2008 году. В ближайшем 2020 году планируется снижение на 45%, а дальнейший целевой уровень снижения не менее чем на 60% [2].

#### МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ОСНОВНЫХ И ФОРСАЖНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Поиск методов снижения индекса эмиссии основных и форсажных камер сгорания ГТД в настоящее время является весьма актуальным. Выявление условий, которые способствуют образованию различных ЗВ в КС, позволяет найти пути снижения уровня выброса данных ЗВ на выходе из КС. Известно, что с одной стороны работа камеры сгорания в зоне с богатой ТВС (топливо-воздушной смеси) уменьшает возможность образования окислов азота ( $NO_x$ ), однако при этом резко повышаются выбросы углерода в виде сажи. Работа же в зоне с обедненной ТВС уменьшает количество окислов азота и сажи, но при этом появляется тенденция к росту количества  $CO$  и  $CH$ . Помимо этого обедненная смесь не обеспечивает стабильность розжига и работы на режимах малой тяги [3]. Также на выбросы ЗВ влияет

качество и сорт самого топлива, здесь стоит отметить, что перспективным топливом (горючим) в будущем возможно будет водород.

В настоящее время существует ряд направлений низкоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания ГТД, где организация рабочего процесса осуществлена по схеме "DLE" — *Dry Low Emission* (дословно: сухая низкая эмиссия), когда получение низкого уровня вредных выбросов достигается «сухим» методом, то есть без добавления воды, пара или аммиака в проточную часть камеры сгорания. К таким направлениям относятся:

1. Концепция RQL (*Rich - Quench-Lean*), которая основана на низкотемпературном сжигании богатой топливовоздушной смеси (ТВС) с подачей всего топлива в первую зону горения, быстром смешении с оставшимся воздухом и дожиганием бедной ТВС при низкой температуре во второй зоне камер сгорания. Примерами служат камеры сгорания типов «TALON» (*Technology for Advanced Low NOx*) (*Pratt&Whitney*), а также «Tiled Phase 5» (*Rolls-Roys*). Схема камеры сгорания данного типа изображена на рис. 1 [6].

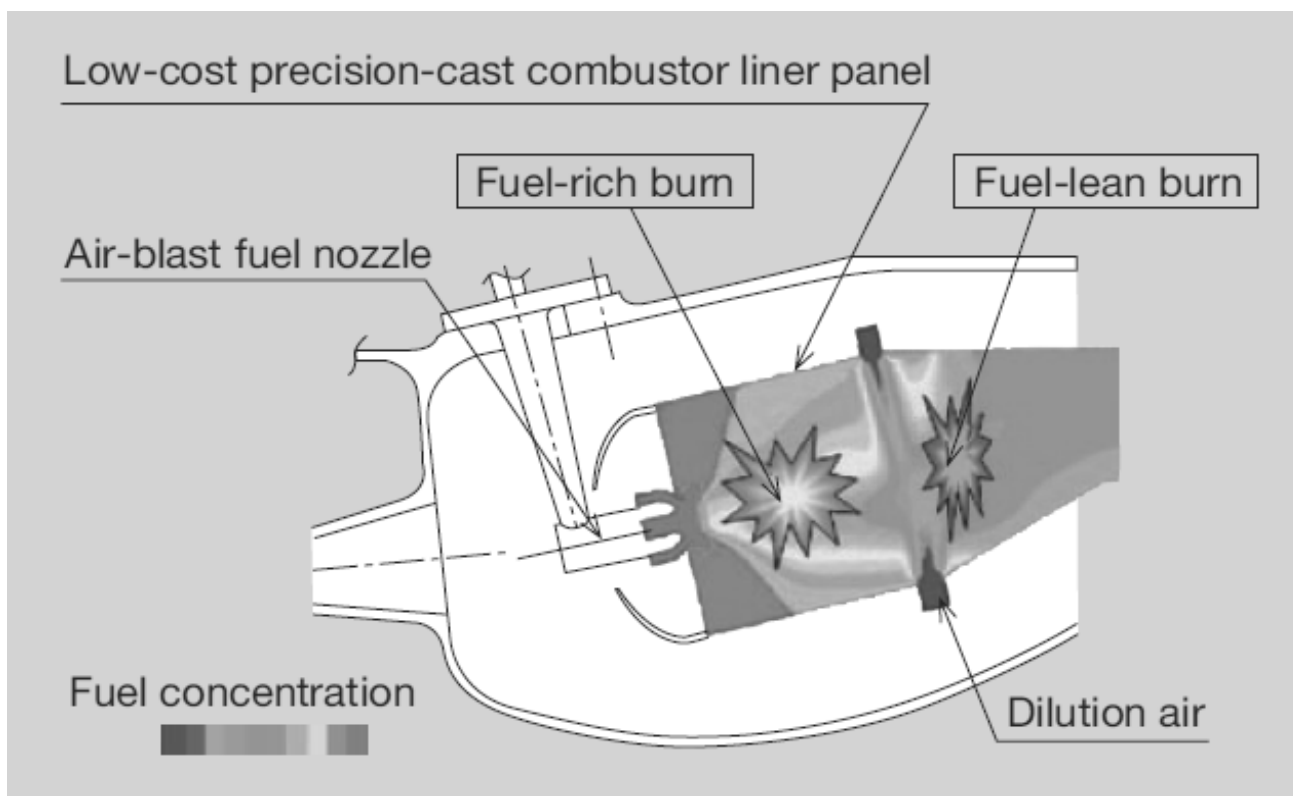


Рис. 1. Камера сгорания типа RQL

2. Концепция LPP (*Lean – premixed and prevaporized*), которая основана на низкотемпературном ( $T_{пл} \leq 1800...1900$  К) сжигании предварительно перемешанной «бедной» топливоздушную смеси [4]. На рис. 2 приведены схема такого горелочного устройства и картина течения в области подготовки, стабилизации и сжигания гомогенной ТВС. [5]. Однако наряду с перечисленными выше концепциями имеет место, и до сих пор остаётся актуальной модернизация конструкции традиционных камер сгорания, которая включает в себя определённые преимущества, такие, как: простота, надёжность, десятилетиями отработанная технология проектирова-

ния, изготовления и эксплуатации, одноконтурная система подачи топлива и однозначность управления на основных режимах. На рис. 3 представлен пример конструктивной схемы серийной и соответственно модернизированной камер сгорания для ГТД НК-16 СТ [4].

Помимо традиционных подходов выделяется революционный метод, который предполагает переход от ГТД к новым двигателям [1]. Ярким тому примером служит ПуДД, представленный на рис. 4. В таком двигателе рабочий процесс организован не по циклу Брайтона, а приближается к циклу Отто (пульсирующий с детонационным сгоранием).

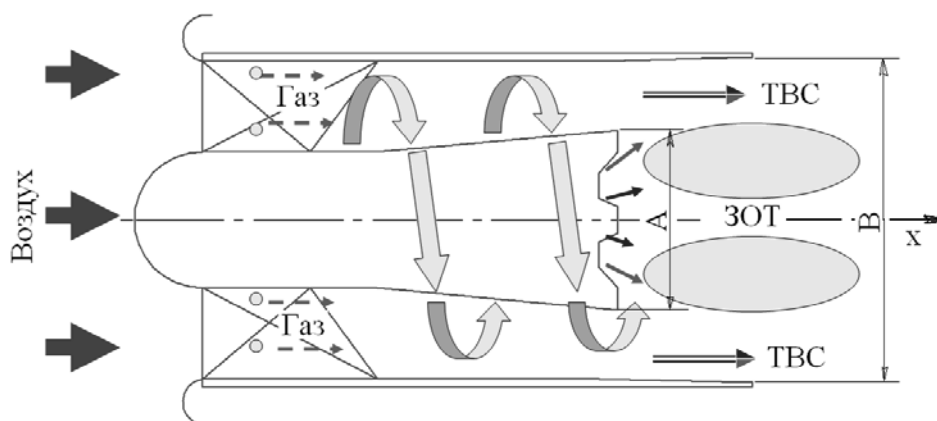


Рис. 2. Камера сгорания типа LPP

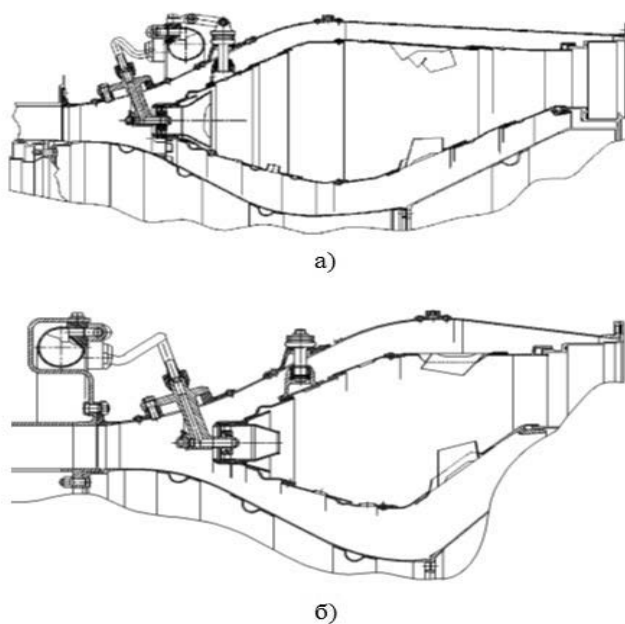


Рис. 3. Конструктивная схема серийной (а) и модернизированной (б) камер сгорания ГТД НК-16 СТ

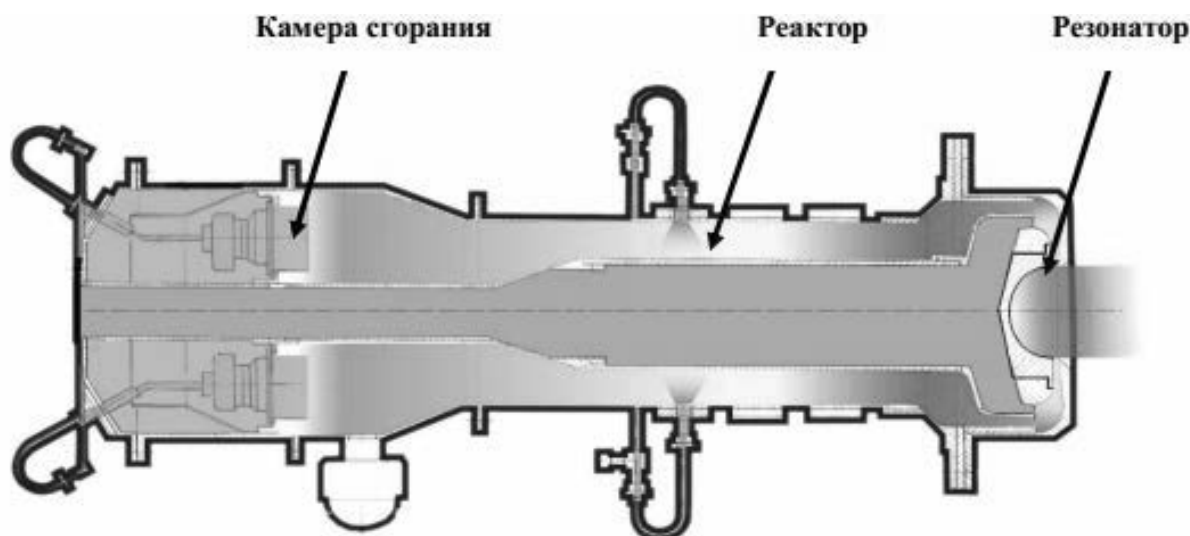


Рис. 4. Схема ПуДД с высокочастотным резонатором

Достоинство таких двигателей заключается в более высоких температурах и давлениях в камере сгорания, в которых и происходит образование ЗВ. Рассмотренная схема ПуДД с высокочастотным резонатором, отличающаяся отсутствием каких – либо механических клапанов и прерывистых запальных устройств и представляет собой последовательно соединенные камеру сгорания, реактор и газодинамический резонатор (детонационную камеру), в которых реализуется двухстадийное сгорание топливо-воздушной смеси.

Рассматриваются и другие нововведения в организации рабочего процесса в камерах сгорания. Например, для увеличения полноты сгорания и увеличения времени пребывания частиц рабочего тела в камере сгорания рассматриваются схемы с закруткой потока на входе и выходе из камеры сгорания. В таких камерах сгорания траектории движения газа имеют винтовой (спиральный) вид. Уменьшение поворота потока в НА (направляющем аппарате) последней ступени компрессора и в СА (сопловом аппарате) ТВД (турбины высокого давления) позволяет повысить КПД КНД (компрессора высокого давления) и ТВД. Это обеспечивает повышение КПД и снижение расхода топлива в ГТД.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для снижения уровня токсичности выбросов авиационных ГТД применяют следующие меры:

1) Продолжать развивать концепции т.н. «сухого типа» *RQL* и *LPP*, а также т.н. «мокрые» методы

2) Переходить к разработкам от ГТД к альтернативным ПуДД. Достоинством ПуДД заключается в том, что параметры рабочего процесса, такие как давление и температура, выше чем у ГТД;

3) Переходить к другим более экологически чистым видам топлива (горючего). В качестве перспективного топлива (горючего) будущего является водород.

4) Искать и внедрять иные (новые) технические решения по снижению эмиссии авиадвигателей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субхангулов А. А., Ганцева Е. М. Методы снижения вредных выбросов продуктов сгорания от авиационных газотурбинных двигателей: Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2017): материалы XIII Международной научно-технической конференции / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Том I. – Уфа: ООО «Первая типография», 2017. – 311 с. [Subkhangulov A.A., Gantseva E.M. Methods of decrease in harmful emissions of products of combustion from aviation gas-turbine engines: Science, education, production in the solution of environmental problems (Ecology-2017): materials XIII of the International scientific and technical conference / Ufimsk. state. авиац. техн. un-t. Volume I. – Ufa: LLC First Printing House, 2017. – 311 pages. ]

2. Васильев А. Ю. Некоторые проблемы разработки малоэмиссионных камер сгорания и пути снижения эмиссии оксидов азота/ Васильев А. Ю. // Научно-технический журнал «Двигатель» – 2016. – №6 (108). – С 10-13. [Vasilyev A. Yu. Some problems of development of small and issue combustion chambers and way of decrease in emission of oxides Nitrogen / Vasilyev A. Yu.//The scientific and technical magazine "Dvigatel" – 2016. – No. 6 (108). – From 10-13. ]

3. «Пламенное» сердце авиационного двигателя. Кое-что о камерах сгорания ГТД [Электронный ресурс]: – URL: <http://avia-simply.ru/kamera-sgoranija-gtd/> (дата обращения: 29.01.18) [ "Ardent" heart of the aviation engine. Something about GTD combustion chambers [An electronic resource]: – URL: <http://avia-simply.ru/kamera-sgoranija-gtd/> (date of the address: 29.01.18). ]

4. А. Н. Маркушин, В. К. Меркушин, А. В. Бакланов. Разработка и исследование малотоксичной камеры сгорания стационарного ГТД. – Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – №5 (29). – С. 155-161. [ A.N. Markushin, V.K. Merkushin, A.V. Baklanov. Development and research of the malotokischny combustion chamber of stationary GTD. – Bulletin of the Samara state space university of the academician S.P. Korolyov (national research university). – 2011. – No. 5 (29). – Page 155-161. ]

5. А. Н. Маркушин, А. В. Бакланов. Исследование качества подготовки топливовоздушной смеси и его влияния на выбросы NOx в малоэмиссионной камере сгорания ГТД. – Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2013. – №3-1 (41). – С. 131-138. [ A.N. Markushin, A.V. Baklanov. A research of quality of training of fuel-air mix and his influence on emissions of NOx in the GTD low-issue combustion chamber. – Bulletin of Samara State Aerospace University of the academician S.P. Korolyov (national research university). – 2013. – No. 3-1 (41). – Page 131-138. ]

6. Research and Development of a Combustor for an Environmentally Compatible Small Aero Engine [Электронный ресурс]: – URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e454/e454009.pdf> (дата обращения: 29.01.18). [ Научные исследования камеры сгорания для экологически совместимого маленького аэро двигателя [Электронный ре-сурс]: – URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e454/e454009.pdf> (дата обращения: 29.01.18). ]

## ОБ АВТОРЕ

**СУБХАНГУЛОВ Айдар Азатович**, студент 5-го курса направления «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» кафедры авиационных двигателей УГАТУ.

