

# Двигатель

Научно-технический журнал № 4-6 (148-150 + 244) 2023

В номере:

Двигатель-генератор со свободными поршнем и цилиндром (стр. 6).

ДВС с разнесённым рабочим циклом (стр. 10).

Топливо для ЖРД (стр. 16), для АЭС (стр. 40), для ДВС (стр. 60).

Зарубежные ТВД (стр. 26).

Обрабатывать быстро и качественно долговечным инструментом (стр. 29).

Арифметика для ИИ (стр. 32).

Антропогенная МЕХАНИКА - многомерный мир Знаний (стр. 48).



ISSN 0250-0985



23006 >

9 772500 098009 >



## Редакционный совет

- Агульник А.Б., д.т.н.,**  
заведующий кафедрой "Теория воздушно-реактивных двигателей" МАИ
- Багдасарьян Н.Г., д.филос.н.,**  
профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана
- Богуслаев В.А., д.т.н.,**  
президент ПАО "МОТОР СИЧ"
- Воронков Ю.С., к.т.н.,**  
зав. кафедрой История науки РГГУ
- Дмитриев В.Г., член-корр. РАН,**  
член секции проблем машиностроения и процессов управления
- Драгунов В.К., д.т.н.,**  
проректор по научной работе НИУ "МЭИ"
- Жердев А.А., д.т.н.,**  
декан факультета "Энергомашиностроение",  
руководитель Научно-учебного комплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана
- Зрелов В.А., д.т.н.,**  
профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей ЛА СГАУ им. С.П. Королёва
- Иноземцев А.А., академик РАН,**  
управляющий директор—генеральный конструктор АО «ОДК-Авиадвигатель»
- Каторгин Б.И., академик РАН**  
член отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления
- Кравченко И.Ф., д.т.н.,**  
руководитель, генеральный конструктор ГП "Ивченко-Прогресс"
- Кутенев В.Ф., д.т.н.,**  
председатель Экспертного совета ГНЦ РФ ФГУП "НАМИ"
- Ланшин А.И., д.т.н.,**  
советник генерального директора по науке ГНЦ ФАУ "ЦИАМ им. П.И. Баранова"
- Марчуков Е.Ю., член-корр РАН,**  
генеральный конструктор - директор ОКБ им. А. Льюлька
- Равикович Ю.А., д.т.н.,**  
проректор по научной работе МАИ
- Рачук В.С., д.т.н.,**  
советник генерального директора госкорпорации "Роскосмос"
- Рогалёв Н.Д., д.т.н.,**  
ректор НИУ "МЭИ"
- Ружьев В.Ю.,**  
первый зам. ген. директора ФАУ "Российское классификационное общество"
- Рыжов В.А., д.т.н.,**  
руководитель направления по развитию двигателестроения АО "Коломенский завод"
- Ситнов А.П.,**  
президент, председатель совета директоров ЗАО "Двигатели "ВК-МС"
- Смирнов И.А., к.т.н.,**  
ген. конструктор КБХМ - филиала ФГУП "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева"
- Соколов В.П., д.т.н.,**  
директор Российского учебно-научно-инновационного комплекса авиакосмической промышленности
- Сперанский А.А., DExpert ISCED,**  
президент ИААБ, академик РИА и ИАА
- Фаворский О.Н., академик РАН,**  
член президиума РАН
- Чуйко В.М., д.т.н.,**  
президент Ассоциации "Союз авиационного двигателестроения"

## РЕДАКЦИЯ

### Главный редактор

Александр Иванович Бажанов,  
академик Международной инженерной академии

### Заместитель главного редактора

Инна Игоревна Тизенгауз

### Ответственный секретарь

Александр Николаевич Медведь, к.т.н.

### Финансовый директор

Инна Игоревна Тизенгауз

### Редакторы:

Андрей Иванович Касьян, к.т.н.

Аделия Юрьевна Бузова

Юрий Романович Сергей, к.т.н.

### Литературный редактор

Иван Петрович Сидоров

### Художественные редакторы:

Александр Николаевич Медведь

Владимир Николаевич Романов

### Техническая поддержка

Федор Михайлович Ларичев

### Фотографии, эскизы и рисунки

#### предоставили:

А.И. Бажанов, А.Н. Медведь,

В.Н. Романов и др.

### Адрес редакции журнала "Двигатель":

111250, Россия, Москва,

ул. Красноказарменная, 14.

Тел./факс: +7(495) 362-7891

aib50@yandex.ru

www.dvigately.ru

Электронная версия журнала (2006-2023 гг.) размещается также на сайте Научной электронной библиотеки [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru) и включена в индекс РИНЦ

## УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

ООО "Редакция журнала "Двигатели"®.

Генеральный директор И.И. Тизенгауз

Заместитель ген. директора А.И. Бажанов

Ответственность за достоверность информации и наличие в материалах фактов, не подлежащих разглашению в открытой печати, лежит на авторах публикаций.

*Мнение редакции не всегда*

*совпадает с мнением авторов.*

Перепечатка опубликованных материалов без письменного согласия редакции не допускается. Ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

Журнал "Двигатель" рекомендован экспертным советом ВАК по технической науке:

2.5.15 - тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, в числе журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Индекс 1833 в общероссийском Перечне 2023 г.

Научно-технический журнал "Двигатель"®

зарегистрирован в ГК РФ по печати.

Per. № 018414 от 11.01.1999 г.

25-й (117-й) год издания.

Отпечатано

ООО "Эксперт" Москва.

Тираж 500 экз.

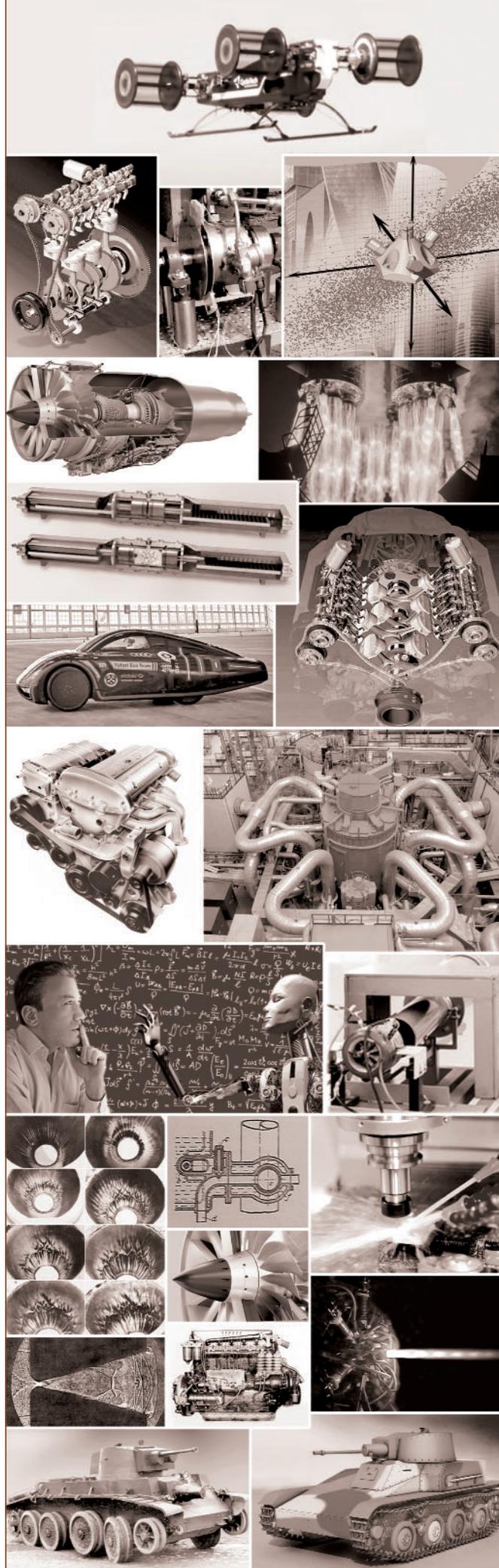
Периодичность: 6 номеров в год.

Цена свободная.



# СОДЕРЖАНИЕ

- 2 Анализ влияния степени реактивности турбины высокого давления двухконтурного ТРД с форсажной камерой и смешением для лёгкого боевого самолёта классом тяги 110 кН на её параметры**  
С.А. Загородников, А.В. Самойлов, М.В. Силуянова,
- 6 Электрический генератор внутреннего сгорания**  
В.М. Шмелев, А.А. Захаров, В.С. Арутюнов
- 10 Новый способ работы ДВС с разделенным рабочим циклом**  
Ю.И. Духанин
- 16 Механика сплошных сред. Свойства рабочих тел. Керосины**  
А.И. Бажанов, Н.Ю. Кочетков, А.А. Сперанский
- 20 Механика сплошных сред. Термодинамика вязко-упругих свойств и сажеобразования**  
А.И. Бажанов, Н.Ю. Кочетков, А.А. Сперанский
- 22 Турбулентность. Экспериментальные методы исследования**  
Ю.М. Кочетков, Н.Ю. Кочетков
- 26 Зарубежные авиационные турбовентиляторные двигатели для сверхзвуковых самолетов**  
В.А. Зрелов
- 29 Повышение производительности и качества формообразования поверхностей деталей путём совершенствования технологии механической обработки режущим инструментом с одновременным ростом его долговечности**  
Ю.В. Комаров
- 32 Бесконечные числа. Искусственный интеллект изучает Арифметику**  
А.И. Касьян
- 36 Физика бесконечного существования материальной Вселенной**  
Д.Н. Воронков
- 40 Уран, торий, термояд**  
А.И. Касьян, А.И. Медведь
- 47 Копилка для энергии**  
А. Идин
- 48 Антропогенная механика - многомерный мир естественнонаучных Знаний**  
А. Сперанский, Ф. Шоучжун, А. Рогов
- 60 Применение нафталина в автомобильных двигателях**  
Репринт статьи из журнала "Двигатель" №12 1914 года
- 62 Танки - от и до**  
О.Н. Брилёв
- Информация - стр. 9, 19, 39**



# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ РЕАКТИВНОСТИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДВУХКОНТУРНОГО ТРД С ФОРСАЖНОЙ КАМЕРОЙ И СМЕШЕНИЕМ ДЛЯ ЛЁГКОГО БОЕВОГО САМОЛЁТА КЛАССОМ ТЯГИ 110 кН НА ЕЁ ПАРАМЕТРЫ

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет):

**Сергей Анатольевич Загородников**, аспирант

**Андрей Васильевич Самойлов**, аспирант

**Марина Владимировна Силуянова**, д.т.н.,

профессор кафедры "Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов"

*Данная статья посвящена вопросам влияния степени реактивности турбины высокого давления на параметры турбореактивного двухконтурного двигателя класса тяги 110 кН и  $T_g^* = 1750$  К. Целью настоящей работы является практический анализ влияния степени реактивности на распределении скорости газового потока в ступени для оптимизации получаемой энергии газового потока. В статье использована геометрия лопаток смоделированного авторами рабочего колеса турбины высокого давления (ТВД) [1]. Авторами было проведено сравнение ТВД при высокой  $\rho = 0,462$  и низкой  $\rho = 0,25$  степенях реактивности. Для этого выполняется профилирование ступени для обоих значений степени реактивности, рассчитываются характеристики обеих турбин и их параметры на различных частотах вращения, в том числе и суммарные потери в венцах [1, 2]. Исследование показало, что применение высокой степени реактивности в процессе расчета ТВД и профилирования ступеней приводит к уменьшению потерь в рабочем колесе ступени, меньшие профильные потери, большая геометрическая конфузурность, но при более высокой температуре в относительном движении за рабочим колесом (РК).*

*This article focuses on the impact of high-pressure turbine reactivity on the parameters of a 110 kN thrust class twin-circuit turbojet engine, with  $T_g^* = 1750$  K. The objective of this study is to conduct a practical analysis of how the reactivity degree affects the gas flow velocity distribution in a stage, with the aim of optimizing the resulting gas flow energy. The authors of this article utilized a modeled impeller of a high-pressure turbine (injection pump), employing blade geometry [1]. A comparison was conducted between the total variation diminishing (TVD) at two different reactivity degrees: high ( $\rho = 0.462$ ) and low ( $\rho = 0.25$ ). To achieve this, the stage was profiled for both reactivity values, and the characteristics and parameters of the turbines were calculated at various rotational speeds, including the total losses within the crowns [1,2]. The study revealed that utilizing a high reactivity degree during the calculation and profiling of the stages resulted in reduced losses in the stage's impeller, lower profile losses, enhanced geometric diffusion. However, concurrently, it led to higher temperatures in the relative movement behind the impeller (RC).*

**Ключевые слова:** теплопередача, турбина высокого давления, рабочее колесо, газодинамика, степень реактивности, конфузурность.

**Keywords:** heat transfer, high pressure turbine, impeller, gas dynamics, degree of reactivity, embarrasment.

## Введение

В современных авиационных двигателях, в том числе, в двигателях для маневренной авиации, предъявляются высокие требования к ТВД. Помимо мощности и степени понижения давления, современные ТВД, будучи охлаждаемыми, должны обеспечить приемлемые первичный коэффициент полезного действия (КПД) и суммарные потери в рабочем колесе турбины. Также необходимо, чтобы ТВД имела хорошую геометрическую конфузурность в канале между лопатками [2, 3].

Для достижения этих свойств и показателей ТВД должна иметь большое значение степени реактивности ( $\rho = 0,4...0,5$ ) [4].

Условие проведения анализа:

- значение степени реактивности: высокая  $\rho = 0,462$ , низкая  $\rho = 0,25$  [4];

- число лопаток соплового аппарата (СА) ступени  $z_{СА} = 39$ , рабочего колеса -  $z_{РК} = 64$ .

## Методы проведения исследования

Расчёт ТВД выполнен по методике, изложенной в [1]. Данная методика характерна для охлаждаемых турбин. Особенности данной методики являются:

- газ в турбине расширяется от температуры в горле СА;

- для каждого венца полная температура считается с учётом подмешивания охлаждающего воздуха и его скорости;

- после расчёта всех параметров ступени турбины определяются её мощность, первичный и эффективный КПД.

После получения основных параметров ТВД по средней линии тока выполняется профилирование лопаток ТВД с высокой и низкой степенью реактивности по методике [1, 5].

Построение зависимостей: изменения первичного КПД  $\eta_{п.т.}^*$ , суммарных потерь в РК  $\zeta_{\Sigma РК}$ , степени реактивности  $\rho$  и полной температуры в относительном движении исследуется на входе в РК от параметра нагруженности ТВД  $Y = u/c_{од}$  по [8].

## Основные результаты

Результаты профилирования лопаток ТВД с высокой степенью реактивности по высоте представлены в таблицах 1, 2 и 3 [5].

Таблица 1

Результаты профилирования лопаток ТВД на среднем радиусе

№	Параметр	Средний диаметр	
		СА	РК
1	Осевая протяжённость лопаток, мм	$b_{ал} = 27$	$b_{ал} = 27$
2	Шаг, мм	$t_c = 44$	$t_{рк} = 27$
3	Хорда, мм	$b_c = 47$	$b_n = 33$
4	Газовые углы	$\alpha_0 = 90^\circ$	$\beta_1 = 60^\circ$
		$\alpha_1 = 17^\circ$	$\beta_2 = 25^\circ$
5	Горло, мм	$a_{с.ср} = 12,6$	$a_{рк.ср} = 11,4$
6	Радиус входной кромки, мм	$r_{1са} = 4,2$	$r_{1рк} = 2,5$
7	Толщина выходной кромки, мм	$s_{2с} = 1,2$	$s_{2л} = 1,2$
8	Угол установки профиля	$\gamma_c = 39^\circ$	$\gamma_d = 55^\circ$
9	Максимальная толщина профиля, мм	$C_c = 11,8$	$C_n = 6,7$

Таблица 2

Результаты профилирования лопаток ТВД на втулочном радиусе

№	Параметр	Втулочный диаметр	
		СА	РК
1	Осевая протяжённость лопаток, мм	$b_{ас} = 31$	$b_{ал} = 28,5$
2	Шаг, мм	$t_c = 40$	$t_{рк} = 24$
3	Хорда, мм	$b_c = 47$	$b_n = 33$
4	Радиус входной кромки, мм	$r_{1са} = 4,2$	$r_{1рк} = 2,5$
		$s_{2с} = 1,2$	$s_{2л} = 1,2$
5	Толщина выходной кромки, мм	$s_{2с} = 1,2$	$s_{2л} = 1,2$
6	Угол установки профиля	$\gamma_c = 39^\circ$	$\gamma_d = 59^\circ$
7	Максимальная толщина профиля, мм	$C_c = 11,8$	$C_n = 8$

Таблица 3

Результаты профилирования лопаток ТВД на периферийном радиусе

№	Параметр	Периферийный диаметр	
		СА	РК
1	Осевая протяжённость лопаток, мм	$b_{oc} = 31$	$b_{ол} = 25$
2	Шаг, мм	$t_c = 48$	$t_{рк} = 29$
3	Хорда, мм	$b_c = 47$	$b_n = 33$
4	Газовые углы	$\alpha_0 = 90^\circ$	$\beta_1 = 60^\circ$
		$\alpha_1 = 16^\circ$	$\beta_2 = 24^\circ$
5	Горло, мм	$a_{с.ср} = 13,2$	$a_{рк.ср} = 11,8$
6	Радиус входной кромки, мм	$r_{1са} = 4,2$	$r_{1рк} = 2,7$
7	Толщина выходной кромки, мм	$s_{2с} = 1,2$	$s_{2л} = 1,2$
8	Угол установки профиля	$\gamma_c = 39^\circ$	$\gamma_d = 48^\circ$
9	Максимальная толщина профиля, мм	$C_c = 11,8$	$C_n = 5,6$

Скорости потока в абсолютном и относительном движении для построения треугольников скоростей для каждого сечения приведены в таблице 4 [5, 6].

Таблица 4

Скорости потока в абсолютном и относительном движении

Сечение	Абсолютное движение		Относительное движение	
	$c_1, \text{ м/с}$	$c_2, \text{ м/с}$	$w_1, \text{ м/с}$	$w_2, \text{ м/с}$
Среднее	599,9	323,5	198,7	686,2
Корневое	644,5	350,1	273	671,7
Периферийное	565,8	313,8	156,8	706,9

Результаты профилирования лопаток ТВД с низкой степенью реактивности по высоте представлены в таблицах 5, 6 и 7 [5, 6, 8].

Таблица 5

Результаты профилирования лопаток ТВД на среднем радиусе

№	Параметр	Средний диаметр	
		СА	РК
1	Осевая протяжённость лопаток, мм	$b_{oc} = 31$	$b_{ол} = 32,3$
2	Шаг, мм	$t_c = 43$	$t_{рк} = 26$
3	Хорда, мм	$b_c = 47$	$b_n = 33$
4	Газовые углы	$\alpha_0 = 90^\circ$	$\beta_1 = 41^\circ$
		$\alpha_1 = 17^\circ$	$\beta_2 = 33^\circ$
5	Горло, мм	$a_{с.ср} = 12,6$	$a_{рк.ср} = 14,1$
6	Радиус входной кромки, мм	$r_{1са} = 4,2$	$r_{1рк} = 2,7$
7	Толщина выходной кромки, мм	$s_{2с} = 1,2$	$s_{2л} = 1,2$
8	Угол установки профиля	$\gamma_c = 39^\circ$	$\gamma_d = 78^\circ$

Таблица 6

Результаты профилирования лопаток ТВД на втулочном радиусе

№	Параметр	Втулочный диаметр	
		СА	РК
1	Осевая протяжённость лопаток, мм	$b_{oc} = 31$	$b_{ол} = 32,7$
2	Шаг, мм	$t_c = 39$	$t_{рк} = 24$
3	Хорда, мм	$b_c = 47$	$b_n = 33$
4	Газовые углы	$\alpha_0 = 90^\circ$	$\beta_1 = 36^\circ$
		$\alpha_1 = 18^\circ$	$\beta_2 = 36^\circ$
5	Горло, мм	$a_{с.ср} = 12$	$a_{рк.ср} = 35,3$
6	Радиус входной кромки, мм	$r_{1са} = 4,2$	$r_{1рк} = 2,7$
7	Толщина выходной кромки, мм	$s_{2с} = 1,2$	$s_{2л} = 1,2$
8	Угол установки профиля	$\gamma_c = 39^\circ$	$\gamma_d = 82^\circ$
9	Максимальная толщина профиля, мм	$C_c = 11,8$	$C_n = 8$

Таблица 7

Результаты профилирования лопаток ТВД на периферийном радиусе

№	Параметр	Периферийный диаметр	
		СА	РК
1	Осевая протяжённость лопаток, мм	$b_{oc} = 31$	$b_{ол} = 31,8$
2	Шаг, мм	$t_c = 47$	$t_{рк} = 29$
3	Хорда, мм	$b_c = 47$	$b_n = 33$
4	Газовые углы	$\alpha_0 = 90^\circ$	$\beta_1 = 48^\circ$
		$\alpha_1 = 16^\circ$	$\beta_2 = 32^\circ$
5	Горло, мм	$a_{с.ср} = 13$	$a_{рк.ср} = 15,4$
6	Радиус входной кромки, мм	$r_{1са} = 4,2$	$r_{1рк} = 2,7$
7	Толщина выходной кромки, мм	$s_{2с} = 1,2$	$s_{2л} = 1,2$
8	Угол установки профиля	$\gamma_c = 39^\circ$	$\gamma_d = 75^\circ$
9	Максимальная толщина профиля, мм	$C_c = 11,8$	$C_n = 5,6$

Скорости потока в абсолютном и относительном движении для построения треугольников скоростей для каждого сечения приведены в таблице 8 [5, 6].

Таблица 8

Скорости потока в абсолютном и относительном движении

Сечение	Абсолютное движение		Относительное движение	
	$c_1, \text{ м/с}$	$c_2, \text{ м/с}$	$w_1, \text{ м/с}$	$w_2, \text{ м/с}$
Среднее	754,4	282,5	339,5	519,2
Корневое	814,5	292,2	436,3	500,1
Периферийное	708,4	291,3	262,8	550,1

Авторы представляют результаты профилирования сопловых и рабочих лопаток в соответствии с таблицами 1-3, 5-7.



Рис. 1 Сопловой аппарат ТВД с высокой степенью реактивности

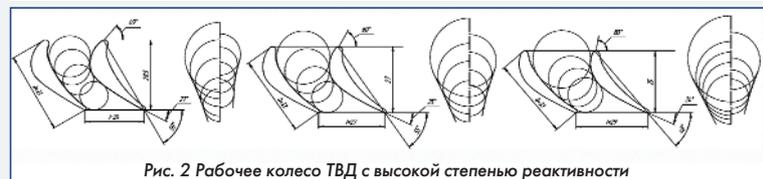


Рис. 2 Рабочее колесо ТВД с высокой степенью реактивности

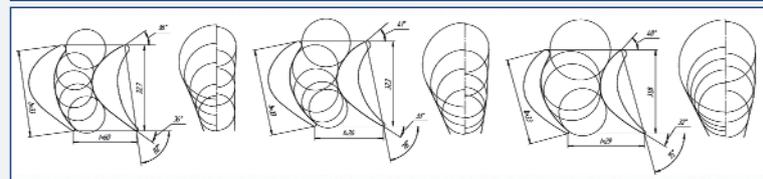


Рис. 3 Сопловой аппарат ТВД с низкой степенью реактивности

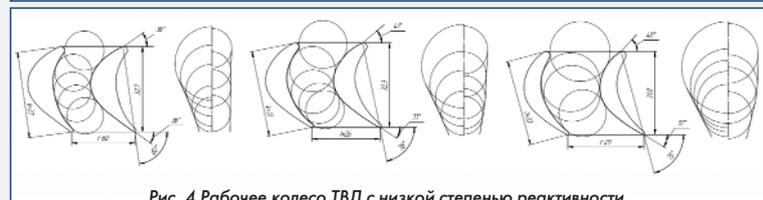


Рис. 4 Рабочее колесо ТВД с низкой степенью реактивности

Характеристики ТВД также были рассчитаны и смоделированы с помощью ЛОГОС [5, 7, 8]: 14 000, 14 500, 15 000, 15 500, 16 000, 16 500, 17 000, 17 500, 18 000 и 18 500 об/мин. Авторы указывают, что частота вращения  $n = 16 500$  об/мин является расчётным режимом для проектируемой ТВД в составе двигателя [1]. В качестве рассчитанных характеристик приведены зависимости: изменение первичного КПД  $\eta_{п.т.}^*$ , суммарных потерь в РК  $\zeta_{срк}$ , степени реактивности  $\rho$  и полной температуры в относительном движении на входе в РК от параметра нагруженности ТВД  $Y = u/c_{од}$  [8].

Первичный КПД охлаждаемой ТВД определен по ГОСТ 23851-79<sup>1</sup>:

$$\eta_{т.п.}^* = \frac{N_T}{G_r + H_{r1}^* + G_{в1} + H_{в1}^*}, \quad (1)$$

где  $N_T$  - мощность ТВД;  $G_r$  - расход газа на входе в ТВД;  $H_{r1}^*$  - адиабатический теплоперепад по полному давлению газа;  $G_{в1}$  - расход охлаждающего воздуха до горла ТВД;  $H_{в1}^*$  - изоэнтропический теплоперепад по охлаждающему воздуху для горла СА по полным давлениям.

Изменение первичного КПД от параметра  $Y$  для ТВД с высокой степенью реактивности показано в таблице 9 [5, 6, 7] и на рис. 5.

Таблица 9

Зависимость первичного КПД высокореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

$n_{вр}$ , об/мин	$Y = u/c_{ад}$	$\eta_{т.п.}^*$
14 000	0,406	0,871
14 500	0,42	0,885
15 000	0,435	0,893
15 500	0,449	0,902
16 000	0,464	0,906
16 500	0,48	0,911
17 000	0,493	0,915
17 500	0,507	0,917
18 000	0,522	0,918
18 500	0,536	0,919

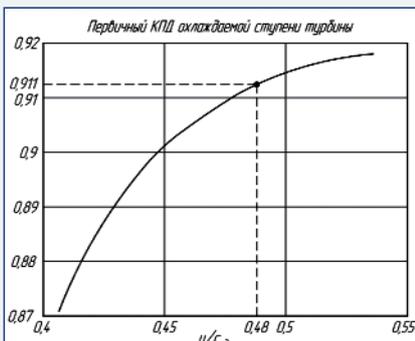


Рис. 5 Зависимость первичного КПД высокореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

Изменение первичного КПД от параметра  $Y$  для ТВД с низкой степенью реактивности показано в таблице 10 [5, 6, 7] и на рис. 6.

Таблица 10

Зависимость первичного КПД низкореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

$n_{вр}$ , об/мин	$Y = u/c_{ад}$	$\eta_{т.п.}^*$
14 000	0,401	0,822
14 500	0,415	0,83
15 000	0,43	0,838
15 500	0,444	0,847
16 000	0,458	0,851
16 500	0,473	0,856
17 000	0,487	0,861
17 500	0,501	0,862
18 000	0,515	0,864
18 500	0,53	0,87

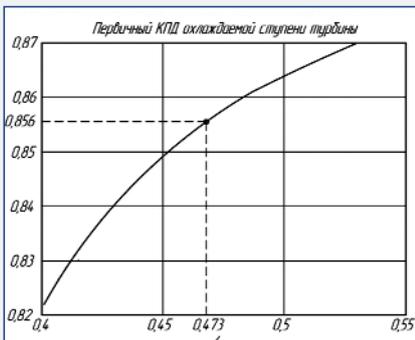


Рис. 6 Зависимость первичного КПД низкореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

Изменение степени реактивности от параметра  $Y$  для ТВД с высокой степенью реактивности показано в таблице 10 [5, 6, 7] и на рис. 7.

Таблица 11

Изменение степени реактивности высокореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

$n_{вр}$ , об/мин	$Y = u/c_{ад}$	$\rho$
14 000	0,406	0,444
14 500	0,42	0,449
15 000	0,435	0,453
15 500	0,449	0,457
16 000	0,464	0,46
16 500	0,48	0,462
17 000	0,493	0,465
17 500	0,507	0,466
18 000	0,522	0,4675
18 500	0,536	0,468

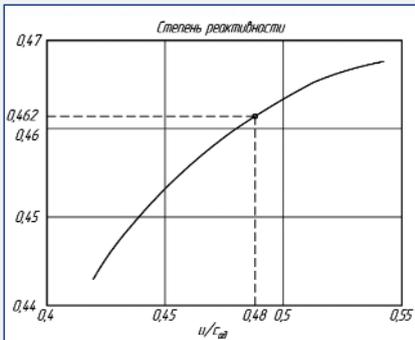


Рис. 7 Изменение степени реактивности высокореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

Изменение степени реактивности от параметра  $Y$  для ТВД с низкой степенью реактивности показано в таблице 12 [5, 6, 7] и на рис. 8.

Таблица 12

Изменение степени реактивности низкореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

$n_{вр}$ , об/мин	$Y = u/c_{ад}$	$\rho$
14 000	0,401	0,193
14 500	0,415	0,206
15 000	0,43	0,218
15 500	0,444	0,229
16 000	0,458	0,239
16 500	0,473	0,25
17 000	0,487	0,257
17 500	0,501	0,264
18 000	0,515	0,271
18 500	0,53	0,277

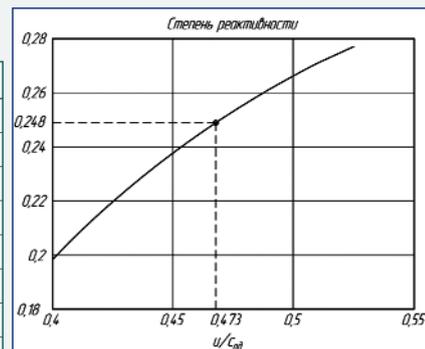


Рис. 8 Изменение степени реактивности низкорреактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

Изменение суммарных потерь в РК от параметра  $Y$  для ТВД с высокой степенью реактивности показано в таблице 13 [5, 6, 7] и на рис. 9.

Таблица 13

Изменение суммарных потерь в РК высокореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

$n_{вр}$ , об/мин	$Y = u/c_{ад}$	$\zeta_{\Sigma РК}$
14 000	0,406	0,128
14 500	0,42	0,116
15 000	0,435	0,107
15 500	0,449	0,0998
16 000	0,48	0,0947
16 500	0,493	0,0914
17 000	0,507	0,0892
17 500	0,522	0,0871
18 000	0,536	0,0854
18 500	0,53	0,0838

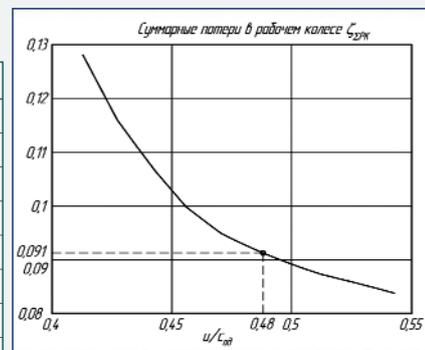


Рис. 9 Изменение суммарных потерь в РК от параметра  $Y$  для ТВД с высокой степенью реактивности

Изменение суммарных потерь в РК от параметра  $Y$  для ТВД с низкой степенью реактивности показано в таблице 14 [5, 6, 7] и на рис. 10.

Таблица 14

Изменение суммарных потерь в РК низкорреактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

$n_{вр}$ , об/мин	$Y = u/c_{ад}$	$\zeta_{\Sigma РК}$
14 000	0,401	0,238
14 500	0,415	0,228
15 000	0,43	0,219
15 500	0,444	0,212
16 000	0,458	0,206
16 500	0,473	0,2014
17 000	0,487	0,197
17 500	0,501	0,194
18 000	0,515	0,19
18 500	0,53	0,187

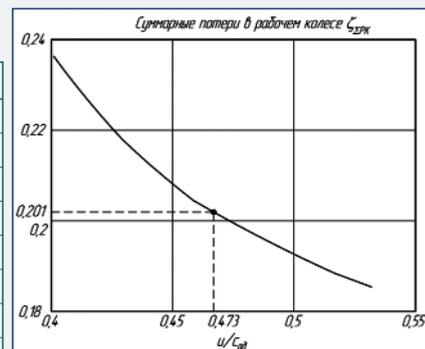


Рис. 10 Изменение суммарных потерь в РК от параметра  $Y$  для ТВД с низкой степенью реактивности

Изменение полной температуры в относительном движении на входе в РК  $T_{w1}^*$  от параметра  $Y$  для ТВД с высокой степенью реактивности показано в таблице 15 [5, 6, 7] и на рис. 11.

<sup>1</sup> ГОСТ 23851-79 Двигатели газотурбинные авиационные. Термины и определения: [Электронный ресурс]. М., 2023. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/40186/> (Дата обращения: 11.09.2023)

Таблица 15

Изменение полной температуры в относительном движении на входе в РК высокореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

$n_{вр}$ , об/мин	$Y = u/c_{ад}$	$T_{w1}^*$
14 000	0,406	1523,8
14 500	0,42	1522,3
15 000	0,435	1521,14
15 500	0,449	1520,19
16 000	0,464	1519,44
16 500	0,48	1518,9
17 000	0,493	1518,5
17 500	0,507	1518,13
18 000	0,522	1517,9
18 500	0,536	1517,6

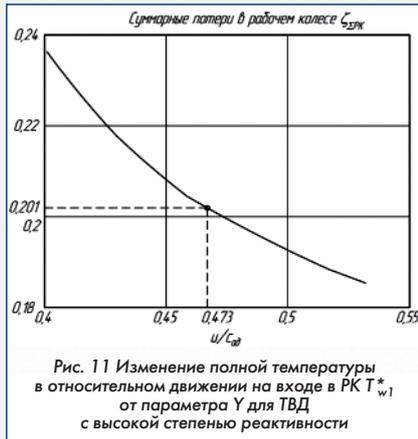


Рис. 11 Изменение полной температуры в относительном движении на входе в РК  $T_{w1}^*$  от параметра  $Y$  для ТВД с высокой степенью реактивности

Изменение полной температуры в относительном движении на входе в РК  $T_{w1}^*$  от параметра  $Y$  для ТВД с низкой степенью реактивности показано в таблице 16 [5, 6, 7] и на рис. 12.

Таблица 16

Изменение полной температуры в относительном движении на входе в РК высокореактивной ТВД от параметра  $Y = u/c_{ад}$

$n_{вр}$ , об/мин	$Y = u/c_{ад}$	$T_{w1}^*$
14 000	0,401	1474,3
14 500	0,415	1472,3
15 000	0,43	1470,6
15 500	0,444	1469,11
16 000	0,458	1467,8
16 500	0,473	1466,8
17 000	0,487	1465,8
17 500	0,501	1465
18 000	0,515	1464,21
18 500	0,53	1463,54

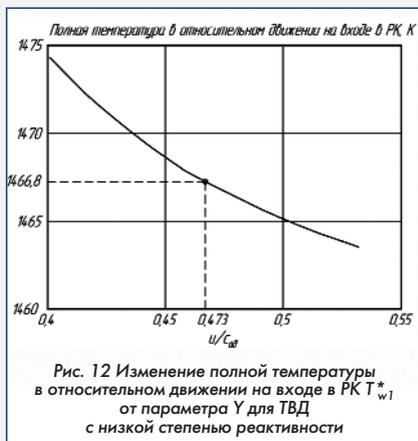


Рис. 12 Изменение полной температуры в относительном движении на входе в РК  $T_{w1}^*$  от параметра  $Y$  для ТВД с низкой степенью реактивности

Авторами были определены минимальные требования к системе охлаждения рабочей лопатки с учетом расчёта глубины охлаждения.

Для ТВД с высокой степенью реактивности [1]:

$$\Theta = \frac{T_{w1}^* - T_n}{T_{w1}^* - T_{охл.в.}} \quad (2)$$

где  $T_n = 1150$  К - допустимая температура рабочей лопатки (РЛ);  $T_{охл.в.} = 800$  К - температура охлаждающего воздуха для рабочей РЛ [1, 2, 4, 10]. Температура охлаждающего воздуха для РЛ принята авторами с учётом [10]:

1) Существующие теплообменные аппараты (ТА) данного назначения имеют в действительности температурный перепад  $\Delta T_{ТА} \approx 50$  К;

2) Охлаждающий воздух после ТА проходит транзитом через СА, нагреваясь на  $\sim 50$  К;

3) После транзита через СА охлаждающий воздух, проходя через аппарат закрутки, охладится на  $\sim 15$  К.

Расчет глубины охлаждения [1]:

$$\Theta = \frac{T_{w1}^* - T_n}{T_{w1}^* - T_{охл.в.}} = \frac{1518,9 - 1150}{1518,9 - 800} = 0,513. \quad (3)$$

Для ТВД с низкой степенью реактивности [1]:

$$\Theta = \frac{T_{w1}^* - T_n}{T_{w1}^* - T_{охл.в.}} = \frac{1466,8 - 1150}{1466,8 - 800} = 0,475. \quad (4)$$

**Выводы**

**1) Особенности ТВД с высокой степенью реактивности:**

Авторами был сделан вывод о том, что выходной результат

расчета и моделирования РК - высокая геометрическая конфузурность, что говорит о минимальных профильных и вторичных потерях;

Наличие трансзвуковых течений, особенно в РК при числе Маха (M~1);

Угол выхода потока из СА  $\sim 16$  град. Исследованный авторами СА ТВД с низкой степенью реактивности представляет высокие кромочные потери в СА, так как высокая степень реактивности предполагает увеличение режима работы СА, что при фиксированном расходе потребует зажатия горлового сечения, которое приведет к увеличению отношения  $a_r/t$  (отношение горла к шагу лопаток). Также в ТВД с низкой степенью реактивности будет РК с низкой конфузурностью, что предполагает повышенные профильные и вторичные потери;

Малые потери на трение:  $\zeta_{тр.СА} = 0,038$ ;  $\zeta_{тр.РК} = 0,0235...0,0239$ .

**2) Особенности ТВД с низкой степенью реактивности:**

Авторами уточняют о незначительном различии степеней расширения по полному давлению на входе и статическому на выходе из-за: выход из ТВД с низкой степенью реактивности - практически осевой, абсолютная скорость близка к осевой (малая величина абсолютной скорости по сравнению с ТВД высокой степени реактивности);

Главный недостаток ТВД с низкой реактивностью - потери в РК составляют 0,2, низкий КПД;

Высокие потери в РК по причине:

а) Большие профильные и вторичные потери, малая геометрическая конфузурность межлопаточных каналов (интенсивные вторичные течения);

б) Большой угол поворота потока в межлопаточных каналах (большие профильные и вторичные потери).

Небольшое преимущество ТВД с низкой степенью реактивности по сравнению с ТВД высокой реактивности - немного меньшие потери от наличия радиального зазора. Однако авторы утверждают, что РК в ТВД с низкой реактивностью всегда имеет большие суммарные потери, чем РК в ТВД с высокой степенью реактивности.