## METADATA

**Title:** Web OLAP conceptual data model design on the basis of situation-oriented database.

**Author:** A. A. Subkhangulov

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** aydar\_subkhangulov@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 154-158, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print).**

**Abstract:** Traditional and new design methods of the main and the forsazhnykh of combustion chambers of gas-turbine engines (GTD) taking into account all of the becoming tougher requirements for the admissible level of emissions of harmful substances are considered. It is shown that for decrease in level of toxicity of emissions of aviation GTD concepts of combustion chambers of "dry type" of RQL and LRR are used and also so-called "wet" methods, transition from GTD (where the cycle of Brighton) to alternative PUDD (with the organization of the pulsing process with detonation burning is implemented). The advantage of PUDD is that parameters of working process, such as pressure and temperature are higher than at GTD. Also other, more environmentally friendly types of fuel (fuel), including hydrogen are considered..

**Key words:** Gas-turbine engine, main and forsazhny combustion chamber, issue of harmful emissions..

**About author:**

**SUBKHANGULOV, Aydar Azatovich**, student of the 5th course of the "Design of Aviation and Rocket Engines" direction of department of the UGATU aviation engines.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ОХЛАЖДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ДВИГАТЕЛЯ АЛ-31СТ

Я. К. Тимошенко

tyana94@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рабочие лопатки первой ступени ТВД является самыми теплонапряженными и от их прочности зависит ресурс двигателя. Выпуск воздуха может быть реализован двумя способами - в торец выходной кромки и на корыто перед выходной кромкой. Выпуск в торец более предпочтителен с точки зрения эффективности охлаждения, простоты конструкции в отличие от выпуска на корыто, которое обеспечивает минимальные аэродинамические потери, но не обеспечивает оптимальную геометрию кромки. На предприятиях энергетики оценку ведут с помощью экспериментальных зависимостей, полученных в результате продувки пакета лопаток.

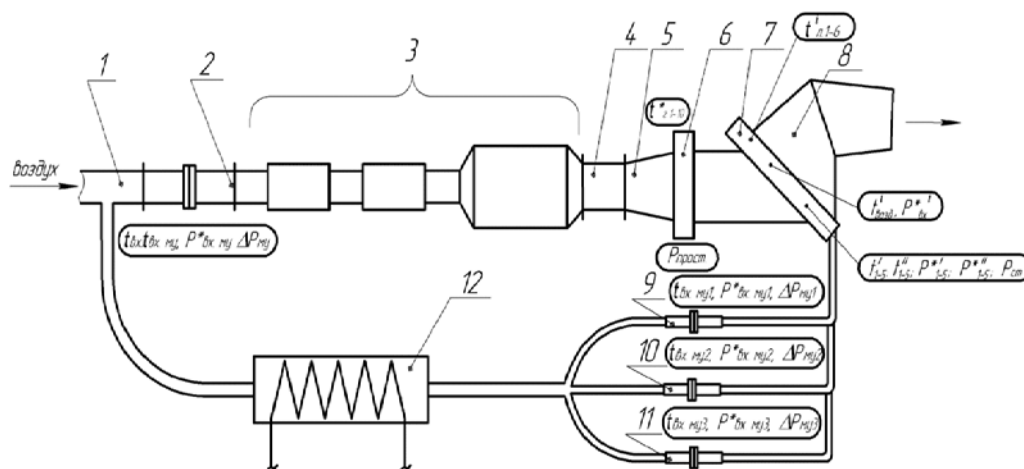
**Ключевые слова:** рабочие лопатки; ТВД; охлаждение; двигатель; экспериментальные зависимости; продувка пакета лопаток.

### ВВЕДЕНИЕ

Для изучения коэффициента глубины охлаждения рабочих лопаток был создан стенд для экспериментального исследования эффективности охлаждения пакета рабочих лопаток турбины высокого давления АЛ-31СТ (рис. 1).

- Материал лопаток – сплав ЖС32-ВИ.
- Проверка каналов измерения температур газа, охлаждающего воздуха и стенок лопаток производилась прибором УПИП-60М.

- В состав проверяемых каналов для измерения температуры входит термоэлектрический преобразователь А565-002-02, преобразующий ЭДС с термопар в температуру в °С, компенсационные провода, коммутатор (клеммы). Абсолютные погрешности каналов измерения температуры газа и стенок лопаток не превышают 1,6 °С, каналов измерения температуры охлаждающего воздуха - 0,9 °, что является приборной погрешностью.



**Рис. 1.** Схема стенда: 1 – воздушная магистраль; 2 – мерный участок с  $d_1=84$  мм ( $d_2=119$  мм); 3 – установка с подогревателями и ресивером; 4 – отсек камеры сгорания 006.97.800; 5 – переходник; 6 – мерная проставка; 7 – пакет лопаток; 8 – отводное колено; 9,10,11 – мерные участки; 12 – электрический подогреватель воздуха

Воздух, поступающий от компрессорной станции по воздушной магистрали 1, делится на основной поток, расход которого измеряется стандартными расходомерными участками 2 с диаметром сопел  $d_c=84$  мм или  $d_c=119$  мм (в зависимости от расхода) и охлаждающий, подаваемый к трём исследуемым рабочим лопаткам, измеряется дроссельными шайбами с диаметром  $d_{ш}$ .

Газ, пройдя через пакет 7, через отводное колено 8 выбрасывается в выхлопную шахту.

### ПАКЕТ ЛОПАТОК

Пакет состоит из девяти лопаток, образующих сектор рабочей решётки (рис. 2). Фронт решётки установлен под углом  $38^\circ$  к потоку, так как он является оптимальным углом атаки.

Три средних лопатки - исследуемые (позиции 4, 5 и 6), далее устанавливаются технологические лопатки, препарированные под измерения температуры (позиции 3 и 7) и полного

давления газа на входе в пакет (позиции 2 и 8).

Термопары для измерения температур лопатки, газа и охлаждающего воздуха изготавливаются из термоэлектродных проводов ХА диаметром 0,3 мм с изоляцией кремнезёмной нитью. Спаи проводов получается аргоно-дуговой сваркой и представляет собой сферу диаметром  $\sim 0,5$  мм. Для измерения температуры стенок лопаток спаи слегка сплющиваются и привариваются к лопатке в небольшие засверловки глубиной от 0,1 до 0,15 мм. Спаи и термоэлектродные провода закрывают фольгой из материала 12Х18Н10Т толщиной 0,1 мм.

При испытаниях фиксировались температуры газа по технологическим лопаткам в среднем сечении (рис. 3). Охлаждающий воздух проходит через электроподогреватель 12 для подогрева охлаждающего воздуха, но в ходе испытаний подогреватель не включался, так как температура газа в ходе испытаний не была столь высокой и допускала заданную температуру охлаждающего воздуха.

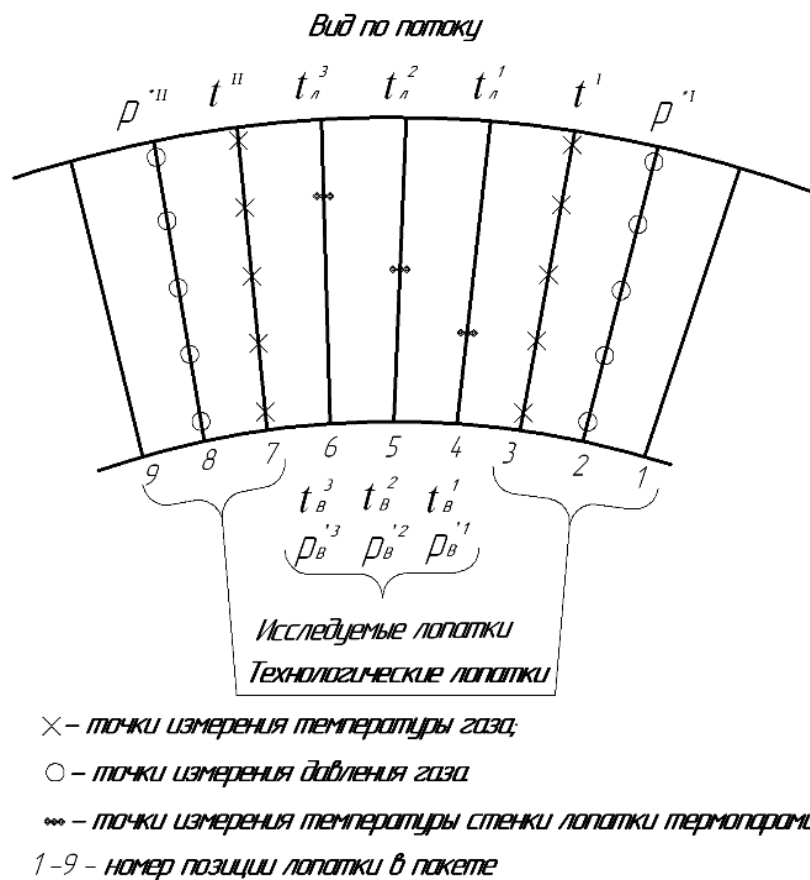
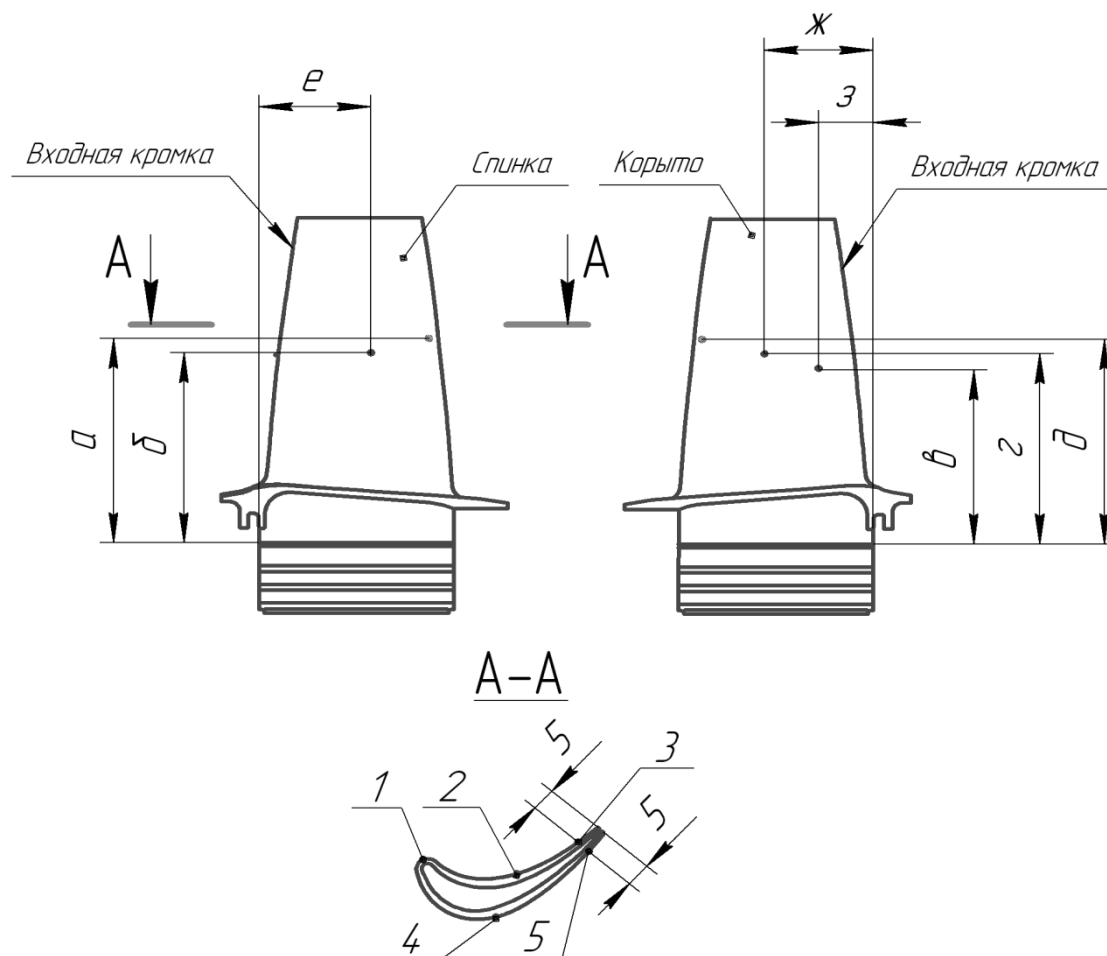


Рис. 2. Пакет лопаток





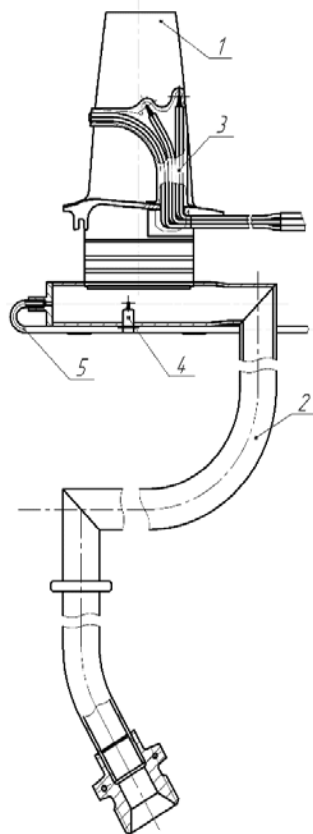
Номер лопатки	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>
377.92.806	23	20	17	20	23	19	22	3,5
377.92.807	39	36	36	39	42	19	21	5
377.802.808	61	58	55	58	61	16,5	20	7

Рис. 3. Схема расположения точек измерения температуры лопаток термопарами

Подогрев основного потока осуществляется в одном из подогревателей установки 3 и в отсеке камеры сгорания 4. Перед пакетом установлена проставка 6 круглого сечения диаметром 190 мм со вспомогательными точками измерения температуры в качестве эталонных, так как термопары греются от стенок лопатки и могут «врать» (две термогребёнки).