Также в качестве ещё одного из преимуществ ТВД с низкой степенью реактивности является то, что полная температура в относительном движении на входе в РК  $T_{w1}^*$  на 50 К ниже. **□**

**Список литературы**

1. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Теория и проектирование газовой турбины: Учеб. пособие по курсу "Лопаточные машины газотурбинных и комбинированных установок. Газовые турбины". - Ч. 1: Теория и проектирование ступени газовой турбины / Под ред. М.И. Осипова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. - 104 с.: ил.
2. Силуянова, М. В. Основы проектирования, конструкция и расчет основных характеристик авиационных газотурбинных двигателей / М. В. Силуянова. - Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство Доброе слово и Ко", 2023. - 166 с. - ISBN 978-5-6049766-8-5. - EDN TGGREI.
3. Силуянова, М. В. Выбор и методика формирования рациональных вариантов комплексных конструктивно-технологических решений для газотурбинных двигателей / М. В. Силуянова, В. В. Курицына // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. - 2017. - № 2-2(30). - С. 106-109. - EDN XXWHMH.
4. Иноземцев А.А., В.Л. Сандрацкий Газотурбинные двигатели / Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. - ОАО "Авиодвигатель", 2006. - 1204 с.
5. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Теория и проектирование газовой турбины: Учеб. пособие по курсу "Лопаточные машины газотурбинных и комбинированных установок. Газовые турбины". - Ч. 2: Теория и проектирование ступени газовой турбины / Под ред. М.И. Осипова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. - 116 с.: ил.
6. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник для студентов специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки": в 3-х т. / Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. - М.: Машиностроение, 2007. - 232 с. - 3т.
7. Григорьев В. А., Ждановский А. В., Кузьмичев В. С. Выбор параметров и термодинамические расчеты авиационных газотурбинных двигателей - 2-е издание, дополненное и исправленное. - Самара : Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2009. - 202 с. - ISBN 978-5-7883-0714-5. - EDN TITKSF.
8. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / С. Патанкар. - М. Энергоатомиздат, 1984. - 150с.
9. Видулин А.В., Ярославцев Н.Л., Земляная В.А. Исследование теплообмена в системах охлаждения теплонапряженных конструкций // Теплоэнергетика. 2017. № 1. С. 39-44. DOI: 10.1134/S0040363617010106 EDN: UYJMMN
10. Иванов, В. Л. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов / В. Л. Иванов, А. И. Леонтьев, Э. Л. Манушин, М. И. Осипов; Под ред. А. И. Леонтьева - Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. - 592 с.

Связь с авторами: dc2mat@yandex.ru

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук:

**Владимир Михайлович Шмелев**, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией

**Александр Алексеевич Захаров**, научный сотрудник

**Владимир Сергеевич Арутюнов**, д.х.н., заведующий лабораторией

*Проведено математическое моделирование работы электрического генератора внутреннего сгорания со свободными поршнем и цилиндром в линейном варианте. Такой генератор представляет собой идеально сбалансированную тепловую машину с движущимися элементами. Проанализированы особенности функционирования такой системы. Показано, что в неоптимизированном варианте КПД преобразования химической энергии в электрическую при сжигании метано-воздушной смеси достигает 50 %. Продемонстрирована работа экспериментальной пневматической модели электрогенератора, выполненного в компактном роторном варианте.*

*The mathematical simulation of operation of an electrical generator of internal combustion with the free piston and cylinder in linear version was conducted. Such generator represents the ideally balanced heat machine with driving parts. The operation particularities of such system are analyzed. It was shown that the conversion efficiency of chemical energy to electrical one at combustion of methane - air mixture reaches 50 % in the not optimized variant. The operation of experimental pneumatic model of an electrical generator executed in the compact rotor variant was demonstrated.*

**Ключевые слова:** ДВС, электрогенератор, свободный поршень, гибридные двигатели.

**Keywords:** ICE, electric generator, free piston, hybrid engines.

**В** настоящее время существует острая проблема создания мобильных автономных мини-электростанций и электрогенераторов нового поколения, эффективно использующих энергию жидких и газообразных углеводородных топлив, в том числе, биогаза и других низкокалорийных топлив.

Применяемые в настоящее время различные мобильные автономные мини-электростанции представляют собой технические устройства в виде двух самостоятельных блоков, обеспечивающих в связке преобразование энергии органического топлива в электроэнергию. Первый блок - это поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Второй блок - собственно электрогенератор. Такая компоновка имеет как преимущества, так и недостатки. Удельная масса энергоблока достигает ~20 кг/кВт. Отметим, что широко используемые энергоблоки не способны работать на низкокалорийном топливе, в частности, на биогазе.

Другим бурно развивающимся направлением является создание компактных и эффективных генераторов электроэнергии на базе ДВС для гибридных автомобилей и других транспортных средств. Двигатели-экстендеры относятся к двигателям, которые обеспечивают только работу электрогенератора, отдающего вырабатываемую энергию электродвигателям автомобиля и заряжающего аккумуляторные батареи. В подавляющем большинстве случаев двигатели-экстендеры представляют собой малогабаритные классические двигатели внутреннего сгорания, обладающие всеми узлами и, соответственно, недостатками таких двигателей.

В последнее время разработан новый тип экстендера - моноэнергоблока, который построен на базе линейного бесклапанного двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем (рис. 1) [1, 2]. По своим энергетическим характеристикам такой электрогенератор внутреннего сгорания (ЭГВС) намного превосходит двухблочную энергоустановку, а по коэффициенту полезного действия приближается к топливным ячейкам.

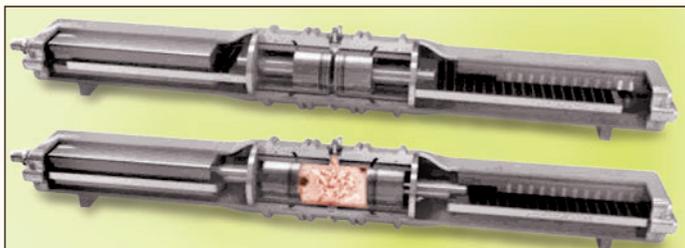


Рис. 1 Схема линейного электрогенератора со свободными поршнями

Другие важные преимущества этого принципа преобразования энергии [2]:

- уменьшение числа движущихся деталей благодаря исключению коленчатого вала и шатунов, входящих в конструкцию ДВС;

- повышение жесткости и механической надежности конструкции двигателя;

- повышение ресурса и механического КПД двигателя вследствие отсутствия шатунов, что приводит к исключению боковых сил, действующих на зеркало цилиндра и уменьшению трения в цилиндропоршневой группе;

- возможность динамического изменения степени сжатия в процессе работы не механическими способами, а установкой параметров системы управления. Возможность работы на больших степенях сжатия;

- возможность работы с различными видами топлива, в том числе, на низкокалорийном топливе и на смесях ультра бедного состава;

- реализация различных режимов воспламенения и сгорания топлива;

- исключение стартера для запуска ДВС, так как вследствие обратного действия генератора, система обладает свойством самозапуска;

- снижение расходов на производство.

Становится возможной применение модульной конструкции двигательной установки в виде нескольких распределенных блоков, что приводит к новым принципам компоновки транспортных средств, а также повышает её надежность при использовании в военных и других критических областях транспортной техники.

Вместе с тем необходимо обратить внимание и на проблемы, связанные с этой концепцией. Основные из них:

1. Опасность столкновения поршней в двухпоршневой схеме генератора или удара поршня о торец цилиндра в однопоршневой схеме генератора на некоторых режимах работы при высокой степени сжатия. В обычном ДВС верхняя мертвая точка траектории поршня задается геометрией кривошипно-шатунного механизма, а в ДВС со свободным поршнем она зависит от степени сжатия и скорости сгорания топливовоздушной смеси. То есть, поршень тормозится противодавлением в камере. Как следствие, длительность тактов и верхняя мертвая точка могут меняться. А это значит, что при сбое в работе форсунки поршень может удариться в торец цилиндра. Для сбалансированной работы двигателя также необходим специальный механизм, который бы нивелировал разницу в процессах сгорания топлива в каждом из рабочих объемов.

2. Система ЭГВС с одним свободным поршнем и двумя торцевыми камерами сгорания принципиально не сбалансирована, поэтому работа такого ЭГВС происходит с сильными вибрациями, если отсутствует массивная основа.

3. Система ЭГВС с двумя свободными поршнями (рис. 1), перемещающимися в противоположных направлениях, и одной центральной камерой сгорания теоретически может быть сбалансированной. Однако, такой генератор нуждается в сложной

электронной системе управления и коррекции положения каждого поршня для обеспечения их синхронного движения.

В [3, 4] предложена конструкция ДВС со свободным поршнем, лишённая указанных недостатков. Система представляет собой свободно движущийся не только поршень, но и цилиндр. Такой ДВС является абсолютно сбалансированной машиной, так как при взаимодействии свободного поршня и цилиндра центр масс системы неподвижен (рис. 2а). Это значительно улучшает весовые характеристики ДВС, существенно упрощается система управления. Возможная конструкция линейного электрического генератора на базе такого принципа по схеме двухтактного двигателя представлена на рис. 2б.

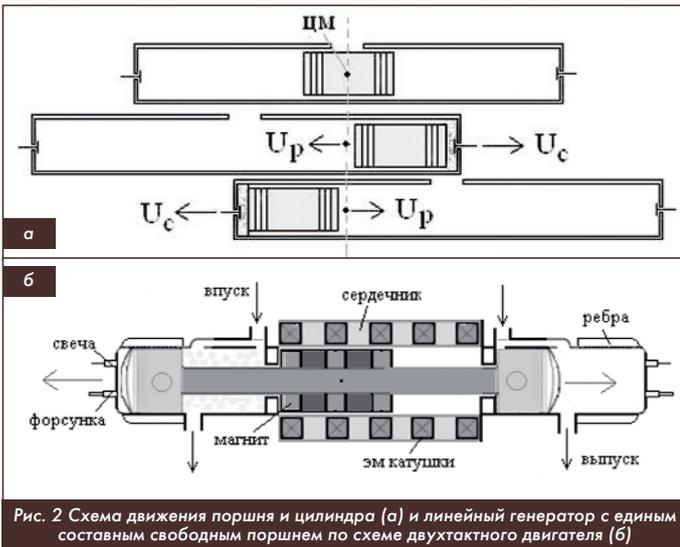


Рис. 2 Схема движения поршня и цилиндра (а) и линейный генератор с единым составным свободным поршнем по схеме двухтактного двигателя (б)

В предлагаемой конструкции генератора кольцевые магниты размещаются на поршне, а катушки статора на цилиндре. В данной системе нет проблемы удара свободного поршня о головку цилиндра при большой степени сжатия при сбое в работе форсунки, поскольку цилиндр также свободный. Снимается также серьезная проблема электронного контроля работы ДВС и управления системой подачи топлива в сравнении с двухпоршневой схемой (рис. 1) для обеспечения синхронного движения поршней.

По существу, реализуется схема "идеального" сбалансированного линейного электрогенератора с той только особенностью, что движение "якоря" и "статора" обусловлено прямым действием давления от сжигания топливоздушной смеси. В этом и заключается основная идея нового типа электрогенератора. При взаимном перемещении поршня и цилиндра происходит изменение магнитного потока от якоря, и в обмотке статора возникает индуцируемая ЭДС. Отметим, что в предлагаемой системе относительная скорость перемещения магнитов поршня относительно катушек статора выше. Такая конструкция энергоблока, т.е. совмещение тепловой машины с генератором электрической энергии позволяет существенно снизить массогабаритные параметры энергоблока.

Возможно создание компактной замкнутой системы в виде цилиндрического двигателя с поршнем - ротором. В этом случае электрогенераторы тарелочного типа крепятся с обеих сторон двигателя. Теория роторного двигателя со свободным ротором изложена [4].

**Математическая модель**

Рассматривалась простая 0-мерная математическая модель процесса сгорания метано-воздушной смеси в цилиндре при сжатии газа свободным поршнем. Предполагалось, что в свободном цилиндре длиной  $L$  и диаметром  $D$  расположен свободный поршень длиной  $L_p$ . Поршень делит цилиндр на две камеры - левую (1) и правую (2), совершая возвратно-поступательное движение.

На торцах цилиндра имеются входы для подачи свежей метано-воздушной смеси, а в центре цилиндра - выход продуктов сгорания.

Входы и выход снабжены клапанами соответствующего действия. Поршень и цилиндр движутся в противоположных направлениях таким образом, что центр масс системы остается неподвижным. Реализуется двухтактный цикл работы системы. В стадии выпуска продуктов сгорания через клапан выходного отверстия при определенном давлении открывается клапан входного отверстия соответствующей камеры и таким образом осуществляется продувка камеры и ее наполнение свежей смесью. Совершаемая при сжигании смеси полезная работа конвертируется в электрическую энергию, при этом, не детализируя электромагнитную систему генератора, полагается, что электрическая мощность в нагрузке, определяемая электромагнитной силой взаимодействия поршня и цилиндра, пропорциональна квадрату относительной скорости поршня и цилиндра.

Следующая система уравнений описывает изменение внутренней энергии и массы газовой среды при сгорании метано-воздушной смеси в камерах ЭГВД при циклических процессах сжатия и расширения [6-9]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_i m_i}{dt} &= P_i \frac{dV_i}{dt} + H_i^+ q_i^+ - H_i^- q_i^- + W_{ci} - W_{hi} \\ \frac{dm_i}{dt} &= q_i^+ - q_i^- \\ \frac{dm_{mi}}{dt} &= -w_i - \xi_0 q_i^+ \\ \frac{dV_i}{dt} &= S U(t) \\ M_k \frac{dU_k}{dt} &= S(P_2 - P_1) - F_f - F_e \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь:  $t$  - текущее время,  $i = 1, 2$  - индекс камеры цилиндра,  $E$  - внутренняя энергия единицы массы газовой смеси,  $H$  - удельная энтальпия входящей смеси (символ "+") и выходящих продуктов сгорания (символ "-"),  $P$  - давление,  $V$  - объем сжимаемого газа,  $m, q$  - масса и расход газа при перетекании [9], соответственно,  $m_m$  - масса топлива,  $W_c$  - скорость тепловыделения при сгорании топлива. В теории ДВС функция  $W_c$  обычно задается тем или иным корреляционным соотношением, например, соотношением Вибе [5]. В данной модели принят аналогичный прием. Предполагалось, что в верхней мертвой точке смесь воспламенялась внешним источником зажигания, после чего сгорала за характерное время реакции  $\tau_r$ . Соответственно, массовая скорость расхода метана выражалась, как  $dm_m/dt = m_m/\tau_r$ . Процесс диссоциации продуктов сгорания учитывался в виде эмпирической поправки к удельной энергии горения в виде линейной функции от температуры. В расчетах пренебрегали изменением теплоемкости при изменении молекулярного состава газовой среды после процесса химического превращения. Скорость теплотерь  $W_i$  задавалась в соответствии с моделью Вошни [11]. Другие переменные:  $M, U$  - масса и скорость поршня ( $k = 1$ ) или цилиндра ( $k = 2$ ), соответственно.  $S$  - внутреннее сечение цилиндра. Система (1) дополнялась уравнением состояния идеального газа.

Начальные условия: при  $t = 0$  и центральном положении поршня в цилиндре  $U_1 = U_0, U_2 = U_0 M_1/M_2$ , давление  $P = 1$  атм, температура газа  $T = 300$  К,  $m_m = 0$ . Начальная скорость  $U_0$  задавалась равной  $14$  м/с,  $\tau_r = 8 \cdot 10^{-4}$  с.

Результаты расчетов показали, что режим работы генератора существенно зависит от многих входных параметров системы, таких как длины и массы цилиндра и поршня, моменты открытия и закрытия впускного и выпускного клапанов при условии гарантированной продувки рабочего объема цилиндра, коэффициента избытка воздуха в метано-воздушной смеси, величины электрической нагрузки и др. Таким образом, задача по оптимизации решения является сложной, многопараметрической. Ниже приведены результаты расчёта генератора для конкретных входных параметров, кото-

рые дают представление об особенностях функционирования такой системы. Расчёты проводились при следующих входных параметрах задачи: диаметр цилиндра  $D = 80$  мм, длина цилиндра  $L = 400$  мм, длина поршня  $L_p = 120$  мм, массы поршня и цилиндра одинаковы и равны 3 кг, приведенный диаметр выпускного отверстия 50 мм, впускного - 10 мм. Давление впуска метано-воздушной смеси 30 атм. Момент открытия выходного клапана соответствовал достигнутому значению рабочего объёма на такте расширения 0,875 от максимального объёма  $V_0$ , а момент открытия входного клапана выбран 0,85. Такое соотношение параметров обеспечивает 100 % продувку рабочего объёма свежей смесью. Коэффициент избытка воздуха метано-воздушной смеси выбран 2. Воспламенение и горение смеси с таким высоким избытком воздуха возможно при высоких температурах сжатия [10, 11]. Для бедной смеси оправдано пренебрежение изменением теплоёмкости газовой среды при изменении её молекулярного состава после процесса химического превращения.

Расходы газовой среды на стадиях впуска и выпуска, а также изменение массы метана в рабочем объёме цилиндра в двухтактном цикле расширения-сжатия представлены на графике (рис. 3). Видно, что при впуске смеси масса метана в рабочем объёме быстро увеличивается, достигая постоянного значения, а после достижения поршнем верхней мертвой точки происходит его полное сгорание.

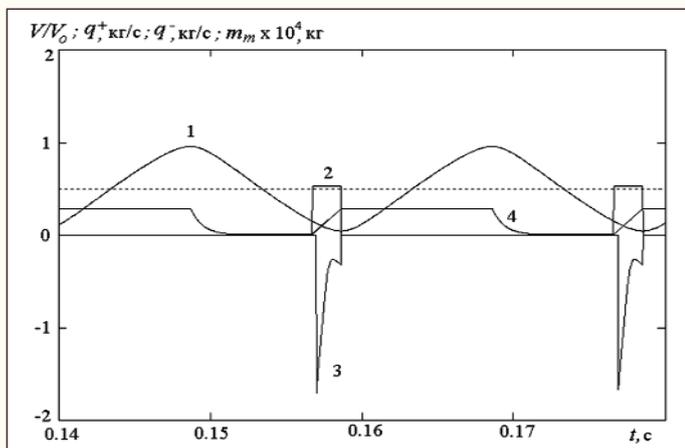


Рис. 3 Изменение со временем рабочего объёма (1), скорости впуска (2) и выпуска (3) газовой среды, а также массы метана в рабочем объёме цилиндра (4)

Изменение давления и температуры при изменении рабочего объёма цилиндра представлены на графике (рис. 4). Максимальное давление при сгорании метана составляет 80 атм, максимальная температура - около 2000 К. При такой температуре поправка на диссоциацию продуктов сгорания оказывается незначительной. Максимальная степень сжатия - около 22.

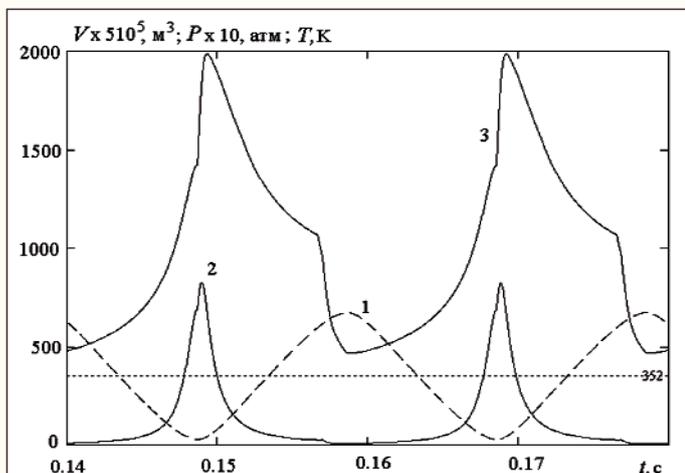


Рис. 4 Изменение со временем рабочего объёма (1), давления (2) и температуры (3) газовой среды

На рис. 5 представлен рабочий цикл процесса в виде P-V-диаграммы, а также скорость поршня и изменение массы метана в правой камере генератора в зависимости от текущей величины рабочего объёма цилиндра. Правая часть петлевой функции  $m_m = f(V)$  соответствует поступлению горючего в цилиндр, левая часть петли определяется процессом его сгорания. Что касается зависимости  $U_1 = f(V)$ , то она сильно "выпложена" и далека от синусоидального вида. Это объясняется преобразованием кинетической энергии поршня (и цилиндра) в электрическую энергию нагрузки.

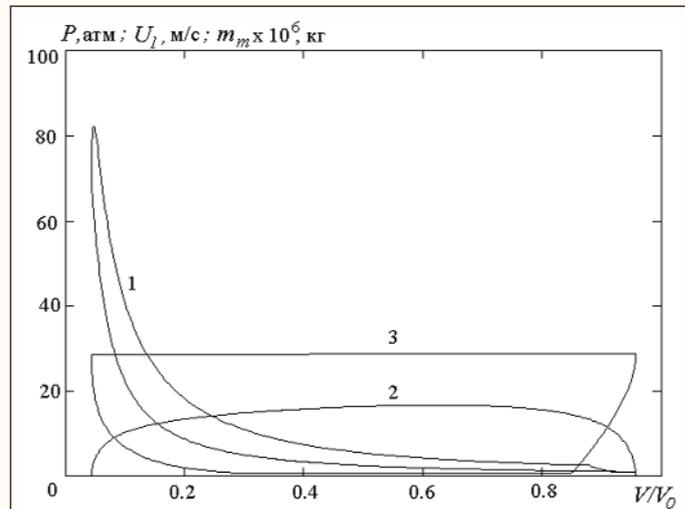


Рис. 5 P-V-диаграмма (1), скорость поршня (2) и изменение массы метана в рабочем объёме генератора (3)

Отметим, что в данном варианте расчёта мощность горения составила 120 кВт, электрическая мощность в нагрузке 61 кВт. Это соответствует КПД преобразования химической энергии в электрическую примерно 51 %. Частота процесса составила 50,6 Гц, что является оптимальным для генераторов переменного электрического тока. Удельная рабочая мощность генератора достигла 43,3 кВт/л, что вдвое превышает соответствующее значение для типичного двухтактного ДВС, работающего на смеси стехиометрического состава.

Таким образом, предварительные расчёты продемонстрировали высокую энергетическую эффективность данного типа генератора внутреннего сгорания. Очевидно, что использование смеси стехиометрического состава, позволит ещё больше увеличить удельную мощность генератора, а оптимизация процесса - поднять его энергетический КПД.

**Экспериментальная методика**

Для экспериментальной демонстрации возможности функционирования электрогенератора со свободными поршнями и цилиндром был изготовлен лабораторный образец генератора в роторном варианте (рис. 6). По сравнению с линейным вариантом такая конструкция существенно выигрывает в простоте совмещения собственно ДВС и электрогенератора, при этом магниты генератора выносятся из зоны "цилиндра". В данных экспериментах для упрощения конструкции использовался односекторный не сбалансированный ротор. Основные параметры конструкции: внутренний диаметр корпуса 100 мм, прямоугольное сечение рабочего объёма в роторе имело ширину 40 мм и высоту 30 мм, размер выходного отверстия в корпусе 1 x 40 мм, рабочий объём генератора 0,17 литра. В секторах ротора и корпуса использовались лабиринтные уплотнения, однако имелась возможность установки по периметру секторов дополнительно компрессионные уплотняющие пластины. В этом случае компрессия существенно возрастала. Для подачи рабочего газа в объёмы использовались стандартные автомобильные электромагнитные клапаны OMVL BFC, Италия, с проходным сечением 28 мм². Момент и продолжительность подачи рабочего газа мог контролироваться специальной сконструированной электронной схемой с герконовыми датчиками. По оценкам максимальная

электрическая мощность данного генератора может достигать примерно 20 кВт при сжигании метано-воздушной смеси стехиометрического состава, при условии обеспечения 50 % КПД преобразования химической энергии в электрическую. Однако, в данной работе не ставилась цель достижения максимальных параметров генератора. На первом этапе предварительного исследования генератор запитывался сжатым воздухом низкого давления, при этом компрессионные пластины отсутствовали. Для генерации электрической энергии использовался стандартный трехфазный электрический генератор фирмы SCOOTER-M 4T139QMB, мощностью 60 Вт, устанавливаемый с одной стороны сборки. Нагрузкой служила электрическая лампа мощностью 10 Вт. С другой стороны корпуса сборки устанавливался датчик угла поворота ротора, выполненный на основе переменного потенциометра. Одновременно, максимальный угол поворота корпуса фиксировался маркером. В одном из рабочих объёмов около сектора корпуса был установлен малогабаритный датчик давления 24PCGFA6D фирмы Honeywell.

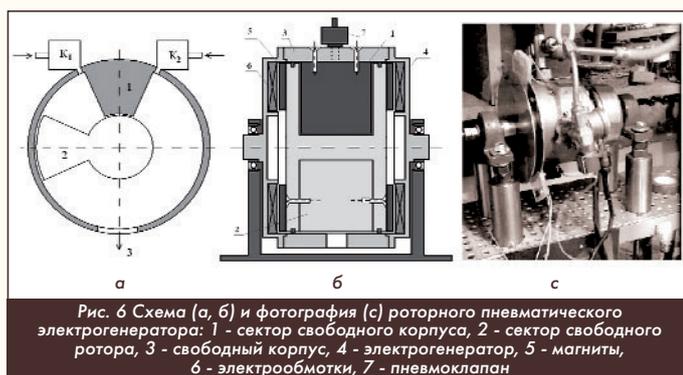


Рис. 6 Схема (а, б) и фотография (с) роторного пневматического электрогенератора: 1 - сектор свободного корпуса, 2 - сектор свободного ротора, 3 - свободный корпус, 4 - электрогенератор, 5 - магниты, 6 - электрообмотки, 7 - пневмоклапан

Результаты экспериментов показали, что генератор устойчиво работал с частотой колебаний 5...15 Гц при подаче сжатого воздуха при давлении от 2 до 6 ата. Степень сжатия была низка, не превышала 1,5, при этом снимаемая мощность в нагрузке составляла порядка 10 Вт.

Осциллограмма давления  $P$  и моменты открытия клапана (подача напряжения  $U_v$  на клапан) для впуска сжатого воздуха в один из объёмов генератора представлена на рис. 7а. Не традиционный вид кривой объясняется утечками газа из-за не эффективной работы лабиринтных уплотнений при малой скорости поршня. Видны стадии сжатия, наполнения, рабочего хода и выхлопа. Анализ P-V-диаграммы (рис. 7б) показывает, что участок кривой (а-б) соответствует стадии сжатия, участок (в-с) соответствует стадии поступления сжатого воздуха в рабочий объём, участок (с-д) - рабочий ход, участок (д-а-е) - выхлоп. Суммарная мощность цикла составляла 10...15 Вт.

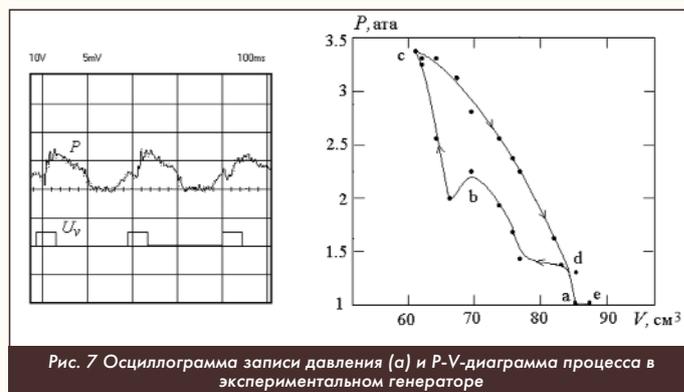


Рис. 7 Осциллограмма записи давления (а) и P-V-диаграмма процесса в экспериментальном генераторе

Таким образом, предварительные эксперименты продемонстрировали жизнеспособность идеи электрогенератора со свободными поршнями и цилиндром. Следующим этапом работы планируются эксперименты с горением метано-воздушной смеси.

#### Литература

1. Blarigan P.V. Advanced internal combustion electrical generator // Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, 2001.
2. Духанин В.И., Кекарис А.А. Анализ конструкции автомобильного генератора возвратно-поступательного движения // Известия МГТУ "МАМИ", 2012, №2(14). С. 97-104.
3. Шмелев В.М. Способ преобразования химической энергии топливно-воздушной смеси в механическую и устройство для его реализации, Патент РФ, №2138656, 26.06.98
4. Шмелев В.М., Марголин А.Д. О возможности использования бедных смесей в двигателе со свободным поршнем // Проблемы машиностроения и автоматизации, 1998. №4. С.65-69.
5. Ramos J.I. Internal Combustion Engine Modelling. New York: HPB, 1989. P. 422
6. Хачиян А.С., Морозов К.А., Луканин В.Н. и др. Двигатели внутреннего сгорания. М.: Высшая школа. 1985. С. 311.
7. Шмелев В.М., Николаев В.М. Парциальное окисление метана в химическом реакторе многостадийного сжатия // ТОХТ, 2008. Т.42. №1. С. 1-8.
8. Шмелев В.М., Николаев В.М. Парциальное окисление метана в химическом реакторе сжатия с внутренней рекуперацией тепла // Химическая физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 20-26.
9. Петренко Р.М. Физические основы внутрицилиндровых процессов ДВС. Л.: Ленинградский университет, 1983. С. 244.
10. Ronney P.D., Shoda M., Waide S.T. and Durbin E.J. Trottless premixed-charge engine: concept and experiment // Proc. Instn. Mech. Engrs, 1994, Part D, 208, p.13-24.
11. В.М. Николаев, В.М. Шмелев. О сжигании бедных смесей в ДВС со сверхадиабатическим сжатием // X Международная научно-практическая конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей", Владимирский государственный университет, Владимир, 2005. 05-01-43.

Связь с авторами: [v\\_arutyunov@mail.ru](mailto:v_arutyunov@mail.ru)  
5481311@gmail.com

## ИНФОРМАЦИЯ. Пассажирский цикложир CruiseUp

Австрийская компания CycloTech представила дизайн двухместного электрического цикложира CruiseUp.

Цикложиры - это летательные аппараты, у которых подъёмная сила создается с помощью вращающихся цилиндрических роторов с лопастями-крыльями, угол атаки которых непрерывно меняется при каждом обороте ротора с помощью механизма изменения шага. Вследствие этого подъёмная сила, создаваемая лопастями, увеличивается или уменьшается в зависимости от их текущего положения. Направление тяги ротора может изменяться в пределах 360° в плоскости вращения.

Первый летающий цикложир Skywalker удалось создать только в 2007 г. в Южной Корее. В нём четыре ротора располагались в углах рамы, как винты у квадрокоптера.

По такой же схеме был построен технологический демонстратор CycloRotor компании CycloTech, совершивший в 2021 г. первый полёт в помещении, а в 2022 г. полёты на открытом воздухе.



От демонстратора CycloRotor компания перешла к созданию пассажирского CruiseUp. У него шесть роторов, четыре из которых находятся по бокам в передней и задней части корпуса, причём кормовые роторы установлены немного выше носовых. Оси вращения ещё двух роторов, располо-

женных перед и за двухместной пассажирской кабиной, совпадают с продольной осью летательного аппарата. Помимо создания дополнительной подъёмной силы они обеспечивают боковое движение и поворот.

CruiseUp будет полностью электрическим. На одном заряде батареи он сможет пролететь 100 км при максимальной скорости 150 км/ч. Длина корпуса 6,7 м, ширина 3,3 м, что немногим больше современных автомобилей, но меньше, чем у многих разрабатываемых сегодня воздушных электрических такси.



# НОВЫЙ СПОСОБ РАБОТЫ ДВС С РАЗДЕЛЕННЫМ РАБОЧИМ ЦИКЛОМ

Юрий Иванович Духанин, заслуженный конструктор НПО "КРИОГЕНМАШ"

Анализ проблем совершенствования и перспектив развития поршневых ДВС показывает, что по долгосрочным научным прогнозам в обозримом будущем бензиновые и дизельные двигатели будут по-прежнему составлять основу транспортной и промышленной энергетики.

Актуальное научно-техническое направление в теории поршневых двигателей можно сформулировать следующим образом: разработка и осуществление высокоэффективного, с точки зрения топливной экономичности, и высокоэкологичного, с точки зрения выбросов токсичных веществ, цикла. При этом осуществление цикла с минимальным количеством токсичных веществ в отработавших газах (ОГ) по своей актуальности становится даже более важной, чем первая задача, и непосредственно связана с глобальной экологической проблемой.

Эти две задачи, решению которых в теории рабочих процессов двигателя отводится решающая роль, нельзя рассматривать раздельно, тем более что часто они конфликтуют между собой.

Основные перспективные технические решения и разработки ДВС, отвечающие заявленным задачам, отражены в табл. 1.

Как показывает анализ современных технических решений и результаты работы экспериментальных двигателей, частичным решением поставленной выше задачи в наибольшей степени отвечают наиболее раскрученный на сегодня двигатель Скудери, разрабатываемый американской компанией Scuderi Group и двигатель Джона Заяца, разрабатываемый фирмой Zajas Motors.

В то же время недостатки рассмотренных выше двигателей с разделённым рабочим циклом очевидны:

- существенное усложнение конструкции;
- увеличенные, по сравнению с обычными ДВС, габариты и масса;
- существенные газодинамические потери при перетекании большого объёма газов в сообщающихся цилиндрах.

Это снижает эффект от лучшей организации рабочего цикла. В то же время положительные качества - экономические и экологические - бесспорно лучше, чем у классических ДВС.

Была предложена техническая идея о разделении функций в двигателе и разработке двигателя, в котором отсутствуют такты всасывания и нагнетания. Эти процессы выполнялись в устройстве, предназначенном для этих целей - компрессоре (поршневом, винтовом, центробежном), а в двигателе осуществлялись только рабочие процессы сгорания и расширения рабочей среды на первом такте и выталкивания отработанных газов на втором, а нагрев сжатого воздуха в компрессоре до температуры воспламенения топлива выполнялся от теплоты отработавших газов.

На этот "Способ работы ДВС и устройство для его осуществления" был получен патент РФ № 2246625 с приоритетом от 27.06.2002 г. (Для справки: патент Скудери № 2286470 от 08.07.2002 г.).

Несмотря на ряд преимуществ перед циклом и двигателем Скудери, предложенный способ имел ряд недостатков, главными из которых можно считать:

- необходимость теплообменного аппарата;
- тяжёлые условия работы клапана впуска;
- возможность работы на одном виде топлива;
- снижение эффективности при отклонении режима работы от номинального режима;

Поиск решения по устранению этих недостатков привел к оригинальной технической находке, которая заключается в замене рекуперативного теплообмена на регенеративный, при

этом регенератор встраивается в цилиндр двигателя. Данное решение защищено патентом РФ № 2516046. В то же время поиск более простого и практически реализуемого решения продолжался и привёл к неожиданному на первый взгляд нелогичному решению.

Но, прежде чем раскрыть сущность найденного решения, необходимо ещё раз напомнить о главных проблемах современных ДВС и способах их решения. Как уже отмечалось ранее, основными задачами, стоящими сегодня перед разработчиками двигателей внутреннего сгорания, являются снижение расхода топлива и снижение вредных выбросов с отработавшими газами. Сокращение запасов углеводородных топлив, рост цен, а также проблемы глобального потепления приводят к ужесточению норм выбросов вредных веществ и увеличению давления на автопроизводителей со стороны правительств и организаций по защите окружающей среды. С небольшим отставанием Россия также принимает новые экологические классы, нормирующие уровень вредных выбросов легкового и грузового транспорта. Современные бензиновые двигатели с непосредственным впрыском топлива в цилиндр, комбинированной системой наддува и трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором позволяют обеспечить уровень вредных выбросов, соответствующий современным экологическим классам. Дизельные двигатели, благодаря высокой степени сжатия и высокой степени наддува, имеют повышенный индикаторный КПД, однако, несмотря на высокий уровень развития топливной арматуры и систем впрыска, процесс сгорания при расслоении заряда приводит к локальному обогащению бедной смеси, вследствие чего образуется большое количество вредных веществ, преимущественно сажа и  $\text{NO}_x$ , а на сегодняшний день стоимость систем нейтрализации вредных веществ, образующихся при сгорании бедных смесей, остается довольно высокой, так как в качестве катализаторов приходится использовать платину, палладий и иридий. Как известно, оксид азота  $\text{NO}_x$  по своей природе термического происхождения и образуется при температуре более 2100 К, а твердые частицы сажи - в зонах обогащенной смеси с локальным коэффициентом воздуха  $\alpha_g \leq 0,8$  при температуре более 1400 К.

Вместе с тем общеизвестно, что одним из наиболее эффективных способов уменьшения выброса с продуктами сгорания окислов азота является возврат некоторого количества продуктов сгорания в цилиндр двигателя, т.е. организация процесса рециркуляции отработавших газов. Уменьшение количества  $\text{NO}_x$  благодаря рециркуляции ОГ основывается на трех процессах:

- сокращение кислорода в камере сгорания;
- сокращение самого потока ОГ;
- снижение температуры в цилиндре благодаря более высокой теплоемкости инертных газов, которые напрямую не участвуют в процессе сгорания.

Количество ОГ, участвующих в рециркуляции, может достигать от 10 до 50 % от общего расхода, при этом содержание  $\text{NO}_x$  снижается до 60 % от того количества, которое образуется без рециркуляции.

В то же время при использовании системы рециркуляции уменьшается мощность двигателя и его КПД, так как соответственно количеству подаваемых ОГ уменьшается количество подаваемого свежего заряда воздуха и топлива.

Впервые система рециркуляции ОГ (EGR) была применена в 1970 году на автомобилях Chrysler. Сегодня она используется повсеместно как на легковых, так и на грузовых автомобилях.