Газ, пройдя через пакет 7, через отводное колено 8 выбрасывается в выхлопную шахту. Имеется схемы измерения температур на лопатке (рис. 4).

Измерение температуры газа, воздуха и стенок лопаток осуществлялось термопарами ХА, соединённых с термоэлектрическим преобразователем посредством компенсационных проводов и коммутатора.



1 – Испытуемая лопатка  
2 – Трубка подвода охлаждающего воздуха  
3 – Препарирование термопары перед лопаткой  
4 – Термопара измерения температуры охлаждающего воздуха  
5 – Трубка измерения давления охлаждающего воздуха

**Рис. 4.** Схема подвода к исследуемым лопаткам охлаждающего воздуха и измерения его параметров

Давление охлаждающего воздуха и газа измерялось манометрами. Статическое давление газа за пакетом измерялось вакуумметром.

Расходы воздуха основного потока и охлаждающего воздуха измерялись посредством мерных участков. Давление воздуха на входе в мерные участки измерялось манометрами. Перепад давлений на мерных шайбах и сопле измерялся водяными пьезометрами с ценой деления 1 мм. Температура воздуха измерялась термопарами ХК.

Максимальное давление газа на входе в испытательный стенд 2,3-2,5 кгс/см при расходе 2,5 кг/с. Максимальная температура газов 900°C (но при такой температуре элементы препарирования «прогорают», поэтому в ходе испытаний достигалось максимумом 600 °С). Кроме того, при температуре газов 900°C включается подогреватель охлаждающего воздуха.

#### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расход воздуха основного потока  $G_B$ , кг/с, если используется расходомерный участок с диаметром сопла  $d_c = 84$  мм вычисляется по формуле

$$G_B = 24,8 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(p_{\text{вх.му}} + p_H) \cdot \Delta p_{\text{му}}}{287 \cdot (t_{\text{вх.му}} + 273,15)}}$$

Расход охлаждающего воздуха через исследуемые лопатки  $G_{\text{вi}}$ , г/с, вычисляется по формулам

- через лопатку № 1

$$G_{\text{в1}} = 812 \cdot \alpha \epsilon \sqrt{\frac{(p_{\text{вх.му1}} + p_H) \cdot \Delta p_{\text{му1}}}{287 \cdot (t_{\text{вх.му1}} + 273,15)}}$$

- через лопатку № 2

$$G_{\text{в2}} = 348,1 \cdot \alpha \epsilon \sqrt{\frac{(p_{\text{вх.му2}} + p_H) \cdot \Delta p_{\text{му2}}}{287 \cdot (t_{\text{вх.му2}} + 273,15)}}$$

- через лопатку № 3

$$G_{\text{в3}} = 342,3 \cdot \alpha \epsilon \sqrt{\frac{(p_{\text{вх.му3}} + p_H) \cdot \Delta p_{\text{му3}}}{287 \cdot (t_{\text{вх.му3}} + 273,15)}}$$

В формулах  $\alpha \epsilon$  – коэффициент расхода и коэффициент сжимаемости, которые находят по соответствующим диаграммам. [1].

Коэффициенты a, b, c, d зависят от  $\Delta p_{\text{му}}/p_{\text{вх.му}}$ , и определяются при градуировке мерного участка эмпирическим путем (табл. 1).

Таблица 1

Номер лопатки	a	b	c	d
1	-0,2893	0,189	-0,5644	1,0162
2	-66,764	6,4178	-0,9483	0,9498
3	-1,4095	1,1636	-0,78586	0,94587

Относительный расход охлаждающего воздуха через исследуемую лопатку  $\bar{G}_{\text{вi}}$ , % рассчитан по формуле

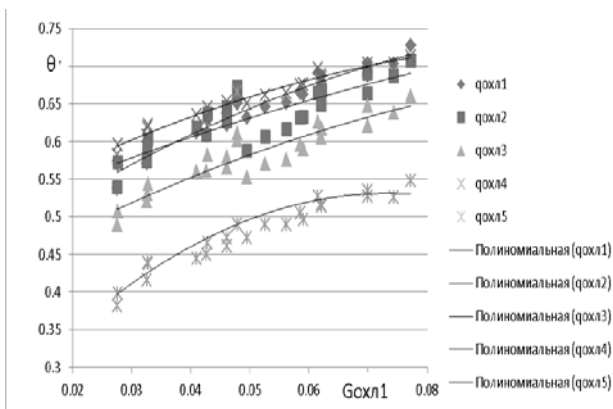
$$\bar{G}_{\text{вi}} = \frac{G_{\text{вi}} \cdot 0,008}{G_r} \cdot 100.$$

Эффективность охлаждения в местах измерения температуры стенок лопатки вычислена по формуле

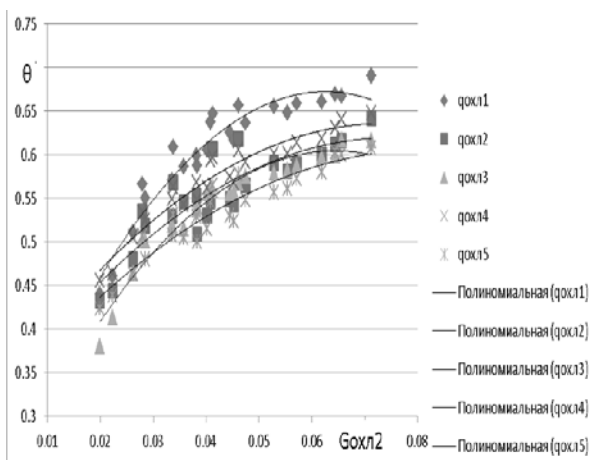
$$\theta_{лК}^i = \frac{t_{гi} - t_{лi}^k}{t_{гi} - t_{вi}^*}$$

Этот коэффициент является наиболее удобным критерием для оценки интенсивности охлаждения пера лопаток. Он показывает долю снижения температуры стенки по сравнению с температурой газа от максимально возможной величины температурного напора.

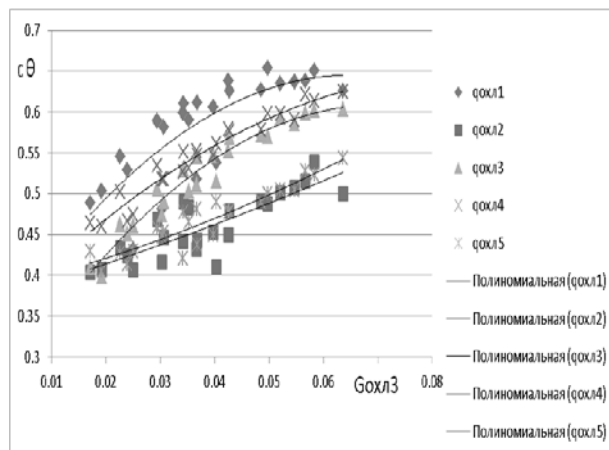
Графики зависимости приведенного расхода охлаждающего воздуха от коэффициента глубины охлаждения представлены ниже (рис. 5–7).



**Рис. 5.** График зависимости приведенного расхода охлаждающего воздуха от коэффициента глубины охлаждения для первой лопатки



**Рис. 6.** График зависимости приведенного расхода охлаждающего воздуха от коэффициента глубины охлаждения для второй лопатки



**Рис. 7.** График зависимости приведенного расхода охлаждающего воздуха от коэффициента глубины охлаждения

Из графиков видно, что при увеличении расхода охлаждающего воздуха увеличивается и коэффициент глубины охлаждения рабочей лопатки турбины высокого давления ГТУ АЛ-31СТ, а значит уменьшается температура стенки лопатки, что приводит к ее более экономичному использованию. С помощью коэффициента  $\theta$  можно рассчитать температуру стенки лопатки в условиях реального течения газа и выяснить, какой расход охлаждающего воздуха требуется отбирать (при известном расходе газа, его температуре и давлении).

Также ниже представлена фотография лопатки с термопарами (рис. 8).



**Рис. 8.** Препарированная лопатка (среднее сечение)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование коэффициента глубины охлаждения лопаток может быть применено в качестве первоначально-

го критерия при конструировании ГТУ в части турбины высокого давления, а так же в качестве исходного значения при расчете лопаток на прочность, вибрационную стойкость (для данного материала лопатки).

Кроме того, используя этот коэффициент, можно прогнозировать температуру стенки лопатки при определенном количестве охлаждающего воздуха, варьируя им. Во время эксплуатации установки с помощью этого можно настраивать автомат для регулирования количества охлаждающего воздуха (в зависимости от режима).

Рисунки выполнены с помощью графической программы для моделирования NX 8.5.

*Автор выражает благодарность руководителю подразделения сектор 31 КБ «Мотор» Алексею А.Ю. за высказанные замечания и пожелания по улучшению статьи.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Охлаждение газотурбинных установок** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gigavat.com/> (дата обращения 20.10.2017). Available: [http://gigavat.com/gtu\\_cooling.php](http://gigavat.com/gtu_cooling.php)
2. **Иноземцев, Н.В.** *Авиационные газотурбинные двигатели: теория и рабочий процесс* /Н.В. Иноземцев. -М.: Оборонгиз, 1955. -352 с. N V Inozemtsev " Aviation gas turbine engines: theory and workflow," (in Russian), pp. 352,1955 ]

#### ОБ АВТОРЕ

**ТИМОШЕНКО Яна Константиновна**, магистр каф.АТиТ, дипл. бакалавра (2016). Готовит ВКР о подборе ПТУ для АЛ-31СТ.

#### METADATA

**Title:** Experimental estimation of the cooling depth of the working blade of the turbine engine AL-31ST

**Author:** Y.K.Timoshenko

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** tyana94@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 159-164, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print).**

**Abstract:** The working blades of the first stage of the HDPE are the most heat-stressed and the life of the engine depends on their strength. The air outlet can be realized in two ways - in the end of the outlet edge and on the trough before the outlet edge. Release to the end is more preferable in terms of cooling efficiency, simplicity of design in contrast to release on the trough, which provides minimal aerodynamic losses, but does not provide optimal edge geometry. At the enterprises of power engineering an assessment conduct by means of the experimental dependences received as a result of purge of a package of blades.

**Key words:** blades, НРТ, cooling, engine, experimental dependencies, purging of a package of blades.

**About author:**

**TIMOSHENKO, Yana Konstantinovna** ,Master of aviation energetic (UGATU, 2016).

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

А. И. ХАБИРОВ<sup>1</sup>, А. Н. ЖИЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ainurkhabi@gmail.com, <sup>2</sup>mr.zan57@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассматриваются источники электроэнергии для резервирования электричества на предприятиях, такие как дизельный и газопоршневой генераторы. Приводится описание конструкции, основных вариантов исполнения, типы установок. Сравняются стоимости топлив для двигателей, стоимость выработки электроэнергии, объем выбросов продуктов сгорания в окружающую среду. Из этого следует вывод, что более экономичным и экологичным является газопоршневая электростанция.

**Ключевые слова:** дизельная и газопоршневая электростанции; резервирование; двигатель; генератор; когенерация; природный газ; дизтопливо.

### ВВЕДЕНИЕ

Электричество в промышленности используется очень широко, и это налагает требования на обеспеченность производственных мощностей бесперебойным электроснабжением.

В настоящее время для резервирования электропитания применяют такие устройства, как дизельная и газопоршневая электростанции. Это стационарные или подвижные энергетические установки, оборудованные одним или несколькими электрическими генераторами с приводом от дизельного или газопоршневого двигателя внутреннего сгорания.

### ДИЗЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Центром такого альтернативного источника электроснабжения является дизель-генератор, в состав которого входит:

- двигатель на дизельном топливе;
- генератор электрический ;
- система охлаждения;
- система смазки;
- система подачи топлива;
- пульты управления.

Дизельные электростанции (рис. 1), вырабатывающие промышленное электричество, отличаются по выходному напряже-

нию (одно- и трехфазные). На однофазных величина выходного напряжения составляет либо 220 В, либо 380 В. На трехфазных – 220 и 380 В. По КПД трехфазные электростанции эффективнее.

Генератор электроустановки может иметь воздушное или жидкостное охлаждение двигателя. Агрегаты с воздушным охлаждением используются как аварийные источники энергоснабжения, так как максимальное время работы без остановки двигателя не превышает 10 часов. Станции с жидкостным охлаждением хорошо подходят для монтажа автономного электроснабжения, так как могут работать в круглосуточном режиме.

Мощные электрические станции вырабатывают трехфазный электрический ток:

- низковольтные – напряжение до 1 кВ,
- высоковольтные – напряжение более 1 кВ (6,3 кВ, 10 кВ).

Мощность промышленность установок составляет 50-2500 кВт. Они востребованы в предприятиях непрерывного цикла. Установки снабжены двигателем работающим при низких оборотах, что позволяет им работать круглосуточно.

Генераторы способны работать до 40000 часов до первого отказа.[1]

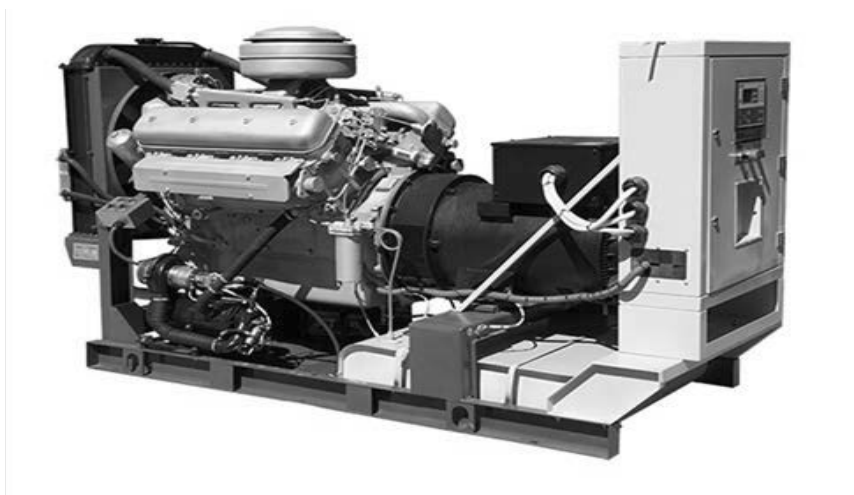


Рис. 1. Дизельная электростанция

### ГАЗОПОРШНЕВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

ГПД представляет собой ДВС с внешним смесеобразованием и искровым зажиганием горючей смеси в камере сгорания, использующий в качестве топлива газ и работающий по циклу Отто. Энергия, выделившаяся при сгорании топлива, в газовом двигателе производит механическую работу на валу, которая используется для выработки электроэнергии генератором электрического тока. Газовые двигатели используются для работы в составе генераторных установок, предназначенных для постоянной и периодической работы (пиковые нагрузки) с комбинированной выработкой электроэнергии и тепла, а также в качестве аварийных источников энергии. Кроме того, они могут работать как в составе холодильных установок, так и для привода насосов и газовых компрессоров.