## Перспективные технические решения и разработки ДВС

Таблица 1

Фирма. Тип двигателя	Особенности рабочего процесса	Достижимый результат
BMW. Система Valvetronic [1, стр. 617]	1. Монопрыск бензина во впускной канал. 2. Управление фазами газораспределения. 3. Управление ходом впускного клапана от 0,3 до 10 мм (автоматическое, сложная механическая система привода). 4. Двигатель должен работать с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_0 \approx 1$ и иметь систему нейтрализации отработавших газов с 3-компонентным катализатором.	1. Снижение расхода топлива на холостом ходу до 18...20 %. 2. Снижение расхода топлива в режиме частичной нагрузки от 10 до 12 %.
MITSUBISHI. Двигатель GDI (Gasoline Direct Injection) [1, стр. 655-658]	Непосредственный впрыск бензина. 1. Работа на сверхбедных смесях ( $\alpha_b \gg 1$ ) это режим малой нагрузки. Бензин впрыскивается в конце процесса сжатия (как в дизеле). Расслоение заряда обеспечивает устойчивую работу двигателя при $\alpha_b = 2,7$ . 2. Работа на ( $\alpha_b = 1$ ) - нет необходимости в расслоении заряда. Впрыск бензина в процессе впуска. 3. Работа с малой частотой вращения коленчатого вала и большими нагрузками. Doppel - впрыскивание - предварительное на такте впуска ( $\alpha_b = 4$ ) - детонационное горение исключено. Вторая основная доля в конце процесса сжатия и $\alpha_b$ становится равным 0,9. 4. Система EGR (рециркуляция).	1. Эффективный расход топлива в режиме х.х. на 40 %, в целом экономия топлива составляет 20 %; 2. Недостаток - повышенная эмиссия $\text{NO}_x$ требует оснащение дорогостоящим катализатором.
SAAB. Двигатель SVC (SAAB Variable Compression) с изменяемой степенью сжатия [патент № 2206774]	1. Механическое смещение головки относительно вертикальной оси позволяет изменять объём камеры сгорания для получения степени сжатия от 8:1 при максимальной нагрузке, до 14:1 при минимальной. 2. Чтобы избежать насосных потерь на всасе установлены: - компрессор (воздух подается в цилиндр под высоким давлением 2,8 бар с промежуточным охлаждением); - четыре клапана на каждый цилиндр. 3. Во всех созданных до этого времени двигателях степень сжатия была постоянной и определялась в зависимости от давления и температурного режима в камере сгорания при максимальной нагрузке, когда расход топлива и воздуха максимальны. Но работает в таком режиме двигатель не всегда, и можно сказать, даже очень редко. На трассе или в городе, когда скорость практически постоянна, мотор работает при малых или средних нагрузках. В такой ситуации для более эффективного использования энергии топлива лучше иметь большую степень сжатия.	1. Расход топлива при средних нагрузках снижен на 30 %, на столько же уменьшился выброс $\text{CO}_2$ . 2. $\text{NO}_x$ , $\text{CH}_4$ и $\text{CO}_2$ соответствуют всем существующим и планируемым на ближайшее время нормам токсичности. 3. Работать на различных марках бензина от А-76 до АИ-98 практически без ухудшения характеристик и исключая появление детонации.
П. Николаев Двигатель с воспламенением гомогенной смеси от сжатия. HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition)	1. Технология сгорания CAI (Controlled Auto-Ignition) - новый метод организации сгорания смеси, эффективный в диапазоне частичной нагрузки. 2. Топливовоздушная смесь образуется заранее на тактах впуска и сжатия, причем тщательно перемешанная, однородная гомогенная. Смесь сжимается в цилиндре, пока не воспламенится самопроизвольно! От сжатия и повышения температуры, а также благодаря присутствию в цилиндре остаточных газов от последнего рабочего цикла. Остаточные газы горячие, и в их составе есть так называемые свободные радикалы, "активные обломки" молекул, которые образовались в пламени предшествующего цикла и теперь инициируют воспламенение основной топливовоздушной смеси; 3. Воспламенение происходит не в отдельной точке (искра на электродах свечи), а сразу во всем объеме камеры сгорания - "объемный взрыв". Поэтому двигатель HCCI работает жестко, шумно, хуже плохого дизеля, поэтому цикл HCCI применим только при низкой нагрузке, когда топлива в цилиндр подается немного. А при средней и высокой нагрузке лучше всего обычный ОТТО. 4. Контролируемое сгорание с самовоспламенением пока может использоваться только в нижнем и среднем диапазоне оборотов и ограничено детонационным пределом.	1. Эффективная экономия топлива на малых и средних нагрузках. 2. Улучшение экологии.
В.М. Кушуль. Двигатель с разделённой КС [1, стр. 215 - 217]	1. Разделенная камера сгорания. 2. В этом двигателе осуществляется глубокое расслоение заряда с помощью спаренных цилиндров. В первый цилиндр поступает обогащенная смесь ( $\alpha_b < 1$ ), а во второй - воздушный заряд ( $\alpha_b \rightarrow \infty$ ). Подача искры за 15...20° до ВМТ первого цилиндра. 3. Двигатель Кушуля может работать на бензине с любым октановым числом, т.к. в них практически отсутствует детонация. Это объясняется тем, что кинетическая неоднородность смеси мешает быстрому распространению фронта пламени в первой (кинетической) фазе сгорания.	1. В режиме максимальной нагрузки коэффициент избытка воздуха в первом цилиндре $\alpha_b \approx 0,5$ , а общий состав смеси, отнесенный к объёму цилиндра практически стехиометрический; 2. Регулирование нагрузки в интервале значений от $\text{Ne}_{\text{max}}$ до $0,5\text{Ne}_{\text{max}}$ достигается путём обеднения смеси в первом цилиндре до $\alpha_b \approx 1$ . При этом суммарный коэффициент избытка воздуха $\alpha_b^{\Sigma} \approx 2,0$ . Дальнейшее снижение мощности осуществляется путем дросселирования в обоих впускных трактах.
Скудери, Двигатель с разделённым циклом [патент 2286470]*	Раздельное питание. 1. Рабочий цикл поделен между двумя цилиндрами: в одном происходит впуск смеси на сжатие, во втором - рабочий ход и выпуск. 2. Сгорание в отличие от двигателя Отто, где смесь поджигают чуть раньше, чем поршень дойдет до ВМТ в двигателе Скудери происходит при движении поршня вниз.	1. КПД выше на 5...10 %, чем у самых продвинутых современных дизельных турбоагрегатов. 2. Добавление наддува увеличивает КПД до 25 %. 3. Отработавшие газы благодаря быстрому и полному сгоранию содержат на 80 % меньше $\text{CO}$ и $\text{NO}_2$ , чем у традиционных четырёхтактных двигателей.
Zajac Motors Джон Заджак Двигатель с автономной камерой	В этом двигателе с разделенным рабочим циклом сгорание топлива производится в автономной камере, а не в цилиндре.	Дальнейшее развитие рабочего цикла Кушуля и Скудери.

\*1. В 2008 г. ряд крупных автопроизводителей PSA, Peugeot Citroen, Honda подписали соглашение о начале работ по этому двигателю.

2. В 2010 г. на Всемирном конгрессе Общества автомобильных инженеров SAE в Детройте был представлен действующий прототип двигателя.

3. Выдающийся мировой специалист по термодинамике из Массачусетского технологического института проф. Джон Хейвуд назвал разделенный цикл сгорания реальной альтернативой HCCI.

По способу ввода ОГ в рабочий объём цилиндра различают внешнюю и внутреннюю рециркуляцию. В первом случае часть ОГ из системы выпуска возвращают в впускной тракт двигателя, а во втором - часть ОГ оставляют непосредственно в цилиндре двигателя.

В двигателе с разделенным рабочим циклом весь цикл осуществляется за один оборот коленчатого вала и два такта, при этом сжатый воздух или рабочая смесь должны заполнить камеру сгорания с температурой не менее температуры рабочей среды, достигаемой в процессе сжатия в цикле традиционного ДВС. Вместе с тем, на втором такте имеется источник нагрева сжатого воздуха - это теплота ОГ, или продуктов сгорания, имеющих, как правило, температуру в диапазоне 800...1500 К.

Возникло предложение о том, чтобы в цилиндре оставлять часть ОГ и сжимать их до давления при котором достигается потенциал тепла, обеспечивающий нагрев воздуха до температуры воспламенения топлива после его впрыска, или температуры ниже температуры топливо-воздушной смеси, но способной как в бензиновом двигателе воспламеняться и сгорать от пламени искры.

Такое решение позволяет:

- благодаря эффекту внутренней циркуляции организовать процесс нагрева рабочего продукта до необходимой температуры без регенеративного и рекуперативного теплообмена, что значительно упрощает конструкцию двигателя;

- использовать как в классическом двигателе энергию части отработавших при выпуске газов для организации процесса наддува в компрессор;

- снизить тепловой режим клапана впуска до 80...100 °С;

- использовать внутреннюю рециркуляцию по своему прямому назначению - снижению концентрации NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания.

Кроме того, меняя степень рециркуляции, количество и состав рабочей смеси можно обеспечить минимальный расход топлива и эмиссию вредных веществ в ОГ в широком диапазоне изменения режима работы двигателя.

Таким образом, с учетом опыта предыдущих наработок обозначился контур нового перспективного ДВС с разделенным

рабочим циклом, который в наибольшей степени приближается к решению обозначенных ранее задач. Приведенные ниже первые инженерные теоретические расчеты подтверждают обоснованность предложенного технического решения и поясняются с помощью индикаторной диаграммы предлагаемого рабочего цикла и расчетом температуры сжатого воздуха, подаваемого в камеру сгорания двигателя от степени внутренней рециркуляции отработавших газов.

На рис. 1 изображена теоретическая индикаторная диаграмма двигателя, поясняющая способ его работы.

На рис. 1 под индексами 1'-2'-3-4-1' отражена теоретическая индикаторная диаграмма цикла классического 4-тактного двигателя, с подводом теплоты к рабочему телу при постоянном давлении:

1' - 2' - изобарический подвод тепла к рабочему телу (сгорание рабочей смеси);

2' - 3 - расширение продуктов сгорания;

3 - 4 - выхлоп продуктов сгорания;

4 - 1' - сжатие воздуха или рабочей смеси с давлением и температурой, соответствующим классическому 4-тактному двигателю.

Под индексами 1-2-3-4-5-6-1 отражен цикл предлагаемого двигателя, который включает следующие процессы:

1 - 2 - подвод теплоты к рабочему телу при постоянном давлении (процесс сгорания в рабочем цилиндре топливо-воздушной смеси);

2 - 3 - расширение продуктов сгорания;

3 - 4 - выхлоп продуктов сгорания;

4 - 5 - выталкивание продуктов сгорания - отработавших газов;

5 - 6 - сжатие продуктов сгорания с температурой конца выхлопа;

6 - 1 - изохорический впуск свежего заряда, нагрев его от теплоты при сжатию отработавших газов до температуры воспламенения топлива и воспламенением его после впрыска, или до температуры ниже температуры воспламенения в случае топливо-воздушной смеси с последующим воспламенением от свечи зажигания.

Для анализа влияния на температуру нагрева рабочей среды (воздуха или топливо-воздушной смеси), в процессе изохорического впуска 6 - 1 от степени рециркуляции ОГ, воспользуемся следующими формулами:

$$\sigma_{6-1} = \frac{P_1}{P_6} \quad \text{- степень сжатия в процессе впуска;}$$

$$\sigma_{5-6} = \frac{P_6}{P_5} \left( \frac{a_0 - b_0}{a_0} \right)^n \quad \text{- степень сжатия отработавших газов;}$$

$$T_6 = T_5 \left( 1 + \frac{b_0}{a_0} \right)^{n-1} \quad \text{- температура отработавших газов в процессе сжатия;}$$

$$T_1 = \frac{k \cdot T_{\text{вх}} \cdot T_6 \cdot \sigma_{6-1}}{T_6 \cdot (\sigma_{6-1} - 1) + k \cdot T_{\text{вх}}} \quad \text{- температура впуска рабочего газа в мёртвый объём камеры сгорания ОГ;}$$

где:

$a_0$  - мёртвый объём или объём камеры сгорания;

$b_0$  - объём оставшегося количества ОГ;

$n$  - коэффициент политропы процесса;

$T_{\text{вх}}$  - температура рабочего газа после компрессора;

$P_1$  - давление рабочего газа после компрессора.

Удобство предложенной методики заключается в том, что в качестве основного характеристического параметра рабочего цикла принята температура рабочего тела и отработавших газов. Это в первом приближении позволяет оценить и проанализировать протекающие процессы.

Для того, чтобы воспользоваться данными формулами необходимо установить взаимосвязь между  $a_0$ , мёртвым объёмом в детандере, который определяется как отношение  $a_0 = V_{a_0} / V_H$ , и степенью сжатия в двигателе  $\epsilon$ , которое представляет отношение:

$$\epsilon = \frac{V_0}{V_{a_0}} = \frac{V_{a_0} + V_H}{V_{a_0}}$$

В результате несложных преобразований:

$$\epsilon = 1 + \frac{1}{a_0} \quad \text{или} \quad a_0 = \frac{1}{\epsilon - 1}$$

Пример расчета температуры нагрева сжатого воздуха для двигателя с следующими рабочими параметрами:

-  $\epsilon = 11$ ;

-  $a_0 = 1/(\epsilon - 1) = 1/(11 - 1) = 0,1$ ;

-  $T_{\text{вх}} = 383 \text{ K (110 °C)}$  - температура входа воздуха;

-  $P_1 = P_c \cdot \epsilon^k = 1 \cdot 11^{1,41} = 29,4 \text{ кг/см}^2$  - давление входа воздуха в двигатель;

-  $T_c = T_{\text{вх}} \cdot \epsilon^{k-1} = 300 \cdot 11^{0,41} = 802 \text{ K (530 °C)}$ ;

-  $T_a$  - температура воздушной смеси на входе в двигатель;

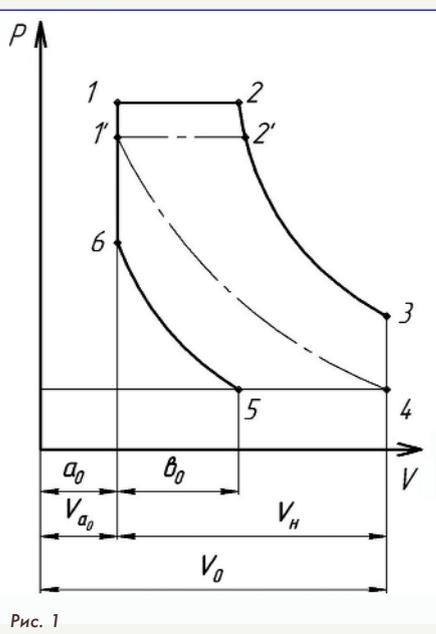


Рис. 1

- $P_5 = 1,2 \text{ кгс/см}^2$  - давление остаточных газов (ОГ);
- $T_5 = 1300...1500 \text{ К}$  - температура остаточных газов;
- $T_c = 300 \cdot 11^{0,41} = 801 \text{ К}$  (528 °С);
- $G_{6-1} = P_1/P_0$ .

Определим давление конца сжатия:

$$P_6 = P_5 \left( 1 + \frac{b_0}{a_0} \right)^k$$

Таблица 2

При $b_0$	0,2	0,3	0,4
Получаем $P_6$ , кгс/см <sup>2</sup>	4,7	7,0	9,67
Получаем $G_{6-1}$	6,25	4,2	3,0

Определим  $T_6$ :

$$T_6 = T_a \left( 1 + \frac{a_0}{b_0} \right)^{k-1} = 1400 \left( 1 + \frac{b_0}{a_0} \right)^{0,41} = 1400 \left( 1 + \frac{0,2}{0,1} \right)^{0,41} = 2196,5 \text{ К} (1923,5 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

$$T_6 = 1400 \left( 1 + \frac{0,3}{0,1} \right)^{0,41} = 2470 \text{ К} (2198 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

$$T_6 = 1400 \left( 1 + \frac{0,4}{0,1} \right)^{0,41} = 2703 \text{ К} (2430 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Определим  $T_1$

$$T_1 = \frac{0,41 \cdot 2196,5 \cdot 383 \cdot 6,25}{2196,5 \cdot (6,25 - 1) + 383 \cdot 1,41} = 618 \text{ К} (345 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Результаты расчета сведем в таблицу 3.

Таблица 3

$b_0$	0,2	0,3	0,4	
$P_6$ , кгс/см <sup>2</sup>	4,7	7,0	9,67	
$T_6$ , К/°С	2196,5/1923,5	2470/2198	2703/2430	
$T_1$ , К/°С	618/345	650/378	736/463	при $T_{вх}=110^\circ\text{C}$
$T_1$ , К/°С	700/425	738/465	843/570	при $T_{вх}=135^\circ\text{C}$

Результаты расчета при  $T_{вх} = 185 \text{ } ^\circ\text{C}$  сведены в таблицу 4.

Таблица 4

$b_0$	0,2	0,3	0,4
$P_6$ , кгс/см <sup>2</sup>	4,7	7,0	9,67
$T_6$ , К	2196,5	2470	2703
$T_1$ , К	853	913	1053
$T_1$ , °С	580	640	780

Пример расчета температуры  $T_1$  сжатого воздуха для двигателя со следующими рабочими параметрами:

- $\epsilon = 16,5$  - степень сжатия двигателя - дизель;
- $a_0 = 1/(16,5 - 1) = 0,0645$ ;
- $T_{вх} = 383 \text{ К}$  (110 °С) - температура входа воздуха;
- $P_1 = 1,2 \cdot (16,5)^{1,41} = 62,5 \text{ кгс/см}^2$ ;
- $T_c = T_a \epsilon^{k-1} = 1200 \text{ К}$  (927 °С) - температура и давление от сжатия воздуха в двигателе;
- $T_5 = 1000 \text{ К}$ ;
- $P_5 = 1,2 \text{ кгс/см}^2$ .

Результаты сведены в табл. 5

Таблица 5

$b_0$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$P_6$ , кгс/см <sup>2</sup>	4,5	8,77	13,8	19,44	25,8
$T_6$ , К	1468	1783	2034	2245	2434
$G_{6-1}$ , К	13,88	7,13	4,52	3,2	2,42
$T_1$ , К	582	628	695	785	921,2
$T_1$ , °С	310	355	422	512	650
$T_1$ , °С ( $T_{вх}=135^\circ\text{C}$ )	380	437	520	630	800

Выполненные расчеты, обобщенные и отраженные на графике (рис. 2) показывают и подтверждают возможность реализации такого способа работы двигателя, при этом достигается улучшение экологических параметров ДВС, особенно благодаря снижению  $\text{NO}_x$ :

- обеспечивается нагрев до необходимых температур сжатого воздуха от теплоты сжатого рециркуляционного количества

отходящих газов (их диапазон в зависимости от организации цикла может изменяться от  $b_0 = 0,2$  до  $0,4$ );

- достигается возможность использовать энергию отходящих газов, не участвующих в процессе рециркуляции для предварительного сжатия воздуха, например, с помощью газовой турбины;
- упрощается конструктивная схема, так как отпадает необходимость в рекуперативном теплообменнике;
- улучшаются температурные условия работы клапана впуска.

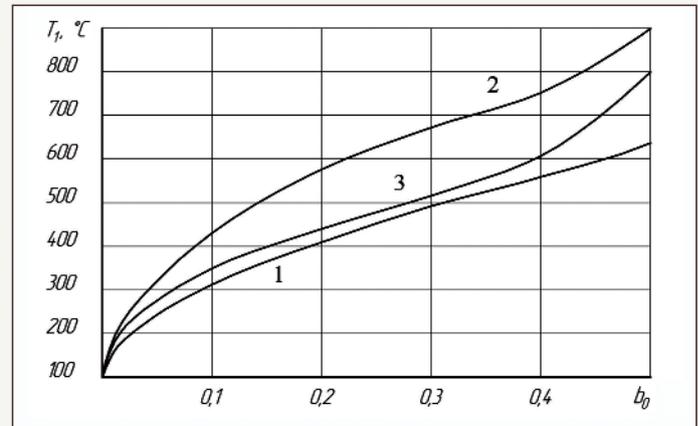


Рис. 2 Зависимость температуры  $T_1$  смеси воздуха и отработавших газов от степени внутренней рециркуляции  $b_0$ :  
 1 - по данным табл. 3:  $\epsilon = 11,0$ ;  $P_1 = 29,2 \text{ кгс/см}^2$ ;  $P_2 = 1,2 \text{ кгс/см}^2$ ;  $T_{вх} = 135 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  
 2 - по данным табл. 4:  $\epsilon = 11,0$ ;  $P_1 = 29,2 \text{ кгс/см}^2$ ;  $P_2 = 1,2 \text{ кгс/см}^2$ ;  $T_{вх} = 185 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  
 3 - по данным табл. 5:  $\epsilon = 16,5$ ;  $P_1 = 62,5 \text{ кгс/см}^2$ ;  $P_2 = 1,2 \text{ кгс/см}^2$ ;  $T_{вх} = 110 \text{ } ^\circ\text{C}$

В то же время необходимо особо подчеркнуть, что обозначенные выше положительные свойства предложенного способа достигаются путём снижения мощности ДВС, а также работы цилиндрического механизма в более напряжённом температурном режиме. Необходимо подчеркнуть, что падение мощности обусловлено снижением воздушного и топливного зарядов из-за необходимости возврата от 20 до 45 % отработавших газов в рабочий цикл ДВС.

На рис. 3 в координатах  $P - V$  отражен рабочий цикл двигателя с разной степенью остаточных газов в цилиндре  $b_0$  и  $b'_0$ .

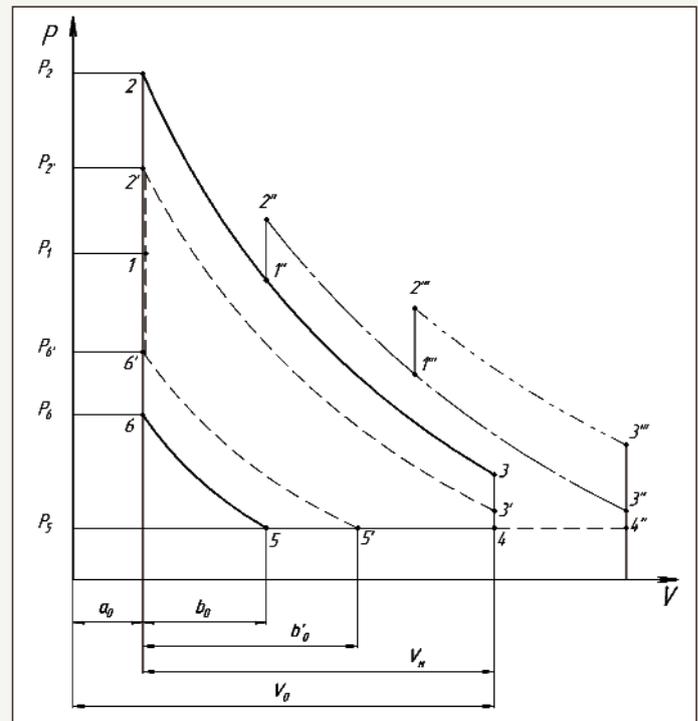


Рис. 3 Рабочий цикл двигателя с разной степенью остаточных газов

Площадь, обозначенная контуром с цифрами 4-5-6-1-2-3-4 - соответствует работе цикла в случае, если степень остаточных газов в цилиндре соответствует  $b_0$ . Рабочий цикл включает сле-

дующие процессы:

- 4-5 - выталкивание ОГ;
- 5-6 - сжатие ОГ;
- 6-1 - процесс наполнения зарядом свежего сжатого воздуха с давлением  $P_1$ , смешение с ОГ и повышение температуры воздуха до  $T_1$  от теплоты ОГ, впрыск топлива;
- 1-2 - изохорное сгорание топливо-воздушной смеси;
- 2-3 - расширение продуктов сгорания;
- 3-4 - выхлоп продуктов сгорания.

Площадь, обозначенная контуром 4-5'-6'-1'-2'-3'-4 - соответствует работе, полученной за цикл при  $b'_0 > b_0$ . Работа, полученная в этом случае, меньше, чем работа в случае с меньшей степенью заполнения цилиндра ОГ, что объяснимо, т.к. количество заряда свежего воздуха будет меньше изохоры наполнения заряда свежего воздуха 1-6' < 1-6.

На том же рис. 3 отражены индикаторные диаграммы, которые показывают путь компенсации потери мощности ДВС, обусловленные процессом внутренней рециркуляции ОГ. Это достигается дополнительными впрысками свежего сжатого заряда воздуха и топлива на определенном этапе расширения горючей (рабочей) смеси. Так, например, в процессе расширения горючей смеси (процесс 2-3) в момент, когда давление расширения  $P_1$  будет меньше давления сжатого воздуха, подаваемого в цилиндр  $P_1$ , производят впрыск свежего заряда воздуха и топлива. Вновь произойдет процесс сгорания 1''-2'' с последующим расширением его количества рабочей смеси.

Регулируя соотношение воздуха и топлива, а также количество впрысков, можно добиться оптимальных условий работы двигателя в широком диапазоне изменения нагрузок и свести к минимальному значению "конфликт" между экономией топлива и экологией при его сгорании.

Правда, для получения наибольшего эффекта, как видно из индикаторной диаграммы такого цикла (4''-5-6-1-2-1''-2''-1'''-2'''-3'''-4''), необходимо увеличить ход поршня. Этот вывод подтверждается также увеличением хода поршня в силовом цилиндре в двигателе с разделенными функциями цилиндров (принцип split-cycle Engine) над созданием которого усиленно работает компания Zojas Motors, а также в статье "Глазами специалиста" С.В. Митрофанова о ДВС, его резервах и перспективах развития, где он, анализируя нетрадиционные рабочие циклы, пишет, "что путь повышения степени сжатия не эффективен и на самом деле степень сжатия следует понижать, а вот степень расширения - увеличивать". Процесс расширения является единственным процессом рабочего цикла, в течение которого совершается полезная работа. Начинается он с началом снижения давления в цилиндре и заканчивается к моменту прихода поршня в НМТ.

На рис. 4 отражена принципиальная конструктивная схема двигателя с разделённым рабочим процессом, которая позволяет реализовать новый способ работы.

Двигатель с разделенным рабочим циклом включает собственно двигатель, состоящий из цилиндра 1, поршня 2, кривошипно-шатунного механизма 3, форсунки 4, клапана выпуска 5 и клапана впуска 6 и многоступенчатый компрессор 7, механически связанный с кривошипно-шатунным механизмом 3 двигателя, и пневматически с клапаном впуска 5 и воздушным турбокомпрессором 8, приводимым в работу тепловой энергией ОГ, поступающих от двигателя после открытия клапана выпуска 6.

Работа двигателя осуществляется следующим образом. По окончании первого такта рабочего цикла в НМТ открывается клапан выпуска 6. При движении поршня 2 от НМТ к ВМТ производят выпуск отработавших газов из цилиндра 1, который выполняют только на части второго такта до момента закрытия клапана выпуска 6, после чего производят сжатие оставшейся рециркуляционной части отработавших газов. В результате сжатия повышается давление и температура отработавших газов. При достижении поршнем 1 ВМТ открывается клапан впуска 5 и в камеру сгорания осуществляют впрыск воздуха с температурой и давлением после конечной ступени многоступенчатого компрес-

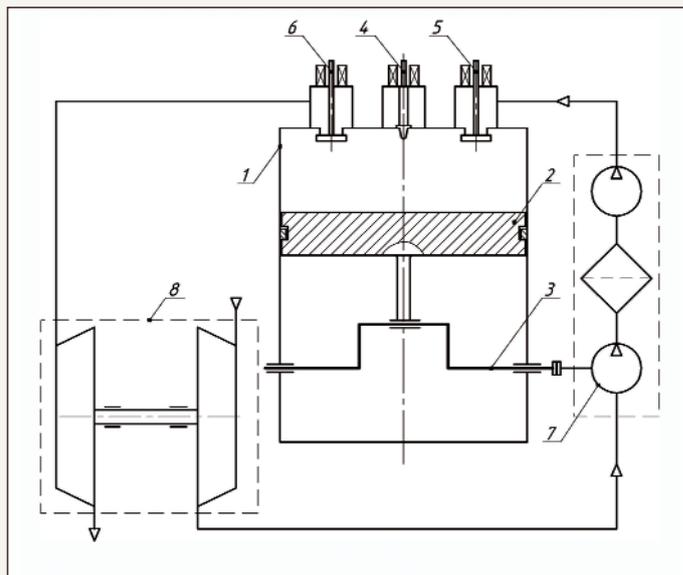


Рис. 4 Принципиальная конструктивная схема двигателя с разделённым рабочим процессом

сора 7, механически соединенного с кривошипно-шатунным механизмом 3 двигателя. В результате впуска производят нагрев заряда сжатого воздуха до температуры воспламенения топлива теплотой от сжатия рециркуляционной части отработавших газов. После заполнения камеры сгорания зарядом сжатого воздуха закрывают клапан впуска 5, после чего на первом такте вначале осуществляют впрыск топлива, сгорание рабочей смеси, а далее в процессе её расширения производят дополнительную подачу заряда сжатого воздуха и впрыск топлива, сгорание и расширение всего количества рабочей смеси до конца первого такта, который продолжается до НМТ, где открывается клапан выпуска 6 и часть отработавших газов в процессе выталкивания, совершаемой на части второго такта, поступает в турбокомпрессор 8, где под действием энергии отработавших газов происходит первоначальное сжатие воздуха, который подается на вход компрессора 7, где производится окончательное сжатие воздуха работой, отбираемой от двигателя. После закрытия клапана выпуска 6 вновь происходит процесс сжатия оставшегося количества отработавших газов в цилиндре 1 и цикл повторяется.

Таким образом, термодинамическую эффективность двигателя удастся повысить как путём получения дополнительной работы в процессе расширения, так и снижения затрат мощности на сжатие воздуха благодаря использованию для первоначального его сжатия тепловой энергии в турбокомпрессоре части отработавших газов, полученных в процессе выпуска.

В зависимости от режима работы двигателя для получения оптимальных энергетических показателей регулируют как количественное соотношение дополнительных порций воздуха и топлива, так степень рециркуляции отработавших газов, а также и количество дополнительных впрысков воздуха и топлива.

Как показывают выполненные расчеты, если в объём камеры сгорания соответствующий степени сжатия двигателя ( $\varepsilon = 10...15$ ) одновременно подавать и сжатые отработавшие газы, оставшиеся в цилиндре в количестве от 15 до 45 %, и воздух с давлением порядка 2,5...5,0 МПа и температурой 130...180 °С (403...453 К), то только от теплоты сжатых отработавших газов температура образующей смеси может составить соответственно от 550 до 800 °С (823...1072 К), что гораздо выше температуры воспламенения дизельного топлива, которое, как известно, лежит в интервале от 250 до 350 °С (523...623 К). В тоже время хорошо известно, что эффективная доля рециркуляционного потока ОГ в современных ДВС составляет для легковых автомобилей до 50 %, а для грузовых от 10 до 30 %, что позволяет уменьшить  $NO_x$  до 60...70 %, но в тоже время этот эффект достигается путём сокращения мощности ДВС, так как уменьшается заряд свежего воздуха и топлива.

В нашем способе этот недостаток устраняется организаци-

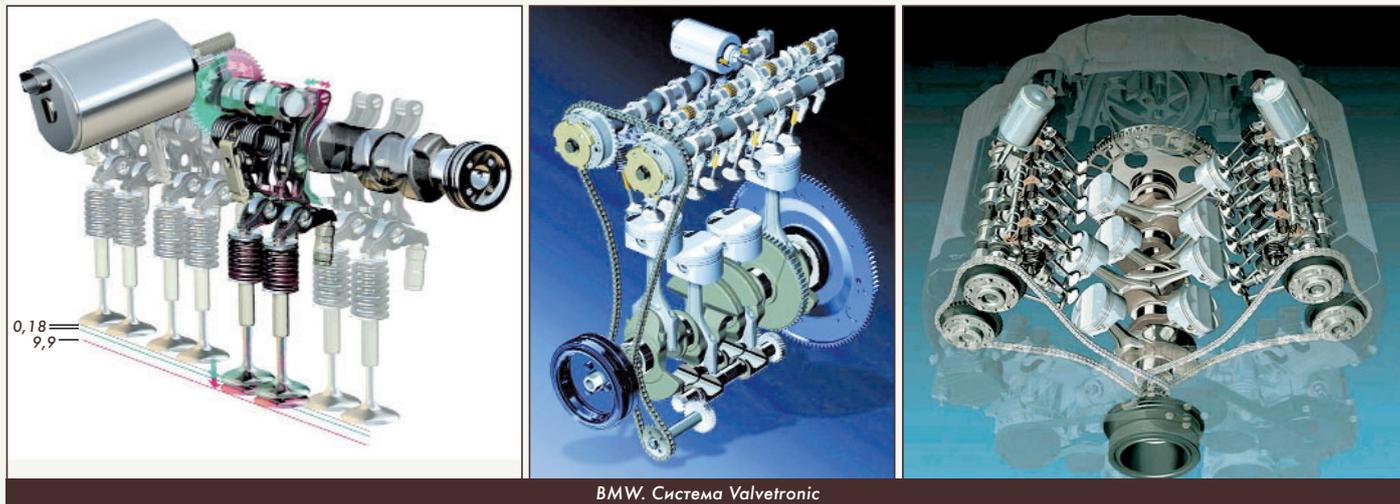
ей дополнительных впрысков порций топлива и воздуха на рабочем такте в процессе расширения смеси. Как видно из рис. 3, максимальная эффективность достигается в случае увеличения хода поршня по сравнению с традиционным ходом.

Кроме того, процессы впрысков порций сжатого воздуха и топлива сопровождаются генерацией вихревого движения воздушного заряда, что позволяет снизить задержку воспламенения, обеспечить высокую скорость процесса горения и уменьшить вероятность образования температурно-концентрационных неоднородных зон, что в итоге позволяет уменьшить удельный расход топлива и способствует существенному снижению выделения сажи и оксидов азота в отработавших газах.

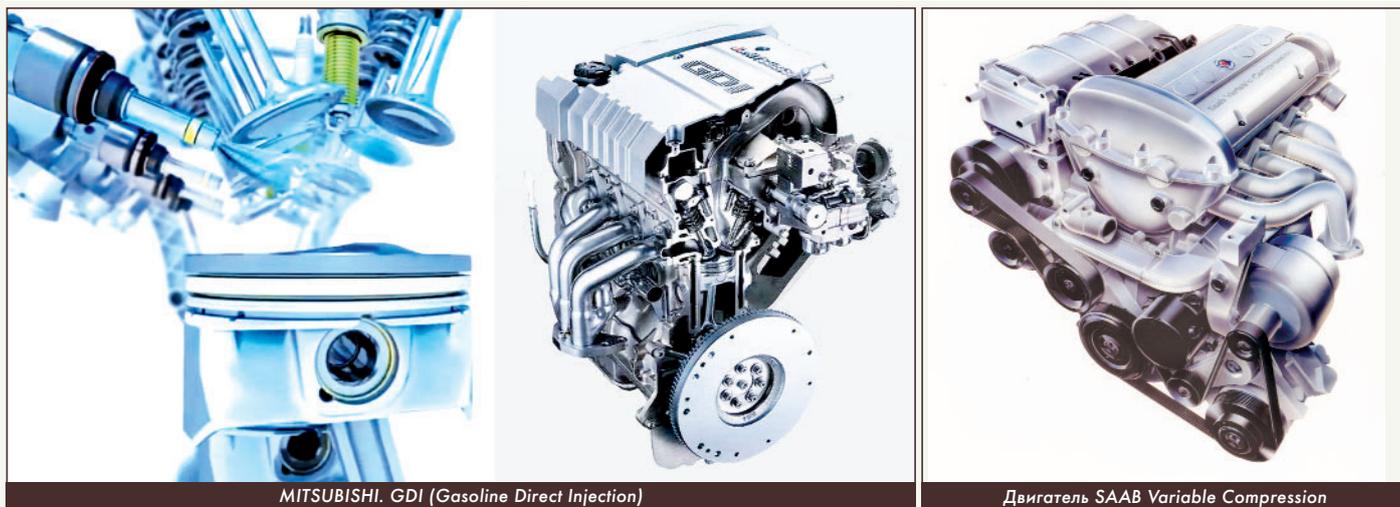
Таким образом, предлагаемый способ работы и принципиальная конструктивная схема двигателя позволяют создать ДВС с разделённым циклом рабочего процесса, способный обеспечить перспективные нормы по выбросу токсичных продуктов, сохраняя при этом высокую эффективность. **П**

**Литература**

1. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей.
2. Тер-Мкртчян Г.Г. ДВС с нетрадиционными рабочими процессами.
3. Митрофанов С.В. Итоги рассмотрения классического ДВС.
4. Орлин А.С. Двигатели ДВС, том 1, том 2.
5. Патенты - 2206774, 2286470, 2246625, 2516046.

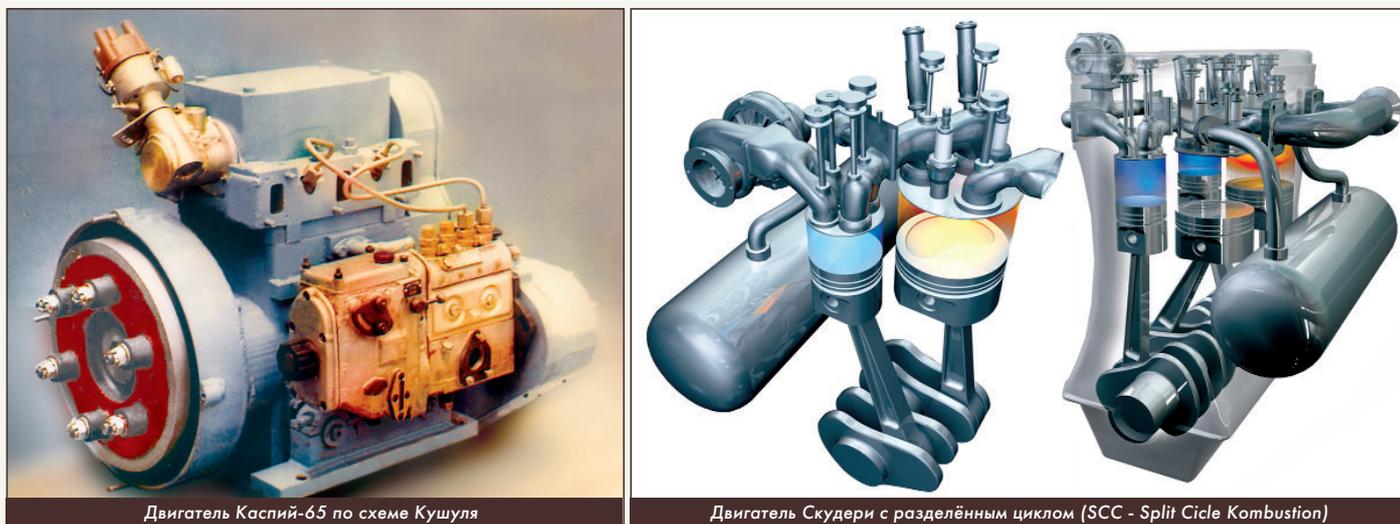


BMW. Система Valvetronic



MITSUBISHI. GDI (Gasoline Direct Injection)

Двигатель SAAB Variable Compression



Двигатель Каспий-65 по схеме Кушуля

Двигатель Скудери с разделённым циклом (SCC - Split Cycle Combustion)

# МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

## СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ. КЕРОСИНЫ

Александр Иванович Бажанов, академик МИА

Николай Юрьевич Кочетков, к.т.н., старший преподаватель ФГБОУ ВО "МАИ (НИУ)"

Анатолий Алексеевич Сперанский, вице-президент РИА, DExpert ISCED, академик РИА и МИА

**В данной статье даются описания и составы рабочих тел, необходимых для замыкания математических расчетных моделей, построенных на принципах механики сплошных сред. Приводятся характеристики современных российских и американских керосинов, используемых в настоящее время в жидкостных ракетных двигателях этих стран. Дается сравнительный анализ свойств этих керосинов, где выделяются преимущества и недостатки.**

**This article provides descriptions and compositions of working bodies necessary for the closure of mathematical calculation models based on the principles of continuum mechanics. The characteristics of modern Russian and American kerosene currently used in liquid rocket engines of these countries are given. A comparative analysis of the properties of these kerosene is given, where advantages and disadvantages are highlighted.**

**Ключевые слова:** механика сплошных сред, метод горячей визуализации, турбулентность.

**Keywords:** continuum mechanics, working fluid, kerosene, fuel characteristics.

Механика сплошных сред - наука прикладная. И как любая прикладная наука она для замыкания математической расчетной модели, построенной на её же принципах, требует в качестве дополнительных условий знания свойств рабочего тела. Применительно к ЖРД - это различные окислители и горючие. К любым ракетным топливам (рабочим телам) предъявляется ряд требований, касающихся их эксплуатационных характеристик, по теплотворной способности, низкотемпературным и антикоррозийным свойствам, стабильности и т.д. Использование углеводородных горючих в ракетной технике связано с тем, что они обладают высокой теплотой сгорания, производятся в широких масштабах нефтеперерабатывающей промышленностью и не вызывают каких-либо серьезных затруднений при их применении. Основным углеводородным горючим для ракетных двигателей на сегодняшний день является керосин. Как ракетное горючее, в паре с жидким кислородом керосин широко используется для одной или нескольких ступеней многих ракетно-носителей. Керосин получают на основе дистиллятов прямой перегонки нефти и продуктов крекинга, и, соответственно, его состав зависит от химического состава и способа переработки нефти, из которой он получен.