Электрический КПД газопоршневых электростанций высоким, и на качественном природном газе составляет ~ 39-44%.

Газопоршневые электростанции (рис. 2) производят с мощностями от 0,05 МВт до 17-20 МВт.

Почти все газопоршневых электростанций в расширенной комплектации способны работать в режиме когенерации, то есть как тепловые электростанции. Температура выхлопных газов на выходе из силовой машины газопоршневой электростанции составляет  $\sim 390 \pm 10^\circ \text{C}$ . Такая температура позволяет легко получать бесплатную тепловую энергию в режиме когенерации (рис. 3).

Соотношение выдачи электричества и тепловой энергии равно 1:1, то есть на 1 МВт установленной электрической мощности вырабатывается 1 МВт тепловой энергии.

Система охлаждения газопоршневых электростанций жидкостная.



Рис. 2. Газопоршневая электростанция

Существуют газопоршневые электростанции, работающие на двух видах топлива. В качестве основного топлива на таких электростанциях используется природный газ. Возможно использование попутного нефтяного газа (ПНГ). При работе на ПНГ требуется его обязательная и тщательная подготовка. Дизтопливо, флотский мазут или сырая нефть используются как второе топливо.[2]

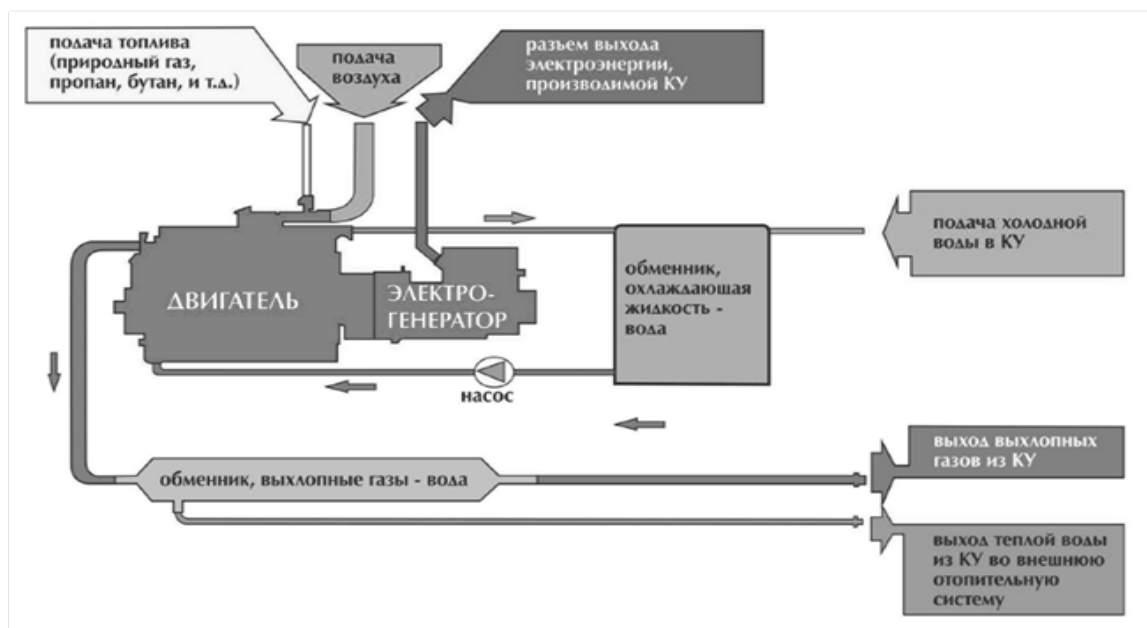


Рис. 3. Когенерационная установка

**СРАВНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ**

Сравнивая дизельные и газопоршневые генераторы можно прийти к выводу, что для использования в городе для резервного питания выгоднее использовать газопоршневые генераторы. В качестве топлива таких станции используется газ, а для дизельных необходимо строить хранилища для дизтоплива.

Основное преимущество газопоршневых двигателей перед дизельными — более дешёвое топливо. Разница в цене отражена в диаграмме на рис. 4. Даже при использовании в качестве резервного топлива газовой смеси пропан-бутан, стоимость единицы электрической энергии, произведённой на газопоршневой установке, в 1,3 раза меньше, чем на дизельной (рис. 5).

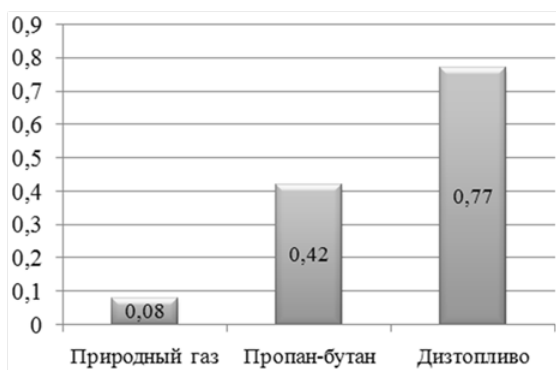


Рис. 4. Стоимость топлива

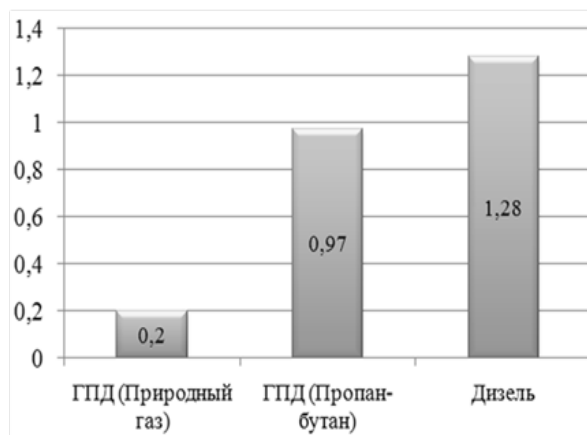


Рис. 5. Стоимость электроэнергии

Другое важное преимущество перед дизельными установками — экологическая безопасность, например, уровень выбросов NOx в 3 раза меньше (рис. 6).[3]

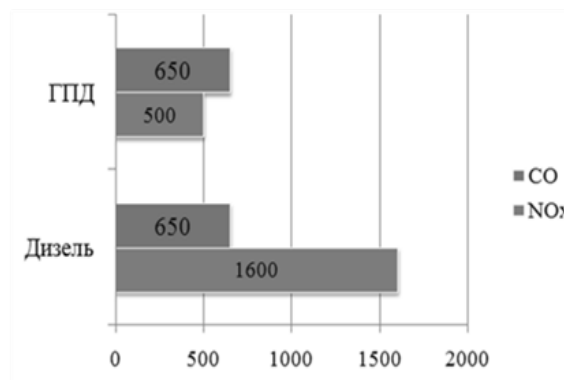


Рис. 6. Выбросы в атмосферу

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнивая дизельные и газопоршневые генераторы можно прийти к выводу, что для использования в городе для резервного питания выгоднее использовать газопоршневые генераторы. В качестве топлива таких станции используется газ, а для дизельных необходимо строить хранилища для дизтоплива.

Основное преимущество газопоршневых двигателей перед дизельными – более дешёвое топливо.

Другое преимущество перед дизельными установками – меньше выбросов в окружающую среду.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mitsubishi diesel engine** [Электронный ресурс]. URL: <http://mitsubishi-engine.ru/dizel-generatoryue-ustanovki>. [ **Mitsubishi diesel engine** [Online]. Available: <http://mitsubishi-engine.ru/dizel-generatoryue-ustanovki>]
2. **Новая генерация** [Электронный ресурс]. URL: [http://manbw.ru/analitycs/gazoporshnevye\\_elektrstantsii](http://manbw.ru/analitycs/gazoporshnevye_elektrstantsii). [ **New generation** [Online]. Available: [http://manbw.ru/analitycs/gazoporshnevye\\_elektrstantsii](http://manbw.ru/analitycs/gazoporshnevye_elektrstantsii)]
3. **Электротехническое снабжение** [Электронный ресурс]. URL: [http://ess-ltd.ru/sravnenie\\_gazoporshnevyyh](http://ess-ltd.ru/sravnenie_gazoporshnevyyh). [ **Electrical supply** [Online]. Available: [http://ess-ltd.ru/sravnenie\\_gazoporshnevyyh](http://ess-ltd.ru/sravnenie_gazoporshnevyyh) ].

## ОБ АВТОРАХ

**ХАБИРОВ Айнур Ильшатович**, магистрант. каф. ТЭТ. Дипл. Энергетическое машиностроение (УГАТУ, 2016).

**ЖИЛИН Александр Николаевич**, доцент каф. ТЭТ. Кандидат техн. наук.

## METADATA

**Title:** Equipment for backup power supply

**Authors:** A. I. Khabirov<sup>1</sup>, A. N. Zhilin<sup>2</sup>

**Affiliation:** <sup>1,2</sup>Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>ainurkhabi@gmail.com, <sup>2</sup>mr.zan57@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 165-168, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print)**.

**Abstract:** This article discusses the sources of electricity for reserving electricity at enterprises such as diesel and gas piston generators. The description of the design, the main variants of execution, types of installations is given. Comparison of the cost of fuels for engines, the cost of electricity generation, the amount of combustion products released into the environment. It follows from this that the more economical and environmentally friendly is the gas piston power plant.

**Key words:** diesel and gas piston power stations; reservation; engine; generator; cogeneration; natural gas; diesel fuel.

**About authors:**

**KHABIROV Ainur Ilshatovich**, graduate student. Dept. of TET. Dipl. Power engineering (USATU, 2016).

**Zhilin Alexander Nikolayevich**, assistant professor Dept. TET. Candidate of technical. sciences.



## АНАЛИЗ ДАННЫХ РСА ПО ВЛИЯНИЮ ИПДК НА СТРУКТУРУ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Zr

Д. А. ХАСАНОВА<sup>1</sup>, А. А. ЧУРАКОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>dianamorte@mail.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>2</sup> Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН

**Аннотация.** Рассматривается рентгеноструктурный анализ объемного металлического стекла (ОМС) на основе Zr до и после интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). По полученным данным РСА, можно сказать, что ИПДК ОМС Zr способствует росту внутренней энергии системы. Однако, данные иных работ, а именно воздействие ИПДК на быстрозакаленный сплав (БЗС) Nd-Fe-B, свидетельствуют о ином влиянии ИПДК на аморфные сплавы.

**Ключевые слова:** аморфные сплавы; объемные металлические стекла; интенсивная пластическая деформация кручением; рентгеноструктурный анализ; трансформация аморфных сплавов.

### ВВЕДЕНИЕ

Особые объектом в материаловеденье являются аморфные материалы и объемные аморфные материалы (объемные металлические стекла(ОМС)) [1, 2]. Специфический состав ОМС позволяет получить аморфную структуры путем литья в форму с быстрым охлаждением.

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) является одним из эффективных способов трансформации структуры металлов и сплавов [3]. ИПД так же является одним из способов воздействия на ОМС и изменения их свойств. Многочисленные исследования показали, что ИПД приводит к сильнейшему изменению структурно-фазового состояния материалов [3]. Интенсивная пластическая деформация чистых металлов приводит к измельчению зерен, а в многокомпонентных материалах под воздействием ИПД происходят фазовые превращения, образуются пересыщенные твердые растворы, формируются метастабильные фазы. В ряде случаев путем ИПД в сплавах достигается аморфизация, как, например, была обнару-

жена аморфизация магнитотвердых сплавов системы Nd-Fe-B [4].

В работах [5, 6] было исследовано воздействие ИПД на аморфные быстрозакаленные сплавы TiNi, Nd-Fe-B, проанализированы наблюдаемые процессы нанокристаллизации при ИПД в аморфных сплавах. Трансформация структуры при ИПД сплавов в исходном кристаллическом и аморфном состоянии были так же проанализированы в недавних работах [7–10], но вопросы влияния ИПД на тонкую структуру аморфных сплавов, а именно аморфных сплавов на основе Zr, в полной мере не исследованы.

В данной статье представлены исследования влияния интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) на объемное металлическое стекло (ОМС) состава Zr62Cu22Al10Fe5Dy1. ОМС (bulk metal glass (BMG)) получили путем литья в вакууме в медную охлажденную литейную форму, со скоростью охлаждения расплава около 10 К/с. Полученные образцы ОМС Zr62Cu22Al10Fe5Dy1 (ОМС Zr62) подверглись ИПДК при комнатной температуре и температуре 150 °С.

Рентгеноструктурный анализ, выполненный на дифрактометре Rigaku Ultima IV с

использованием  $\text{CuK}\alpha$  излучения с шагом 0.02 град и выдержкой 2 сек на град., щель первичное 10 2/3 и 2/3 0.6 во вторичном. монохроматор графитовый, напряжение - 40 кВ, ток - 40 мА, показал изменения уширения аморфного галло ОМС и положения его центра тяжести в результате ИПДК.

В табл. 1 представлены параметры аморфных галло, наблюдаемых на образцах: D1 (ang) – среднее межатомное расстояние первой координационной сферы в ангстремах по положению галло 1, D2 (ang) – среднее межатомное расстояние первой координационной сферы в ангстремах по положению галло 2; Int I – интенсивность (зависит от размера объекта съемки и параметров съемки, отсюда принимать во внимание надо только сравнение Int галло 1 и галло 2 состояний), FWHM – уширение галло.

Исследования показывают, что ИПДК ОМС Zr62 приводит к росту уширения основного галло: исходный ОМС - FWHM = 4 град.; ИПДК при 20°C - FWHM = 6.2 град; ИПДК 150°C - FWHM = 6.44 град., и к росту галло второй координационной сферы. Так же ИПДК ОМС Zr62 приводит к увеличению среднего межатомного расстояния первой координационной сферы (табл. 1, рис. 1).

Однако, интенсивность галло второй координационной сферы мала, что затрудняет анализ, и в ряде случаев галло второй координационной сферы практически не идентифицируется, по этой причине изменение галло второй координационной сферы далее анализироваться не будет.

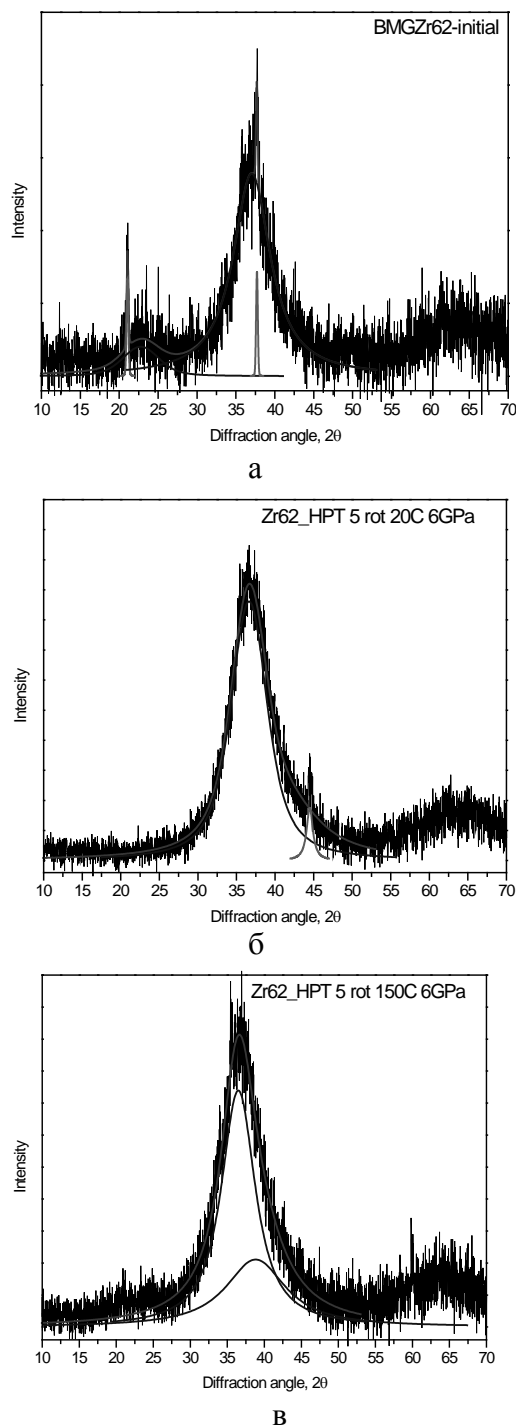
Таблица 1

**Результаты рентгеноструктурного исследования BMG Zr<sub>62</sub>Cu<sub>22</sub>Al<sub>10</sub>Fe<sub>5</sub>Dy<sub>1</sub> до и после ИПДК**

Состояние	2 theta (deg)	D (ang)	Int. I	FWHM
Исходный BMG	37.03	2,4025	101	4.00(11)
	64.4(4)	1.446(7)	17	8.1(5)
НРТ n=5 при 20 °C	36,85	2,4143	294	6.20(7)
	64.4(5)	1.446(10)	34	9.9(4)
НРТ n=5 150 °C	36,85	2,4143	2194	6.44

ИПДК приводит к сдвигу центра тяжести галло первой координационной сферы ОМС Zr62Cu22Al10Fe5Dy1. Для ОМС Zr62

угол центра тяжести галло соответствует межатомному расстоянию  $D = 2,4025$  анг, ИПДК 20°C -  $D = 2,4143$  анг.; ИПДК 150°C -  $D = 2,4143$  анг.



**Рис. 1.** Рентгенограммы ОМС Zr62Cu22Al10Fe5Dy1: а – исходного ОМС; б – ОМС после ИПДК n=5 T=20 °C; в – ОМС после ИПДК n=5 T=150 °C

Большее значение уширения (FWHM) означает состояние с большим набором (спектром) значений атомных расстояний в соответствующей координационной сфере.

Таким образом, ИПДК приводит к уменьшению порядка в аморфной фазе. Хотя, формирование кластеров с различными значениями атомных расстояний в соответствующей координационной сфере может дать эффект уширения. Таким образом, прирост уширения при ИПДК может быть связано с расслоением аморфной фазы на две составляющие.

Эффекты разложение аморфной фазы при ИПДК, отмечались иными авторами при исследовании воздействия ИПДК на аморфные быстрозакаленные сплавы (БЗС) Nd-Fe-B [5]. Однако, при воздействия ИПДК на сплавы Nd-Fe-B наблюдалась не только расслоение аморфной фазы, но и частичная нанокристаллизация Fe. В нашем случае, после ИПДК ОМС Zr<sub>62</sub>Cu<sub>22</sub>Al<sub>10</sub>Fe<sub>5</sub>Dy<sub>1</sub> нанокристаллизация не была отмечена.

Сдвиг центра тяжести галло первой координационной сферы в область малых углов свидетельствует о росте межатомных расстояний, и, соответственно, о росте свободного объема, а это, в свою очередь, говорит о росте неравновесности аморфной фазы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Судя по всему, в случае нашего аморфного ОМС Zr<sub>62</sub>Cu<sub>22</sub>Al<sub>10</sub>Fe<sub>5</sub>Dy<sub>1</sub> деформация способствует росту внутренней энергии системы, а в случае аморфного БЗС Nd-Fe-B воздействие ИПДК приводит к релаксации за счет нанокристаллизации и уменьшение свободной энергии системы.

Природу несоответствия изменения свободной энергии системы в различных аморфных материалах при интенсивном деформационном воздействии требуют дополнительного изучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.М. Глезер, Б.М. Молотилов Структура и механические свойства аморфных сплавов. М.: Металлургия, 1992. 208 с.
2. V.Yu. Zadorozhnyy, A. Inoue, D.V. Louzguine-Luzgin // Mater. Sci. Eng. A. 551, 82–86 (2012).
3. Р.З. Валиев, И.В. Александров. Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства. М.: Академкнига. 2007. 398 с.
4. В.В. Столяров, А.Г. Попов, Д.В. Гундеров, В.С. Гави-ко, Г.Ф. Корзникова, А.С. Ермоленко, Р.З. Валиев. ФММ. 2, 173–178 (1997)

5. Р.З. Валиев, В.Г. Пушин, Д.В. Гундеров, А.Г. Попов. Докл. РАН. 398(1), 54 (2004)

6. Li Hailing, Li Lou, Fuchen Hou, Defeng Guo, Wei Li, Xiaohong Li, D.V. Gunderov, Kiminori Sato, Xiangyi Zhang. APPLIED PHYSICS LETTERS. 103, 142406 (2013)

7. D.V. Gunderov, V.Yu. Slesarenko, A.V. Lukyanov, A.A. Churakova, E.V. Boltynjuk, V.G. Pushin, E.V. Ubyivovk, A.V. Shelyakov, R.Z. Valiev Advanced Engineering Materials. 17 (12), 1728–1732 (2015)

8. D.V. Gunderov, V.Yu. Slesarenko, A.A. Churakova, A.V. Lukyanov, E.P. Soshnikova, V.G. Pushin, R.Z. Valiev. Intermetallics. 66, 77–81 (2015) doi:10.1016/j.intermet.2015.06.013

9. V.Yu. Slesarenko, D.V. Gunderov, P.G. Ulyanov, R.Z. Valiev. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 63, 012166 doi:10.1088/1757-899X/63/1/012166 (2014)

10. A.Yu. Churyumov, A.I. Bazlov, A.A. Tsarkov, A.N. Solonin, D.V. Louzguine-Luzgin, J. Alloys Comp. 654 (2016) 87–94.

### ОБ АВТОРАХ

ХАСАНОВА Диана Алферовна, магистрант (УГАТУ, 2018)

ЧУРАКОВА Анна Александровна, кан. ф.-м. наук (ИФМиК, 2016)

### METADATA

**Title:** Analysis of data x-ray diffraction analysis on the effect intensive plastic deformation on the structure of amorphous alloys on the basis of ZR

**Authors:** D. A. Khasanova<sup>1</sup>, A. A. Churakova<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>2</sup> Institute of Physics of Molecules and Crystals

**Email:** <sup>1</sup>dianamorthe@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 169–171, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The paper considers the the X-ray structural analysis of a bulk metal glass (BMG) based on Zr before and after intense plastic deformation by torsion (IPDT). According to the results of X-ray diffraction analysis, it can be said that the IPDT BMG Zr promotes the growth of the internal energy of the system. However, the data of other works indicate a different effect of the IPDT on amorphous alloys.

**Key words:** amorphous alloys, bulk metal glasses, intense plastic deformation by torsion, X-ray structural analysis, transformation of amorphous alloys.

**About authors:**

KHASANOVA, Diana Alferovna, master (UGATU, 2018)

CHURAKOVA, Anna Alexandrovna, can. f.-m. Sciences (IPMC, 2016)

## МИКРОПРОГРАММНЫЕ ДИСКРЕТНО-ЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Н. Г. ЧИКУРОВ<sup>1</sup>, В. А. МОКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> tchikurov@yandex.ru, <sup>2</sup> mokinmk@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** В связи с развитием компьютерных систем управления возрос интерес к проблемам проектирования дискретно-логических систем управления промышленной электроавтоматики, реализуемой на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Это сложная техническая задача, для решения которой разработчик должен хорошо владеть теорией устройств дискретного действия и математическим аппаратом алгебры логики. Объектом исследования данной статьи является проектирование систем управления с помощью микропрограмм. Разработана методика построения нового вида дискретно-логических микропрограммных систем управления. Дан пример построения микропрограммной системы управления в инструментальной среде программирования ISaGRAF.

**Ключевые слова:** проектирование; диаграммы; синтез систем; микрокоманды; микропрограммы; ISARGAF; роботизированный комплекс; система управления; циклограммы; FBD.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных станках автоматизированы многочисленные операции технологического обеспечения: управление автоматической сменой инструмента, управление переключениями в приводах главного движения, управление зажимными приспособлениями, охлаждением, смазкой, перемещением ограждений и другими.

Существует ряд методов синтеза систем управления, но у каждого из них есть свои недостатки. Например, в сетях Петри сложно использовать подпрограммы, строить параллельные циклы и остается не решенным вопрос программирования сетей Петри. Другой метод синтеза связан с построением циклограмм работы механизмов. Применение данного метода сопряжено с большой трудоемкостью процедуры синтеза системы и ограниченными возможностями построения ветвящихся программ.

В работе [3] приведен новый универсальный метод синтеза дискретно-

логических систем управления путем построения микропрограмм. Проект микропрограммной системы управления создается в инструментальной среде программирования *ISaGRAF*. Этот метод дает описание алгоритмов управления с помощью логических функций, которые затем достаточно легко реализовать в виде электрической схемы или программы для ПЛК.

В данной статье проведен анализ новых микропрограммных дискретно-логических систем управления. Разработана по новой методике система управления роботизированным комплексом. Написана в инструментальной среде программирования *ISaGRAF* управляющая программа на языке функциональных блок-диаграмм (*FBD*).

Практическая реализация микропрограммных систем управления сложными объектами, как и любых других систем управления, требует решения разнообразных задач частного характера, возникающих в процессе проектирования.

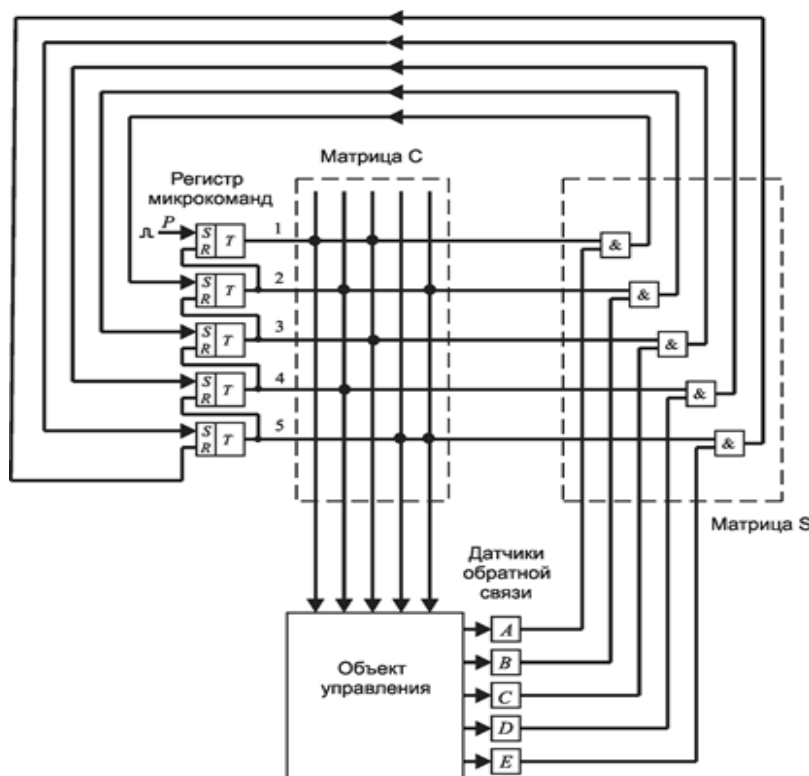


Рис. 1. Схема микропрограммной системы управления

Используемый в проектировании графический язык функциональных блок-диаграмм *FBD* [1] хорошо подходит для решения такого рода вопросов, поскольку создаваемые в процессе проектирования функциональные схемы наглядны, они отождествляются с реальными электронными схемами и поэтому сравнительно легко отлаживаются, и тестируются с помощью средств инструментальной системы программирования *ISaGRAF*.

#### СИНТЕЗ МИКРОПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Микропрограммирование обычно связывают с именем Уилкса (*Maurice Vincent Wilkes*), предложившего совместно со Стринджером (*John Bentley Stringer*) в 1951 г. микропрограммное управление в качестве упорядоченного и гибкого средства для управления вычислительными машинами [2]. Программа, задаваемая вычислительной машине, представляет собой последовательность команд. Микропрограммное управление означает, что машина с помощью заранее составленной внутренней микропрограммы интерпретирует каждую команду и затем исполняет ее в виде последо-

вательности микроопераций. Микропрограммная система управления – это дискретный автомат, который в процессе функционирования генерирует последовательность микрокоманд, передаваемых в качестве управляющих воздействий на внешний объект управления. Микрокоманды запрограммированы и хранятся в виде двоичных кодов в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ).

Рассмотрим работу микропрограммной системы управления (рис. 1). Импульс пуска *P* включает первый (сверху) триггер регистра микрокоманд. Сигнал с его выхода возбуждает горизонтальную шину 1 матриц *C* и *S*. В матрице *C* с помощью вентилях или схем ИЛИ, присоединенных к этой шине, отбираются сигналы, которые в виде параллельного двоичного кода передаются на объект управления. После этого система переходит в режим ожидания конца исполнения переданной на объект управления микрокоманды.

Окончанием действия, заданного микрокомандой, служит сигнал с одного из датчиков обратной связи на выходе объекта управления. На рисунке в качестве такого датчика условно выбран датчик *A*. Сигнал с

этого датчика открывает схему И, включенной последовательно в первую шину матрицы  $S$ . В результате на выходе матрицы  $S$  формируется единичный сигнал, который по цепи обратной связи поступает в регистр микрокоманд и открывает в нем следующий по порядку (второй) триггер. Этот триггер, включившись, возбуждает горизонтальную шину 2 и одновременно сбрасывает вышестоящий первый триггер  $T$ . Таким образом, управление микрокомандами передается от первой горизонтальной шины ко второй и далее процесс повторяется.

После отработки последней микрокоманды по цепи обратной связи автоматически выключается последний триггер регистра микрокоманд, и микропрограммная система управления приходит в исходное состояние. В обобщенном виде микропрограммная система управления похожа на дискретный автомат Мура (рис. 2). Она содержит логический преобразователь (ЛП) и входные логические элементы.



Рис. 2. Микропрограммная система управления в обобщенном виде

### СИНТЕЗ МИКРОПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Для описания алгоритма работы робота используются диаграммы микрокоманд. *Диаграмма микрокоманд* – это графическое изображение *позиций* и *микрокоманд*, соединенных *направленными линиями*. Позиции и микрокоманды чередуются. *Позиции* изображаются маленькими горизонтальными полосками, которые пересекают линии соединения. К каждой позиции присоединяются логические условия перехода к этой позиции. Возле каждой позиции указывается ее порядковый номер.