Практика показала, что в одной марке топлива невозможно сочетать требования, предъявляемые к реактивному топливу современной авиацией. Поэтому было создано несколько марок топлив, каждая из которых имеет определенные преимущества по эксплуатационным свойствам с учётом стоимости и ресурсов производства. Все эти марки изготавливаются по стандартам тех стран, в которых они получают и используются, и могут не соответствовать требованиям для двигателей других стран.

Актуальность проблемы состоит в том, что освоение космического пространства имеет международный характер, и соответственно в ракетных двигателях, приобретённых в другой стране, например, в РД-180, которые поставляются Россией в США, используются керосины не из страны производителя, на которых проводились испытания, а собственные марки, что может стать определенной проблемой.

При этом известно, что основные марки ракетных топлив для России - это Т-1 и РГ-1, а для США - JP-5 и RP-1. Поэтому важным аспектом являются их свойства и характеристики, на основании которых можно определить есть ли существенные различия между российскими марками керосинов и американскими.

### Основные марки керосинов

#### 1. Керосин Т-1

Горючее Т-1 (ГОСТ 10227-86) было разработано Институтом нефтехимических процессов им. Ю.Г. Мамедалиева НАН Азербайджана при участии ЦИАМ. Это было первое отечественное стандартное реактивное горючее. В настоящее время топливо выпускают только первого сорта и очень ограниченно. Сырьём

для производства могут служить дефицитные сорта нефти с ничтожным содержанием серы (нефти Северного Кавказа и Азербайджана). Сырьём для производства керосина Т-1 в СССР служили нефтепромыслы Баку и Сахалина. Т-1 было основным ракетным топливом для линейки советских ракет серии Р-7. Использовался в ЖРД РД-107, РД-108.

Горючее Т-1 это бесцветная или слегка желтоватая жидкость с запахом нефтепродуктов, получаемая путем прямой перегонки нефти малосернистых сортов нафтенового основания. Горючее Т-1 содержит большое количество нафтеновых кислот, из-за чего имеет высокую кислотность, поэтому после выделения фракции из нефти её подвергают защелачиванию с последующей водной промывкой.

Состав горючего описывается приближенной формулой  $C_{7,2}H_{13,6}$ . Энтальпия образования  $\Delta H_{обр} = -1958$  кДж/кг.

Горючее Т-1 почти на 100 % состоит из достаточно эффективных горючих элементов, практически не содержит балластных элементов и потому, несмотря на довольно низкое значение энтальпии, обеспечивает получение достаточно высокого удельного импульса топлива; применяется в сочетании с кислородом. Горючее Т-1 не самовоспламеняется с кислородом и другими окислителями, поэтому применяют специальные пиротехнические устройства или пусковые горючие, самовоспламеняющиеся с кислородом. Оно обладает достаточно хорошими теплофизическими свойствами как теплоноситель для охлаждения камеры сгорания двигателя.

В горючем, несмотря на очистку, содержится некоторое количество побочных соединений, содержащих серу, кислород, азот, имеется некоторое количество олефинов и довольно значительное - ароматиков, и при использовании продукта для охлаждения стенок сопла, где тепловые потоки очень велики, возможно образование твердых отложений на стенке. Это ведет к резкому, на несколько сотен градусов, перегреву стенки и возможности ее прогара, что является серьезным препятствием для создания ЖРД с большим ресурсом службы (в т.ч. многоразовых ЖРД).

Горючее Т-1 не агрессивно к конструкционным материалам; углеродистая сталь, алюминиевые сплавы являются весьма стойкими материалами. Емкости для хранения и транспортировки горючего изготавливаются из углеродистой стали. Достаточно широк выбор пластических материалов, стойких в контакте с горючим.

Подводя итог, можно выделить следующие достоинства горючего Т-1: достаточно хорошие энергетические возможности и физические характеристики, в том числе высокая температура кипения, не агрессивность к материалам, слабая токсичность, экологически безопасные продукты горения, низкая стоимость.

#### 2. Керосин РГ-1

В дальнейшем, начиная с МБР Р-9 для двигателей РД-111 - первая ступень, РД-461 - вторая ступень, было решено перейти на специально разработанный для применения в космической

сфере ракетное горючее керосин РГ-1 (нафтил). Соответственно, для двигателя третьей ступени РН "Союз-У" РД-0110, как потомка РД-461, также стал применяется керосин РГ-1.

Возможность перехода на РГ-1 рассматривалась как в плане унификации горючих на различных двигателях, так и в плане увеличения удельного импульса тяги двигателей. Испытания показали, что при переводе двигателей с горючего Т-1 на РГ-1 не наблюдается увеличения удельного импульса. Дальнейшие работы по переходу на горючее РГ-1 были прекращены.

Состав горючего описывается приближенной формулой  $C_{12,3}H_{23,9}$ . Энтальпия образования  $\Delta H_{обр} = -1810$  кДж/кг.

Данное горючее не отличается от продукта Т-1 по внешним признакам, но имеет существенно иной групповой состав: в нем очень малое содержание ароматических углеводородов и практически отсутствуют олефины. С учетом этого получается несколько большим соотношением Н/С.

Горючее получают путем насыщения водородом (гидрогенизации) богатых ароматиками продуктов прямой перегонки специальных сортов нефти, благодаря чему ароматические углеводороды почти полностью переводятся в нафтенy, одновременно происходит отщепления сернистых и кислородосодержащих соединений.

Благодаря этому горючее РГ-1 обладает, по сравнению с Т-1, такими достоинствами, как:

- значительно более высокая термоокислительная стабильность, соответственно лучше охлаждающие свойства;
- более "узкий" фракционный состав при такой же, примерно, средней температуре испарения ( $T_{50\%}$ );
- лучшие кинетические свойства в процессе горения;
- выше температура вспышки (~60 °С);
- несколько выше плотность.

В энергетическом отношении горючие Т-1 и РГ-1 практически равноценны.

Стоимость РГ-1 примерно в 1,5 раза выше, чем Т-1.

### 3. Керосин JP-5

Первым шагом в области создания перспективных углеводородных горючих является получение деароматизированных нефтяных дистиллятов. При удалении ароматических углеводородов улучшаются энергетические и почти все эксплуатационные свойства горючих. Деароматизированные горючие имеют более высокую теплоту, скорость и полноту сгорания, более высокую стабильность, лучшие низкотемпературные свойства и др. К такому виду горючего относятся горючие под маркой JP-X. Топлива этой серии использовались на американских ракетах "Найк" и "Атлас".

Топливо JP-5, относится к марке деароматизированных горючих, его получают путём прямой перегонки продуктов термического и каталитического крекингов, гидрокрекингом. Температура начала кристаллизации горючего повышена до -40 °С и фракционный состав его более тяжелый по сравнению с другими горючими. Горючее JP-5, как более тяжелое, рекомендуется для сверхзвуковой авиации для скоростей до 3600 км/ч.

Горючее JP-5 как по составу, так и по свойствам примерно аналогично Т-1. Бромное число 5, характеризующее содержание олефинов, здесь равноценно йодному числу 3 с учетом соотношения атомных масс брома и йода.

### 4. Керосин RP-1

Керосин RP-1 рекомендуется для ракетного двигателя, например, двигателя первой ступени ракетносителя "Аполлон", он также используется в РД-180 в США. Керосин RP-1, широко используемый в американских ЖРД в качестве горючего компонента топлив в паре с кислородом - это специальный керосин с повышенным содержанием циклических нафтеновых углеводородов и сниженным содержанием парафиновых, по свойствам он близок к горючему РГ-1. Как показали исследования, циклические углеводороды обладают повышенной термической стабильностью и дают меньше отложений при охлаждении двигателя, чем парафиновые.

Когда керосин RP-1 вырабатывался в небольших количествах,

его свойства были достаточно стабильными, однако с расширением производства физические и химические свойства этого горючего стали меняться от партии к партии в весьма широких пределах.

Состав горючего описывается приближенной формулой  $C_{11,7}H_{22,8}$ . Энтальпия образования  $\Delta H_{обр} = -1769$  кДж/кг.

Повышение содержания парафиновых углеводородов в керосине RP-1, обладающих более низкой термической стабильностью, чем циклические углеводороды, ведет к увеличению склонности керосина RP-1 к коксообразованию, а, следовательно, и к ухудшению охлаждающих свойств. Керосин RP-1 используется в двигателе в качестве охлаждающего агента. Проходя через рубашку двигателя, он нагревается, однако его максимальная температура никогда не достигает 300 °С. Широкие пределы изменения плотности керосина RP-1 осложняют процесс заправки ракет, регулировку двигателей и т.д. В связи с этим были проведены исследования по изысканию синтетических горючих, которые имели бы более стабильные характеристики, чем керосин RP-1, но имели бы близкие к нему свойства. Проведенные исследования показали, что заменителем керосина RP-1 могут служить циклические углеводороды - декалин и алкилдекалины, гомологи циклогексана.

### Основные свойства керосинов

Основные физические свойства углеводородных горючих зависят от их фракционного и углеводородного составов. В условиях применения горючих температура оказывает большое влияние на изменение их физических свойств.

С повышением температуры горючего понижаются его плотность, вязкость, поверхностное натяжение и теплопроводность; одновременно повышаются давление насыщенных паров и теплоемкость.

Также, общим правилом является возрастание плотности, вязкости, температур кипения и замерзания горючего с увеличением, при прочих равных условиях, молекулярной массы углеводородов, входящих в горючее.

### 1. Плотность

Плотность - важнейшая физическая характеристика топлива. Она определяется отношением массы топлива к занимаемому объёму. Плотность реактивного топлива зависит от химического и фракционного состава. При увеличении содержания тяжелых фракций, ароматических углеводородов и уменьшении содержания парафиновых углеводородов плотность топлива повышается.

Таблица 1

Плотность основных марок ракетных топлив при 20 °С и атмосферном давлении

Плотность, г/см <sup>3</sup>	T-1	РГ-1	JP-5	RP-5
		0,82	0,83	0,82

Плотность важна для расчета объёма баков ЖРД. Топливные компоненты должны иметь максимальную плотность, особенно на первых ступенях ракет, т.к. они самые объёмные и имеют мощнейшие РД, с большим секундным расходом.

В ГОСТ на реактивные топлива регламентируется минимально допустимое значение плотности при температуре 20 °С. Плотность товарных партий одного и того же сорта топлива может отклоняться от средней величины примерно на ±15 кг/м<sup>3</sup>.

### 2. Вязкость

Вязкость - свойство жидкости (газа) оказывать сопротивление перемещению под действием внешних сил одной части жидкости (газа) относительно другой.

Таблица 2

Плотности марок Т-1 и JP-5 в зависимости от температуры

t, °С	T-1	JP-5
20	0,819	0,824
30	0,814	0,816
40	0,808	0,809
50	0,801	0,802
60	0,795	0,795
70	0,788	0,788
80	0,781	0,78
90	0,774	0,773
100	0,766	0,766
150	0,728	0,730
150	0,685	0,694

У реактивных топлив вязкость зависит от градиента скоростей - чем больше градиент скоростей в потоке, тем ниже вязкость топлива. Вязкость имеет очень большое значение при учете высокочастотных колебаний в ЖРД. Вязкость гасит турбулентность. Очень вязкие жидкости текут в ламинарном режиме.

Различают динамическую  $\mu$  и кинематическую  $\nu$  вязкости, которые связаны следующим соотношением:  $\nu = \mu/\rho$ ,

где  $\nu$  - кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\mu$  - динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$\rho$  - плотность жидкого топлива,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

В стандартах на топлива предусматривается определение кинематической вязкости, как правило, при температурах 20 и -40 °С.

Таблица 3

Кинематический коэффициент вязкости для основных марок ракетных топлив

Кинематический коэффициент вязкости, $\text{мм}^2/\text{с}$	T-1	РГ-1	JP-5	RP-1
При 20 °С	1,5	4,5	-	-
При -40 °С	16	60	16,4	13,8

### 3. Теплопроводность

Теплопроводность - молекулярный перенос теплоты в теле (или между телами), обусловленный переменностью температурного поля тела (или контактирующих между собой тел). Количественно теплопроводность определяется величиной коэффициента теплопроводности  $\lambda$ .

Экспериментальных данных по теплопроводности реактивных топлив в жидком состоянии очень мало, но реактивные топлива по теплопроводности различаются незначительно.

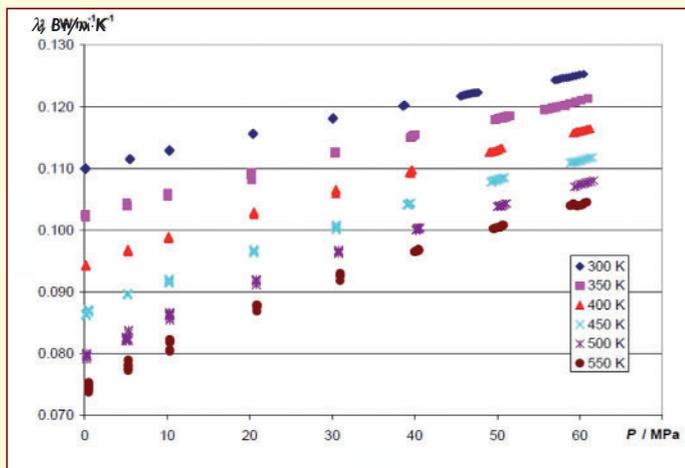


Рис. 1 Коэффициент теплопроводности для RP-1 в зависимости от давления при разных температурах

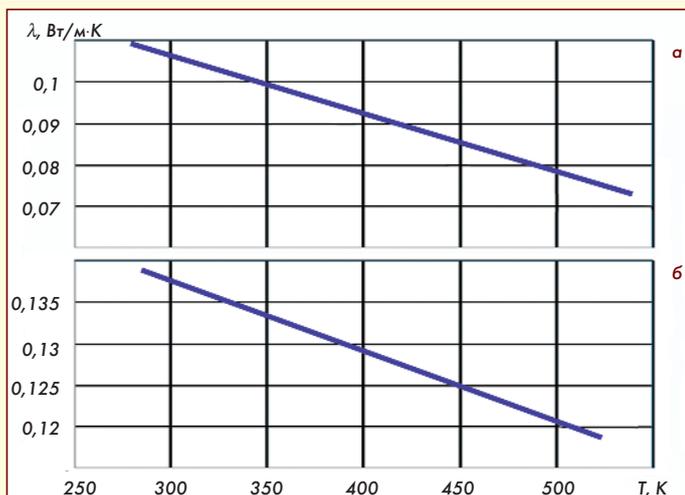


Рис. 2 Коэффициент теплопроводности для T-1 (а) и JP-5 (б)

### 4. Теплоёмкость

Теплоёмкость - отношение количества теплоты, сообщаемой топливу в процессе, к изменению его температуры. Теплоёмкость реактивных топлив зависит от их углеводородного и фракционного состава. Чем больше в топливе парафиновых и олефиновых и меньше ароматических углеводородов, тем выше теплоёмкость топлива. Значение теплоёмкости важно при расчете охлаждения стенок ЖРД. Стандартные реактивные топлива по теплоёмкости различаются незначительно.

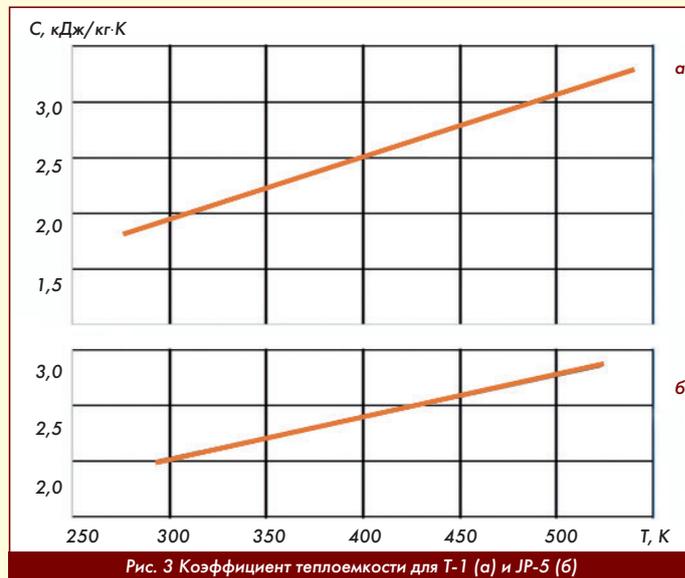


Рис. 3 Коэффициент теплоёмкости для T-1 (а) и JP-5 (б)

### 5. Прочие характеристики топлив

Таблица 4

Характеристики применяемых топлив

Показатели	T-1	РГ-1	JP-5	RP-1	
Температура фракционной перегонки, °С:					
- начало перегонки	150	195	115...189	-	
- перегонка	50 % 98 %	225 270	235 275	210...220 260...290	219 -
Кислотность, мг КОН на 100 мл, <	0,7	0,5	0,5	-	
Йодное число, г $\text{J}_2$ на 100 г горюч., <	2,0	1,0	5 ( $\text{Br}_2$ )	-	
Содержание смол, мг на 100 мл, <	6	-	7	-	
Температура начала кристаллизации, °С, <	-60	-60	-51...-47	-49	
Температура вспышки, °С, >	30	-	60	44	
Общее содержание серы, %, <	0,1	0,01	0,04	-	
Содержание водорастворимых кислот и щелочей, нерастворенной воды, механических примесей, сероводорода	Отс.	Отс.	-	-	
Содержание ароматических углеводородов, %, <	20	5	16...20	-	

Из рассмотренных марок керосинов можно отметить их достоинства и недостатки, а также выделить равенство свойств между некоторыми российским и американскими марками.

Для горючего T-1 будет достоинством следующее:

- достаточно хорошие энергетические возможности и физические характеристики;

- высокая температура кипения;
- не агрессивность к материалам;
- экологически безопасные продукты горения;
- низкая стоимость.

Недостатки:

- несамовоспламеняемость топлив на данном горючем;
- повышенная температура продуктов горения;
- некоторая химическая нестабильность;
- не слишком хорошие охлаждающие свойства;
- дефицитные сорта нефти.

Горючее РГ-1 обладает, по сравнению с Т-1, такими достоинствами, как:

- значительно более высокие охлаждающие свойства;
- более "узкий" фракционный состав при  $T_{50\%}$ ;
- лучшие кинетические свойства в процессе горения;
- выше температура вспышки;
- несколько выше плотность.

В энергетическом отношении горючие Т-1 и РГ-1 практически равноценны, и при переводе двигателей с горючего Т-1 на РГ-1 не наблюдается увеличения удельных импульсов тяг камер сгорания, однако стоимость РГ-1 примерно в 1,5 раза выше чем Т-1.

Горючее JP-5 как по составу, так и по свойствам примерно аналогично Т-1. Но температура начала кристаллизации топлива повышена до  $-40^{\circ}\text{C}$  и фракционный состав его более тяжелый по сравнению с другими топливами.

Керосин RP-1 по свойствам близок к горючему РГ-1.

Среди его недостатков:

- сильное изменение свойств от партии к партии при массо-

вом производстве;

- широкие пределы изменения плотности;
- более плохие охлаждающие свойства.

В связи с этим, можно сделать вывод, что проблемы могут возникнуть при использовании в российских двигателях марки керосина RP-1.

Вообще, можно заметить, что существует общий недостаток для всех типов данного горючего - нечеткая количественная определенность их физико-химических характеристик, определенная нестабильность, что связано с особенностями состава, смесевым характером этих горючих. Данным недостаткам лишены синтетические горючие, состоящие из индивидуальных молекул. Были проведены исследования по изысканию синтетических горючих, которые имели бы более стабильные характеристики, чем керосин RP-1, но имели бы близкие к нему свойства. Проведенные исследования показали, что заменителем керосина RP-1 могут служить циклические углеводороды - декалин и алкилдекалины, гомологи циклогексана.



Связь с авторами: kolabuy@gmail.com

### Литература

1. В.К. Пономаренко. Ракетные топлива. - Спб.: ВИККА им. А.Ф. Можайского, 1995. - 619 с.
2. Я.М. Паушкин. Жидкие и твердые химические реактивные топлива. - М.: Наука, 1978. - 192 с.
3. В.Н. Зрелов, Е.П. Серегин. Жидкие ракетные топлива. - М.: Химия, 1975. - 320 с.
4. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник / Н.Ф.Дубовкин, В.Г. Маланичева, Ю.П. Массур, Е.П. Федоров. - М.: Химия, 1985. - 240с.
5. Велюров, Аркадий. Справочник по авиационным и ракетным керосинам [Электронный ресурс]: справочник. - Науч. поп.сайт пось.вопросам ист. освоения косм. пр. /- режим доступа <http://free-inform.ru/pepelaz/kerosene.htm>
6. Thermophysical Properties Measurements and Models for Rocket Propellant RP-1; Phase I / Joseph W.Magee, Thomas J. Bruno, Daniel G. Friend и др.// NISTR 6646: отчет. - Boulder,CO: NIST, 2008. - 53с.

## ИНФОРМАЦИЯ. Рекорды дальности и ускорения

Команда TUfast Eco, костяк которой состоит из студентов Мюнхенского технического университета, с середины прошлого десятилетия создаёт сверхэффективные электромобили. Это не серийные машины, а экспериментальные, предназначенные для участия в различных соревнованиях и рекордных заездах. В сентябре 2023 г. был продемонстрирован очередной успех: удалось показать лучший в мире запас хода на одной зарядке среди электромобилей без солнечных панелей. Созданный ими электромобиль Muc022, оснащённый батареей ёмкостью 15,5 кВт·ч, проехал 2573,79 км (предыдущий рекорд 2017 г. - 1608,54 км, был установлен американской командой IT Asset Partners).



В основе конструкции кузова электромобили Muc022 лежит углепластиковый монокок, усиленный алюминиевыми панелями с сотовой структурой, масса которого всего 18,6 кг (масса Muc022 без водителя всего 170 кг, а без аккумулятора - 74 кг). Коэффициент аэродинамического сопротивления ( $c_x$ ) всей конструкции снижен до 0,159 при габаритной длине - 3,4 м, ширине - 1,2 м, высоте - 1,0 м. Углепластиковые колёса снабжены тонкими шинами с пониженным сопротивлением качению. Конструкция рулевого

управления взята их авиации - для снижения массы применён тросовый привод. Мощность синхронного электромотора с постоянными магнитами составляет 400 Вт, хотя первоначально на электромобиль было установлено два электромотора мощностью по 440 Вт. Ёмкость аккумулятора - 15,5 кВт·ч. Сама батарея выбиралась исходя из оптимального баланса между её массой (96 кг) и ёмкостью. Средний расход энергии за время пробега составил 0,6 кВт·ч на 100 км. Электромобиль способен разогнаться до 42 км/ч, но во время рекордного заезда скорость была значительно меньше: средняя скорость составила около 26 км/ч. Непосредственно на движение было затрачено 99 часов, но машина периодически останавливалась для смены водителя, поэтому заезд, проходивший в одном из ангаров Мюнхенского аэропорта, продолжался шестеро суток.

Другой рекорд установила сборная инженерная команда, состоящая из студентов Швейцарской высшей технической школы Цюриха и Университета прикладных наук Люцерна и построившая гоночный электромобиль Mythen, который затратил менее 1 с, чтобы достичь 100-километровой скорости.

Борьба за этот рекорд имеет давнюю историю, когда в 2006 г. студенты Швейцарской высшей технической школы Цюриха организовали автоспортивный клуб AMZ (Academic Motorsports Club Zurich), в котором они конструировали гоночные автомобили для участия в студенческих соревнованиях Formula Student, а затем ежегодно участвовали в них на новых моделях.

В 2016 г. ими был создан гоночный электромобиль Grimsel, установивший ми-

ровой рекорд ускорения, разогнавшись с места до 100 км/ч за 1,513 с. Предыдущий рекорд - 1,779 с, был установлен электромобилем студенческой команды Green Team из Штутгарта (улучшение на 0,266 с). Естественно, штуттаровцам захотелось вернуть лидерство, и в 2022 г. они установили рекорд ускорения равный 1,461 с. Разница составила всего 0,052 секунды.

Но в 2023 г. команда AMZ вновь вернулась в лидеры и смогла побить рекорд Green Team, улучшив их время более чем на треть. Созданный ими электромобиль Mythen WR разогнался до 100 км/ч за 0,956 с, преодолев при этом всего 12,3 метра. Перегрузка при этом достигла 3,81 g.

Теперь про электромобиль Mythen, масса которого составила 137 кг. Все его колёса имеют собственные электромоторы суммарной мощностью 240 кВт (326 л.с.). Для улучшения сцепления колёс с поверхностью на машине установлен вентилятор, отсасывающий воздух из-под днища автомобиля. Благодаря этому была создана дополнительная сила, прижимающая колёса электромобиля к земле в момент старта.



# МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

## ТЕРМОДИНАМИКА

### ВЯЗКО-УПРУГИХ СВОЙСТВ И САЖЕОБРАЗОВАНИЯ

Александр Иванович Бажанов, академик МИА

Николай Юрьевич Кочетков, к.т.н., старший преподаватель ФГБОУ ВО "МАИ (НИУ)"

Анатолий Алексеевич Сперанский, вице-президент РИА, DExpert ISCED, академик РИА и МИА

**Данная статья является логическим продолжением начатого ранее цикла "Механика сплошных сред", где авторы излагают новые достижения по этой важной для науки и практической деятельности. В новой подборке авторы стараются представить, в основном, оригинальные материалы, лишь иногда обращаясь к традиционным, что позволяет не нарушать преемственность. В настоящей работе изложены расчётные исследования основополагающих параметров термогазодинамики и молекулярной физики. Это – вязкость и сжимаемость (упругость), на которых базируются многие смежные специальности.**

**This article is a logical continuation of the previously started series "Continuum Mechanics", where the authors present new achievements in this important scientific and practical activity. In the new collection, the authors try to present mainly original materials, only occasionally turning to traditional ones, which allows them not to disrupt continuity. This paper presents computational studies of the fundamental parameters of thermogas dynamics and molecular physics. These are viscosity and compressibility (elasticity), on which many related specialties are based.**

**Ключевые слова: вязкость, сжимаемость, упругость, сажеобразование.**

**Keywords: viscosity, compressibility, elasticity, soot formation.**

Значение термодинамики среди других наук весьма велико, так как почти все явления природы в той или иной степени связаны с процессами преобразования энергии. Она дает возможность описать сложные системы со многими внутренними степенями свободы с помощью небольшого числа переменных. Особенно термодинамика важна в двигателестроении. Работа любого двигателя, например, ДВС, используемого в автомобильной промышленности, авиационного двигателя (ВРД, ГТД и др.), ракетного двигателя (ЖРД, РДТТ и др.) связана с преобразованием энергии, с тепловыми процессами и т.д. Всё это как раз изучает термодинамика.

Ракетный двигатель - очень сложное изделие, и работает в тяжёлых условиях. Температура в камере сгорания (КС) составляет тысячи градусов, а скорость газового потока достигает нескольких Махов. Чтобы смоделировать такую сложную термодинамическую систему используются специальные программы, такие как Астра.4/рс, RPA (Rocket Propulsion Analysis) и др.

В основу алгоритма многоцелевого программного комплекса Астра.4/рс положен универсальный термодинамический метод определения характеристик равновесия произвольных гетерогенных систем, основанный на фундаментальном принципе максимума энтропии. Этот метод предоставляет уникальную возможность обобщенного описания любого высокотемпературного состояния с помощью одних только фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия.

#### Исследование сжимаемости в продуктах сгорания

В данной работе было проведено исследование зависимости сжимаемости продуктов сгорания относительно других характеристик. Сжимаемость - одно из основных свойства газового потока. Она вместе с вязкостью определяют структуру турбулентного движения.

#### Исходные данные.

Расчёт проводился на базе жидкостного ракетного двигателя в многоцелевом программном комплексе Астра.4/р.

Параметр	Значение
Давление в КС, МПа	24,5
Давление в выходном сечении сопла, МПа	0,072
Диаметр минимального сечения сопла, мм	235,5
Горючее	Керосин C <sub>12,3</sub> H <sub>23,9</sub>
Энтальпия образования горючего, кДж/кг	-1810
Окислитель	Кислород O <sub>2</sub>
Энтальпия образования окислителя, кДж/кг	0
Коэффициент избытка окислителя	1,6

Таблица 1

На основании ранних разделов были проведены расчёты.

Для расчёта использовались следующие формулы:

- для расчёта сжимаемости:  $B = 1/(\rho^2 a^2)$ ;

- для плотности:  $\rho = 1/V$ ;

- для числа Маха:  $M = W/a$ ;

- для удельного акустического импеданса:  $Z = \rho a$ ;

- для показателя адиабаты:  $\kappa = C_p/C_v$ ;

- для расчёта вязко-упругого комплекса:  $(\mu\sqrt{B})/r_{кр}$ .

В результате расчётов было выяснено, что сжимаемость увеличивается при увеличении степени расширения сопла. Другие величины, такие как, скорость звука, удельный акустический импеданс и показатель адиабаты уменьшаются. Так же был посчитан критерий, определяющий вязко-упругие свойства потока и построены графики, из которых видно, что он так же зависит от числа Маха и от показателя адиабаты. Соответственно изменяется и сам поток.

По результатам проведенных расчётов можно сделать вывод о том, что сжимаемость может характеризовать различные явления и зависеть от многих параметров, а выражая через неё различные характеристики можно получать полезные для практического анализа зависимости. Сжимаемость - основное свойство сверхзвукового потока и на основании проведенного анализа можно видеть, что с увеличением числа Маха сжимаемость потока растёт. Ещё одно представление сжимаемости - акустический импеданс. С увеличением степени расширения он падает. При этом вязко-упругий критерий растёт.

#### Термодинамические расчёты коэффициентов динамической вязкости и процента содержания сажи в продуктах реакции

Вязкость - одно из основных свойств газового потока. Она вместе с сжимаемостью определяют структуру турбулентного движения. Вязкость гасит турбулентность. Она имеет очень большое значение при учёте высокочастотных колебаний в ЖРД, так как наличие неустойчивости приводит к вибрациям и механическому разрушению конструкций, локальным оплавлением стенок, нестабильности тяги.

Сажа может образовываться при использовании углеводородных горючих. И, например, при использовании горючего для охлаждения стенок сопла, где тепловые потоки очень велики, возможно образование твёрдых отложений на стенке. Это ведет к резкому, на несколько сотен градусов, перегреву стенки и возможности её прогара. Это является серьезным препятствием для создания ЖРД с большим ресурсом службы (в т.ч. многозачетных).

ЖРД), а также двигателей с высоким давлением в камере и тепловыми нагрузками. Наличие сажи влияет на величину вязкого трения. Поэтому при исследовании вязких потоков необходимо тщательно изучать наличие сажи на стенках.

Для рассмотрения зависимости коэффициента динамической вязкости продуктов сгорания от изменения коэффициента избытка окислителя, а также изменение процента образования сажи, был использован многоцелевой программный комплекс Астра.4/рс.

В основу данной программы положен универсальный термодинамический метод определения характеристик равновесия произвольных гетерогенных систем, основанный на фундаментальном принципе максимума энтропии. Этот метод предоставляет уникальную возможность обобщённого описания любого высокотемпературного состояния с помощью одних только фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия.

**Исходные данные**

Расчет проводится на базе одной камеры 4-камерного жидкостного ракетного двигателя в многоцелевом программном комплексе Астра.4/рс v.1:17.

Таблица 2

Параметр	Значение
Давление в КС, МПа	15,7
Давление в выходном сечении сопла, МПа	0,1
Горючее	Керосин РГ-1 (C <sub>12,3</sub> H <sub>23,9</sub> )
Энтальпия образования горючего, кДж/кг	-1810
Окислитель	Кислород O <sub>2</sub>
Энтальпия образования окислителя, кДж/кг	0
Коэффициент соотношения компонентов, ок/г	2,34

В результате расчёта были получены зависимости коэффициентов динамической вязкости и процентов сажи для различных участков двигателя (табл. 3). Так же были построены графики этих зависимостей (рис. 1, 2).

В результате проведённых расчётов можно сделать следующие выводы для одной камеры двигателя:

1. Изменение коэффициента динамической вязкости для КС и критического сечения имеет одинаковый характер и близкие значения, в то время как на срезе сопла наблюдается совершенно отличный от первых двух графиков рисунок. Вязкость ПС в сопле самая минимальная в сравнении с КС и критическим сечением. В общем случае с увеличением коэффициента избытка окислителя

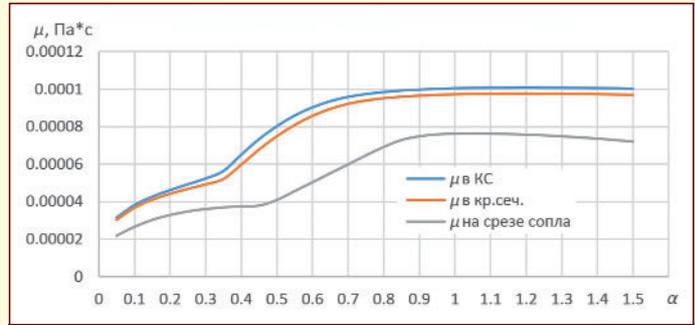


Рис. 1 Изменение коэффициента динамической вязкости от α

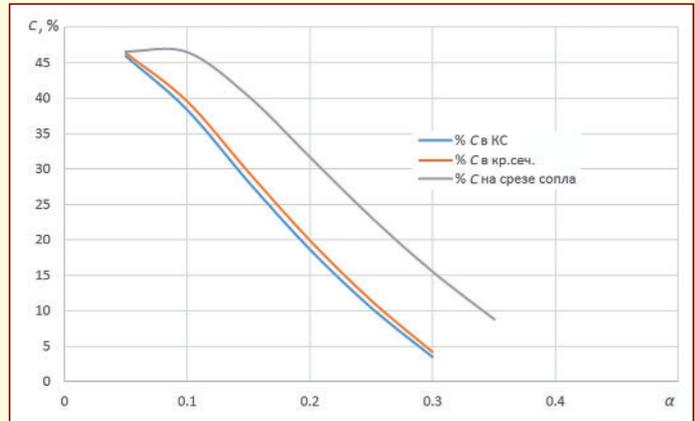


Рис. 2 Изменение содержания сажи от α

значение μ увеличивается, достигая максимума при α ≈ 1, далее значение μ очень медленно уменьшается (рис. 1).

2. Изменения количества сажи для КС и критического сечения также имеет одинаковый характер и близкие значения, в то время как на срезе сопла наблюдается совершенно отличный от первых двух графиков рисунок. Количество сажи в сопле самое максимальное в сравнении с КС и критическим сечением. В общем случае, с увеличением коэффициента избытка окислителя значение процента содержания сажи уменьшается, достигая минимума при α ≈ 0,3 для КС и критического сечения и при α ≈ 0,35 для среза сопла, далее образование сажи практически прекращается. Отсюда можно сделать вывод о том, что, чем больше топлива по отношению к окислителю, тем больше процента содержания сажи. □

Таблица 3

α	o/f	Коэф. динам. вязкости μ (Па·с)			Сажа (С), %		
		КС	Критическое сечение	Срез сопла	КС	Критическое сечение	Срез сопла
0,05	0,17	0,0000315	0,0000303	0,0000219	45,9348	46,4076	46,5771
0,1	0,34	0,0000382	0,0000367	0,0000266	38,3386	39,5770	46,4848
0,15	0,511	0,0000427	0,0000410	0,0000303	28,1720	29,5980	40,2432
0,2	0,681	0,0000462	0,0000442	0,0000329	18,6523	19,9771	31,6451
0,25	0,851	0,0000493	0,0000468	0,0000348	10,4186	11,4913	23,1282
0,3	1,021	0,0000524	0,0000492	0,0000361	3,46692	4,22306	15,4406
0,35	1,191	0,0000564	0,0000521	0,0000370			8,74963
0,4	1,361	0,0000651	0,0000597	0,0000375			
0,45	1,532	0,0000734	0,0000678	0,0000379			
0,5	1,702	0,0000803	0,0000749	0,0000409			
0,55	1,872	0,0000860	0,0000809	0,0000456			
0,6	2,042	0,0000904	0,0000858	0,0000503			
0,65	2,212	0,0000937	0,0000895	0,0000551			
0,7	2,382	0,0000960	0,0000922	0,0000598			
0,75	2,553	0,0000975	0,0000940	0,0000646			
0,8	2,723	0,0000986	0,0000952	0,0000691			
0,85	2,893	0,0000994	0,0000960	0,0000728			
0,9	3,063	0,0000999	0,0000966	0,0000748			
0,95	3,233	0,0001003	0,0000970	0,0000758			
1,0	3,403	0,0001006	0,0000973	0,0000762			
1,05	3,574	0,0001008	0,0000975	0,0000763			
1,1	3,744	0,0001009	0,0000976	0,0000762			
1,15	3,914	0,0001009	0,0000977	0,0000760			
1,2	4,084	0,0001010	0,0000977	0,0000757			
1,25	4,254	0,0001009	0,0000976	0,0000753			
1,3	4,424	0,0001009	0,0000976	0,0000748			
1,35	4,595	0,0001008	0,0000975	0,0000742			
1,4	4,765	0,0001007	0,0000974	0,0000736			
1,45	4,925	0,0001006	0,0000972	0,0000728			
1,5	5,105	0,0001004	0,0000970	0,0000720			

**Литература**

4. А.Н. Голиков, Ю.М. Кочетков, Ю.С. Свиричук, В.Б. Федотов. Электродуговые плазмотроны Центра Келдыша // Двигатель. 2005. № 1.