*Микрокоманды* изображаются в виде прямоугольников, внутри которых с помощью математических символов записываются действия системы управления во время исполнения данной микрокоманды. Изучим методику синтеза микропрограммных систем управления на примере системы управления роботизированным комплексом (рис. 3). Общая программа управления роботом состоит из двух основных программ  $S1$  и  $S2$ , которые работают независимо друг от друга, и обслуживают соответственно станок 1 и станок 2, что обеспечивает надежность системы при аварийном отключении одного из станков

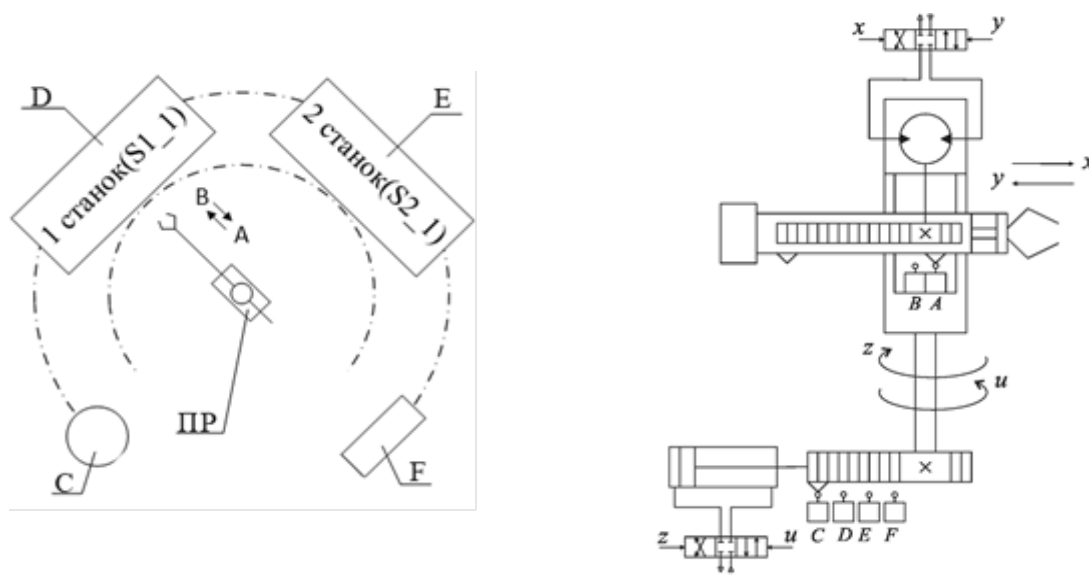


Рис. 3. Структурно-кинематическая схема роботизированного комплекса:  $D$  и  $E$  – первый и второй станок соответственно;  $F$  – накопительное устройство;  $C$  – разгрузочное устройство; ПР – промышленный робот

Общая программа управления роботом состоит из двух основных программ *S1* и *S2*, которые работают независимо друг от друга, и обслуживают соответственно станок 1 и станок 2.

Каждая из программ генерирует последовательность микрокоманд, которые изображают в виде диаграмм микрокоманд (рис. 4). При подаче с пульта управления сигнала «*Pusk*» запускается программа *S1* или *S2* либо обе программы *S1* и *S2* одновременно. На рис. 5

показана схема запуска программы *S1*. Программа *S2* запускается аналогично.

В позициях 2 и 5 проверяются условия. Если робот не занят загрузкой или разгрузкой станка, то подается команда на выполнение следующей программы. В позиции 2 включается программа *Z1* загрузки первого или *Z2* загрузки второго станка. Команды завершения этих программ *FZ1* или *FZ2* разрешают запустить в работу программы управления станками *S1\_1* или *S1\_2*.

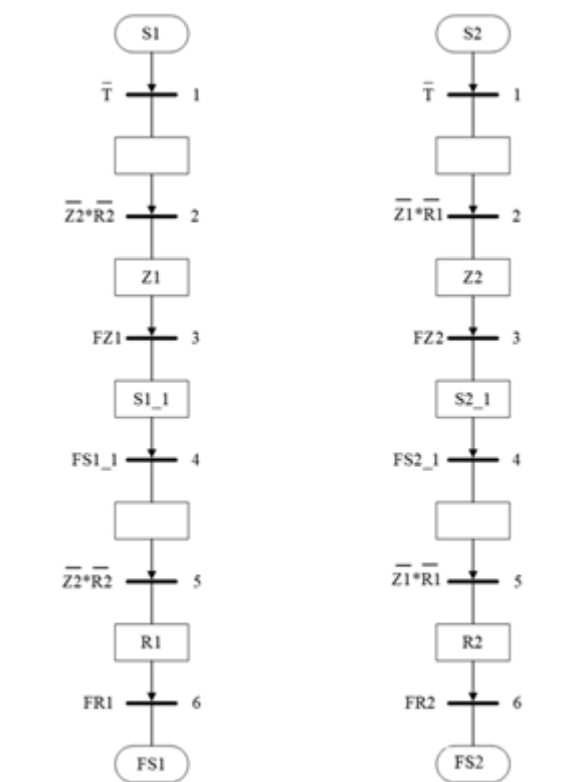


Рис. 4. Диаграмма микрокоманд для управления первым и вторым станками: *Z1,Z2* – программа загрузки станков; *S1\_1,S2\_1* – запуск программ управления станками; *R1,R2* – программы выгрузки станков

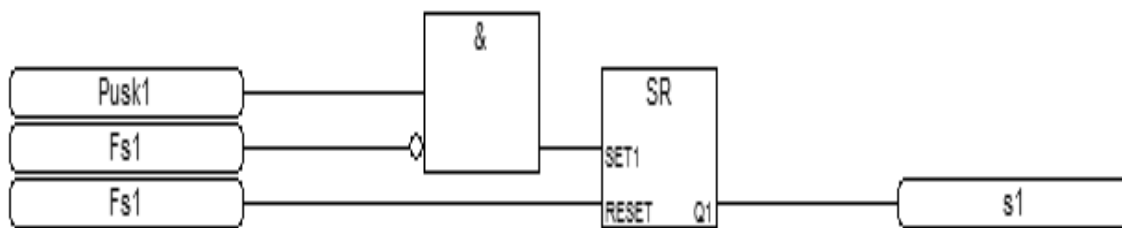


Рис. 5. Схема запуска программы *S1*

Так как целью является создать управляющую программу для роботизированного комплекса работа станка будет выполняться условно и после запуска подпрограммы S1\_1 или S2\_1 она сразу будет завершаться (FS1\_1 или FS2\_1) и запускать проверку местоположения робота (такт 5).

После проверки (такт 2 рис.4) подается сигнал на загрузку первого или второго станка (Z1, Z2). Диаграмма микрокоманд для загрузки первого и второго станка представлена на рис. 6. После завершения подпрограммы (FZ1 или FZ2) система запускает работу станка.

При проектировании с помощью микрокоманд можно организовывать переходы на другие ветви программы, если выполнены условия переходов. Такого рода условные переходы необходимы, когда, например, по внешнему сигналу требуется перейти из автоматического режима работы в режим

ручной работы и наоборот, при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций и другие.

После проверки в позиции 5 завершения работы одного из станков запускается программа разгрузки R1 или R2 соответствующего станка (рис. 4). Рассмотрим программу разгрузки первого станка (рис. 7). В данной программе реализованы два условных перехода. В начале программы осуществляется проверка местонахождения робота. Если он находится на путевом переключателе D, то программа с помощью микрокоманды Go1\_2 переходит в позицию разгрузки станка. В противном случае робот совершает движение на переключатель D и только тогда приступает к разгрузке. Во втором случае условный переход проверяет необходимость ожидания разгрузки другого станка, в противном случае он возвращается в начальную точку.

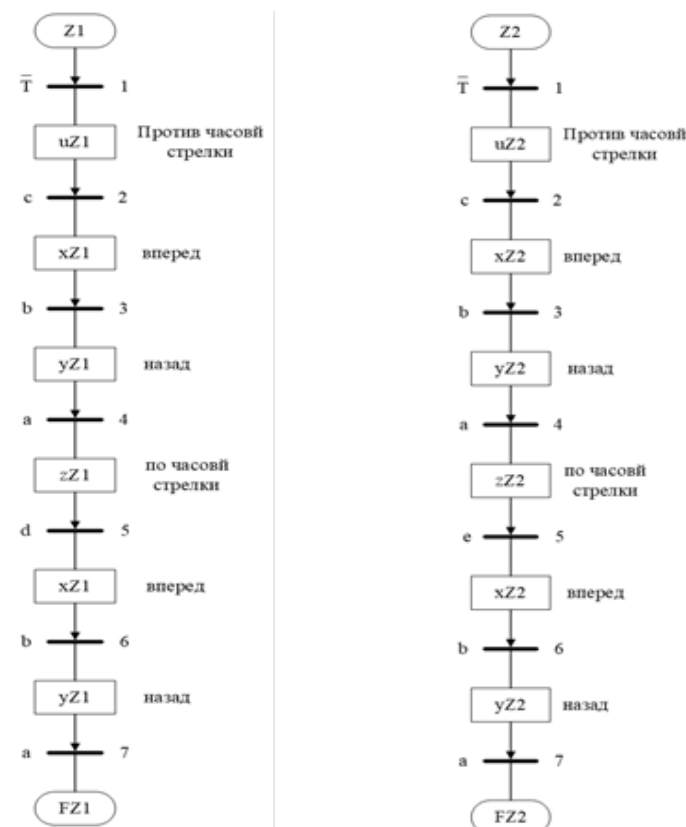


Рис. 6. Диаграмма микрокоманд загрузки станка



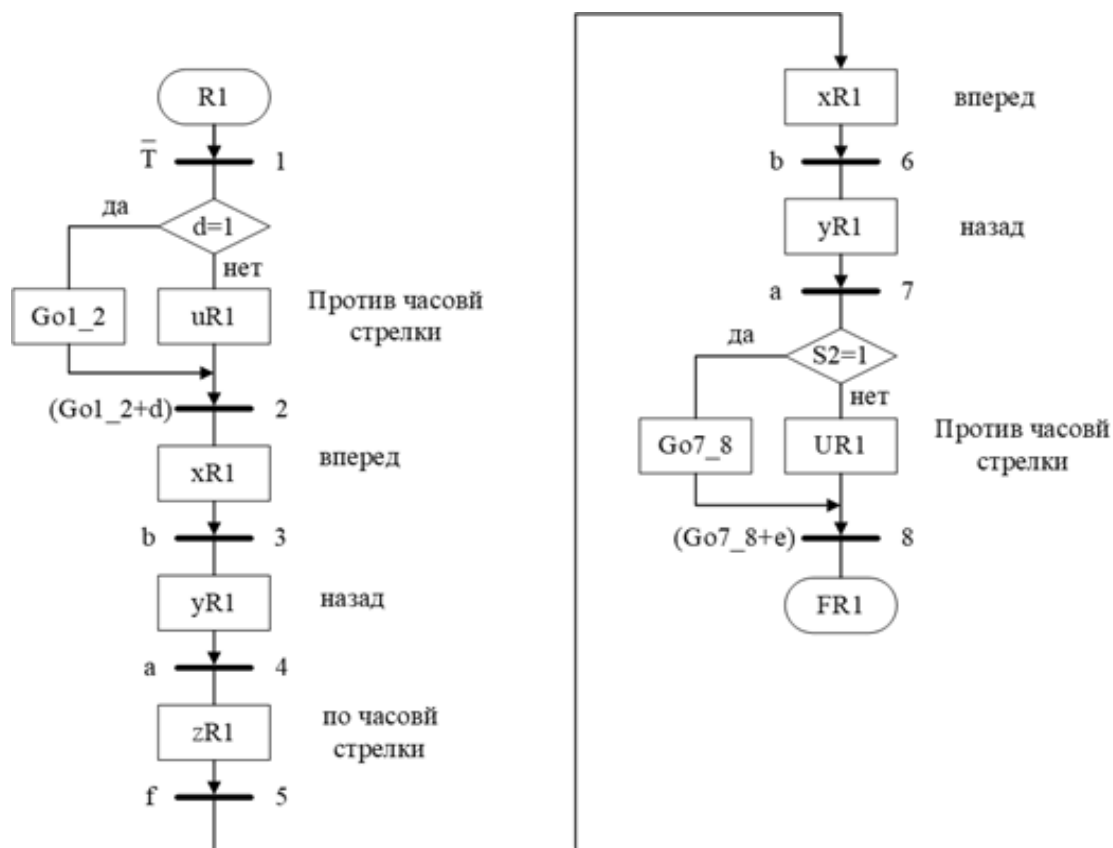


Рис. 7. Диаграмма микрокоманд разгрузки станка

Проект микропрограммной системы управления создается в инструментальной среде программирования ISaGRAF с использованием языка функциональных блоков FBD. Используя алгоритмы сложных циклов, которые реализуются в микропрограммных системах управления, можно в ряде случаев исключить применение в проекте языка высокого уровня SFC. Каждая программа состоит из системной программы, триггера управления и формирователя микрокоманд. По завершении написания программы можно симулировать программу в графическом отладчике тем самым проверив работоспособность программы и проверить аварийные ситуации при работе робота.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью полученной в процессе проектирования функциональной схемы можно создавать программы как для ПЛК, так и для систем управления на основе ПЛИС или на основе иных интегральных микросхем с дискретной логикой.

Главное отличие микропрограммной системы управления от известных многотакт-

ных систем в том, что последовательная выборка микрокоманд, запрограммированных в компьютере, позволяет управлять внешним объектом без применения дополнительных (внутренних) элементов памяти. Поэтому в процессе синтеза микропрограммных систем не требуется строить сложные циклограммы работы механизмов, исключать повторяющиеся состояния дискретного автомата и минимизировать логические функции. В результате проектирование дискретно-логических систем значительно упрощается. Команды ветвления и обращения к подпрограммам существенно расширяют функциональность микропрограммных систем управления, создаваемых на языке *FBD* [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров И. В. Программируемые контроллеры. / Под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с. [Petrov I. V. Programmable controllers. / Under the editorship of the prof. V. P. Dyakonov. – M.: SOLON Press, 2004. – 256 pages. ] <http://mexalib.com/view/2880>
2. Хассон С. Микропрограммное управление. Выпуск 1. – М.: Изд-во Мир, 1973. – 240 с. [Hasson S. Microprogram management. Release 1. – M.: Publishing house World,

1973. – 240 pages. ]  
<https://studfiles.net/preview/491777/page:15/>

3. **Чикуров Н. Г.** Синтез дискретно-логических систем управления: Учебное пособие.- М.: ИНФРА-М, 2018. – 229 с. [ Chikurov N.G. Synthesis of discrete and logical control systems: Manual. М.: INFRA-M, 2018. – 229 pages. ]  
<http://www.studmed.ru/>

#### ОБ АВТОРАХ

**МОКИН Владимир Александрович**, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов и производств УГАТУ, степень бакалавра автоматизации технологических процессов и производств (УГАТУ, 2017). Тема выпускной-квалификационной работы: Синтез микропрограммных дискретно-логических систем управления роботизированным комплексом.