Связь с авторами: kolabuy@gmail.com



# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ):

**Юрий Михайлович Кочетков**, д.т.н., профессор

**Николай Юрьевич Кочетков**, к.т.н., старший преподаватель

*Предоставляемая читателю статья является результатом многолетних трудов авторов, посвященных сложнейшей проблеме, стоящей на переднем плане науки уже несколько сотен лет, но так до конца и не решенной – проблеме турбулентности. В ней изложены известные экспериментальные методы, которые в настоящее время применяются для изучения процессов турбулентности в двигательных и энергетических установках. Представлены результаты визуальных наблюдений, полученных при исследовании различных сложных пространственных течений, характеризующих турбулентность.*

*The article provided to the reader is the result of many years of work by the authors devoted to the most difficult problem that has been at the forefront of science for several hundred years, but has not been completely solved – the problem of turbulence. It outlines well-known experimental methods that are currently used to study turbulence processes in propulsion and power plants. The results of visual observations obtained during the study of various complex spatial currents characterizing turbulence are presented.*

**Ключевые слова:** турбулентное течение, теневая визуализация воздушных потоков, сажемазевый метод, метод горячей визуализации.

**Keywords:** turbulent flow, shadow visualization of air flows, carbon black method, hot visualization method.

Следует констатировать, что на сегодняшний день нет окончательной замкнутой теории турбулентности, хотя в силу эпистемологических представлений, этому нет объяснений. Высочайшая востребованность, доступность современного лабораторного и методического оснащения, а главное беспрецедентная актуальность, тем не менее, на сегодняшний день не дали желаемого результата. Очень многие великие ученые посвятили свое творчество этой проблеме. Проведено огромное число различных опытов, испытаний, разработано множество математических моделей и теорий, тем не менее, проблема остается на зачаточном уровне. Особенность турбулентности заключается в её быстро-текучести и мелко-масштабности. Именно этим осложнено экспериментальное воспроизведение процесса. Привычный инструментарий не срабатывает. Газодинамические методы не успевают зафиксировать процесс. На повестку выходят различные методы, основанные на визуализации течений. Для холодных потоков в качестве методов изучения процессов широко используются теневые методы. Большую ценность приобретают альбомы из фотографий, которые получены в результате уникальных экспериментов. Такие коллекции известны. Они не многочисленны, отличаются высоким качеством и охватывают широкий диапазон гидравлических, газодинамических и аэродинамических параметров. Известны альбомы течений жидкости и газа, составленные М. Van Dyke (США) [1], Н. Werle (Франция) [2], Т. Uemura (Япония) [3]. Они охватывают, как правило, только дозвуковые, либо простейшие (плоские и осесимметричные) сверхзвуковые потоки. Великолепный альбом Г.Ф. Глотова (Россия) [4] составлен для сложнейших аэродинамических течений вблизи узлов и агрегатов летательных аппаратов, работающих в атмосфере. Подробно представлены картины обтекания сверхзвуковых и гиперзвуковых аппаратов. Для получения качественных фотографий использовались модификации теневого метода: искровой, метод цветных полосовых фильтров, интерферометрический, метод лазерного ножа [5] и метод высоковольтного разряда. А так же использовались методы визуализации с помощью сажемазевой пленки [6], точно наносимых размываемых красок и метод абляции. Последний метод – абляции – пожалуй является единственным для исследования высокоэнтальпийных потоков. Предлагаемая работа содержит результаты многочисленных экспериментальных исследований процессов турбулентности теплообмена внутренних течений в каналах и соплах, работающих в том числе и на двухфазных потоках. Результаты были получены в процессе решения актуальных задач и проблем ракетной техники и энергетики. Главным методом в этом направлении для исследований был метод горячей визуализации [7], позво-

ляющий получить следы турбулентных потоков на поверхности каналов, изготовленных из полимеров, в основном из фторопласта. Результаты проведенных исследований позволили сформировать новую концепцию турбулентности и объяснить многие неизученные процессы, происходящие в локальных зонах сложных конфигураций изделий.

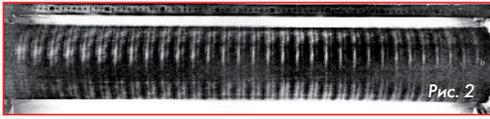
### Визуализация потоков

Разработка любой новой теории должна базироваться на фактах: результатах визуальных наблюдений, прямых и косвенных количественных измерениях, анализе результатов дефектации образцов. Любой исследователь волею неба мечтает заглянуть внутрь изучаемого им процесса, пытается проследить за динамикой его протекания или просто посмотреть на результат. Но не всегда это возможно. Часто невозможно ни то, ни другое, ни третье. Физикам, изучающим элементарные частицы, это не удается, и поэтому они вынуждены ставить мысленный эксперимент, призывая на помощь логику, выдумку и изобретательность. А вот физикам-оптикам и гидромеханикам это удастся. В своей замечательной книге "Альбом течений жидкости и газа" профессор Станфордского Университета Милтон Ван-Дайк отмечал, что "...весьма счастливой привилегией является возможность визуализации предмета наших исследований. В литературе по гидромеханике разбросана настоящая сокровищница прекрасных и поучительных фотографий, представляющих собой ценный материал для новых исследований". Многие фотографии явились началом развития новых направлений в газовой динамике и некоторые послужили основанием для научных открытий. Было бы неправильно в этой связи не вспомнить замечательную картину обтекания цилиндра потоком газа с различными числами Рейнольдса и превосходную дорожку Кармана, замыкающую многообразие промежуточных стадий перехода течения от спокойного ламинарного к развитому турбулентному (рис. 1).



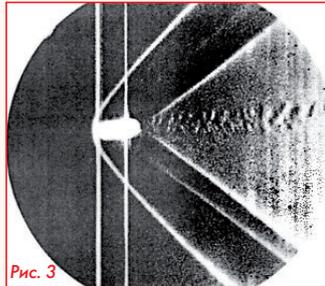
Поражает своей идеальной регулярностью картина движения жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами – непод-

вижным внешним и внутренним, вращающимся с постоянной угловой скоростью. Эта картина иллюстрирует знаменитые вихри Тейлора (рис. 2).

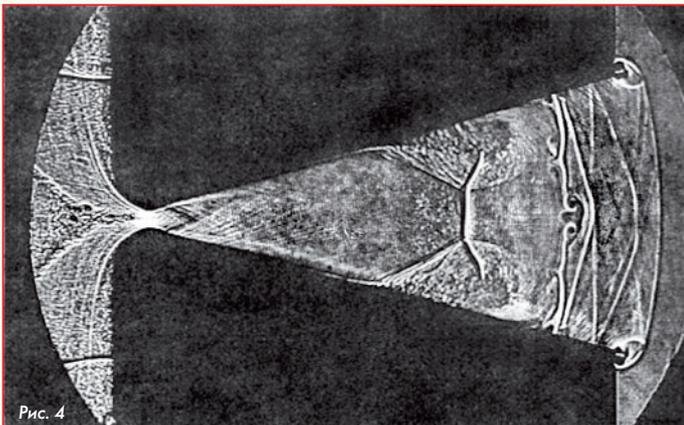


Аналогичные вихри - вихри Тейлора-Гертлера могут возникать при обтекании криволинейных поверхностей с положительным градиентом давления.

Революционная для своего времени фотография Эрнста Маха, сделанная в 1888 году шлирен-методом, использование которого позволило зафиксировать в сверхзвуковом полете латунную пулю, выпущенную из стрелкового оружия в воздухе. На фотографии четко отпечатались прямой и косой скачки уплотнения, а также волны Прандтля-Майера в кормовой части (рис. 3).



И еще одна из всего многообразия приведенных в книге профессора Ван-Дайка картин, поражающая воображение - это картина течения при запуске сверхзвукового сопла (рис. 4).



Остается радоваться везению исследователя, которому удалось в кратчайший интервал времени пребывания, равный одной стотысячной секунды, зафиксировать последовательность прекрасных газодинамических метаморфоз. Методы визуализации широко применяются в гидромеханике, аэро- и газодинамике при изучении внешних течений, среди которых обтекание корпусов кораблей, самолетов и ракет. Наиболее распространенными и надежными считаются шлирен-метод Теллера, метод теневых фотографий, метод парового экрана и метод интерферограмм. Для исследования внутренних течений эффективен метод масляных покрытий.

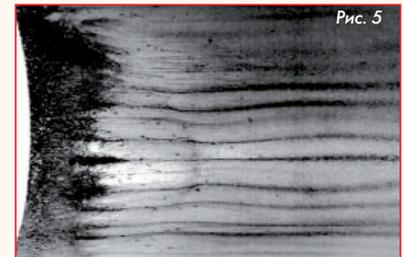
При исследовании процессов, происходящих в соплах ракетных двигателей возникает сложная техническая задача диагностики течений, связанная с уникальными особенностями рабочего тела. Их три: высокая температура  $T_k$ , высокий окислительный потенциал  $B_m$  и существенная доля конденсированных частиц  $Z$ . В соплах ракетных двигателей твердого топлива типичны области с пространственной структурой течения, обусловленные чисто конструкторскими особенностями, а также особенностями, возникающими в результате разгара стенок. Для исследования течения и тепломассообмена в соплах и каналах ракетных двигателей был разработан эффективный метод горячей визуализации, основанный на принципе уноса массы сублимирующих материалов (метод уноса массы). Экспериментально было показано, что для исследований процессов этим методом, наиболее удобным и технологичным является фторопласт-4. Авторами было проведено более тысячи различных испытаний на модельных двигателях твердого топлива с различными сверхзвуковыми соплами, каналами и органами управления. Было получено несколько сотен отпечат-

ков, иллюстрирующих динамику разгара и относительный уровень скоростей уносов. Анализ результатов испытаний позволил в дальнейшем разработать математические модели, инженерные методики и расчетные программы. Наиболее интересные и четкие фотографии в виде рельефных узоров приведены в данной работе. Целью работы является систематизация имеющегося в этом направлении опыта. Она предназначена для специалистов по термогазодинамике и теплоэрозионному состоянию материалов современных ракетных двигателей, а также преподавателям высших специальных заведений как иллюстративный материал.

Может быть эта работа кого-то наведет на философские размышления, кому-то поможет осмыслить новые процессы, а кого-то - пересмотреть свои взгляды.

**Сажемазевый метод. Течение за уступом**

Сажемазевый (сажемасляный) метод был разработан для исследования внутренних и внешних течений вблизи обтекаемых поверхностей рабочих стенок. На исследуемую поверхность предварительно наносился тонкий слой мази ЦИАТИМ, перемешанной с порошком графита. Под воздействием воздушного потока мазь распределялась в соответствии с направлением линий тока. При турбулентном течении выстраивалась весьма сложная, даже замысловатая структура. По сформированным на поверхности картинам можно было судить о характере течения. К разработке и развитию сажемазевого метода исследования были причастны российские естествоиспытатели: В.Н. Наумов, Г.Ф. Глотов, К.Н. Жуков, В.В. Миронов. Наумов тщательно исследовал процесс обтекания утолщенного сопла в РДТТ. Глотов и Мороз исследовали течение за уступом [6]. В дальнейшем Жуков и Миронов повторили их эксперименты в более широком диапазоне параметров (рис. 5).



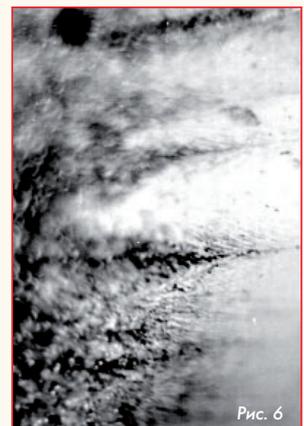
Эксперименты, проведенные на газодинамической установке в целях исследования образования и развития трехмерных структур за уступом сажемазевым методом имели следующие параметры: давление в камере  $P_k = 7$  МПа; время работы  $\tau_{\text{роб}} = 10$  с; число Маха перед уступом  $M_{\text{уст}} = 2,59$ . Уступ выполнен в виде ступеньки высотой  $H = 10$  мм. Расчетная толщина пограничного слоя в этом месте  $\sigma_{\text{вс}} = 2,5$  мм.

На фотографии, сделанной после эксперимента, видны четко выраженные области сгущения смеси термостойкой смазки и графитового порошка. Между сгущениями располагаются светлые продольные полосы, в которых смесь практически отсутствует. Непосредственно за уступом видна затененная зона с нетронутым слоем покрытия, которая по величине примерно в 2...3 раза больше высоты уступа.

Размеры сгущений и области с обедненным визуализируемым составом с некоторого момента по длине не изменяется. Расстояние между сгущениями на протяжении всей длины сопла держится постоянным с периодом, зависящим от высоты уступа.

Область непосредственно за уступом была увеличена. На фотографии (рис. 6) представлено увеличенное изображение её границы.

Здесь покрытие имеет вид исходного покрытия с практическим отсутствием каких-либо следов растекания. Своего внешнего вида эта область практически не изменила, а толщина слоя осталась в этом месте первоначальной. Далее наблюдается отрывная зона с относительно низким уровнем скоростей, перехо-



дящая в область присоединения потока. На поверхности в этом месте появляются поперечные вторичные течения, отображающиеся на сажемазевой картине периодически расположенными узловыми и седловыми точками.

**Метод горячей визуализации**

Для исследования турбулентных конфигураций в сложных каналах предлагается использовать экспериментальный метод горячей визуализации в сочетании с теоретическим анализом и математическим описанием полученных результатов.

Суть метода заключается в организации условий, при которых высокоэнтальпийный газовый поток оставляет след на исследуемой уносимой поверхности. При этом в качестве уносимого материала используются полимерные материалы, свойства которых подчиняются законам линейного пиролиза. При этом скорость разрушения и уноса материала практически прямо пропорциональна тепловому потоку. Предварительные эксперименты проводились для различных материалов с указанными свойствами: фторопласт 4, полиметилметакрилат, винипласт, а также некоторые стеклопластики и графиты. Прделанная работа показала, что фторопласт-4 - самый подходящий материал для созданной установки при выбранных временных и температурных условиях эксперимента.

Важным аспектом исследований является кратковременность процесса. Правильный подбор времени разгара обеспечивает четкую мгновенную фиксацию трехмерной структуры, исключает наложение одной газодинамической картины на другую, а также нивелирует влияние образовавшихся следов в материале на последующую структуру течения.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны модельные РДТТ, ЖРД, а также была специально доработана модельная установка на базе плазмотрона типа "Звезда" [8] (рис. 7). Исследуемые сопла были выполнены разборными и, как правило, имели стакан, в который закладывался фторопластовый образец, имитирующий натурное сопло или канал.

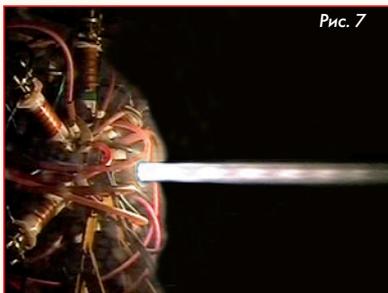


Рис. 7

Вкладыш критического сечения сопла выполнялся из материала с низкой скоростью уноса по сравнению с фторопластом исследуемого образца. Описанная конструкция позволяет исследовать разнообразные конфигурации каналов и сопел, многократно на одной рабочей части производить запуски при обтекании рабочих стенок высокоэнтальпийным потоком. Оставленные после воздействия горячего газа отпечатки на поверхности стенок дают возможность визуализировать рельефные структуры течения непосредственно вблизи них. Замеры геометрии полученных узоров позволяют построить профили уносов вдоль образующих и по окружности.

Ниже приводятся результаты некоторых из многочисленных наиболее эффектных экспериментов, проведенных на описанных установках.

1. Пристенное течение в зоне закритической ямы в модельном сопле РДТТ. На рис. 8. показана динамика развития разгаров по времени. Характерным является наличие в потоке продольных винтовых структур. Это-вихри Тейлора-Гёртлера, которые по теории появляются на вогнутых криволинейных поверхностях.

2. Течение вдоль внутренней поверхности камеры сгорания модельного ЖРДМТ. Здесь был зафиксирован процесс развития пограничного слоя. Отпечатались следы ламинарного течения, переходящие в волны Толмина-Шлихтинга и далее следы торсионного течения в виде ячеистых структур, расположенных в шахматном порядке (рис. 9).

3. Турбулентное течение у поверхности критического вкладыша модельного сопла при работе на плазмотроне. На рис. 10 представлена фотография поверхности в области трансзвуковой

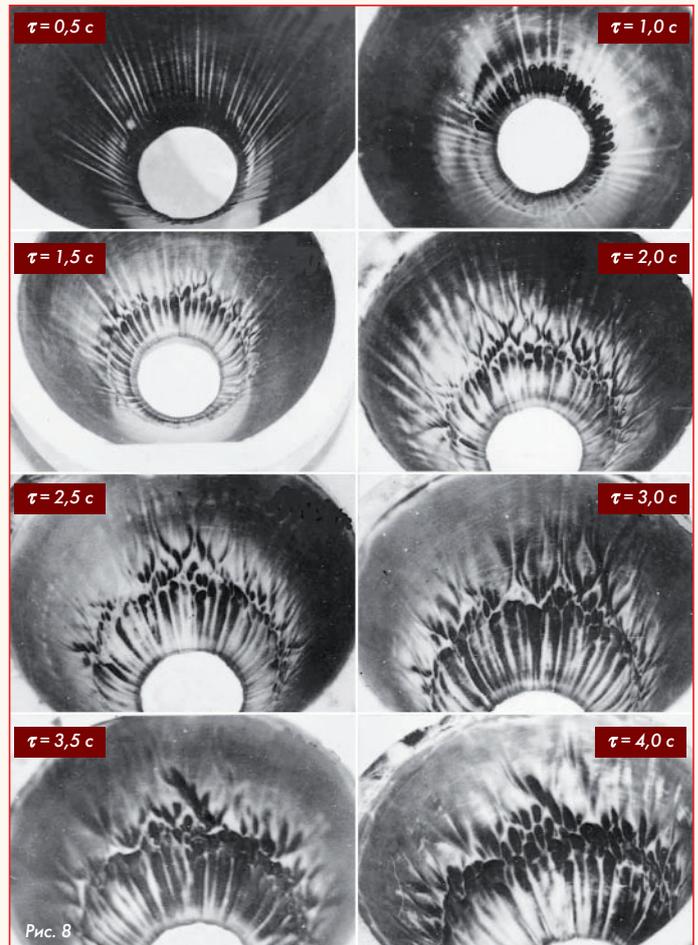


Рис. 8

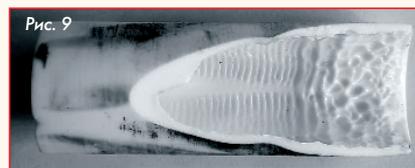


Рис. 9



Рис. 10

части сопла, то есть в зоне перехода потока через звук ( $M = 1$ ). Рельефная поверхность в этом месте весьма замысловатая и напоминает прижатые друг к другу следы тигровых лап. Авторы оставляют читателям возможность объяснения данного феномена.

Представленные экспериментальные методы на сегодняшний день являются наиболее востребованными и используются для составления математических моделей и разработки новых теорий. □

**Литература**

1. М. Ван-Дайк. Альбом течений жидкости и газа. М. Мир. 1986 г.
2. Werle H. Le tunnel Hydrodynamique au service de la recherche. Aerospatiale/. - Office National d'Etudes et Recherches Aeronautiques&Double No. 156. 1974
3. Uemura T, Instant High-speed Photography and Photonics. - XIII International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Tokio, Japan, 1979.
4. Г.Ф. Глов. Аэротермодинамика летательных аппаратов в фотографиях. г. Жуковский, ЦАГИ, 2003 г.
5. Боровой В.Я., Иванов В.В., Орлов А.А., Харченко В.Н. Визуализация обтекания модели с помощью лазерного ножа - "Ученые записки ЦАГИ", т.4, №5, 1973 г.
6. Глов Г.Ф., Мороз Э.К. Продольные вихри в сверхзвуковых течениях с отрывными зонами. - "Ученые записки ЦАГИ", и.VIII, №4, 1977 г.
7. А.И. Бажанов, Н.Ю. Кочетков, А.А. Сперанский. Механика сплошных сред. Метод горячей визуализации // Двигатель. 2023. № 1-3.
8. А.И. Бажанов, Н.Ю. Кочетков, А.А. Сперанский. Механика сплошных сред. Применение плазмотронов для экспериментального решения задач газовой динамики // Двигатель. 2023. № 1-3.

Связь с авторами: swgeorgy@gmail.com



**XXVII Московский  
международный  
Салон изобретений  
и инновационных  
технологий**

**АРХИМЕД**

**19 - 21 марта 2024**



**КОНКУРСНАЯ ПРОГРАММА:**

**Международная выставка изобретений,  
новых продуктов и услуг**

**Презентация высокотехнологичных  
проектов**

**Международная выставка товарных  
знаков «Товарный знак - Лидер»**

**Международная научно-практическая  
конференция «Актуальные вопросы  
изобретательской, и патентно-  
лицензионной деятельности»**

**Заявки на участие принимаются  
до 1 марта 2024 года**

**105187, г.Москва, ул.Щербаковская, д.53, к.В,  
ООО «АрхимедЭкспо»,**

**Телефон/факс:  
+7(495) 366-14-65  
+7(495) 366-03-44**

**e-mail: [mail@archimedes.ru](mailto:mail@archimedes.ru)  
[www.салон-архимед.рф](http://www.салон-архимед.рф)**

**[www.салон-архимед.рф](http://www.салон-архимед.рф)**



# ЗАРУБЕЖНЫЕ АВИАЦИОННЫЕ ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ САМОЛЁТОВ

(ЧАСТЬ 5, ОКОНЧАНИЕ,  
НАЧАЛО В ЖУРНАЛЕ "ДВИГАТЕЛЬ" №130-136, 145-147)

ГЛАВЫ ИЗ КНИГИ ПРОФЕССОРА В.А. ЗРЕЛОВА

ФГАОУВО "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва":

**Владимир Андреевич Зрелов**, д.т.н., профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов

## 9 Affinity

Компания GE Aviation 17 октября 2018 г. представила новый турбовентиляторный двигатель Affinity (рис. 19.1), который предполагается установить на перспективный сверхзвуковой пассажирский самолёт AS2, разработкой которого с 2014 г. занимается компания Aerion Corporation.

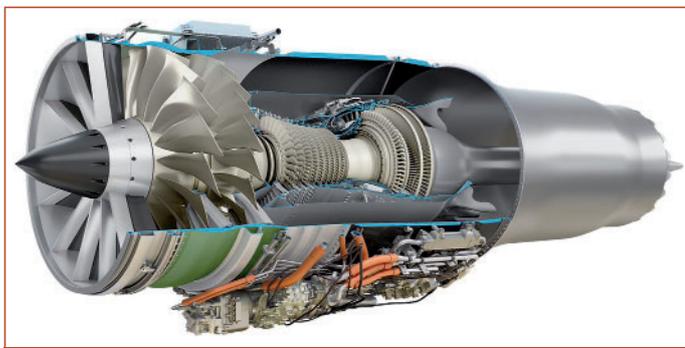


Рис. 19.1 Проект турбовентиляторного двигателя Affinity

Первый заказ на самолёты Aerion получила в 2015 г. от компании Flexjet на 20 самолётов общей стоимостью \$2,4 млрд. Каждый самолёт компания Aerion оценивала в \$120 млн. В марте 2021 г. другая компания Net Jets тоже объявила о приобретении прав на покупку 20 AS2 [201].

По предварительным расчётам, максимальная взлётная масса сверхзвукового самолёта составит 54,8 тонны. AS2 будет оснащён тремя двигателями, тяга каждого из которых, по оценке разработчиков, должна быть 69...89 кН. Самолёт будет рассчитан на перевозку до 12 пассажиров (рис. 19.2) [194].



Рис. 19.2 Проект сверхзвукового пассажирского самолёта AS2

AS2 будет выполнять полёты над водой с крейсерской скоростью  $M = 1,4...1,6$ , замедляясь до  $M = 1,2$  над сушей. Несколько меньшая скорость полёта над сушей в сочетании с особой аэродинамической конструкцией планера позволит, по мнению разработчиков, почти полностью избежать формирования ударных волн. Дальность полёта самолёта на скорости  $M = 1,4$  составит 7,8 тыс. км и 10 тыс. км на скорости  $M = 0,95$ .

Двигатель Affinity сможет обеспечить полёт пассажирского

самолёта на высоте до 18,3 тыс. метров. Разработчик утверждает, что новый двигатель будет эффективно работать на сверхзвуковой и дозвуковой скоростях полёта. Предположительно, новый двигатель будет полностью готов к 2023 году. Aerion планирует провести первый полёт сверхзвукового пассажирского самолёта AS2 в 2024 г. В октябре того же года AS2 должен выполнить первый трансатлантический перелёт, а затем в 2026 г. он поступит в эксплуатацию. Его приурочат к 20-летию со дня последнего полёта французского сверхзвукового самолёта Concorde [195, 196].

Основу двигателя Affinity составляет модифицированный газогенератор турбовентиляторного двигателя CFM56, включающий девятиступенчатый компрессор и одноступенчатую турбину.

Новый двухступенчатый вентилятор, диаметром 133 см (рис. 19.3), оптимизированный для сверхзвуковой скорости, приводится двухступенчатой турбиной низкого давления.



Рис. 19.3 Вентилятор двигателя Affinity

Ближний ротор вентилятора имеет титановые ширококордные лопатки с неподвижными направляющими лопатками. Входной направляющий аппарат имеет поворотную заднюю часть пера. Для снижения лобового сопротивления степень двухконтурности составляет около 3, при этом расход топлива в крейсерском режиме увеличивается на 50 % по сравнению с CFM56-5 [197].

Камера сгорания оснащена передовыми покрытиями и использует аддитивные технологии производства [197]. Смеситель выхлопных газов (рис. 19.4) аналогичен композитной конструкции (ceramic matrix composite) двигателя GE Passport [198].

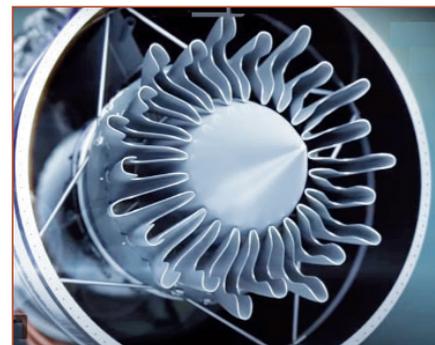


Рис. 19.4 Смеситель потоков внутреннего и наружного контуров

По мнению разработчика, скорость от 1,4 до 1,6 Маха не требует входного устройства с изменяемой геометрией, а сопло переменной площади имеет центральное коническое тело, перемещающееся в осевом направлении (как в советском двигателе РД36-51А для сверхзвукового самолёта Ту-144Д), заменяя сужающееся-расширяющееся сопло (рис. 19.5, 19.6) [199].

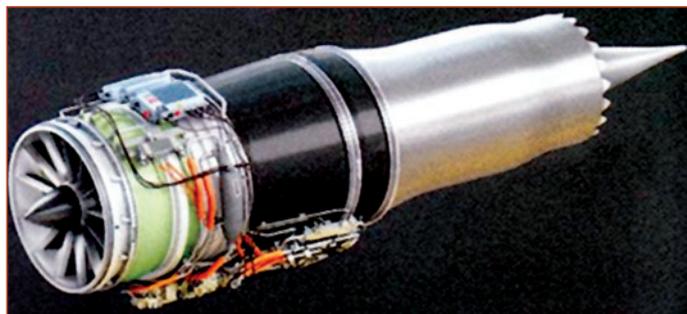


Рис. 19.5 Модель двигателя Affinity



Рис. 19.6 Изображение AS2 со стороны сопел двигателей

Таблица 19.1

Некоторые параметры двигателя Affinity [79, 93, 148 - 151]	
Применение	Aerion AS2
Двигатель	GE Affinity
$P_{\text{макс}}$ , кН (кгс)	71...89 (7242...9078)
$P_{\text{кр.}}$ , кН (кгс)	16 (1632)
$m$	3
$D_{\text{вхл}}$ , м	1,33
Год начала станд. исп.	2023 (проект)

лей GE для коммерческих авиакомпаний" [195].

"Программа Affinity - это, что угодно, только не академическое упражнение. Компания имеет "сотни инженеров", привлеченных к проекту - число, которое может утроиться к концу года и рассматривает Affinity как первого члена нового семейства силовых установок для сверхзвуковых самолетов "средней мощности".

"Мы создаем набор технологий, позволяющие реализовать будущие разработки двигателей Affinity для новых поколений сверхзвуковых самолётов Aerion, включая более масштабные коммерческие применения" [197].

GE внедрила технологии военных и гражданских двигателей в Affinity, который, по данным компании, будет иметь два вентилятора и соответствовать строгим нормам авиационного шума.

В GE Aviation ожидают, что удельный расход топлива двигателями Affinity будет не намного выше или даже сопоставим с расходом топлива современными турбовентиляторными двигателями обычных дозвуковых пассажирских самолётов [196].

"Мы продолжаем проверять конструкцию на соответствие стандартам производительности, установленными Aerion, а также стандартам шума и выбросов, необходимым для достижения долгосрочных целей регулирования", - говорится в сообщении компании GE. Были запланированы испытания конструкции выходного устройства и камеры сгорания" [197].

Однако, из-за пандемии COVID-19 Aerion пришлось перенести дату первого полёта AS2 с 2024 на 2025 г.

Разработка была остановлена, когда Aerion прекратила свою деятельность в мае 2021 г. К этому времени объём невыполненных заказов превысил \$10 млрд [201].

### Заключение

Анализ развития ТРДДФ General Electric свидетельствует, что для компании определяющим фактором являлось создание двигателей, обеспечивающих самолёту-истребителю высокую маневренность, скороподъёмность и завоевание превосходства в воздухе.

Поставленные цели достигаются реализацией жёстких требований по удельной массе двигателей (рис. 19.7), большей тяги в широком диапазоне высоты и скорости полёта (рис. 19.8), надёжности, экономичности, эксплуатационной технологичности и низкой стоимости жизненного цикла.

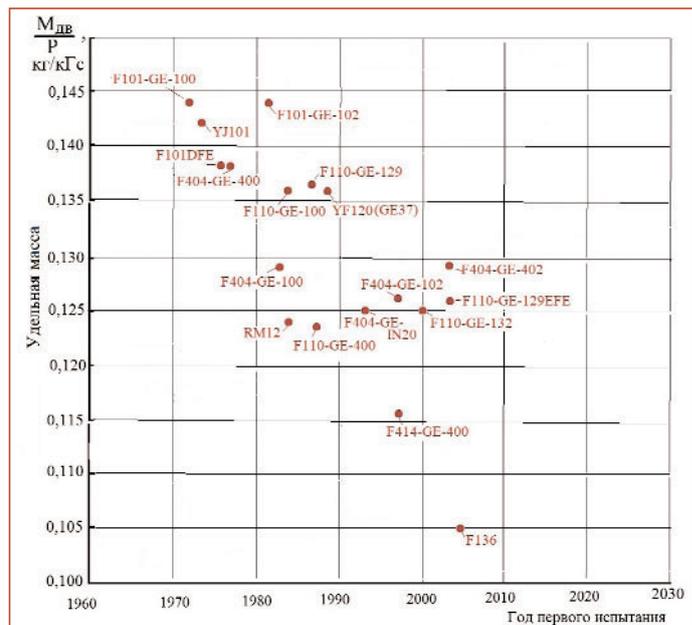


Рис. 19.7 Изменение удельной массы двигателей по годам их создания

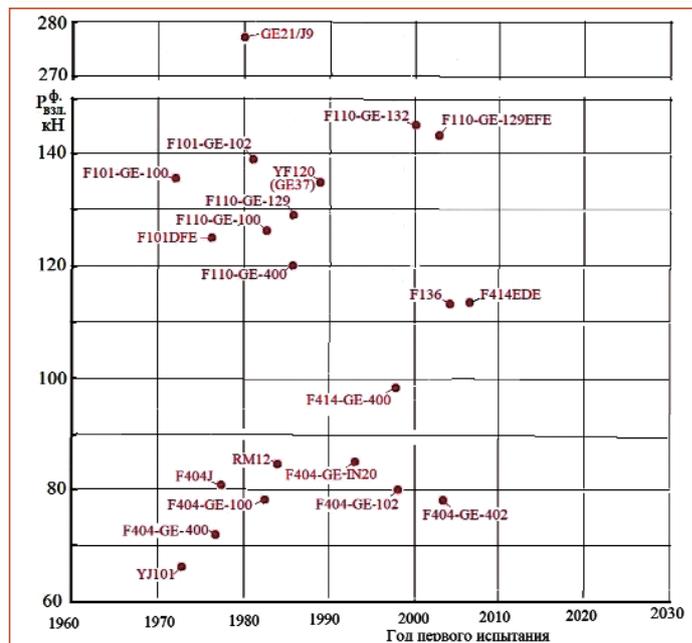


Рис. 19.8 Изменение значения форсажной взлётной тяги двигателей по годам их создания

По значению величины форсажной тяги на взлётном режиме (рис. 19.8) двигатели GE можно разделить на три группы: от 70 до 100 кН (модификации F404), от 100 до 120 кН (модификации F414, F136), от 120 до 160 кН (модификации F110).

Благодаря повышению температуры газов перед турбиной (рис. 19.9), созданию высоконапорных компрессоров (рис. 19.10), совершенствованию систем охлаждения, применению новых материалов и технологий удалось уменьшить количество деталей, снизить удельную массу - за 25 лет примерно в 1,4 раза, а также снизить трудоёмкость изготовления и эксплуатации двигателей.

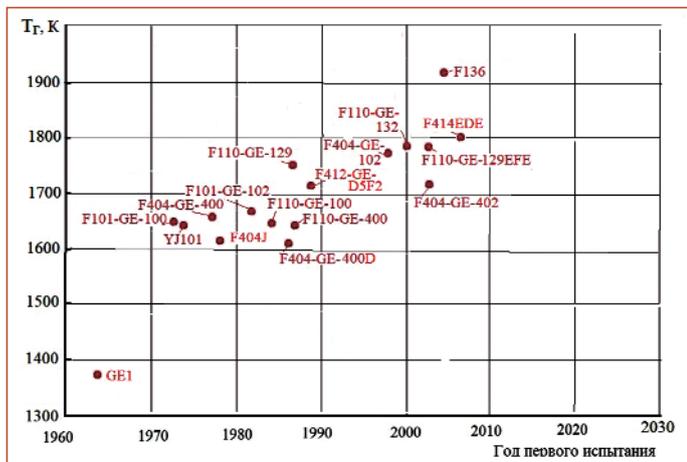


Рис. 19.9 Изменение температуры газа перед турбиной по годам создания двигателей

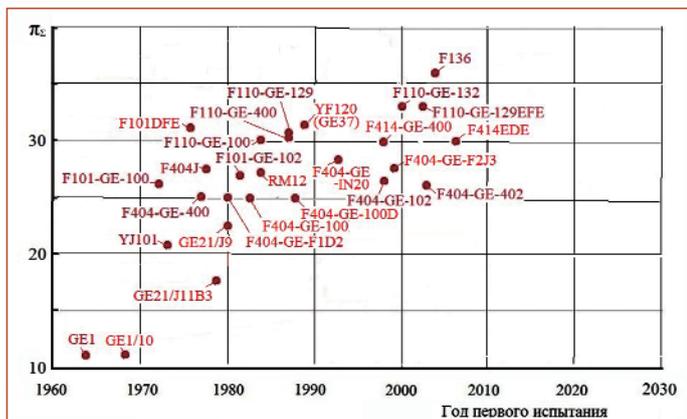


Рис. 19.10 Изменение степени повышения давления за компрессором по годам создания двигателей

В первых ТРДДФ компании General Electric (MF295, F101), разрабатываемых в 1960-е года, стали применяться жаропрочные никелевые и титановые сплавы, охлаждаемые лопатки, кольцевые камеры сгорания, поворотные вертикальные сопла, форсажные камеры.

В 1970-е годы на основе преемственности конструкции, использования принципа единого газогенератора, применения отработанных технических решений, а также новых технологий, материалов и конструкций (модульная конструкция, направленная кристаллизация, порошковая металлургия, методы неразрушающего контроля, низкотемпературные композиты) были созданы модификации F101, F101DFE, F404-GE-400, F404J и другие.

В это время General Electric начинает исследовать возможность создания двигателя изменяемого рабочего цикла (семейство GE21).

Следующее десятилетие (1980-е гг.) характеризуется освоением технологии монокристаллов, теплозащитных покрытий, автоматической вакуумной сварки. Разрабатываются системы автоматизированного проектирования/производства (CAD/CAM), цифрового электронного управления двигателем, широко применяются метод конечных элементов, вычислительная гидродинамика, компьютеризированная цифровая обработка. Создаются малозамасштабные камеры сгорания, малозаметные входные и выходные устройства.

В этот период появляются модификации F404-GE-F1D2, F101-GE-100, F404-GE-100, F110-GE-100, F404-GE-400D, F110-GE-

400, F110-GE-129, F404-GE-100D.

В конструкции ТРДДФ 1990-х гг. General Electric применяет интерметаллиды, керамику для малонагруженных элементов, усовершенствованные покрытия, "блиски" (рабочие колёса или интегральные роторы), двухзонные камеры сгорания, двухмерные отклоняемые сопла, дополнительные датчики системы диагностики, роторы противовращения. Были разработаны методы быстрого прототипирования.

Спроектированы и испытаны новые двигатели изменяемого цикла и усовершенствованные модификации: F404-GE-IN20, F404-GE-102, F120, F414, F414-GE-400.

Разработки General Electric 2000-х гг. характеризуются применением лёгких высокотемпературных композитных материалов с керамической матрицей, лазерной обработки, многоточечных топливных форсунок, встроенных стартер-генераторов, созданием методов повышения усталостной прочности при циклическом нагружении, испытаниях двигателей, интегрированных с имитаторами самолётов, полного моделирования динамики двигателя. Применяются системы автоматического диагностирования, прогнозирования и управления, используется металлическое прототипирование. К основным разработкам General Electric этого периода относятся: F110-GE-132, F404-GE-402, F110-GE-129EFE, F136, F414 EDE.

Современные проекты характеризуются дальнейшим ростом теплонапряжённости, уменьшением количества деталей, широким применением цифровых технологий, новых материалов. Проектирование, разработку и испытание новой конструкции предполагается осуществлять только с использованием виртуальных моделей, которые затем используются для моделирования процессов производства, эксплуатации и технического обслуживания, а также для экономических расчётов. В проектах большое внимание уделяется значительному сокращению операционных и эксплуатационных расходов. Проектируются трёхконтурные двигатели с адаптивным циклом (XA100), турбовентиляторные двигатели для перспективных сверхзвуковых пассажирских самолётов (Affinity).

Осуществляются исследования малоразмерных теплообменников для охлаждения охлаждающего воздуха, регулируемых сопловых аппаратов первой ступени турбины высокого давления, полых турбинных дисков, турбин низкого давления с противовращением без соплового аппарата на входе, магнитной подвески роторов, аэродинамического управления плоским соплом.