**ЧИКУРОВ Николай Георгиевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств УГАТУ.

#### METADATA

**Title:** Microprogram discrete and logical control systems

**Authors:** N. G. Chikurov<sup>1</sup>, V. A. Mokin<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>tchikurov@yandex.ru, <sup>2</sup>mokinmk@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhny Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 172-178, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Due to the development of computer control systems interest in problems of design of discrete and logical control systems of the industrial electro automatic equipment realized on the basis of the programmable logical controllers (PLC) has increased. It is a difficult technical task for which solution the developer has to own well the theory of devices of discrete action and a mathematical apparatus of algebra of logic. An object of a research of this article is design of control systems by means of micro programs. The technique of creation of a new type of discrete and logical micro program control systems is developed. The example of creation of a micro program control system in the tool ISaGRAF programming environment is given.

**Key words:** design; charts; synthesis of systems; micro teams; micro programs; ISARGAF; robotic complex; control system; cyclograms; FBD.

**About authors:**

**МОКИН Владимир Александрович**, undergraduate of department of automation of technological processes and productions of UGATU, degree of the bachelor of automation of technological processes and productions (UGATU, 2017). Subject of final-qualification work: Synthesis of microprogram discrete and logical control systems of a robotic complex.

**ЧИКУРОВ, Nikolay Georgiyevich**, Candidate of Technical Sciences, associate professor of automation of technological processes and productions of UGATU.

## МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА КОТЛА

В. В. Чудинов

vladon-chudinov@yandex.ru,

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Проанализирована система автоматического регулирования газозвдушного тракта отопительного котла. Предложены новые способы регулирования газозвдушного тракта отопительного котла. Проведено исследование газозвдушного тракта отопительного котла.

**Ключевые слова:** газозвдушный тракт; отопительный котёл; регулирование котла; система автоматического регулирования; ГВТ; САР.

### ВВЕДЕНИЕ

В данный момент из-за дороговизны и нехватки энергии энергосбережение выходит на первый план. Если брать во внимание климат наших широт, то увеличение энергетической эффективности это очень важная, первостепенная задача, решением которой является создание энергосберегающей системы автоматического регулирования газозвдушного тракта отопительного котла [1, 2].

Мы будем считать процесс работы Газозвдушного Тракта Отопительного Котла (далее ГВТ ОК) объектом управления для того, чтобы исследовать возмущающие, наблюдаемые и управляемые факторы.

В процессе работы ОК возникает необходимость регулирования тепловой энергии, вырабатываемой котлом [3].

Мощность ОК:

$$Q_k = \sum_{i=1}^n Q_{in} + Q_{пот}, \quad (1.1)$$

где  $Q_k$  - тепловая энергия вырабатываемая котлом, кДж;  $Q_{in}$  - тепловая энергия потребляемая  $n$ -м абонентом тепловой сети, кДж;  $Q_{пот}$  - потери тепловой энергии в процессе передачи от ОК к абонентам тепловой сети, кДж.

Изменение  $Q_{in}$  обусловлено двумя основными причинами:

- изменение температуры окружающей среды ( $t_{окр}$ ) [4];

- изменение потребления тепловой энергии абонентами тепловой сети в целях ее экономии. Примером может служить уменьшение потребления электроэнергии производствами ночью [5].

Главные возмущающие параметры, которые диктуют необходимость изменения мощности, а также расхода топлива это температура окружающей среды ( $t_{окр}$ ), потери тепловой энергии в тепловых сетях ( $Q_{пот}$ ), тепловая энергия, потребленная абонентами тепловой сети ( $Q_{in}$ ).

Если посмотреть на формулу (1.2), то можно увидеть, что при изменении расхода топлива ( $B_p$ ) изменяется и расхода воздуха ( $V_a$ ) А это главный возмущающий фактор на ГВТ, который говорит о необходимости подачи воздуха в котёл.

$$V_a = V_0 \cdot B_p \cdot T \cdot (t_a + 273)/273, \quad (1.2)$$

где  $B_p$  - расчетный расход топлива, м<sup>3</sup>/с;  $V_0$  - теоретический расход воздуха для сгорания 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/с;  $T$  - коэффициент избытка воздуха в топке;  $t_a$  - температура воздуха, °С.

Если котёл работает с уравновешенным газозвдушным трактом, чтобы установился нормальный режим топки, то нужно постоянное разрежение в верху топки до ~2 кПа. Для того чтобы обеспечить данный критерий нужно, что бы производительность дымососа была пропорциональна продуктам сгорания перед ним и соответствовала формуле (1.3). Также возмущающими фактора-

ми являются изменение температуры уходящих газов ( $T_{yx}$ ), реальный объём продуктов сгорания и расход топлива ( $V_T$ ).

$$V_{дг} = V_T \cdot (273 + T_{yx})/273, \quad (1.3)$$

$$V_T = V_n \cdot V_p, \quad (1.4)$$

где  $V_n$  - суммарный объём продуктов сгорания 1кг топлива, м<sup>3</sup>;  $V_2$  - действительное количество продуктов сгорания, м<sup>3</sup>;  $V_{дг}$  - объём продуктов сгорания перед дымососом, м<sup>3</sup>;  $T_{yx}$  - температура уходящих газов, °К.

Учитывая вышенаписанное, из-за действия возмущающих факторов появляется задача дросселирования объёма воздуха в топке котла. Датчики, используемые для измерения расхода воздуха это датчики разряжения и давления[4].

Изменение расхода воздуха и разряжение возможно двумя основными методами:

- изменяя характеристики системы подачи воздуха или отводящих газов;
- изменяя характеристики вентилятора или дымососа.

Наиболее целесообразно осуществлять этот процесс в автоматическом режиме.

Требования к Системе Автоматического Регулирования Газовоздушного Тракта Отопительного Котла (далее САР ГВТ ОК):

- точность поддержания заданных значений расхода воздуха и разряжения в топке ОК не более 5%;
- быстродействие САР ГВТ ОК, определяемое как время перехода от одних заданных значений расхода воздуха  $V_v$  и разряжения, не более  $t_{зад}$ , где  $t_{зад}$  - время задержки срабатывания защиты ОК;
- перерегулирование в процессе автоматического управления не более 5%.

Самый популярный метод регулирования расхода это дросселирование. В данном методе регулирование происходит путём изменения сопротивления воздушного канала при помощи направляющих аппаратов (заслонки) [8]. Этот способ обеспечивает быструю отработку возмущающих воздействий. Но минус в том, что этот метод не энергоэффективен, особенно при глубоком регулировании.

А самый экономичный метод это регулирование производительности вентилято-

ров и дымососа путём изменения скорости их вращения электроприводом. [7].

Для разрешения данной проблемы был разработан оригинальный метод регулирования. Этот метод основан на регулировке при помощи заслонок и изменении частоты вращения дымососа и вентилятора [9]. При установившихся режимах и в условиях мало изменяющихся колебаний регулировка происходит благодаря изменению частоты напряжения электродвигателей тягодутьевых механизмов. Одновременно с этим, заслонки открываются и уменьшают тем самым сопротивление газовоздушного тракта, а также уменьшая потребление электричества на дымосос и вентилятор.

Чтобы узнать какой объём воздуха нужно подать, нужно сравнить значения блока задатчика и датчика давления. Дифференциальный сигнал образуется в блоке регулятора, управляющего заслонки. Регулятор управляет частотным преобразователем на основании сигнала от датчика положения заслонки. А преобразователь мягко меняет скорость вращения вентилятора, исходя из данных по углу открытия заслонки. Но при этом не выходя за заданные пределы угла открытия заслонки. На регуляторе ставят значения  $z_1$  и  $z_2$  – минимальный и максимальный уровни раскрытия заслонки, соответственно. Если значение ушло за пределы заданного интервала (от  $z_1$  до  $z_2$ ), то регулятор даёт сигнал преобразователю, преобразователь меняет скорость вращения вентилятора в большую или меньшую сторону. В большую, если угол открытия заслонки больше  $z_2$ , а в меньшую, если угол открытия заслонки меньше  $z_1$ .

Таким образом, можно сделать выводы, что система регулирования обеспечивает демпфирование резких колебаний методом регулировки заслонки, а плавные колебания, такие как изменение температуры, методом регулирования частоты вращения рабочего колеса вентилятора, дымососа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать выводы, что система регулирования обеспечивает демпфирование резких колебаний методом регулировки заслонки, а плавные колеба-

ния, такие как изменение температуры, методом регулирования частоты вращения рабочего колеса вентилятора, дымососа.

Также возможно внедрение этой системы в котельную. Расчётная экономия электричества на дымососах получится примерно 30%, исходя из расчётов (за отопительный период).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасов Д. В.** Требования к частотно-регулируемым электроприводам насосов и вентиляторов при аварийных режимах в системе электроснабжения котельных / Д. В. Тарасов // Электрические станции. 2006. № 1.
2. **Хечуев Ю. Д.** Частотно-регулируемые электроприводы тягодутьевых и насосных механизмов котельных на базе преобразователей частоты АТ корпорации «Триол» / Ю. Д. Хечуев, Б. Е. Калашников, В. И. Ольшевский // Электрические станции. 2006. № 1.
3. **Бузников Е. Ф.** Производственные и отопительные котельные / Е. Ф. Бузников, К. Ф. Родда-тис, Э. Я. Берзиньш. М. : Энергаториздат, 1984.
4. **Озеров М. Ю.** Энергосберегающие технологии в системе отопления / М. Ю. Озеров, А. Г. Тихонов, Р. А. Гареев // Сб. докладов Всероссийск. на-уч.-техн. конф. «Энергосбережение и энергоэффективные технологии-2004». Липецк : ЛГТУ, 2004
5. **Озеров М. Ю.** Автоматическое регулирование системы отопления / М. Ю. Озеров, А. Г. Тихонов, Р. А. Гареев // Ежемесячный научно-практический журнал «Энергетика - наш регион» 2004. № 7-8.
6. **Тверской Ю. А.** Регулирование разряжения в топке котла - современный подход / Ю. А. Тверской // Известия Академии наук. Энергетика. 2003. № 1.
7. **Захаренков А. В.** Применение частотно-регулируемых электроприводов тягодутьевых механизмов и питательного насоса в АСУТП котла ТЭЦ / А. В. Захаренков // Электротехника. 2005. № 8.
8. **Плетнев Г. П.** Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. М. : Энергоиздат, 1981.
9. **Ямаев А. И.** Способ автоматического регулирования разрежения в топке отопительного котла / А. И. Ямаев, М. Ю. Озеров // Патент №2322642 от 05.09.2006.

#### ОБ АВТОРЕ

**ЧУДИНОВ Владислав Валерьевич**, магистрант ФАДЭТ, каф. АТиТ. Дипл. Инженер-технолог по литейному производству (УГАТУ, 2012). Готовит ВКР для окончания магистратуры по специальности «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика».

#### METADATA

**Title:** Method of regulation of gas-air path of the heating boiler.

**Author:** V.V. Chudinov

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

**Email:** vladon-chudinov@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 179-181, 2018. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The system of automatic control of the gas-air path of the heating boiler is analyzed. New ways of regulation of a gas-air path of a heating boiler are offered. A study of the air-gas path of the heating boiler. The system of automatic control ; air-gas tract of heating boiler.

**Key words:** gas-air path, heating boiler, regulation of boiler, automatic control system, GAP, ACS

**About author:**

**CHUDINOV, Vladislav Valerievich.** Undergraduate FAEET, dept of Aviation Heating Engineering and heat power engineering. Engineer-technologist of foundry industry (USATU, 2012).

## ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЗНАНИЙ ПРИ СИНТЕЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Р. И. Шайдуллин<sup>1</sup>, М. Р. Исмагилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>sh-rinat1996@yandex.ru, <sup>2</sup>ismagilova.margo@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассмотрен новый подход к синтезу технологических операций на основе формирования цепочек знаний переходов. Гибкость процесса технологической подготовки достигается выбором наилучшего решения, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации. Предложен метод представления знаний на основе XML-схем, основанный на создании элементов знаний переходов. Элементы знаний включают атрибуты, определяющие их свойства и типы данных. Для повышения эффективности синтеза технологических операций предложено его осуществлять на функциональном языке программирования.

**Ключевые слова:** технологический процесс; элементы знаний; XML-схема; переход; цепочка элементов знаний; функциональный язык.

### ВВЕДЕНИЕ

Все существующие системы по разработки технологических процессов лишь нацелены на автоматизацию получения технологических документов и не вписываются в предлагаемую методологию из-за отсутствия комплексного подхода, позволяющего поднять труд технолога на интеллектуальный уровень. Методология интеллектуальной среды технолога основана на применении гибкого инструмента формирования технологического процесса. При создании такой системы технолог может эффективно принимать решения по доработке любого технологического процесса в машиностроении.

Для решения задачи поставленной задачи наиболее целесообразным является метод синтеза проектных решений. Процесс формирования технологического процесса представляет собой совокупность процедур структурного и параметрического синтеза. Структурный синтез реализуется на уровнях формирования операций и переходов, а па-

раметрический – на уровне выбора базы, определения межпереходных размеров, расчета режимов обработки и т.д. Для формирования технологического процесса роботехнологических комплексов предлагается метод структурного синтеза технологических операций на основе последовательных цепочек знаний переходов, формируемых, в свою очередь, на основе навыков и опыт технологов и операторов, участвующих в различные технологические процессы изготовления изделий и представленных в виде элементов знаний.

### СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Синтез технологических операций по обработке и сборке изделия – это последовательность методов обработки, необходимых для достижения требуемых значений атрибутов, определенных чертежом изделия. Такими атрибутами являются:

- геометрический тип поверхности;
- точность размера;
- шероховатость и т.д.