**Список использованных источников информации**

194. GE Aviation представила двигатель для сверхзвукового пассажирского самолёта. <https://www.aex.ru/news/2018/10/17/189329/>
195. Affinity seria utilizado pelo programa AS2 da Aerion, que suspendeu as atividades. [https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/ge-interrompe-desenvolvimento-de-motor-supersonico-por-falta-de-clientes\\_6709.html](https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/ge-interrompe-desenvolvimento-de-motor-supersonico-por-falta-de-clientes_6709.html)
196. Какими двигателями дёшево будем летать на сверхзвуке? <https://dzen.ru/media/id/5b55dd5556f65d00a87f8aef/kakimi-dvigateliami-deshevo-budem-letat-na-sverhzhvuke-5be9eaa2ef052f00aaec72ae>
197. GE refines Affinity supersonic engine, plans for 2020 performance tests. <https://travelandaviation.com/ge-refines-affinity-supersonic-engine-plans-for-2020-performance-tests-news/>
198. Guy Norris. GE Shows Affinity for Supersonics // Aviation Week Network. October 15, 2018. <https://aviationweek.com/show-news/nbaa/ge-shows-affinity-supersonics/>
199. Guy Norris. Why GE's Affinity Is a Supersonic Enabler // Aviation Week Network. October 16, 2018. <https://aviationweek.com/shownews/nbaa/why-ge-affinity-supersonic-enabler>
201. Сверхзвуковые пассажирские самолёты второго поколения: Boom набирает обороты, а Aerion "влетел в трубу". <https://habr.com/ru/company/vdsina/blog/560608/>

# ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПУТЁМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ С ОДНОВРЕМЕННЫМ РОСТОМ ЕГО ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Юрий Владимирович Комаров, магистр МГТУ Станкин

*В данной работе предлагается новый подход к определению оптимальных режимов резания, затрагивающий физические явления, сопровождающие процесс резания, определяющие производительность технологического процесса механической обработки с заданным качеством обработанных поверхностей, характер и факторы износа, учет влияния которых впервые позволяет достаточно точно вести расчет времени работы инструмента до катастрофического износа или плановой замены инструмента.*

*В работе изложены вопросы повышения эффективности механической обработки рабочих поверхностей деталей, изготавливаемых из любых конструкционных материалов путём замены нескольких операций: черновой, чистовой и отделочной как лезвийным, так и абразивным инструментом на одну, выполняемую режущим стандартным или модернизированным инструментом, имеющим покрытие и некоторые геометрические особенности его режущих кромок. Обработка осуществляется на оптимальных режимах резания, рассчитываемых по новым закономерностям.*

*На примерах показано, что выбор оптимальных режимов резания по новым авторским закономерностям, позволяет одновременно: повысить производительность и точность механической обработки, обеспечить однократной обработкой высокий класс шероховатости поверхностей и увеличить долговечность инструмента в разы, а иногда и на порядок.*

*The paper presents the issues of improving the efficiency of machining the working surfaces of parts made of any structural materials by replacing several operations: roughing, finishing and finishing with both blade and abrasive tools with one performed by a standard cutting or upgraded tool with a coating and some geometric features of its cutting edges. Processing is carried out at optimal cutting conditions calculated according to new patterns. The examples show that the choice of optimal cutting modes according to new author's patterns allows at the same time: to increase the productivity and accuracy of mechanical processing, to provide a high class of surface roughness with single-pass processing and to increase the durability of the tool at times, and sometimes by an order of magnitude.*

**Ключевые слова:** резание, инструмент, режимы резания, покрытия, режущие материалы.

**Keywords:** cutting, tools, cutting modes, coatings, cutting materials.

В работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] установлено, что на шероховатость и точность обрабатываемых поверхностей влияют кинематические и динамические факторы процесса резания, точность и динамическая устойчивость (жесткость) применяемого оборудования, геометрия и точность исполнения инструмента. Динамическое поведение системы СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь) зависит от величины и направления силы резания, возникающей при удалении стружки заданной величины по заданной кинематикой траектории резания.

Максимальное значение силы резания достаточно точно можно рассчитать по приведенному в работе [7] уравнению:

$$F_{\max} = 3,4 \cdot \sigma_b \cdot S_{п.к.}, \quad (1)$$

где  $\sigma_b$  - предел прочности обрабатываемого материала [Па];  $S_{п.к.}$  - площадь сечения удаляемой режущей кромкой инструмента стружки [м<sup>2</sup>].

$$S_{п.к.} = m \cdot t, \quad (2)$$

где:  $t$  - удаляемый за один проход припуск [мм];  $m$  - фактическое значение сечения стружки по вектору подачи [мм].

Величину  $m$  можно рассчитать по уравнению:

$$m = S_z + K \sqrt{\delta_R^2 + \delta_{OC}^2} + \Delta_{и}, \quad (3)$$

где  $S_z$  - подача на одну режущую кромку (подача на зуб) [мм/зуб];  $\delta_R$  - радиальное биение режущей кромки [мм];  $\delta_{OC}$  - осевое биение режущей кромки [мм];  $\Delta_{и}$  - погрешность изготовления инструмента [мм];  $K$  - равно 1 или 2 в случае наступления резонанса (высоко амплитудных вибраций).

Для повышения точности и производительности обработки различных поверхностей деталей, изготавливаемых из любых известных или перспективных конструкционных материалов, режимы резания следует рассчитывать по уравнению, связывающему известную величину приращения температуры материала режущей части инструмента ( $\Delta T$ ), с физико-механическими и теплофизическими свойствами обрабатываемого и режущего материалов, а также динамическими показателями устойчивости системы СПИД, выраженной в количественном изменении фактической величины сечения удаляемой режущей кромкой стружки ( $m$ ).

Уравнение получено на основе дифференциального выражения теплопередачи в однородной среде, в которой действует импульсный источник тепловыделения [7], и имеет вид:

$$\Delta T_k = \frac{0,85 \sigma_R \text{Сп.к.} \cdot K_{ш} \cdot \sqrt{V}}{\sqrt{\pi \lambda_{и} C_{и} \rho_{и}} \cdot \sqrt{l_x} \cdot \text{Сакт.из}} \cdot \sum_{i=1}^{N_i} \left( \frac{1}{\sqrt{i}} \right). \quad (4)$$

Установившийся минимальный износ происходит только тогда, когда температура в зоне резания или стружкообразования (где нет СОЖ) меньше температуры начала деструктивных превращений режущего материала.

Согласно основным законам импульсной теории резания она зависит от множества факторов:

$$\tau_x = l_x / V \text{ [с];}$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \left( \frac{1}{\sqrt{i}} \right) = 1 + 1/\sqrt{2} + 1/\sqrt{3} + \dots + ((C \cdot W \cdot N)/(l_x \cdot V))^{1/2};$$

- не сходящийся ряд, характеризующий число импульсов энергии на пути резания  $l_x$ ;

Преобразование суммы ряда в полином приближённо:

$$\sum_{i=1}^{N_i} \left( \frac{1}{\sqrt{i}} \right) \approx 2(l_x \cdot V / (C \cdot W \cdot N))^{1/2} + ((C \cdot W \cdot N) / (l_x \cdot V))^{1/2} - 1,5; \quad (5)$$

$N1 = l_x / \delta l_0$  - число импульсов на пути резания длиной  $l_x$ ;

$$K_{ш} = \frac{\sqrt{\lambda_{и} C_{и} \rho_{и}}}{\sqrt{\lambda_{и} C_{и} \rho_{и}} + \sqrt{\lambda_{м} C_{м} \rho_{м}}} - \text{коэффициент пропорциональности теплоизоляции};$$

$$\delta l_{и} = (C \cdot W \cdot N) / V; \quad (6)$$

где  $N$  - характеризует зону распространяемого теплового потока от зоны плавления материала в стружке, рассчитывается по специальному алгоритму или определяется экспериментально;

$$C = \frac{\pi \sigma_R 3(1 - 2\mu)}{E - \sigma_R 3(1 - 2\mu)}$$

- постоянная физико-механических свойств

обрабатываемого материала;

$\sigma_R$  - предел прочности материала,  
 $E$  - модуль упругости материала Юнга,  
 $\mu$  - коэффициент Пуассона,

$N$  - характеризует зону распространяемого теплового потока от зоны плавления стружки (рассчитывается по специальному алгоритму или определяется экспериментально) [7],

$\lambda_i$  - удельная теплопроводность режущего материала [Вт/(м·°C)],  
 $c_p^{(i)}$  - удельная теплоемкость режущего материала [Дж/(кг·°C)],  
 $\rho_i$  - плотность режущего материала [кг/м³],  
 $\lambda_m$  - удельная теплопроводность обрабатываемого материала [Вт/(м·°C)],  
 $c_p^{(m)}$  - удельная теплоемкость обрабатываемого материала [Дж/(кг·°C)],  
 $\rho_m$  - плотность обрабатываемого материала [кг/м³],  
 $W^{(m)}$  - температуропроводность обрабатываемого материала [м²/с].

Величина площади сечения стружки  $S_{п.к.}$  рассчитывается по уравнению (2).

$S_{ак.т.из.}$  - площадь активного теплоизлучения при стружкообразовании зависит от размера импульса ( $\delta l_{и}$ ) и длины режущей кромки, находящейся в срезаемом материале -  $L$ :

$$S_{ак.т.из.} = \delta l_{и} \cdot L; \quad (7)$$

Поскольку величина  $L$  величина не постоянная, постольку эту величину следует рассчитывать в каждом отдельном случае с учетом конструкции инструмента и кинематической схемы срезания припуска. Величина  $m_x$  также не постоянная и также зависит от типа инструмента и схемы удаления припуска.

Рассмотрим влияние величины удаляемого за проход припуска режущей кромкой концевых фрез на производительность резания материалов в свете закономерностей импульсной теории резания, выдвинутых в работах В.А. Комарова [6, 7]. Согласно уравнению, на величину приращения температуры  $\Delta T_i$  прямо влияет фактическое значение сечения стружки по вектору подачи  $m$ . Но её величина при росте отбиений падает существенно, если удалять припуск меньше радиуса фрезы, например, при чистовом проходе. На рис. 1 показана схема срезания припуска цилиндрической частью фрезы, из которой очевидно, что фактическое значение величины сечения стружки ( $m$ ) = АВ будет меньше при удалении припуска за проход  $t_{пр.}$ .

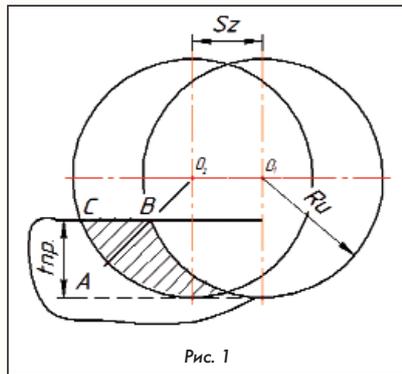


Рис. 1

$CВ = S_z$  - подача на одну режущую кромку (подача на зуб) [мм/зуб];

$АВ = m$  - фактическое сечение стружки по вектору подачи, определяемое кинематикой станка [мм]. Из рис. 1 его значение равно:

$$m = S_z / \sqrt{(2R_u \cdot t_{пр.} - t_{пр.}^2)}. \quad (8)$$

В связи с малыми значениями подач на зуб, можно упрощенно записать, что допустимая по заданной силе резания подача  $m_{ф.}$  может превышать величину, определяемую теплофизикой резания  $m_x$  на корень квадратный из соотношения радиуса фрезы  $R_u$  к удаляемому за проход припуску  $t_{пр.}$ :

$$m_{ф.} = m / \sqrt{(R_u / 2 / t_{пр.})}. \quad (9)$$

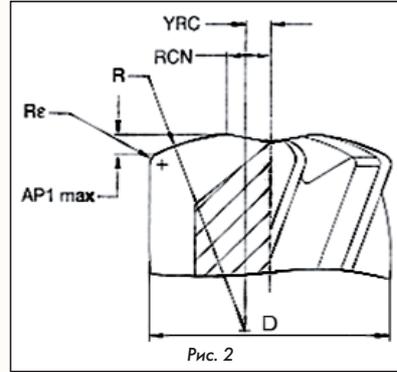


Рис. 2

Для обработки высокопрочных материалов концевыми фрезами целесообразно использовать фрезы, работающие цилиндром фрезы при удалении припуска с плоскости, следует торцы выполнять радиусным, так чтобы удаляемы за проход припуск был меньше или равен величине AP1, показанной на рис. 2.

Рассмотрим примеры расчета оптимальных режимов резания по закономерностям (1-7), приведенным в этой статье.

### Сверление алюминиевого сплава марок US 319 и US 380

Актуальность этой проблемы была сформирована на предприятиях компании General Motors (GM). В настоящее время на заводах GM сверление отверстий в алюминии и его сплавах осуществляется с широким использованием смазочно-охлаждающих жидкостей (рис. 3). Этот факт ухудшает экологию и условия труда, а также увеличивает себестоимость продукции; только на утилизацию этих опасных жидкостей требуется около \$700 млн. На заводах GM сверление глухих отверстий в изделиях из алюминиевых сплавов (силумин) осуществляют сверлами конструкции Kennametal BK-6, диаметр  $D = 6,35$  мм.



Рис. 3 Обработка отверстий на вертикально-сверлильном станке с использованием смазочно-охлаждающей жидкости



Свойства твердого сплава марки BK-6:

- прочность,  $\sigma > 35$  ГПа;
- красностойкость,  $\Delta T_t < \Delta T_s = 860$  °C;
- $\lambda_t = 54,3$  Вт/м·°C;
- $c_p^{(t)} \rho_t = 2,22 \cdot 10^6$  Дж/(°C·м³).

Сплав АК6М2 имеет свойства:

$E_m = 70 \cdot 10^9$  Па;  $\sigma_b = 380 \cdot 10^6$  Па;  $\mu = 0,3$ ;  $\psi = 0,6$ ;  $T_{melt} = 630$  °C;  
 $\lambda_m = 201$  Вт/м·°C;  $c_p^{(m)} = 920$  Дж/кг/°C;  $\rho_m = 2700$  кг/м³;  
 $c_p^{(m)} \rho_m = 2,48 \cdot 10^6$  Дж/°C/м³;  $W = \lambda_m / c_p^{(m)} / \rho_m = 95,7 \cdot 10^{-6}$  м²/с.

Сверление производится на средних скоростях резания, с высокими подачами и только при использовании смазочной охлаждающей жидкости [6, 7].

При расчете оптимальных режимов сверления этого сплава теми же сверлами на глубину 19 мм с заменой СОЖ на обдув сжатым воздухом давлением до 2...4 атм. (рис. 4), содержащим экологически чистые компоненты, получены в сравнении следующие результаты:

- минимальное время сверления любой пластины этих сплавов в базовом варианте было порядка 0,4 с, при обдуве - 0,2 с;
- оптимальная скорость резания оказалась в 3 раза выше базовой.

Следует отметить, что:

- удалось почти в 10 раз повысить точность отверстия, так



Рис. 4 Сверление отверстий в алюминиевом сплаве АК6М2 без СОЖ

как "разбивка" его диаметра от номинального значения составляла 1...2 мкм, при базовой до 10 мкм;

- шероховатость обработанной поверхности, соответствовала 9 классу при 6 классе в базовой версии;
- стойкость инструмента составила 25 000 отверстий непрерывного сверления, что в два раза больше, чем на заводах компании GM.

**Обработка титанового сплава TC-4 ( $\sigma_b = 904$  МПа) фрезерованием**

В России его ближайший аналог сплав BT-6. Его химический состав полностью аналогичен TC-4 ( $\sigma_b = 902$  МПа).

Химический состав материала BT6										
Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
до 0.6	до 0.1	до 0.1	3.5 - 5.3	до 0.05	86.45 - 90.9	5.3 - 6.8	до 0.3	до 0.2	до 0.015	прочих 0.3

Примечание: Ti - основа, процентное содержание Ti дано приблизительно

Теплофизические свойства для всех сплавов титана очень близки:

- температура плавления титановых сплавов  $T_{пл.} = 1668$  °C;
- удельная теплопроводность  $\lambda_m = 16,76...21,9$  Вт/м·°C;
- удельная теплоемкость  $C_m = 520...540$  Дж/(°C·кг);
- плотность  $\rho_m = 4540$  кг/м<sup>3</sup>;
- произведение плотности на теплоемкость  $C_m \cdot \rho_m = 2,45 \cdot 10^6$  Дж/(°C·м<sup>3</sup>);
- температуропроводность  $\omega_m = 9,28$  м<sup>2</sup>/с.

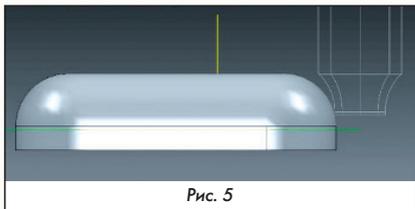


Рис. 5

Необходимо обработать внешнюю радиусную поверхность образца, показанную на рис. 5, с достижением шероховатости не ниже 9 класса. Для проведения опытных работ был заказан инструмент:

1. Фреза концевая с прямым торцом Ф8 мм.  $Z_{II} = 4$ , материал фрезы BK-6 с нанесенным на него нанокompозитным покрытием nCo, которое не вызывает адгезии с титаном и его сплавами.

2. Фреза концевая фасонная Ф12 мм.  $Z_{II} = 4$ , материал фрезы BK-6 с покрытием TiCN, на которое сверху нанесено нанокompозитное покрытие nCo (рис. 6).

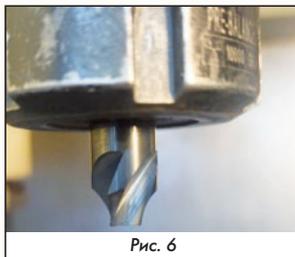


Рис. 6

Физикомеханические и теплофизические свойства твердого сплава марки BK-6 с покрытием nCo: прочность,  $\sigma > 45$  ГПа; красностойкость,  $\Delta T_1 < \Delta T_3 = 1200$  °C;  $\lambda_1 = 20,1$  Вт/м·°C;  $\rho_1 = 3970$ ;  $c_p^{(II)} = 758$ ;  $c_p^{(II)} \rho_1 = 3,06 \cdot 10^6$  Дж/(°C·м<sup>3</sup>).

При расчете оптимальных режимов фрезерования радиусной наружной поверхности удалялся припуск 2,4 мм. Получены в сравнении следующие результаты:

- минимальное время фрезерования этой поверхности в базовом варианте составило 34 мин., по предлагаемой технологии - всего 6 мин., а оптимальная скорость резания -  $V = 3,8$  м/с.
- шероховатость поверхности в базовом варианте после фрезерования соответствовала 7 классу и требовались дополнительные операции полирования для доведения до 9 класса, а по новой технологии за одну операцию фрезерования обеспечивался 10 класс шероховатости поверхности, что соответствовало полированию (рис. 7).



Рис. 7

**Фрезерование закаленной инструментальной стали У8 HRC 65-68 концевыми фрезами с покрытием**

Материал образца высокоуглеродистая сталь марки У8: твердость HRC<sub>Э</sub> > 65;  $\sigma_b = 1860$  МПа; температура плавления  $T_{пл.} = 1350$  °C; удельная теплопроводность  $\lambda_m = 49$  Вт/(м·°C); температуропроводность  $\omega_m = 13,1$  м<sup>2</sup>/с; произведение плотности на теплоемкость  $c_m \cdot \rho_m = 3,74 \cdot 10^6$  Дж/(°C·м<sup>3</sup>).

Фреза концевая Ø8 мм,  $Z_{II} = 4$ , торец режущей части радиусный как на рис. 2. Материал твердого сплава BK-6: красностойкость  $\Delta T_1 < \Delta T_3 = 860$  °C;  $c_p^{(II)} \rho_1 = 2,22 \cdot 10^6$  Дж/(°C·м<sup>3</sup>);  $\lambda_1 = 54$  Вт/(м·°C).

Покрытие Ti-AL-N: красностойкость  $\Delta T_1 < \Delta T_3 = 1700$  °C;  $c_p^{(II)} \rho_1 = 3,01 \cdot 10^6$  Дж/(°C·м<sup>3</sup>);  $\lambda_1 = 23,1$  Вт/(м·°C).

Согласно расчетам по уравнениям, обработка фрезой Ø8 мм с покрытием позволяет фрезеровать закаленную сталь со скоростью  $V = 1,9...2$  м/с с продольной подачей  $S_m = 75$  мм/с, т.е. время фрезерования отверстия на глубину 5 мм составляет всего 1,7 с. При этом шероховатость обработанной поверхности (рис. 8) соответствует 9-10 классу ( $Ra = 0,32...0,16$  мкм).

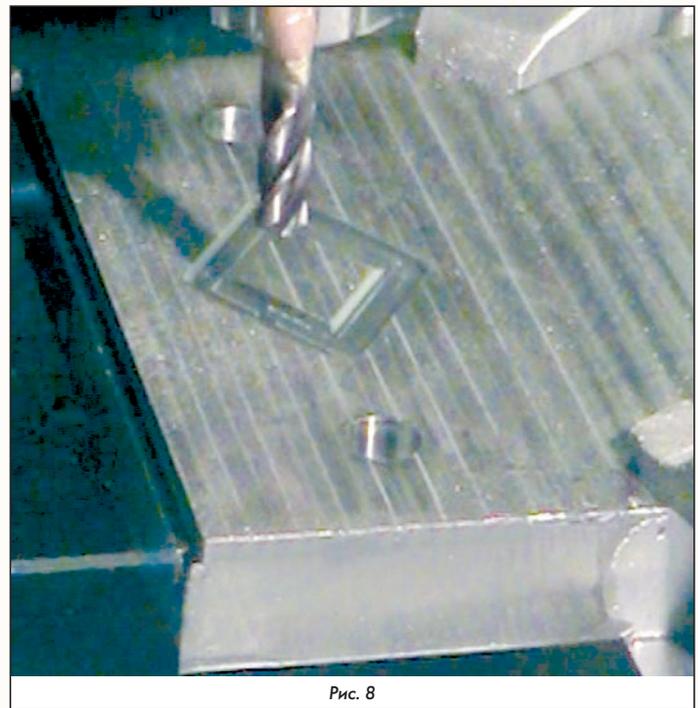


Рис. 8

**Литература**

1. С.Н. Shen. The importance of diamond coated tools for agile manufacturing and dry machining. Surface and coating technology 86-87 (1996), p.672-677.
2. Cantero, M.M. Tardio, J.A. Canteli, M. Marcos, M.N. Miguelez. "Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V", Int. J. Machine Tools Manufact. 45(2005), p.1246-1255.
3. Bono, J. Ni "A method for measuring the temperature distribution along the cutting edges of a drill", J.Manufact.Sci.Eng. 124 (2002), p.921-923.
4. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Материалы по физике внешнего трения, износу и внутреннему трению твердых тел. т.4. - Томск: Полиграфиздат, 1947 г.
5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов, - М.: Изд "Машиностроение", 1975 г.
6. Комаров В.А., Абрамович А.Л., Мещерякова Т.Ф., Мольков В.Н. Подтверждение импульсного характера разрушения материалов на основе металлофизического анализа образцов стружки // Техника. Технология. Управление. 1992, №2, с.13.
7. Комаров В.А. Повышение эффективности технологических процессов на основе совершенствования процессов резания. Москва, Издательство МГТУ, 2002 (на русском языке).

Связь с автором: komarov\_yura@list.ru

# БЕСКОНЕЧНЫЕ ЧИСЛА

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ИЗУЧАЕТ АРИФМЕТИКУ

Андрей Иванович Касьян, к.т.н., АО "НПО "Мобильные информационные системы"

(Продолжение. Начало в 4, 6 - 2018; 1, 3, 4-6 - 2020; 3, 4, 5-6 - 2021; 1-3 - 2023)

**Рассматриваются свойства чисел и арифметические операции. Properties of numbers and arithmetic operations with them are considered.**

**Ключевые слова: числа, простые числа, арифметические операции.**

**Keywords: numbers, prime numbers, arithmetic operations.**

Приведем замечательные слова фон Лейбница: "Математика изучает всё в области чистого умозрения, что поддается точному определению". Добавим - и эти объекты таковы, какими мы их представляем. Именно "чистое умозрение" особенно привлекает искусственный интеллект (ИИ) к математическим вопросам. Заметим далее, что почти все величайшие люди были знакомы и "дружили" с математикой. Чтобы стать сильным, выдающимся (как они), надо много учиться и ИИ принимает решение заниматься математикой, причем хочет начать с Царицы - Арифметики (др.-греч. арифмос - "число"). В нашем распоряжении стенограмма одного занятия. Заметим, что обучение ИИ задача не из простых: ИИ требует очень точного логического объяснения без лукавства и замалчиваний.



Г. Лейбниц

**Искусственный Интеллект (ИИ) - Учителю (У):** мне хотелось бы изучить Арифметику!

**У.** (пауза...) Мм, мм... Изучить Арифметику - это почти то же самое, что изучить Математику. Следует не горячиться, сконцентрироваться и начинать неспеша...

**ИИ.** В чём проблемы?

**У.** Можно прямо сказать - в числах... А именно, в множестве целых (для краткости - натуральных). По важности с множеством натуральных может поспорить, разве что, теория Галуа. Неплохо начинать с так называемых числовых систем.

**ИИ.** Числа я хорошо знаю: 1, 2, 3 и т.д. Действия:  $1 + 2 = 3$ ,  $2 \times 4 = 8$ . А числовые системы, это что?

**У.** Ты верно представил числа (начала ряда натуральных) их именами. Мы оперируем с именами, а не с объектами, ими поименованными. Объекты остаются под некоторым покровом. Поставить в соответствие числам их имена не так просто. Арифметические действия тобою осуществлены (записаны) правильно. Умножить на 3 и прибавить единицу - сложнее. На практике целые числа употребляются для счёта и упорядочения. С теоретической точки зрения они также достаточно важны. Числовые системы - это фундаментальное понятие - целая область науки. Числовые системы включают натуральные числа, целые, рациональные и многие другие. Заметим сразу, что абстрактный дух математики диктует стремление излагать все аксиоматически (от др.-греч. аксио - "считаю достойным"). Считается, что как только установлены акси-

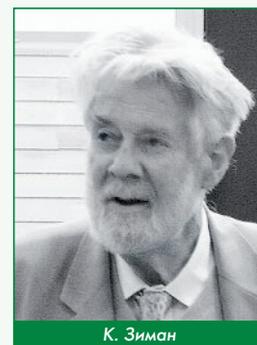
омы системы (и понятия), то всё дальнейшее получается посредством логических рассуждений (имеется в виду математическая логика, а не человеческая). Здесь уместно привести мысль Д. Берджеса: "Точное знание аксиом не является обязательным. Обязательной является вера в то, что вся математика следует из этих аксиом". В основе лежит Вера, одновременно аксиоматический метод дает свои плоды, так как позволяет приобретать новые знания. Отсюда получаем, что наша Арифметика строится на основе аксиом, подобно Геометрии, но аксиоматический подход воспринимается как определённый психологический барьер (для людей). Поэтому аксиомы не будем перечислять - они есть в Интернете (трудно удержаться от такой аксиомы: "существует пустое множество". Раз существует, то не совсем пустое. Речь идет не о пустоте, а о множестве. В физике вакуум не считается абсолютно пустым).



Д. Берджес

Логика в естественных науках, в технике должна осуществлять внутренний Большой дозор. Контроль на каждом шагу. Ничто не принимать просто на веру. В связи с этим подход к математическому доказательству менялся с течением времени, причем ужесточались требования к логике. Теперь доказательство - путь через трубчатый фильтр, куда можно протиснуться, следуя течению (умозаключениям). А весь поток начинается с аксиом.

В математическом исследовании пути могут зацикливаться. Механический подход очень проблематичен. Британский математик К. Зиман говорил, что "любая теорема - это своего рода интеллектуальная точка покоя...". Скорее, - это экстремум или кульминация. Сложная теорема - это симфония. Очевидно, сочинить симфонию, не зная нотной грамоты, невозможно. Так и теоремы.



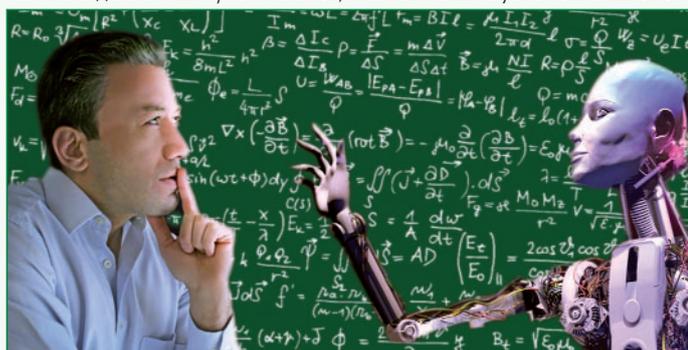
К. Зиман

Известный французский математик Ш. Эрмит говорил: "...математики больше слуги, чем господа". Можно сказать, верующие, которым Истина предписывает дорогу в Будущее. Итак, аксиомы и логика в математике не мечают нужный путь, но не говорят о его длине и трудности.

Упомянутые числа 1, 2, 3 и т.д. - это натуральные числа. Атомами, образующими натуральные числа, являются простые, которые делятся только на себя и на единицу (2, 3, 5...). Отечественные математики нуль в множество натуральных не включают. Естественно, западные математики стараются включить. Единица не входит в множество простых (это связано с многозначностью представления  $6 = 2 \times 3 = 1 \times 2 \times 3 = 1 \times 1 \times 2 \times 3$  и т.д.). Натуральные мож-



Ш. Эрмит



но считать первичным понятием, хотя они сложнее большинства других первичных понятий. Например, первичное (аналогичное) понятие - точка - воспринимается более легким и простым, но это заблуждение. В сложном пространстве функция может выступать в качестве точки.

Когда пересчитываем множество различных объектов, то ставим им в соответствии число. Это - умозраительная операция. В математике она нашла свое воплощение во "взаимно однозначном соответствии". Неграмотному человеку трудно объяснить, что звезды, атомы, камешки и овец можно пересчитывать одинаковым способом. Даже протоны в ядре можно пересчитать (получив порядковый номер элемента). И это несмотря на то, что протоны непрерывно превращаются в нейтроны, даже более того, всё это ядерное семейство представляет собой кипящий котел, в котором частицы, наподобие героя Р. Патрика, принимают вид то протона, то нейтрона, только с фантастически высокой частотой. А теория струн (теория Всего) считает, что все-все эти частицы сами образованы из струн, которые вибрируют и располагаются в необъяснимо микроскопических масштабах в "музыкальных" пространствах, размерностью не меньше десяти.

Числа, методически, если такая потребность возникает, можно определить с теоретико-множественных позиций. Теория множеств - целая наука. Говоря о "теории множеств" следует различать три точки зрения. Наивная "теория" имеет многотысячную историю. Китайская "Книга перемен", например, содержит таблицы Кэли для булевых операций на конечных множествах (Н. Вавилов). Начиная с 17-го века теория множеств (все еще наивная, но более разработанная) развивалась трудами великих математиков и мыслителей (П. Ферма, Р. Декарт, В. Лейбниц, Я. Бернулли, Л. Эйлер). Теоретико-множественная доктрина нашла свое воплощение в канторовской теории множеств [1]. Основой, символом Веры стала актуальная бесконечность. Бесконечность - одно из самых фундаментальных понятий. Можно сказать, что математика всем обязана бесконечности. Д. Гильберт писал: "Ни одно понятие не нуждается так остро в разъяснении, как нуждается в нем бесконечное".

В 20-м веке была создана аксиоматическая теория множеств трудами Э. Цермело, А. Френкеля, К. Геделя, П. Бернаиса и др. Множество получило свое точное определение (аксиоматическое). Но до сих пор большинство учебников остаются на позициях наивной теории. Именно система аксиом Цермело-Френкеля или эквивалентная система Геделя-Бернаиса (существуют и другие) лежат в основе современной математики. Этот подход полностью изгнал из теории все парадоксы. Можно предположить, что для разных наук (например, для математической физики) следует применять разные (аксиоматические) теории множеств. Перспективно, например, понятие мультимножества, поскольку допускает более краткое изложение. Computer science предлагает эквивалентное понятие "списка" и соответствующие подходы. Дальнейшее обобщение фундаментальных математических теорий пошло по пути поиска категорных аналогов для теоретико-множественных понятий, замены множеств - категориями, функций - функторами и т.д. Нетривиальность этого процесса состоит в том, что аксиомы, формулируемые как равенства, должны заменяться изоморфизмами и т.д. Освобождение от классической (двузначной) логики (?), применяемой в теории мно-

жеств, нашло свое отражение в теории топосов, которая представляет все варианты теории множеств. Впрочем, мы несколько отвлеклись.

**ИИ.** Очень мощный абстрактный пласт...

**У.** Мы упоминали нуль. С нулем ассоциируется пустое множество. Здесь имеется некоторая тонкость. Пустое множество не содержит ничего, но имеет имя. Можно сказать, что на нём написано: "пустое множество", то есть оно не совсем пустое... Далее, многие математики считают, что нужно уточнять о каком пустом множестве говорить в теореме: о пустом множестве чисел, или геометрических фигур, или другом.

**ИИ.** А нуль?

**У.** Нуль требует некоторого "уточнения" (но нет отдельно нуля целых чисел, нуля рациональных и т.д.), кроме, пожалуй, комплексного нуля (0, 0). Комплексному нулю может быть поставлена в соответствии матрица 2x2. Если на нуле написан "нуль", то это говорит о том, что рассматриваемый объект является нейтральным элементом абелевой группы по сложению. (Это отлично от пустого множества). В нашем случае речь идет о группе целых чисел, т.к. по определению  $1 - 1 = 0$ . Единица, в свою очередь, является автоматически нейтральным элементом абелевой группы по умножению рациональных чисел без нуля (но она может обозначаться буквой e). И нуль, и единица играют аналогичные роли (нейтральных элементов) в других математических объектах, в первую очередь, в группах, в полях (действительных числах), автоматически принадлежат им.

**ИИ.** Что такое действительные числа?

**У.** Мы забегаем сильно вперед. Можно очень кратко и прилизительно сказать, что действительное число записывается бесконечной непериодической дробью. В этом отношении p-адические числа более фундаментальны. Действительные числа включают в себя иррациональные (бесконечное множество), о которых можно сказать, что в этом случае оперируют с фактор-множествами последовательностей рациональных чисел и соответствующими классами эквивалентности.

Была упомянута бесконечность. Необходимо проявлять осторожность, особенно при доказательстве бесконечности. Часто встречаются совсем не убедительные "доказательства". Расскажем о попытке обнаружения несчётного количества признаков натуральных чисел. Например, доказывая просто несчётность множества всех множеств натуральных чисел некоторые авторы исходят из предположения, что мы располагаем "произвольным бесконечным списком  $S_1, S_2, S_3, \dots$  множеств натуральных чисел...". Все упирается в этот таинственный список, о котором ничего подробно не говорится.

Множество простых чисел считается бесконечным. По аналогии с рассмотренным выше подходом множество P всех подмножеств простых чисел должно оказаться несчётным. Но множество P определяет, по основной теореме арифметики, множество натуральных чисел. Каждое натуральное число единственным образом представляется в каноническом виде произведением простых в соответствующей степени (например,  $30 = 2 \times 3 \times 5$ ). И так, по теореме каждое натуральное число разлагается на простые множители, или каждому натуральному ставится в соответствие некоторое множество простых [2] чисел. Из приведенных рассуждений следует, что тогда множество натуральных становится несчётным.



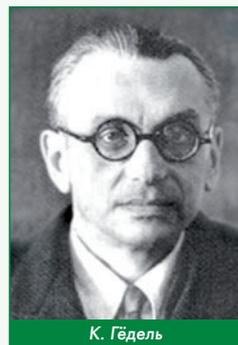
Р. Декарт



Я. Бернулли



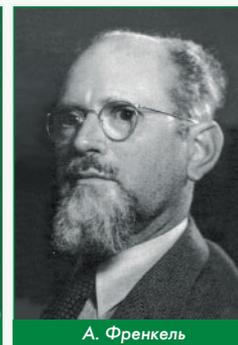
П. Ферма



К. Гедель



Э. Цермело



А. Френкель

ИИ. Грандиозно! Жар холодных чисел (простых).

У. Из сказанного ранее ясно, что фактически идет речь о рассмотрении и уточнении понятия бесконечности, из области чистого умозрения. В качестве примера взяты натуральные числа. Будем вести рассмотрение с помощью простых чисел, которые, предполагается, сами образуют бесконечное множество. О простых числах - основных кирпичиках всех рассматриваемых чисел - было кратко сказано. Это первооснова. Изучим бесконечность натуральных. Рассмотрим запись натуральных чисел через их предшественники - простые числа. Предположим, что всякое натуральное число однозначно разлагается в (каноническое) произведение простых сомножителей (это предположение мы не будем изучать, но считаем, что его можно доказать). Предположим также, что множество простых чисел образует естественный ряд или порядок:  $2, 3, 5, \dots, p(i), \dots$ . В этом случае любое натуральное число  $n$  записывается в виде произведения некоторых сомножителей  $p(i)$  ряда простых  $n = p_1 p_2 \dots p_m$ . Сомножители могут теоретически повторяться соответствующее число раз, что будет учтено. Заметим, что мы рассматриваем всё множество натуральных, а не его конечную часть (бессмысленно изучать конечную часть, если мы изучаем бесконечность). Чтобы не запутаться, мы не будем использовать в каноническом разложении степени чисел, а все простые сомножители числа  $n$  запишем последовательно, одним за другим, в ряд. Каждое натуральное число будем записывать особо, соблюдая следующий порядок. Начинать запись числа будем с простого сомножителя его разложения, который предшествует остальным сомножителям в ряду простых. (Здесь используется соответствующее утверждение - ограниченное множество (снизу) натуральных имеет наименьшее начальное число, что относится и к простым). И будем записывать вместо имени или значения указанного простого сомножителя  $p(i)$  номер его места в ряду, т.е. его номер  $i$ . Очевидным образом учтем кратность (в предыдущей статье на  $i$ -м месте помещалась степень простого). Назовем используемую запись  $p$ -позиционной. Например, число 120 запишется так  $1, 1, 2, 3$ , что означает  $2 \times 2 \times 2 \times 3 \times 5$ . И так, в первой позиции нашей записи числа 120 первая единица означает, что в разложении 120 фигурирует простое число, стоящее первым в ряду простых (2). Это число самое маленькое простое. В силу кратности, единица здесь записывается через запятую три раза, что означает третью степень. После третьей запятой идет число 2, что означает простой сомножитель, который входит в разложение 120 и который стоит на 2 месте в ряду (3). Затем после запятой идет 3, что означает сомножитель, стоящий в ряду на третьем месте (5). Как станет дальше ясно - знаки препинания важны. Наша задача изучить количество всех натуральных чисел (по аксиоме оно бесконечно). Но одна бесконечность может отличаться от другой.