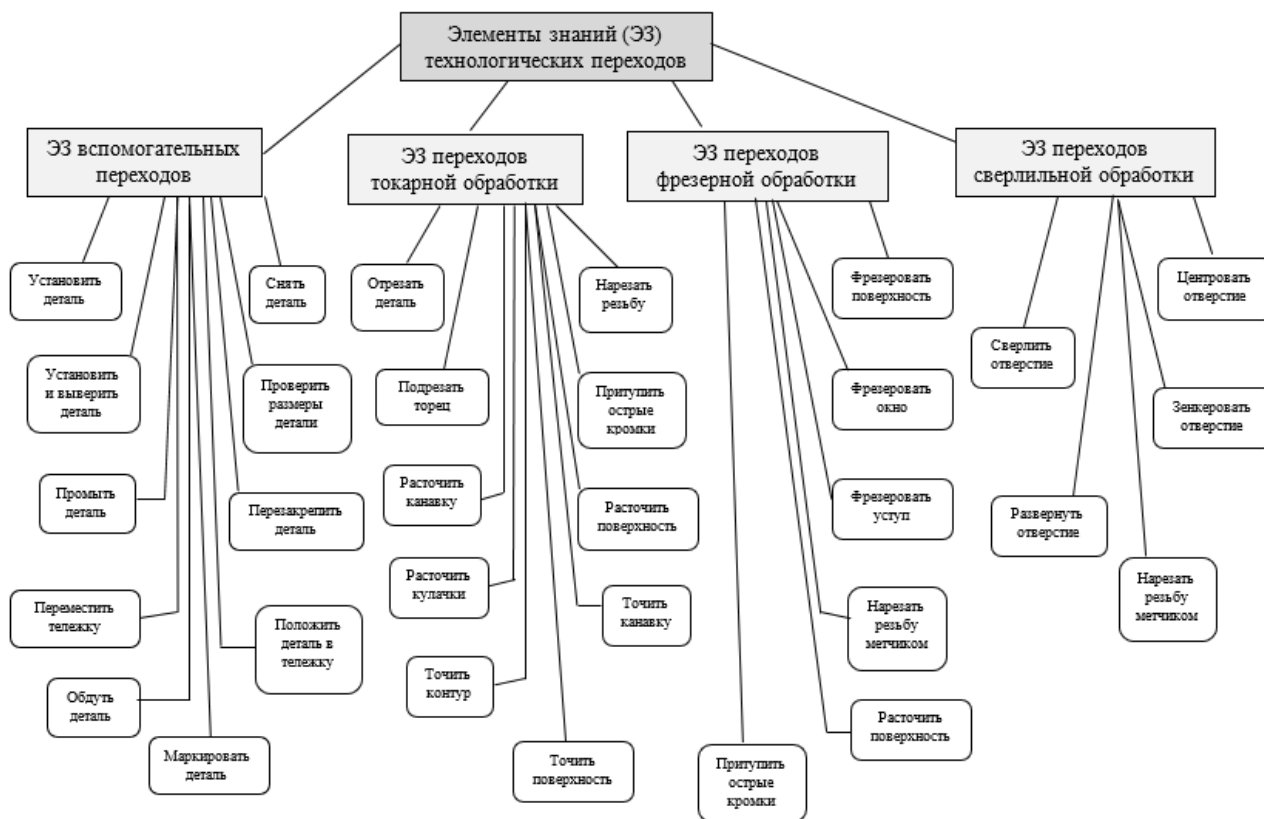


Рис. 1. Классификация элементов знаний технологических переходов механообработки

Предлагаемый метод синтеза предусматривает формирование различных цепочек исполняемых переходов на основе элементов знаний и в соответствии с условиями технологического процесса. Для технологической операции, не говоря уже о технологическом процессе в целом, характерна многовариантность, которая предполагает выбор наилучшего решения, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации. В итоге необходима гибкость технологической подготовки, достигаемая методом синтеза технологических операций в виде цепочки исполняемых переходов, которые предлагается представлять в виде элементов знаний [1].

Для решения данной задачи предложен новый метод представления знаний на основе XML-схем [2]. Предложено разбивать знания на элементы (обозначив их символом E) с дальнейшим гибким формированием цепочек знаний. Таким образом предлагается использовать язык XSD для описания E, а данные описывать в XML формате. Для формирования базы знаний в области тех-

нологической подготовке производства были созданы E объектов и E технологических переходов. Описание элементов знаний предлагается производить на языке XSD, так как они содержат метаданные и с их помощью можно создавать базу знаний. На рис. 1 приведена классификация элементов знаний, необходимых для построения операций механообработки и сами элементы (E), созданные в программной системе Liquid XML Studio. Надо иметь в виду, что некоторые элементы повторяются в разных видах обработки.

Знания о технологических переходах принято разделять на рабочие и вспомогательные.

Рабочие переходы имеют такие атрибуты как номер перехода, скорость главного движения, величина подачи, время перехода, вид обрабатываемой поверхности. При описании перехода необходимо указывать обрабатываемые поверхности, материал детали и способ выполнения перехода, пример представленный в виде XML - схемы показан на рис. 2.

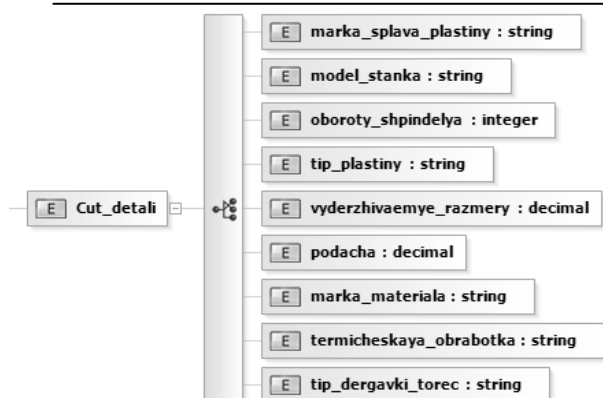


Рис. 2. Рабочий переход в виде XML-схемы

Вспомогательные переходы определяют установку и снятие детали, выверку и закрепление детали, переустановку детали. При использовании в технологическом процессе роботехнологических комплексов создаются ЭЗ на перемещение детали в зону захвата роботом, манипулирование детали роботом в рабочую зону технологического оборудования и манипулирование детали роботом после ее обработки в накопитель, пример схемы на рис. 3.

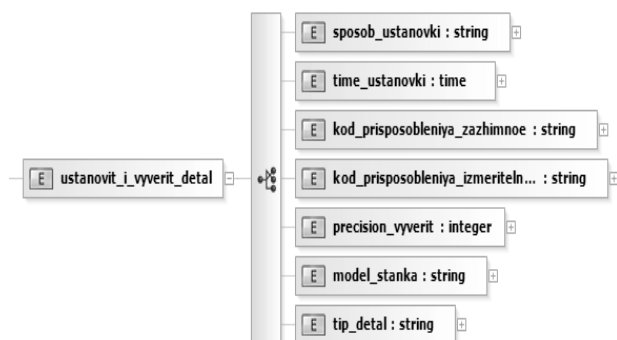


Рис. 3. Вспомогательный переход в виде XML-схемы

Элемент знания (E) описывает действие, выполняемое конкретным переходом и включают в себя описание основных данных и свойств для конкретного вида обработки. В результате для механообработки была создана классификация E технологических переходов. На рис. 4 приведен пример описания E, рабочего перехода «Обработка контура», на рис. 5 вспомогательный переход «Установить и выверить деталь».

Условие синтеза исполняемых переходов в виде E осуществляется не только за счет влияния атрибутов чертежа изделия и визуализации 3D - модели, но и таких атрибутов, как:

- максимальная величина припуска, определяющая тип перехода (черновой, полуступовой или чистой);
- марка обрабатываемого материала;
- марка материала инструмента;
- класс точности станка;
- необходимое применение количества одновременно управляемых координат движения инструмента.

В дальнейшем элементы знаний (E) импортируются из формата XSD в Java-классы, работа с которыми осуществляется с помощью функционального программирования[3]. Технологический процесс, как правило, включает в себя функции, связанные сложными алгоритмами, включая циклы и численные вычисления. Функциональные программы строятся из логически расчлененных определений функций и состоят из вызовов основных функций, для реализации которых используются базовые и библиотечные функции, а также функции пользователя и описывают то, что нужно делать и что собой представляет результат решения. Таким образом было предложено осуществлять синтез операций из элементарных функций. Созданные функции ( $F_i$ ) и цепочки исполняемых переходов из этих функций помещаются в базу знаний. В дальнейшем их можно использовать при разработке и моделировании технологических процессов.

Разработка операционной технологии в соответствии с требованиями текущей ситуации выполняется поэтапно.

1. Синтез очередного варианта операции.
2. Анализ варианта
3. Принятие решения о замене ранее выбранного варианта на новый вариант или о прекращении синтеза новых вариантов.

Использование данного подхода позволяет создавать возможные варианты типовых функций обработки деталей. Например, типовых функций обработки тела вращения:

$$F_{\text{твр}}^1 \langle \text{точение черновое} \rangle \Rightarrow (F_{\text{устан}}) ((F_{\text{торец}}) (F_{\text{поверхности}}) (F_{\text{сверление}})) (F_{\text{снятие детали}});$$

$$F_{\text{тчс}}^1 \langle \text{точение чистовое} \rangle \Rightarrow (F_{\text{устан\_выверка}}) ((F_{\text{торец}}) (F_{\text{контур}}) (F_{\text{канавки}}) (F_{\text{резьба}}) (F_{\text{зенкерование}}) (F_{\text{расточка отв.}})) (F_{\text{снятие детали}}).$$



```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<!--Created with Liquid XML Studio Developer Edition 9.0.11.3078 (http://www.liquid-technologies.com)-->
<xs:schema elementFormDefault="qualified" xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="Cut_detali">
    <xs:complexType>
      <xs:all>
        <xs:element name="marka_splava_plastiny">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="model_stanka">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="oboroty_shpindelya">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:integer" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="tip_plastiny">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="vyderzhivaemye_razmery">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:decimal" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="podacha">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:decimal" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="marka_materiala">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="termicheskaya_obrabotka">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="tip_dergavki_torec">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string" />
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
      </xs:all>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
</xs:schema>

```

Рис. 4. Рабочий переход в XML-формате

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<!--Created with Liquid XML Studio Developer Edition 9.0.11.3078 (http://www.liquid-technologies.com)-->
<xs:schema elementFormDefault="qualified" xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="ustanovit_i_vyverit_detal">
    <xs:complexType>
      <xs:all>
        <xs:element name="sposob_ustanovki">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string">
                <xs:anyAttribute />
              </xs:extension>
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="time_ustanovki">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:time">
                <xs:anyAttribute />
              </xs:extension>
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="kod_prisposobleniya_zazhimnoe">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string">
                <xs:anyAttribute />
              </xs:extension>
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="kod_prisposobleniya_izmeritelnogo">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string">
                <xs:anyAttribute />
              </xs:extension>
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="precision_vyverit">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:integer">
                <xs:anyAttribute />
              </xs:extension>
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="model_stanka">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string">
                <xs:anyAttribute />
              </xs:extension>
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="tip_detal">
          <xs:complexType>
            <xs:simpleContent>
              <xs:extension base="xs:string">
                <xs:anyAttribute />
              </xs:extension>
            </xs:simpleContent>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
      </xs:all>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
</xs:schema>
```

Рис. 5. Вспомогательный переход в XML-формате

```
(ns main.clojure.operations.oper003
  (:require [main.clojure.core.element :as e] )

;цепочка из элементов знаний
(def oper_003 [e/ustanovit_detal           ;установить деталь
              e/podrezat_torec           ;подрезать торец
              e/tochit_vnutrennij_diametr ;расточить отверстие
              e/tochit_kontur            ;точить контур
              e/tochit_kanavka          ;точить канавку 1
              e/tochit_kanavka          ;точить канавку 2
              e/pritupit_ostrye_kromki  ;притупить острые кромки
              e/proverit_razmery_detali  ;проверить размеры детали
              e/snyat_detal              ;снять деталь
              e/markirovat_detal])       ;маркировать деталь

(seq oper_003)                          ;вызов цепочки
```

а

```
(ns main.clojure.operations.oper004
  (:require [main.clojure.core.element :as e])) ;использование функций с файла где расписаны наши элементы

;цепочка из элементов знаний
(def oper_004 [e/ustanovit_detal
              e/sverlit_otverstie        ;сверлить отверстие-1
              e/zenkerovat_otverstie     ;зенкеровать отверстие-1
              e/razvernute_otverstie     ;развернуть отверстие
              e/sverlit_otverstie        ;сверлить отверстие-2
              e/zenkerovat_otverstie     ;зенкеровать отверстие-2
              e/pritupit_ostrye_kromki  ;притупить острые кромки
              e/proverit_razmery_detali  ;проверить размеры детали
              e/snyat_detal              ;снять деталь
              e/markirovat_detal])       ;маркировать деталь

(seq oper_004)                          ;вызов цепочки
```

б

**Рис. 6.** Примеры операций, реализованных в функциональном языке программирования:  
а – операция обработки контура; б – операция обработки отверстия

На рис. 6 и рис. 7 приведены примеры синтезируемых операций из элементарных функций, описывающие элементы знаний.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод представления знаний на основе XML схем и разделение знаний на элементы с дальнейшим гибким формированием цепочек знаний. Элементы знаний описывают объекты и выполняемые переходы в технологическом процессе. Этот метод представления знаний удобен для практического применения человеком и позволяет легко конвертировать знания в функциональное представление для дальнейшего построения технологического процесса и его компонентов.

Для поиска наилучшего решения в построении технологического процесса, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации, предложен метод структурного синтеза технологических опе-

раций на основе последовательных цепочек знаний переходов. Предлагаемый подход к структурному синтезу операций позволяет сократить время на разработку технологического процесса и управляющей программы для оборудования с числовым программным управлением.

Повышение эффективности синтеза технологических операций можно добиться за счет использования типовых цепочек переходов на функциональном языке. С этой целью необходимо создавать множество вариантов типовых функций обработки тела вращения. Метод синтеза операций основан на вызове необходимых цепочек знаний и формирования программы реализации всех создаваемых операций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Интеллектуальное** управление процессами технологической подготовки машиностроительного производства / Лютов А. Г. [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». –

2017. – Т.17, № 3. – С. 117-124. [ A. G. Lutov, et al., "Intellectual Control of Processes of Technological Preparation of Machine-Building Production", (in Russian) *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 117-124. ]

2. **Хабидуллин И.Ш.** Самоучитель XML. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 336 с.: ил. [ I. Sh. Khabibullin, *The XML Self-Tutorial*. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2003. ]

3. **Хювёнен Э., Сеппянен Й.** Мир Лиспа. Том 1 и 2. Пер. с англ. – М: Мир, 1990. [ E. Huvönen ja J., Seppänen, *Lisp-world* vol. 1 & 2 (in Russian). Trans. with English. - M: Mir, 1990. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ШАЙДУЛЛИН Ринат Ильгизович**, студент кафедры автоматизации технологических процессов, Уфимский государственный авиационный технический университет.

**ИСМАГИЛОВА Маргарита Расулевна**, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов, Уфимский государственный авиационный технический университет.

#### METADATA

**Title:** Possible application elements of knowledge in synthesis of technological operations.

**Authors:** R. I. Shaydullin<sup>1</sup>, M. R. Ismagilova<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>sh-rinat1996@yandex.ru,

<sup>2</sup>ismagilova.margo@gmail.com,

**Language:** Russian.

**Source:** *Molodezhnyj Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (18), pp. 182-188, 2018. **ISSN 2225-9309 (Print)**.

**Abstract:**

A new approach to the synthesis of technological operations based on the formation chains of knowledge has examined. The flexibility of the process of technological preparation is achieved by choosing the best solution that meets the requirements of the current production situation. A method for representing knowledge based on XML schemas is proposed, which is based on the creation of knowledge elements of transitions. The elements of knowledge include attributes that define their properties and data types. To improve the efficiency of synthesis of technological operations, it is proposed to implement it in a functional programming language

**Key words:** technological process; elements of knowledge; XML-schema transition; a chain of knowledge elements; functional language.

**About authors:**

**SHAYDULLIN, Rinat Ilgizovich**, student of the department of automation of technological processes, Ufa State Aviation Technical University.

**ISMAGILOVA, Margarita Rasulevna**, graduate student of the department of automation of technological processes, Ufa State Aviation Technical University.