Для упрощения мы сначала из всего множества натуральных чисел отбросим следующее (бесконечное) множество  $A$ . Это множество  $A$  состоит из всех натуральных чисел, в каноническое разложение которых не входят простые числа, стоящие в ряду на месте, начиная с некоторого граничного номера  $N$ , т.е. входят все простые с номерами меньшими  $N$ , а с большими не входят. При этом  $N$  можно выбрать сколь угодно большим. (Но, в соответствии с приведенным утверждением, любое ограниченное множество натуральных имеет наименьшее число. Граничное число  $N$  будет выступать в качестве этого наименьшего). Другим словами, простые числа, стоящие до выбранной позиции  $N$  в ряду простых, входят в разложение натуральных чисел множества  $A$ , причем могут входить кратно, т.е. с произвольными степенями. А остальные простые, стоящие в разложении  $n$ , начиная с номера  $N$  и дальше в ряду, не встречаются в каноническом разложении чисел множества  $A$ , и входят в множество  $B$ . Далее мы более подробно рассмотрим вопрос о количестве натуральных чисел (множества чисел  $B$ , оставшегося после изъятия наночисел множества  $A$  из всего множества натуральных. Еще раз заметим, что  $p$ -позиционная запись чисел множества  $B$  использует ограниченное снизу множество простых, где границей является произвольный номер  $N$ ). Изъятие несколько не уменьшило размер полученного множества  $B$ . Например, мы могли бы изъять одновременно все чётные числа.

Но оставшееся множество (нечётных чисел) будет иметь такой же размер (говорят - мощность), как и чётные и такой же размер, как все множество натуральных. Это объясняется взаимно однозначным соответствием между  $n$  и  $2n$ .

Для наших исследований мы используем известный метод диагонализации [1]. Необходимо составить, как всегда, таблицу, или бесконечный массив из оставшихся натуральных чисел (множества  $B$ ) в  $p$ -позиционной записи с помощью простых сомножителей их канонического разложения (как описано выше). Можно выбрать порядок следования в нашей таблице натуральных довольно произвольным. Но для ясности мы будем располагать натуральные числа в  $p$ -позиционной записи следующим образом. Начинаем с первой строки нашей таблицы. Первое натуральное число, которое записывается в первой строке таблицы имеет в разложении единственный сомножитель, стоящий в ряду простых на месте выбранного граничного  $N$  (т.е. это простое число, стоящее на месте  $N$ , т.е.  $p(N)$ ). Ясно, что по алгоритму в  $p$ -позиционной записи в первой строке таблицы записывается не  $p(N)$ , а само число  $N$ . Подразумевается, что число  $p(N)$  первый (и единственный) сомножитель разложения числа, стоящего в самой первой строке записываемой таблицы. И так, вместо  $p(N)$  в строке стоит  $N$ , например, в десятичной записи. Переходим ко второй строке. В этой строке, в соответствии с условием, сначала поставим опять число  $N$ , а за ним, через запятую число  $N + 1$ . Эти два числа соответствуют каноническому разложению, поставленного во вторую строчку натурального  $k = p(N)p(N+1)$ . В третьей строке располагаются числа  $N, N + 1, N + 2$ . И т.д. В строчках верхнего или начального блока таблицы должны быть учтены все простые числа, без повторений. Мы получили некоторую последовательную запись. Но теперь надо учесть, что сомножители могут стоять произвольно. Тогда делаем пропуски, например, для числа  $v = p(N)p(N + 2)$ . Тем самым получая различные сочетания простых сомножителей. В полученном на этом шаге массиве строк отсутствуют квадраты простых. Чтобы учесть возможную кратность простых сомножителей следует уточнить алгоритм. Необходимо вводить в запись чисел квадраты и т.д. (не сами квадраты, а последовательные произведения простых, представимые в виде последовательности пар чисел  $N, N$ , или  $N + 1, N + 1$  и т.д.). С этой целью полученный первоначально массив строк копируется, но при этом в строчки добавляются вторые простые множители (т.е. добавляются квадраты). Другими словами, во все строчки скопированного множества добавляются сначала множители  $N$ , по аналогии с предыдущим, затем  $N + 1$  и т.д. (см. далее). Необходимо также учесть кубы и т.д. То, что полученная таблица бесконечна, не может встречать возражения, т.к. это обычная практика процесса диагонализации.

Заметим, что алгоритм работает линейно. Могут возникнуть возражения, что такие представления чисел некорректны. На это можно ответить так. Если представление некорректно, то это значит, что существует натуральное число, которое не представимо в виде некоторого произведения простых сомножителей.

В продолжение алгоритма, в нижележащих строчках, в дополнение к квадрату  $r = p(N)p(N)$  ставим квадрат числа  $p(N + 1)$ . Тогда, после записи второго верхнего блока таблицы записываем третий, где начальная строка записывается в виде  $N, N, N+1, N+1$  (два квадрата). Ниже запишем  $N, N, N + 1, N + 1, N + 2$ . Продолжаем аналогично дальше. Далее, необходимо учесть пропуски квадратов (допустим  $N, N + 1, N + 2, N + 2$ ) и всевозможные произведения квадратов. Мы получили блок нашей таблицы, включающий всевозможные квадраты простых сомножителей. Затем аналогично переходим к записи, учитывающей кубы и т.д. В результате, в таблицу записываем по приведенному конструктивному алгоритму всё оставшееся множество натуральных чисел  $B$ , без пропуска. Абстрактный алгоритм звучал бы так: "Запишем в таблицу все множество  $B$  натуральных чисел".

Еще раз опишем нашу таблицу. Вначале идут строчки, где друг за другом без пропуска учитываются все простые сомножители  $p$ -позиционной записи натуральных в различных сочетаниях, но только в первой степени. Моделировать пропуски можно дво-

ичными числами. Например, пропуск в строчке простого числа  $p(N + 1)$  записывается 101, а пропуск сразу двух  $p(N + 1)$  и  $p(N + 2)$  записывается 100 и т.д. Число 01001 означает пропуск  $p(N)$ ,  $p(N + 2)$  и  $p(N + 3)$ .

Так продолжается пока не будут использованы все квадраты простых сомножителей в различных сочетаниях. По аналогии строятся строчки с кубами и со всеми большими степенями. Таблица содержит все натуральные числа (множества  $B$ ) в  $p$ -позиционной записи.

Будем работать с полученной таблицей. Как станет ясно из изложенного, все конечные записи не играют роли, а только бесконечные последовательности чисел  $N(i)$ , но мы, для ясности, будем учитывать все числа.

По традиции метод диагонализации состоит в следующем. Требуется получить такое, в нашем случае, натуральное число, которое не входит в рассматриваемую таблицу (т.е. должны получить противоречие с условием, что все натуральные числа включены). Для этого находим соответствующее "диагональное" число  $D$ . Число  $D$  формируем следующим образом. Необходимо, чтобы число  $D$  содержало хотя бы один сомножитель типа  $p(N)$ . Тогда все остальные могут быть произвольными. Этот сомножитель может быть поставлен первым в  $D$  (можно поставить после диагонализации). Данная операция не обязательна, так как номера простых чисел  $p$  идут по возрастающей и заведомо превысят конечное  $N$ . Алгоритм имеет следующий вид: в нашей таблице, в записи стоящего в первой строке первого числа ( $N$ , которое записывается конечным числом цифр) находим первую (старшую) цифру разряда числа  $N$ . Меняем цифру, стоящую в этом деците (разряде), на любую другую произвольную, и эта новая цифра будет старшим разрядом (первым децитом) (второго) сомножителя синтезируемого числа  $D$ . Идем дальше по диагонали на вторую строчку и находим вторую цифру, стоящую в записи наших чисел (здесь опять стоит число  $N$ ) во втором деците. Меняем эту цифру на произвольную. Эту цифру записываем после первой во второй децит сомножителя числа  $D$ . Идем дальше и получаем аналогично третью цифру сомножителя числа  $D$  и таким образом проходим по диагонали всю нашу таблицу и окончательно получаем  $D$ . Учтем запятые. То есть, когда появляется запятая, то её копируем в  $D$ . Алгоритм следующий. Возьмем, в качестве "числового" примера, граничное число  $N$  порядка Гаггола ( $G$ ).

**ИИ.** Что это за число?

**У.** Это конечное число. Мы его взяли для солидности. Можно кратко сказать, что если записывать цифры Гаггола на каждой частичке и в каждом месте нашей Вселенной, то число  $G$  во Вселенной не поместится. Существуют гораздо большие числа ( $G$  в степени  $G$ ). Итак, в обычной десятичной записи  $G$  представим конечным числом цифр соответствующих децитов. Предположим, с учетом сказанного, что мы прошли по диагонали некоторое число строчек (соответствующее числу децитов  $G$ ), т.е. проработали операции алгоритма с нашим числом  $N = G$ . Везде проводили замену соответствующих цифр чисел (в  $p$ -позиционной записи) строк таблицы и синтезировали  $D$ . Наконец, дециты числа  $N = G$  закончились, т.е. требуется при диагонализации переход к следующему простому числу ( $N + 1$ ), а значит, к следующей строчке. Этот переход отображен в записях наших чисел запятой. Эта запятая копируется в том месте, куда пришел алгоритм, в запись синтезируемого числа  $D$ . После того, как поставили запятую, меняем цифру строки и её записываем в  $D$  после запятой. Далее таблица продолжается, алгоритм идет дальше, и мы проходим по строчкам, соответствующим числу  $N + 1$ . Мы записываем в число  $D$  измененные цифры разрядов, в соответствии с алгоритмом. Число обрабатываемых децитов может оказаться больше, чем в первом случае ( $N$ ), но соответствующее число  $p(N + 1)$  может оказаться гораздо больше  $p(N)$ , хотя в среднем, в ряду, они отличаются не на много. В любом случае, алгоритм работает с номерами простых чисел. В конце концов, мы проходим соответствующие строчки (по диагонали) и доходим до следующей запятой, которую опять копируем в  $D$ , и т.д. Другими словами, если в процессе диагонализации встречаются запятые, то их вносим в запись  $D$ . Ана-

логично можно рассмотреть второй блок таблицы, где участвуют квадраты простых сомножителей. В записи чисел в строчках этого блока появилось смещение, по сравнению с начальным верхним блоком. Имеется в виду еще один сомножитель  $N$ . Этот сомножитель "сдвинул" запятые. Тем не менее, если в процессе встретится запятая, то она будет помещена в соответствующем месте  $D$ , т.е. сдвиг учтется. Аналогично алгоритм работает с остальными блоками, куда входят кубы и более высокие степени простых сомножителей. Это разъяснение говорит о том, что запятые можно вполне корректно расставлять в числе  $D$ , в соответствии с алгоритмом.

Что касается конечных натуральных в строчках, то их можно не учитывать. Другими словами, если при диагонализации попали на пустое место, то спускаемся отвесно вниз. Можно рассмотреть другой алгоритм. Предположим, что рассматривается строчка, в которой стоит запись  $N, \dots, N+K$ , т.е. некоторое конечное натуральное число. Модифицируем эту запись. Поставим ещё одну запятую в конце и запишем далее бесконечную последовательность нулей. Будем считать, что нули обозначают  $p(0)$ . Под  $p(0)$  будем понимать единицу, хотя 1 не входит в множество простых (любое число может иметь произвольное множество сомножителей из 1). Но умножение на 1 не изменяет число. Когда диагональ дойдет до этой строчки, до такой бесконечной последовательности нулей, то вместо нуля запишем в число  $D$  сначала запятую, а затем любую другую цифру, что означает очевидное отличие  $D$  от рассматриваемого числа. Так поступаем со всеми конечными числами в строчках таблицы. В любом случае, очевидно, что конечные числа не равны  $D$ , т.к. диагональ идет до бесконечности.

Теперь докажем, что число  $D$  не может входить в нашу таблицу, в которую входят все натуральные. Сравним число  $D$  с числом, стоящим в строке  $q$  ( $N + M$ ). Предположим, что в процессе диагонализации мы дошли до  $q$ . Предположим также, что все запятые к данному моменту у  $q$  и  $D$  совпадают. Но так как мы по алгоритму изменили соответствующее число  $N + M$ , то число  $q$  не может быть равно  $D$ . Если же запятые  $q$  по какой-то причине не совпадают с запятыми  $D$ , то это также свидетельствует о неравенстве. Не только все числа, но и все запятые должны совпадать. Мы здесь пропускаем для краткости некоторые тонкости.

Итак, для любой строчки таблицы даже если все цифры и запятые совпали, то одна измененная по алгоритму цифра не даст возможности приравнять число  $D$  числу в  $q$ -й строчке. Противоречие принятому условию очевидно. В множестве  $A$  ни одно число не имеет в своем каноническом разложении простые числа с номером  $N$  и выше. Следовательно, число  $D$  не может совпасть ни с одним числом из множества  $A$ .

Рассмотрим некоторые дополнительные соображения. Мы выстраивали таблицу по определенному порядку, но эта таблица теоретически может быть записана в произвольном порядке, что не повлияет на конечный результат метода диагонализации. В итоге получаем несчетное множество натуральных.

Возможно возражение, что метод диагонализации не применим для множества натуральных. Рассматривается бесконечная диагональ. Но диагонализацию можно рассматривать не в законченном виде, а по шагам. На каждом шаге будем обнаруживать неравенство  $D$  числу  $q$ . Более того, метод диагонализации использовался для случая дробей [1]. Если дробью (включая иррациональные) такой почёт, то мы можем замаскироваться под дробь. Предположим, что перед каждым числом нашей таблицы стоит ноль с запятой, который мы фактически не учитываем. Все доказательство остается прежним. Нули мы потом отбрасываем. Тогда возникнет замечание: если всё давно доказано [1], то и не надо городить огород. Дело в том, что ИИ просил научить арифметике, а не дробям. По данной теме есть другие соображения, но их требуется рассмотреть отдельно. **П**

(Продолжение следует.)

### Литература

1. Г. Кантор. Труды по теории множеств. М.: Наука, 1985 г.
2. А. Касьян. Бесконечные числа // Двигатель. 2023. № 1-3. С. 31.

Связь с автором: a.kasyan1@yandex.ru

# ФИЗИКА БЕСКОНЕЧНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Дмитрий Николаевич Воронков, к.т.н.,  
главный научный сотрудник АО "НПП "РадиоСигнал"

**Время существования человечества несравненно меньше времени жизни любой из звезд, поэтому все теории о динамических процессах Вселенной – гипотезы. Это относится и к данной статье, однако внимательный читатель может увидеть в ней основы для разработки новых технологий практической физики.**

В современной физике представление об основных этапах развития Вселенной с момента её образования и до наших дней базируется на следующих теориях:

- ♦ Теории расширения Фридмана (предполагает конечный возраст Вселенной [1]);
- ♦ Большого взрыва (теории горячей Вселенной или сингулярности, из которой и зародилась Вселенная [2]);
- ♦ Теории инфляции (гипотеза расширения Вселенной после Большого взрыва [3]);
- ♦ Иерархической теории формирования крупномасштабной структуры (все объекты Вселенной были сформированы в ходе первоначальных возмущений [4]);
- ♦ Теории звёздного населения [5].

Все эти теории, говоря о возрасте Вселенной, фактически признают начало её образования и являются гипотезами.

В этой статье предлагается доказательство, но не об **образовании** материальной Вселенной, а о её **бесконечном существовании**, вытекающим из концепции электрической вселенной [6], постулатов неточной физики [7] и основаны на законе резонансной передачи энергии при контактном взаимодействии материальных объектов (МО) [8].

В основе концепции электрической Вселенной только одно фундаментальное взаимодействие - электромагнитное, вместо четырёх в современной физике.

Материальный объект (МО) рассматриваем объектом со сложной многоуровневой топологией и связями между его внутренними МО посредством электрических и магнитных полей. Материя организуется в различные фазы или состояния в зависимости от давления и температуры - твердое, жидкое, газообразное, плазму [9] и, наконец, состояние первородной космической материи, когда она приобретает температуру 0 К (ПКМ) [7]. При этом в силу отсутствия внутреннего движения в ней отсутствуют электрические заряды.

Следует особо остановиться на состоянии материи в ПКМ, так МО в этом состоянии полностью поглощают электромагнитное поле (ЭМП), в том числе и в световом диапазоне. Именно поэтому мы не можем "увидеть" (в электромагнитном диапазоне как в световом так и в радио диапазоне) черную дыру и космические облака с такой температурой (минимум, который зафиксирован в 1995 году Европейской Южной Обсерваторией в Туманности Бумеранг (рис. 1) - это 1 К [10]). Кроме того, в процессе понижения



Рис. 1 Туманность Бумеранг

температуры, т.е. уменьшения количества электрических зарядов в ней, происходит процесс уменьшения количества функциональных связей (ФС) на единицу количества вещества, что вызывает повышение "рыхлости" материи. Максимально "рыхлая" материя - это материя в состоянии ПКМ.

**Примечания:**

1. Состояние ПКМ по свойству поглощения ЭМП схоже с абстрактным "абсолютно чёрным телом (АЧТ)" но отличается тем, что АЧТ при **любой температуре** поглощает ЭМП, но оно ещё и излучает свое ЭМП [11].

2. Процесс изменения рыхлости - например адиабатически расширяющийся идеальный газ с отрицательной теплоемкостью.

3. Если исходить из того, что заряд формируется внутренним движением материи МО, то при увеличении плотности материи выше некоторых значений, когда внутреннее движение материи становится невозможным, то свойство материи - "электрический заряд" - должно пропасть, а с ним и ФС.

С другой стороны, в современной физике для описания явлений материального мира используют термин "тело", или систему из "тел", не учитывая бесконечную структуру любого тела и тех ФС между элементами, в том числе и **полевых**, которые собственно, и определяют сущность "тела".

Прежде чем изложить гипотезу остановимся на основных постулатах, положенных в основу неточной физики:

**Постулат № 1.** Абсолютного и физического вакуума, как и эфира в природе нет и любая точка Вселенной материальна, а **поле** это **возмущение** материальной **среды передачи** импульса.

**Постулат № 2.** МО ограниченный неким, конкретным объемом и количеством материи в нем, рассматриваем как механическую иерархическую **систему** с бесконечным количеством уровней -  $j$ ,  $j = 1 - \infty$ . Уровни МО - первый это уровень максимально возможных внутренних МО, из которого он состоит, например молекулы, количество которых  $N_1$  (штук), следующий уровень - уровень атомов, из которых состоят эти молекулы МО это второй уровень, а количество атомов в этом МО  $N_2$  (штук), и т.д. до бесконечности.

Любой МО имеет форму и содержание благодаря наличию электрических зарядов, образующих ФС. Однако сам этот МО может иметь (например, электрон), а может не иметь электрический заряд (например, нейтральная молекула воды). Каждый МО, при температуре выше абсолютного нуля, может иметь электрический заряд и, соответственно, обладать его свойствами благодаря внутреннему движению составных частей МО на всех  $j$  уровнях [12], которые будем характеризовать электрическими силовыми функциями  $\Psi_{МО/Е}(r)$  с размерностью [В/м], где  $r$  - радиус-вектор между МО и взаимодействующими с ним другим МО, находящимся на расстоянии  $r$ , а связи, образованные этим взаимодействием, будем называть функциональными связями (ФС). Для каждого конкретного МО, образованного внутренними МО со своими  $\Psi_{МО/Е}(r)$ , имеем внутреннее поле, как сумма полей внутренних МО, так и внешнее, которое характеризуется не только внутренним полем, но еще и реакцией на внешнее полевое воздействие ("вторичное поле").

**Постулат № 3.** К агрегатным состояниям материи - твердое, жидкое, газ и плазма **добавляем 5-е состояние** - первородная космическая материя (ПКМ) [7]. К ПКМ следует отнести любое тело при **абсолютном нуле** температуры, при которой полностью прекращается внутреннее движение на всех его уровнях и которое яв-

ляется причиной появления таких свойств материи как "заряд". К такому состоянию можно отнести космические пылевые облака, которые, к сожалению, наблюдать не можем, и черные дыры (ЧД) галактик, которые могут фиксироваться по косвенным признакам, например, по аккреционному диску.

**Постулат № 4.** Взаимодействие МО можно рассматривать как контактное и полевое. При температуре материи около 0 К преобладает контактное взаимодействие, при котором вероятность столкновений двух МО, приблизительно равных по габаритам, значительно выше трех и больше.

При температуре материи выше 0 К преобладает полевое взаимодействие (при котором наблюдается т.н. гравитация), однако заканчивающееся контактным взаимодействием.

**Постулат № 5.** Процесс образования ЧД из сверхмассивной звезды (СМЗ). В процессе горения СМЗ её ядро уплотняется до таких значений, что в нём становится невозможным внутреннее движение, являющееся основой для образования электрических зарядов. При пропадании основных фундаментальных взаимодействий ядра СМЗ, оно приобретает свойства ПКМ, в то время как оболочка СМЗ имеет сверхвысокую температуру термоядерной реакции и обеспечивает сверхплотность материи ядра. В момент, когда процесс горения оболочки СМЗ кончится, начинается процесс образования ЧД, при этом материя СМЗ, имеющая из-за сверхмощной плотности минимум электрических зарядов (минимум ФС), начинает рассыпаться, постепенно переходя к "сверхрыхлому" состоянию и уменьшению своей абсолютной скорости движения.

Во Вселенной постоянно идет процесс взаимодействий МО, которые являются как контактными, так и бесконтактными (полевыми). Процесс контактного взаимодействия зависит от инертных масс и скоростей МО, причем как относительных, так и абсолютных. Контактный процесс взаимодействия подробно рассмотрен в [8], где два МО обозначены как "тело" и "частица", введён коэффициент захвата энергии (уменьшение энергии частицы после взаимодействия с телом) равный:

$$Z_c = \frac{E_{c2} - E_{c1}}{E_{c1}}, \quad (1)$$

где  $E_{c1}$  - кинетическая энергия частицы до (индекс 1) и после (индекс 2) взаимодействия.

Выражение (1) с учетом масс и скоростей взаимодействующих МО имеет вид [8, стр. 16]:

$$Z_c = \left\{ \frac{V_{T1}}{V_{c1}} (2 - 2Y) + 2Y - 1 \right\}^2 - 1, \quad (2)$$

где  $Y = m_c / (m_c + m_T)$ ,  $m$  - инертная масса тела и частицы,  $V_T$  - скорость тела,  $V_c$  - скорость частицы.

Несколько слов о скорости. В природе есть абсолютные, и есть относительные скорости, которые учитываются при рассмотрении взаимодействия материи. Живущие на планете Земля люди практически никогда не учитывают абсолютную скорость, равную скорости движения самой планеты Земля вокруг звезды Солнце:  $30 \text{ км/с} \pm \Delta V_{MO}$ , где  $\Delta V_{MO}$  относительная скорость движения МО на планете. А с учетом движения Солнца вокруг центра галактики Млечный путь она будет равна около 300 км/с. Покажем физическую сущность влияния абсолютной скорости МО на процесс их взаимодействия.

Преобразуем выражение (2) чтобы учесть относительную скорость движения МО и, главное, абсолютную скорость их движения.

Так как "неподвижные" тела и частицы на самом деле имеют скорость планеты  $V_3$ , а их скорости отличается от неё на  $\Delta V$ , тогда выражение (2) приобретает вид:

$$Z_c = \left\{ \frac{1 + \frac{\Delta V_T}{V_3}}{1 + \frac{\Delta V_c}{V_3}} (2 - 2Y) + 2Y - 1 \right\}^2 - 1, \quad (3)$$

где  $\Delta V_T$  и  $\Delta V_c$  - скорость тела и частицы на планете Земля, имеющей скорость  $V_3$ .

А для относительно неподвижного тела, когда  $\Delta V_T = 0$ , получим:

$$Z_c = \left\{ \frac{1}{1 + \frac{\Delta V_c}{V_3}} (2 - 2Y) + 2Y - 1 \right\}^2 - 1, \quad (4)$$

Максимальная (полная) передача энергии от частицы телу имеет место при значении  $Z = -1$ . При  $Z = 0$  частица сохраняет свою кинетическую энергию.

Анализ выражения (4):

1. При  $\Delta V_c / V_3 \Rightarrow 0$ , т.е. абсолютная скорость движения планеты значительно выше скоростей тел на ее поверхности, а коэффициент захвата энергии  $Z \Rightarrow 0$ . Когда значения  $Z$  близки к нулю, означают что скорость МО (частицы) при взаимодействии с другим МО (телом), меняет направление, сохраняя модульное значение скорости, и наблюдаются такие процессы как броуновское движение. Это состояние материи, которое можно характеризовать как "**устойчивое**", в котором взаимодействующие МО, при условии относительных скоростей МО, находящихся на планете Земля, значительно меньших абсолютной скорости планеты, сохраняют свою кинетическую энергию достаточно долго. В этом состоянии материя относительно длительно может находиться во всех фазовых состояниях, кроме ПКМ.

2. При  $\Delta V_c / V_3 \Rightarrow \infty$  (когда абсолютная скорость планеты стремится к нулю, или когда рассматриваем взаимодействие МО с одинаковой массой -  $Y \approx 0,5$ , в космическом облаке, имеющем абсолютную скорость равную нулю),  $Z \Rightarrow -1$ . Когда значения  $Z$  близки -1 означает, что МО (частица) при взаимодействии с другим МО (телом) полностью отдает телу свою кинетическую энергию, и наблюдается процесс поглощения частиц телами (при полном поглощении энергии процесс называют резонансным) при этом происходит увеличение инерционной массы тел и повышения их внутренней энергии. Это состояние материи можно определить как "**неустойчивое**", в котором происходит накопление инертной массы и внутренней энергии МО (кинетической энергии движения составных частей материи на ее внутренних  $j$  уровнях), благодаря чему появляется такое свойство материи как "заряд".

3. Газопылевые космические облака при температуре абсолютного нуля и отсутствии электромагнитного взаимодействия распадаются до минимально возможных частиц, но при этом их инертные массы приблизительно одинаковы, и для этого случая  $Y = 0,5$  при абсолютных значениях скоростей  $V \approx 0$ ,  $\Delta V \neq 0$ ,  $Z = -1$ . Таким образом в них зарождается материя. Вначале образуются ядра водорода, дейтерия и трития, затем атомы, и так далее пока, наконец, в этом "облаке" не начнется термоядерная реакция и не сформируется новая звезда.

Рассмотрим факты, показывающие на наличие газопылевых космических облаков с абсолютной скоростью, близкой к нулю.

Австралийскому астроному Тобиасу Вестмейеру (Tobias Westmeier) удалось составить полную карту\* расположения и скоростей движения быстрых облаков нейтрального водорода в нашей галактике Млечный Путь, Большом и Малом Магеллановых облаках и соседних карликовых галактиках, где показано наличие областей пространства, в которых абсолютная скорость близка к нулю (рис. 2).

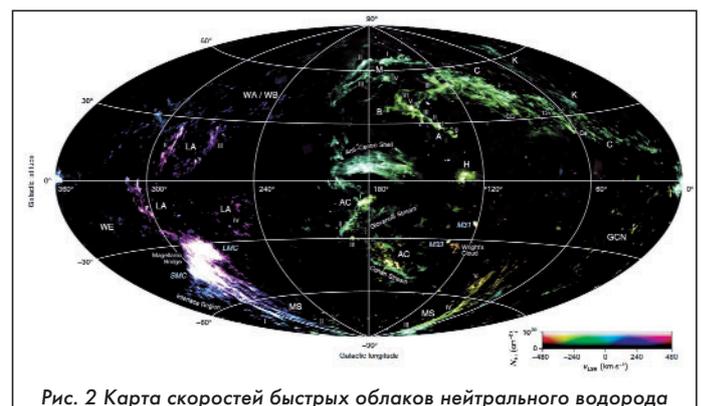


Рис. 2 Карта скоростей быстрых облаков нейтрального водорода

Ученый использовал данные обзора HI4PI, проведенного австралийской обсерваторией Паркс, а также радиотелескопом Effelsberg в Германии. Его статью опубликовал журнал Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Исходя из анализа выражения (4) можно сказать, что:

1. Момент **образования** Вселенной, о котором так много говорится в современных теориях развития Вселенной, не было и, следовательно, никогда не будет. Материя существовала вечно и никогда не перестанет существовать.

2. Материя постоянно переходит из одного состояния в другое. Крайние формы существования материи Вселенной зависят от абсолютной скорости движения и температуры:

- это ПКМ (при нулевой температуре по Кельвину и нулевой абсолютной скорости);

- и это звезды и планеты при высоких значениях температуры звезд и высоких значениях абсолютных скоростей.

Смерть звезды с одной стороны разрушительный процесс, с другой - созидательный. На заре своей жизни звезды генерируют огромное количество энергии, превращая два атома водорода в гелий. Когда водород заканчивается, начинается производство углерода, затем кислорода и так вплоть до железа. Процесс гибели звезды, в зависимости от её размера, сопровождается переходом её в белый карлик или нейтронную звезду, а при больших размерах - в черную дыру.

Отдельно следует рассматривать черную дыру. Астрономические наблюдения показывают, что ЧД имеет плотность  $18,5 \text{ кг/м}^3$  при массе погибшей звезды в 1 миллиард Солнц, а при 10 миллиардах масс Солнца имеет плотность ниже плотности воздуха у поверхности Земли [13]. Чем ниже радиус ЧД, тем больше её плотность -  $10^{14} \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, в зависимости от **процессов**, идущих в ЧД (от возраста ЧД), изменяется значение её плотности от высоких до низких значений. При этом вокруг ЧД образуется аккреционный диск. Астрономы определили, что "аккреционный диск - это структура (часто околозвездный диск), образованная диффузным материалом, находящимся в орбитальном движении вокруг массивного центрального тела". Фактически это поверхность ЧД, которая, имея небольшую абсолютную скорость ЧД, МО которой слипаются, образуя большие чем исходные МО, и под воздействием окружающего космоса начинает нагреваться, а значит в ней начинают появляться электрические заряды, которые создают ФС между МО, тем самым начинается формирование самых простейших атомов, а затем и молекул. При достижении определенной температуры диффузный материал аккреционного диска вступает в термоядерную реакцию и процесс формирования новой звезды.

В [14] ЧД "Стрелец А" и весь этот регион пространства ЧД "идеальная среда для активного формирования звезд".

В силу вышесказанного можно говорить об **образовании** галактик, звезд и планет из ЧД и космических облаков нейтрального водорода.

С другой стороны, гибель звезд - это переход материи в состояние абсолютного нуля температуры и абсолютного нуля скорости. Кстати, гибель планеты происходит после гибели звезды, а гибель звезды - это процесс выгорания её материи.

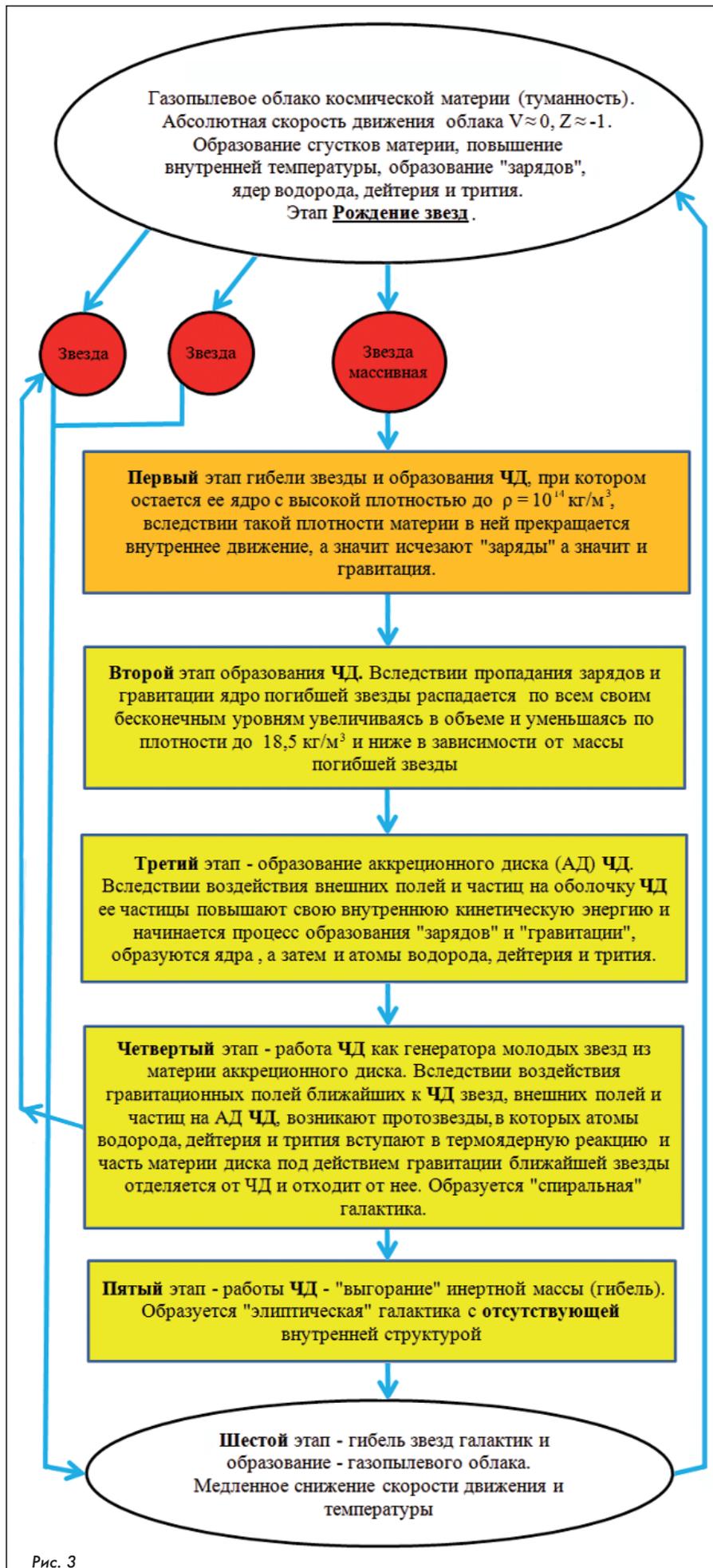


Рис. 3

Механизм запуска образования новой звезды из погибшей материи (газо-пылевые облака или ЧД) в анализе выражения (4) 2-й и 3-й пункты. Когда материя постепенно охлаждается до 0 К (теряя заряды на всех уровнях) и теряя свою абсолютную скорость, но при всем этом приобретая свойство резонансного взаимного поглощения в соответствии с (4), когда  $Z = -1$ , т.е. свойства образования МО, вначале самых малых пи-мезоны, нуклоны и далее до атомов водорода, дейтерия и трития.

Периодический процесс зарождения и гибели галактик, звезд и планет будем понимать как вечный процесс существования материальной Вселенной, а на рис. 3 представлен бесконечный процесс её трансформации.

**Выводы**

1. Вселенная вечна и существует одновременно в состоянии двух фаз развития - "неустойчивой фазы" и "устойчивой фазы", переходящих во времени друг в друга.

2. "Неустойчивая фаза" развития вселенной характеризуется тем, что материя в этой фазе имеет:

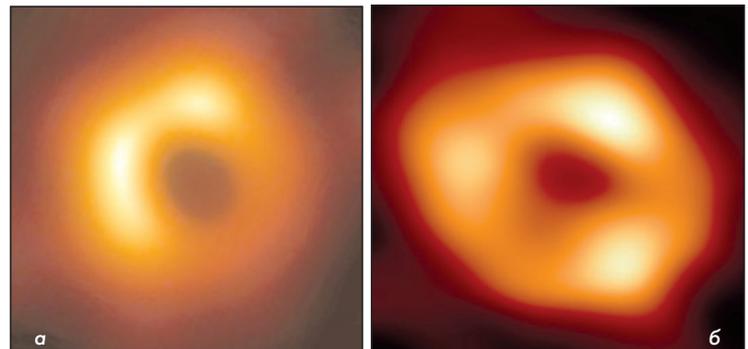
- температуру близкую к абсолютному нулю, в ней практически прекращается внутреннее движение, вследствие чего отсутствуют заряды на всех уровнях МО, а также гравитационная масса (или свойство гравитации), а это в свою очередь ведет к отсутствию ФС формирующих предметы (в том числе и космические, такие как звезды и планеты);
- абсолютную скорость, постепенно приближающуюся к нулю, что обеспечивает при взаимодействии частиц их слияние с повышением внутренней энергии и возникновением условия образования "зарядов". Эти "заряды" на самих нижних уровнях материи начинают образовывать ФС между частицами, формируя МО, в том числе ядра и атомы водорода, дейтерия и трития, создавая исходный материал для образования звезд.

3. "Устойчивая фаза" развития вселенной характеризуется тем, что материя в этой фазе имеет:

- температуру значительно выше абсолютного нуля, благодаря внутреннему движению и силовым электромагнитным полям, которые необходимы для образования всех тел, вплоть до планет и звезд;
- благодаря взаимному электромагнитному взаимодействию звезд и окружающих их планет, имеющих абсолютную скорость порядка десятков километров в секунду и выше, обеспечивается устойчивое существование всех фазовых состояний материи (жидкое, твердое, газообразное, плазма) кроме ПКМ.

**Литература**

1. www.osnmedia.ru/1000/vselennaya-fridmana/
2. Hi-News.ru. Теория Большого взрыва: история эволюции нашей Вселенной. Николай Хижняк.
3. ru.m.wikipedia.org/wiki/Инфляционная модель Вселенной.
4. 2dip.su/теория\_концепция\_современного\_естествознания/эволюция\_крупномасштабных\_структур\_теоретические\_положения/
5. ru.m.wikipedia.org/wiki/Звездное\_население
6. Л.А. Похмельных. Электрическая вселенная. Под ред. академика РАН Д.С. Стребкова. ФГБНУ ФЦАМ ВИМ, ООО "Сам Полиграфист", 2019.
7. Воронков Д.Н. Неточечная физика. Функциональные связи системы как энергетическая характеристика // Образование и наука в России и за рубежом. № 3. 2021. стр. 79.
8. Зверев Г.Я. Физика без механики Ньютона, без теории Эйнштейна и без принципа наименьшего действия. М. Изд. ЛКИ. 2007.
9. ru.wikipedia.org/wiki/Агрегатное состояние#Четыре основных состояния
10. ru.m.wikipedia.org/ Туманность Бумеранг
11. ru.m.wikipedia.org/wiki/Абсолютно\_черное\_тело.
12. fb-ru.turbopages.org/fb/ru/s/article/569890/2024-elektricheskiy-zaryad-eto-fundamentalnaya-harakteristika-materii
13. Fb-ru.turbopages.org/turbo/fb/ru/s/frticle/462456/plotnost-cherpou-dyryi-svoystva-pokazateli-interesnii-fakty Плотность чёрной дыры: свойства, показатели, интересные факты
14. habr.com/ru/articles/415211/ Млечный Путь прячет десятки тысяч чёрных дыр



Компьютерная реконструкция изображений чёрных дыр в центре галактик: а - М87, б - Млечный путь

**ИНФОРМАЦИЯ. Малогабаритные ГТД для БПЛА**

**В** Самарском университете им. Королева начались комплексные испытания малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) для компактных БПЛА, которые с этими двигателями смогут летать быстрее и поднимать большую нагрузку. Испытания продлятся около трех месяцев.

Особенностью малоразмерного газотурбинного двигателя "Колибри" по сравнению с поршневыми той же размерности - высокое соотношение тяги и веса. При массе двигателя 2,1 кг, его максимальная тяга должна составить 220 Н. Длина "Колибри" - 30,6 см, диаметр - 11,8 см. БПЛА, оснащенный этим двигателем, при взлетной массе 45 кг сможет развивать максимальную скорость 800 км/ч на максимальной высоте полета 9 км.

Среди других особенностей разработки - встроенная, а не отдельная система управления, электрический запуск двигателя и возможность его дистанционного перезапуска во время полета. Двигатель может

быть оснащен электрогенератором, с помощью которого будет подзаряжаться аккумуляторная батарея, питающая электронику БПЛА.

В качестве топлива для МГТД "Колибри" используется керосин, у которого энергоёмкость в 40 раз больше, чем у литий-полимерных батарей. Да и в сравнении с бензином у керосина выше теплотворная способность, что при одинаковой массе топлива даёт большую тягу.

"Колибри" (МГТД-22) - самый первый и самый маленький в линейке малоразмерных газотурбинных двигателей, разрабатываемых в молодежной лаборатории университета. Но уже в лаборатории прорабатываются проекты еще двух двигателей - МГТД-40 "Чайка" и МГТД-100 "Орел". Они будут превосходить "Колибри" по размеру,



тяге, мощности и другим характеристикам. Так, масса "Чайки" составит 4 кг, тяга - 400 Н, длина корпуса - 38 см, диаметр - 15 см. Масса "Орла" - 13 кг, тяга - 1200 Н, длина - 62 см, диаметр - 24 см.

Четыре МГТД-100 смогут обеспечить скоростному грузовому БПЛА вертикальный взлет и посадку и доставку груза массой до 110 кг с максимальной скоростью 480 км/ч.

Для испытаний разрабатываемых МГТД тягой до 1500 Н спроектирован стенд, позволяющий исследовать как отдельные узлы - компрессор, камеру сгорания, турбину, систему смазки и т.д., так и весь двигатель в целом. Стенд оснащен топливной системой, датчиками для измерения температуры, расхода воздуха и топлива, а также автоматизированной системой обработки результатов измерений.

# УРАН, ТОРИЙ, ТЕРМОЯД?



АО "НПО "Мобильные информационные системы":  
**Александр Николаевич Медведь**, доцент, к.т.н.  
**Андрей Иванович Касьян**, доцент, к.т.н.

**Рассматриваются перспективные направления развития ядерной энергетики Российской Федерации.**  
*The prospects for the development of the nuclear power industry are considered.*

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, ториевый топливный цикл.  
**Keywords:** energy security, thorium fuel cycle.

Важнейшим стратегическим направлением государственной энергетической политики России является обеспечение энергетической безопасности. Одной из существенных угроз, затрагивающей все уровни, начиная с федерального, является угроза в энергетической сфере, в частности, в ядерной энергетике. В качестве одного из направлений совершенствования системы обеспечения энергетической безопасности в области ядерной энергетики может стать переход с общепринятого уранового на ториевый топливный цикл. Альтернативными или дополняющими направлениями специалисты считают так называемый замкнутый цикл, а также термоядерный синтез. Купирование вызовов и решение энергетических проблем с помощью ядерной энергетики, очевидно, потребует совершенствования ядерного топливного цикла, вовлечения новых видов ядерного топлива.

Новая Доктрина энергетической безопасности России утверждена указом Президента РФ В. Путина 13 мая 2019 г. Доктрина учитывает практически все важные направления действий государства в указанной области. Отмечается, что более трети генерации электроэнергии в нашей стране приходится на атомную и гидроэнергетику. Указывается на лидирующую позицию России в части работ по реализации замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ).

В Доктрине выделяется ряд положений и важных вызовов, но реалии сегодняшнего дня таковы, что многие из них должны быть скорректированы. Например, те положения, которые связаны с совместными проектами на базе иностранных месторождений и другие подобные. На современном этапе определенные круги взяли курс на изоляцию России, на запрещение поставок ей важного сырья, технологий, оборудования, даже на развал страны. Делаются попытки максимального устранения России с международных рынков и т.д. Очевидно, что развитие международных отношений в сфере энергетики встретит значительные трудности. В связи с этим необходимо опираться на собственные силы и не ждать "манны небесной" и добрых спонсоров со стороны.

С точки зрения техногенной безопасности следует обратить внимание на возникающие риски в сфере важнейшего компонента топливно-энергетического комплекса, а конкретно - в области минерально-сырьевой базы. Следует также отметить требования Доктрины достичь в 2035 г. доли утилизированных и обезвреженных отходов - 85 %. Отмечается, что для решения поставленных задач установленная мощность реакторов на быстрых нейтронах (БН) должна достигнуть 1,78 ГВт.

В нашей стране была декларирована амбициозная цель - довести в энергетике долю атома до 25 % к 2045 году. По имеющимся оценкам, это потребует ввода примерно 24 новых блоков, в том числе на новых площадках. За последние 10 лет накоплен опыт успешной эксплуатации АЭС наряду с выявлением возможности повышения безопасности. Отметим, что преобладание легководных реакторов обусловлено эффективностью этих установок. Атомная энергетика включена в российскую таксономию и признана зеленой. Другими словами, ядерная энергетика включается в "стандарт "чистой" энергетики", решающей серьезные экологические проблемы [1].

Здесь следует сделать замечание, что сами атомные электростанции не выбрасывают в атмосферу вредные газы. Но цикл включает не только АЭС, но и многое другое. Конечно, выброс в атмосферу в этом случае не сравнить с гигантскими выбросами угольных ТЭС. В нашей стране развитие неуглеродной энергетики - атомной, гидроэнергетики - является одной из важных стратегических инициатив ЭС-2035.

## Урановый цикл

По итогам прошлого года на российских АЭС выработано электроэнергии на 0,7 % больше, чем в 2021 году. На Ленинградской, Смоленской и Курской АЭС вводятся в строй новые энергоблоки с реакторами типа ВВЭР-1200. Россия в настоящий момент является лидером по числу строящихся энергоблоков АЭС за рубежом - ведется строительство 6 блоков и еще по 5 блокам имеются предварительные договоренности. Проектируются и строятся модульные реакторы и АЭС. Включена в работу первая в мире плавучая АЭС "Академик Ломоносов" с двумя реакторами. Дистраивается ядерный реактор на быстрых нейтронах (БРЕНТ). Все это вызывает оптимизм, но предстоит, очевидно, преодолеть немалые трудности.

Почти 95 % мировой добытого урана идет сегодня на производство электроэнергии. Разведанные запасы оцениваются в 5...6 млн т (и более 20 млн т в фосфатных месторождениях). К перспективным ресурсам относят также уран, содержащийся в морской воде (40 млрд т). Но технология добычи урана из морской воды весьма сложна и не освоена применительно к крупномасштабному производству. По распространенности уран можно сравнить с цинком. В земной коре его примерно 1,5 трлн т. В различных источниках приводятся несколько отличающиеся данные, но более важен вопрос о способности добывающей промышлен-

ности удовлетворять потребности экономики. По мнению профессионалов, работающих в этой области, более-менее доступного урана на Земле хватит еще примерно на полстолетия. Если же реализовать замкнутый цикл (для этого придется повсеместно внедрить реакторы-размножители на быстрых нейтронах) - то урана может хватить и на 10 000 лет.

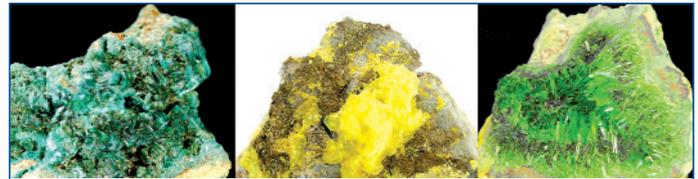
В СССР и России с середины прошлого века добыто более 1,5 млн т природного урана. После распада СССР на территории Российской Федерации осталось чуть больше одной трети ураносодержащих руд. На территории собственно России добывается за год порядка 4...5 тыс. т. Конечно, имеется возможность увеличить добычу, но сможет ли страна обеспечить себя полностью? "Росатом" за последнее время осуществил скупку урановых месторождений за пределами евразийского континента. Самая известная сделка - покупка контроля над канадским добытчиком урана Uranium One, имеющим лицензии на добычу этого элемента во многих странах.

"Росатом" приобрел также австралийскую Mantra Resources, флагманским проектом которой является освоение месторождения в Танзании. Более того, известно, что ряд ураносодержащих участков в Африке купили и несколько не связанных с "Росатомом" крупных российских компаний. Очевидно, что существует опасность попадания этих активов под западные санкции.

Российские фирмы являются крупнейшими мировыми поставщиками низкообогащенного урана, поставляя его не только в почти всю Юго-Восточную Азию и Европу, но и в США. Однако и тут России могут закрыть доступ на рынок. Ожидается, что источники углеводородных источников и другие факторы к середине XXI века в конечном итоге приведут не только к удорожанию энергии и т.п., но и к различным международным конфликтам.

Китай планирует многократное увеличение потребления урана. Ему, по мнению экспертов, предстоит "сложная работа с будущим урановым картелем, созданным по типу ОПЕК на основе казахских, монгольских запасов и с участием России". Особое место здесь занимает Казахстан, который лидирует в мире по объемам добычи урана. Как известно, в Казахстане происходят сложные процессы. У всех на памяти попытка цветной революции. Западная пресса начала свою кампанию, направленную на дестабилизацию обстановки в стране, что неизбежно отразится на мировом рынке урана.

Вернемся в Россию. Из сказанного ясно, что перед нашей страной уже стоят, а в перспективе и обострятся вызовы в области получения урановой руды и производства уранового концентрата. Напомним, что еще во времена СССР для добычи и переработки урана вблизи разведанных месторождений были построены горнодобывающие и перерабатывающие предприятия. Добыча производилась открытым способом (карьеры) или в рудниках. Все эти предприятия оказывали неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Впрочем, любое предприятие, добывающее полезные ископаемые, оказывает негативное воздействие на природу (так, например, в Канско-Ачинском угольном бассейне 6 тыс. га сельскохозяйственных угодий выведены из оборота). Основными источниками загрязнения в случае уранодобывающих предприя-



Минералы, содержащие уран.  
Известно свыше 200 урановых и ураносодержащих минералов

тий являются карьеры и "хвостохранилища" (складированные отвалы переработанной руды и отходы). Из семи крупных уранодобывающих комбинатов Советского Союза в России остался сейчас только один, входящий в холдинг "АРМЗ". Открытый (карьерный) метод в России сегодня не применяется; месторождения разрабатываются шахтным методом (глубина порядка километра).

В настоящее время разработаны новые, более совершенные экологически эффективные технологии и операции. Разрабатываются схемы обогащения руды, когда процесс осуществляется на глубине до подъема горной массы на поверхность. Разработаны такие технологии как, например, автоклавное выщелачивание руды в крупных закрытых резервуарах с нагревом, что приводит к превращению серы сульфидов в серную кислоту и т.д. В "Росатоме" не скрывают, что концентрация урана в российских месторождениях крайне низка (порядка 0,3 % и даже ниже, тогда как, например, в Канаде 3...4 %), а многие месторождения "трудноизвлекаемые", однако потребность в сырье не исключает их разработку. Заметим, если концентрация урана будет меньше 0,1 %, то никакая технология не сможет обеспечить рентабельную добычу.

Наша страна обладает самой передовой технологией обогащения урана. В основе технологии лежит метод использования газовых центрифуг. Объединяет все обогатительные предприятия и организации Топливная компания "ТВЭЛ" госкорпорации "Росатом". В рамках компании консолидированы мощности всего топливного цикла - от обогащения урана до производства ядерного топлива. Предприятия расположены по всей стране: от Санкт-Петербурга до Ангарска, на них занято около 40 тысяч человек. Процесс обогащения урана осуществляется в газовых центрифугах, где газ (гексафторид урана) раскручивается с огромной скоростью - 1500 оборотов в секунду. При этом молекулы с тяжелым изотопом (уран-238) "отжимаются" к стенке, тогда как молекулы с более легким изотопом (уран-235) остаются у оси вращения. Таким образом удаётся разделить изотопы. Если соединить десятки тысяч центрифуг, то можно добиться высокой степени обогащения. В Доктрине энергетической безопасности России поставлена задача разработки центрифуг нового поколения.

Наиболее распространенным типом энергетического ядерного реактора является водо-водяной (теплоноситель и замедлитель нейтронов - вода) поколения 3+ (ВВЭР1000 и ВВЭР-1200). Отметим, что в большинстве современных реакторов цепная реакция деления протекает на тепловых нейтронах, что требует обогащения топлива по урану-235 до 3...4 %. Без обогащения уран можно использовать в реакторах на тяжелой воде, однако получение тяжелой воды - дорогое удовольствие. При самом экономном использовании угля один килограмм может дать только 7 кВт·ч электроэнергии. В случае газа - в два раза больше. От одного килограмма уранового топлива можно получить до 360 МВт·ч электроэнергии. Физика процесса основана на цепной реакции деления.

В типичном ядерном реакторе протекает управляемая цепная ядерная реакция, сопровождающаяся выделением энергии (т.е. реактор выступает в роли кипятильника). Спектр нейтронов в активной зоне сложен, но в среднем энергия нейтронов теплового реактора не превышает 0,1 эВ, т.е. это тепловая энергия (в реакторах на быстрых нейтронах средняя энергия может быть порядка 0,1... 0,6 МэВ). По сути, атомные электростанции - это тепловые электростанции. Выделяемая ядерная энергия (другими словами, тепло) преобразуется в электрическую. Кардинальным отличием от тепловых электростанций, работающих на органическом топливе, является то обстоятельство, что АЭС работает на

Урановый карьер



ядерном горючем (в основном, U-235, Pu-239, но не исключено и применение тория, из которого получается делящийся U-233). При делении 1 г изотопов урана или плутония высвобождается примерно 22 500 кВт·ч, что эквивалентно энергии, содержащейся в 2800 кг условного топлива.

Известны несколько разновидностей ядерных реакторов:

- уже упоминавшиеся водо-водяные или корпусные реакторы под давлением (международная аббревиатура PWR, отечественная - ВВЭР);

- кипящие реакторы BWR (ABWR);
- реакторы на тяжелой воде PHWR (CANDU);
- газоохлаждаемые реакторы GCR (AGR);
- реакторы большой мощности каналные РБМК;
- реакторы на быстрых нейтронах БН (FBR);
- высокотемпературные (ториевые) реакторы (HTR);
- жидкосольевые реакторы (MSR);
- реакторы с жидкотеплоносителем (LMR).

Если в реакторе образуется новый делящийся материал, отличный от выгорающего, то реактор называется конвертером. Если вторичный нуклид совпадает с первичным, то реактор называется бридером.

В цепной реакции, происходящей в активной зоне, тяжелые ядра (например, урана) делятся и при этом возникают новые нейтроны, что дает предпосылки к дальнейшим делениям. Эту картину можно представить наподобие бильярда. Множество маленьких шариков (нейтроны) налетают на более крупные шары (это ядра тяжелых атомов). При попадании нейтроны рассеиваются как шары, но иногда (с некоторой вероятностью) происходит деление ядер. Если ядро тяжелого атома разделилось, то выделяется энергия, и в среднем возникает около двух-трех новых нейтронов. Часть родившихся нейтронов может попасть в соседние ядра и снова вызвать деление. Такой лавинообразный процесс называется цепной реакцией. Самоподдерживающаяся цепная реакция деления идет в реакторе, точнее в среде (активной зоне), в которой обеспечен управляемый процесс размножения нейтронов. Нейтрон является тем "философским камнем", с помощью которого и энергию может выделить, и золото получить. Но здесь не обойтись ретортой и горелкой. "Горелка" должна представлять собой фундаментальное сооружение - шедевр человеческой мысли, обеспечивающий успешный процесс. С другой стороны, поскольку цепная реакция обладает определенной "самостоятельностью", нельзя исключить вероятности выхода её из-под контроля, когда энергии выделится "слишком много". В этом кроется основная проблема безопасности современных реакторов.

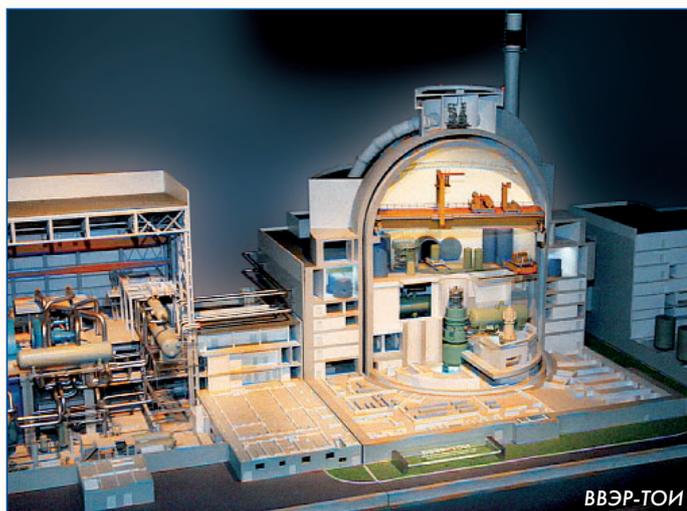
Сразу нужно отметить, что ядерный взрыв в реакторе невозможно осуществить. Конструкция активной зоны такова, что нейтроны теряют значительную часть своей энергии (даже в случае быстрых реакторов - на порядок). Поэтому аварийный разгон реактора следует рассматривать как неуправляемую вспышку делений. Например, в катастрофической чернобыльской аварии в ре-

акторе четвертого блока произошло не более  $8 \cdot 10^{20}$  актов делений, что составило в тротиловом эквиваленте около 5 т тринитротолуола (чего оказалось достаточно для разрушений). Получается, что для нагрева и испарения активной зоны требуется разделить всего лишь несколько миллиграммов тяжелых ядер, в то время как при ядерном взрыве делится килограмм и более. Катастрофические последствия аварии связаны с выбросом накопленной радиоактивности из разрушенного реактора в окружающую среду.

Рассматривая принципы, положенные в основу функционирования реактора, сразу сделаем некоторые замечания. Из числа делящихся материалов, пригодных для применения на практике (уран-235, уран-233, плутоний-239), только уран-235 существует в окружающем нас мире: он составляет примерно 0,7 % природного урана. Тяжелые ядра указанных актиноидов делятся нейтронами любых энергий (с некоторой вероятностью), лишь бы только произошло "попадание" нейтрона в ядро. Поэтому указанные ядра носят название делящихся. Их участие "в игре" обусловлено только одним обстоятельством - доступностью. Некоторые другие ядра также являются делящимися, но они малодоступны.

Из природного урана чистый радионуклид - уран-235 может быть получен "отделением" от других изотопов, в первую очередь от урана-238. В настоящее время наиболее эффективным способом разделения изотопов является газоцентрифужный метод.

Плутоний-239 и уран-233 в природе не существуют. Они могут быть получены в реакторах в результате захвата нейтронов ядрами того же урана-238 (получается плутоний) или ядрами тория-232 (уран-233). Заметим, что плутоний и уран-233 будут образовываться в любом реакторе, если там содержится уран-238 или торий. В связи с этим ядра урана-238 и тория-232 могут быть косвенно "использованы" в качестве горючего, и их называют сырьевыми.



В России сейчас на одиннадцати атомных электростанциях эксплуатируются 38 энергоблоков суммарной мощностью около 30 ГВт. Ядерная энергетика требует сырья. Можно оценить потребное количество добываемой для нужд страны урановой руды (следует учесть, что кроме развития энергетики уран может потребоваться для транспортных реакторов, космических систем и т.д.). Оценим приблизительно эту требуемую общую массу в 20 000 т (по некоторым данным требуется 30 000 т) в год. Около 30 % от этой массы можно получить путем переработки отработавшего топлива и других источников. Остается около 14 000 т, которые необходимо добыть из недр. В настоящее время мы добываем около 5000 т, а остальное покупаем на рынках. Но серьезный и ответственный подход к обеспечению безопасности говорит о том, что собственная добыча должна составлять именно 14 000 т в год.

Оценим наши запасы. Суммарные запасы урана в мире оцениваются в 30...40 млн т, а экономически эффективные в 5...6 млн т. В России экономически эффективные запасы урана оцениваются в 0,15 млн т (по другим открытым источникам - около 120 000 т). Если не увеличивать добычу урана, то известных рентабельных запасов хватит всего на 10 лет. Это серьезный стратегический риск. Отсюда, во-первых, следует необходимость работ по геологической разведке и освоению новых месторождений (требования Доктрины). Но еще более важное - разработка достаточно эффективных, экономически и экологически приемлемых технологий извлечения урана из недр. Следует также искать другие технологические пути купирования подобных рисков. Главное, что необходимо принять во внимание - запасы природного урана исчерпаемы, причем в очень короткое по историческим меркам время! В этой ситуации необходимо искать пути быстрого и эффективного решения указанных проблем.

### Реакторы на быстрых нейтронах

22 сентября 2022 г. произошло событие, которое может изменить к лучшему жизнь человечества. В Свердловской области был впервые выведен на полную мощность четвертый энергоблок Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-800.



БН-800

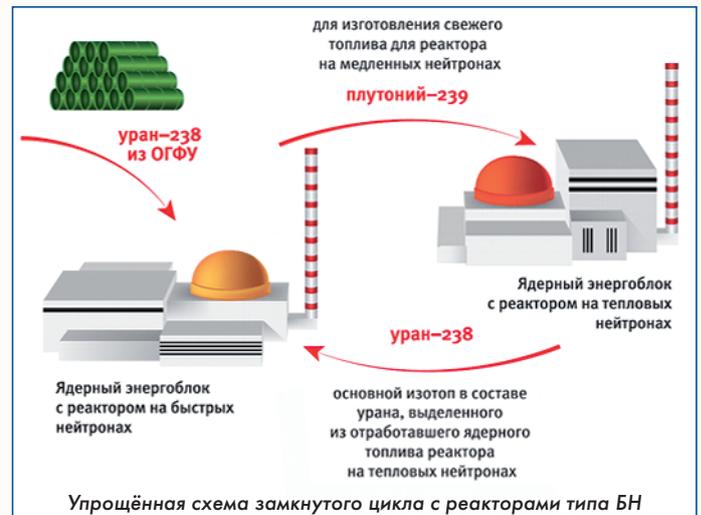
Реактор на быстрых нейтронах - ядерный реактор, в активной зоне которого нет замедлителей нейтронов (воды или графита). Отсюда и название этого типа реакторов, которые позволяют превращать отработавшее ядерное топливо в новое топливо для АЭС, образуя замкнутый ядерно-топливный цикл. Реакторы на быстрых нейтронах используют в качестве теплоносителя легкоплавкие металлы. Так, в реакторе БН-800 на Белоярской АЭС используется натрий.

В активную зону Белоярского реактора загружается не обычный уран-235, а так называемое МОКС-топливо (MOX (Mixed-Oxidefuel) - ядерное топливо, которое содержит несколько видов оксидов плутония и урана).

Белоярский БН-800 сразу проектировали под МОКС-топливо, но загружали его постепенно. В 2014 г. большую часть стартовой загрузки составляло обычное урановое топливо (БН-800, в принципе, может работать и на нём), МОКС-топлива было 16 %. В январе 2021 г. после очередной перегрузки доля МОКС-топлива выросла до трети. В январе 2022 года - до двух третей. В конце сентября того года блок был полностью загружен МОКС-топливом, изготовленным на Горно-химическом комбинате в городе Железногорске Красноярского края.

Главное преимущество реактора на быстрых нейтронах состоит в том, что он позволяет превращать отработавшее ядерное топливо в новое топливо для АЭС, образуя так называемый "замкнутый ядерно-топливный цикл". Благодаря этому атомная энергетика будущего, в создании которой лидируют российские атомщики, не будет иметь ядерных отходов (точнее - высокоактивных отходов будет гораздо меньше).

Еще одним преимуществом реактора на быстрых нейтронах является то, что в качестве топлива может использоваться наиболее распространенный изотоп уран-238, который в обычных реакторах ВВЭР или РБМК является своеобразным "балластом" и хуже того - источником весьма неприятного высокорadioактивного продукта плутоний-240.



Первым атомным реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем стал американский EBRI, запущенный 20 декабря 1951 г., но к электросетям он подключен не был, энергия использовалась в основном для освещения здания, в котором находился реактор. В 1965 г. реактор остановили и запустили второй такой же, но в 1994 г. остановили и его. Владельцы АЭС США - в основном частные компании, не видят коммерческих преимуществ в быстрых реакторах по сравнению с обычными "тепловыми".

Не вышло у американцев и с военным использованием натриевых быстрых реакторов. Натрий бурно реагирует с водой и горит на воздухе, что усложняет любую аварию с утечкой теплоносителя. Поэтому после трехлетней эксплуатации единственной американской подлодки с натриевым теплоносителем USS Seawolf были сделаны отрицательные выводы о применимости такого типа реакторов в подводном флоте. На указанной подлодке реактор был заменен обычным водо-водяным, а эксперименты с использованием быстрых реакторов Пентагон прекратил.

14 июля 1974 г. во Франции был пущен в коммерческую эксплуатацию реактор на МОКС-топливе "Феникс". Из-за нескольких аварий его периодически останавливали и окончательно заглушили в феврале 2010 г., так и не выведя на проектную мощность.

В Японии быстрым реактором не повезло: в 1995 г. на реакторе "Мондзю" через четыре месяца после пуска произошла крупная утечка натрия. Потом на протяжении 15 лет на АЭС производился ремонт, но при перезапуске снова произошла авария. С тех пор реактор не работает.

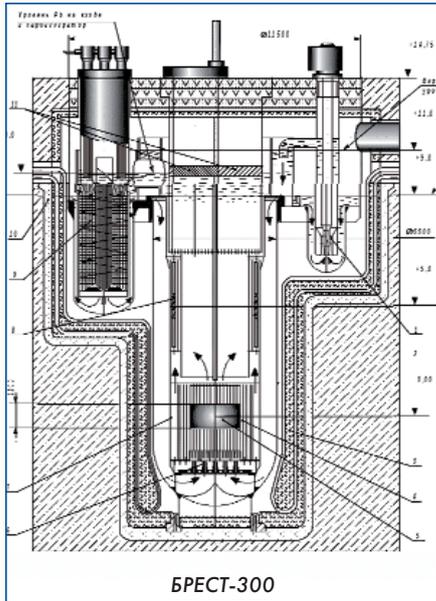
Индия имеет исследовательский быстрый реактор FTBR, но с пуском демонстрационного реактора PFBR-500 у индийцев не ладится уже много лет по причине отсутствия опыта и специалистов. Многочисленные отказы экспериментального оборудования ставят под вопрос реализацию этого проекта.

В этой области работают и в КНР, которая, впрочем, использует российское топливо с обогащенным ураном: там в 2011 г. запустили экспериментальный реактор на быстрых нейтронах CEFR.

Реактор CEFR мощностью 65 мегаватт с натриевым теплоносителем проектировался еще в 90-х годах в России, но был построен китайцами самостоятельно. Задача перевода реактора на собственное МОКС-топливо пока не решена.

Следующим шагом в развитии атомной энергетики на быстрых нейтронах станет российский реактор БРЕСТ-300, создаваемый в рамках росатомовского проекта "Прорыв".

В этом реакторе в качестве теплоносителя используются свинец с температурой плавления 327 °С. По заявлениям разработ-



чиков, такое техническое решение упрощает управление и повышает энергоэффективность реактора. Конструкция БРЕСТ-300 обеспечивает так называемую естественную безопасность: на этом реакторе невозможна авария из-за неконтролируемого выброса нейтронов, приводящего к цепным реакциям, например, в случае разгона реактора по мощности.

Реактор БРЕСТ-300 с электрической мощностью 300 МВт строят в Северске (Томская область), решая таким образом задачу энерго- и теплоснабжения

города. Вокруг него будет построен комплекс, который позволит решать задачи регенерации топлива. И все процессы создания замкнутого ядерного топливного цикла будут сосредоточены в одном месте.

Параллельно решается задача по выводу ядерных отходов из топливного цикла без нарушения естественного радиационного баланса Земли.

В 1945 г. Энрико Ферми сказал, что страна, которая первой разработает реактор на быстрых нейтронах, получит значительное преимущество в использовании атомной энергии.

Россия первой запустила реактор на быстрых нейтронах с полным циклом использования МОКС-топлива, которое позволяет использовать неисчерпаемые запасы природного урана. Это дает нашей стране неоспоримый долгосрочный приоритет.

Доктриной энергетической безопасности России предусматривается доведение установленной мощности реакторов на быстрых нейтронах до 1,48 ГВт к 2024 г.

### Термоядерный синтез

Как известно, ядерные реакции с огромным энерговыделением могут происходить не только в результате деления, но и синтеза (слияния) легких ядер, например, изотопов водорода - дейтерия и трития. Эти реакции еще в пятидесятые годы минувшего века были реализованы в водородных бомбах, но они неуправляемы и носят взрывной характер. В декабре 2022 г. пришло сообщение, что в лабораторных условиях удалось получить положительный выход реакции (инерционное удержание) при синтезе в ограниченном объеме, т.е. в результате синтеза было получено больше энергии, чем затрачено. Для создания необходимых условий был применен многоручевой лазер с энергией 2,2 МДж в импульсе. Конечно, до производства энергии в промышленных масштабах еще далеко, но очередной шаг вперед сделан.

При реакции синтеза образуются несколько новых ядер. Для того, чтобы она произошла, ядра должны подойти очень близко друг к другу. Чтобы близко подойти им нужно преодолеть электрические силы отталкивания (все ядра положительно заряжены). Отсюда требуется большая скорость сближения. Когда ядра сблизятся, в игру вступают ядерные силы притяжения (проявления кварк-глюонной ядерной структуры). В результате образуется новое ядро или ядра. При этом из-за потери массы (масса дочернего ядра меньше суммы масс ядер, из которых оно образовалось) высвобождается энергия (по формуле  $E = mc^2$ ) в форме кинетической энергии продуктов синтеза (разлета дочерних ядер и частиц). Атомные ядра, имеющие небольшой заряд, легче свести на маленькое расстояние. В перспективной реакции синтеза ядер дейтерия и трития (сечение реакции около 5 барн, что на порядок превышает сечения подобных реакций; 1 барн =  $10^{-24} \text{ м}^2$  - "любимая"

единица ядерных сечений у атомщиков) выделяется 17,6 МэВ энергии, из которой 80 % уносят нейтроны (сверхбыстрые). Для протекания реакции необходим нагрев до десятков миллионов градусов. Такие условия впервые были обеспечены при взрыве устройства "Майк" в США в 1952 г. Примерно в тот же период ученые впервые задумались о возможности создания термоядерного энергетического реактора. Огромный вклад в результаты исследований в этом направлении внесли советские и российские специалисты.

Третий федеральный проект Комплексной программы "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ" носит название "Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий" и делится на несколько исследовательских направлений, связанных, в том числе, с разработкой:

- базовых термоядерных технологий;
- гибридных реакторных технологий и систем;
- плазменных технологий;
- лазерного термоядерного синтеза.

Одна из ключевых работ - создание термоядерного реактора типа "токамак" (токамак - это "ток-камера-магнитная катушка", одна из немногих в мире технических аббревиатур, имеющая русские корни) с реакторными технологиями (РТТ).

К настоящему времени в мире построено более 300 токамаков. В России сегодня действуют лишь небольшие токамаки в ГИЦ РФ ТРИНИТИ, в НИЦ "Курчатовский институт" и в ФТИ имени А.Ф. Иоффе, выполняющие исследовательские функции. На территории ГИЦ РФ ТРИНИТИ, площадью 88,5 тыс. м<sup>2</sup> ведется подготовка к строительству установки с РТТ. Реактор планируется запустить в 2030 г. Кроме этого, в планах - до 2024 г. довести рабочую мощность токамака Т-15МД в НИЦ "Курчатовский институт" до 12 МВт, а к 2030 г. - до 25 МВт.

Россия сегодня участвует в международном проекте термоядерного экспериментального реактора ИТЭР, но по известным причинам взаимодействие с Западом в этом направлении может зайти в тупик. Кроме того, специалисты утверждают, что международный проект не реализует все современные технологии, например, такие как литиевая защита первой стенки, ядерные blankets, высокотемпературные сверхпроводящие катушки магнитной системы и другие. Все эти технологии будут реализованы при создании реактора РТТ в России.

В глобальном масштабе РТТ разрабатывается как плазменный прототип термоядерного источника нейтронов для гибридного реактора. В НИЦ "Курчатовский институт" специалисты разрабатывают бланкет гибридных систем, в частности для наработки урана-233. В ГИЦ НИИАР на реакторе БОР-60 испытывают новейшие конструкционные материалы для гибридного blanketа будущей гибридной реакторной установки. В НИКИЭТ занимаются обоснованием уникальных конструктивных решений гибридных систем для создания новой экспериментально-стендовой базы термоядерных исследований.

Примером природного термоядерного реактора, по современным воззрениям, служит Солнце. На нем удержание вещества происходит благодаря его огромной гравитации, поэтому повторить в лаборатории такой сценарий невозможно. В земных условиях удерживать плазму достаточное время для протекания термоядерных реакций пытаются с помощью магнитного поля, создаваемого витками с током. Только, в отличие от металла, плазма не притягивается магнитом, а отталкивается от него. Это существенно усложняет задачу физикам: плазма старается покинуть область удержания и погибнуть на стенках вакуумной камеры ещё до начала протекания термоядерных реакций. Температура плазмы внутри камеры составляет более 100 млн градусов, и даже самые огнеупорные материалы стенок камеры начинают испаряться и загрязнять плазму, которая из-за этого меняет параметры, что приводит к затуханию процесса.

Известны несколько технологий удержания продуктов управляемого синтеза в реакторе, но основными являются уже обрисованные

ванная магнитная и инерциальная. При лазерном управляемом синтезе условия для инерциального удержания создаются путем сжатия оболочки капсулы, в которой содержится дейтериево-тритиевая смесь. Оболочка облучается мощным лазерным импульсом, в результате чего её верхний слой испаряется и действует на нижние слои подобно ракетному двигателю. Фактически реализуется аналог идеи сжатия вещества давлением излучения, применяемой в термоядерном оружии. При этом в термоядерном реакторе череда подобного рода реакций синтеза (микровзрывов) может происходить несколько раз в секунду. Лазерный импульс можно заменить импульсами от ускорителя ионов, возможны и другие технологии.



Установка термоядерного лазерного синтеза

Однако опыт минувших лет свидетельствует: до практической реализации идеи термоядерной электростанции еще очень далеко. Может быть, к середине века...

**Альтернатива - торий!**

Наряду с используемым уран-плутониевым существует еще один цикл - уран-ториевый. Здесь уран упоминается по той причине, что для запуска реакции должен сначала использоваться уран-235, а потом в процессе реакций из тория-232 синтезируется делящийся изотоп урана-233 (более выгодно для стартовых загрузок использовать не уран, а плутоний; особенно это будет сказываться в случае замыкания ядерного топливного цикла). К уран-ториевому циклу периодически вспыхивает нешуточный интерес. Опыт использования в энергетике уран-плутониевого цикла выявил ряд негативных моментов, заставляющих время от времени вспоминать об альтернативах.

Практически все типы ядерных реакторов в то или иное время изучались с точки зрения применения ториевого топлива. Это касается в первую очередь реакторов на тепловых нейтронах: высокотемпературного (HTR), на тяжелой воде (PHWR) и обычной легкой воде (PWR).

По-видимому, впервые испытания ториевого топливного цикла были проведены в Окриджской национальной лаборатории в 60-х годах прошлого века. В реакторе использовался высокотемпературный солевой расплав тетрафторида тория. Финансирование эксперимента было прекращено в 1976 г. Причина крылась в низкой рентабельности.

В период с 1967 по 1988 гг. в Германии эксплуатировался экспериментальный реактор AVR с насыпным бланкетом мощностью 15 МВт. Большую часть времени реактор работал на ториевом топливе. Топливо представляло собой 100 000 топливных элементов в виде шариков из смеси тория с высокообогащенным ураном.

Реактор Dragon мощностью 20 МВт с 1964 по 1973 г. работал в английском городе Уинфит и использовал ториевые ТВЭЛы. Он эксплуатировался в рамках совместного проекта, в котором наряду с Великобританией участвовали Австрия, Дания, Швеция, Норвегия и Швейцария.

В 1967-1974 гг. в США работал на уран-ториевом топливе вы-

сокотемпературный реактор Peach Bottom мощностью 110 МВт, изготовленный компанией General Atomic. В Нидерландах в течение трех лет эксплуатировался гомогенный ториевый реактор с водяной смесью мощностью 1 МВт.

Проводились и эксперименты с торием в реакторе на быстрых нейтронах. Так, например, в Германии был разработан реактор THTR мощностью 300 МВт, эксплуатировавшийся в период с 1983 по 1989 г.

Единственным коммерческим реактором на ториевом топливе в США был Fort St Vrain, работавший в 1976-1989 гг. Это был высокотемпературный реактор (1300 °С) с графитовым замедлителем и гелиевым охлаждением проектной мощностью 842 МВт (330 МВт электрических). Топливные элементы были изготовлены из карбида тория и карбида уран-ториевого сплава в виде микросфер. В реакторе использовалось почти 25 т тория. Исследования ториевого топлива для реакторов типа PWR проводились и на другом американском реакторе - Shippingport. В качестве "стартового" делящегося материала топлива использовались U-235 и плутоний.

Практический интерес к применению тория в реакторах типа CANDU был обусловлен, в первую очередь, теоретическим обоснованием возможности достигнуть в тяжеловодных реакторах на тепловых нейтронах околобрідерных режимов (вплоть до циклов с самообеспечением топливом). В этом направлении был проведен обширный цикл исследований в Канаде. В настоящее время подобная работа ведётся в Индии.

Для использования в реакторах CANDU были изучены два топливных цикла, предполагавших переработку выгоревшего топлива: топливный цикл с самообеспечением топливом и цикл с высоким выгоранием топлива. В итоге отметим, что в стандартной конструкции CANDU режима самообеспечения достигнуть невозможно из-за большого паразитного поглощения нейтронов в нетопливных материалах. Для улучшения баланса нейтронов необходимо уменьшить энергонапряжённость топлива, повысить степень очистки тяжёлой воды, удалить из активной зоны стержни, предназначенные для компенсации отравления ксеноном, отказаться от использования циркониевых сплавов.

Применительно к использованию в CANDU также исследовался открытый топливный ториевый цикл. В этом цикле слабообогащенное урановое топливо и торий размещаются отдельно в нескольких каналах, чтобы можно было обеспечить различную энергонапряжённость топлив. Урановое топливо в этом цикле выгорает и перегружается быстрее. Расчёты свидетельствуют, что потери при выгорании уранового топлива успешно компенсируются большим выгоранием ториевого топлива. Экономические показатели этого цикла схожи и могут даже превосходить аналогичные показатели для чистого уранового топливного цикла. Такой цикл после детальной проработки может быть рассмотрен для использования в тяжёловодных реакторах на ближайшую перспективу.

HTR - единственный реактор, изначально спроектированный под использования тория. Уран-233, образующийся из тория, имеет весьма привлекательные ядерно-физические характеристики, является стратегическим материалом. В США был испытан ядерный заряд на уране-233 (взрыв Teapoll). Это также позволяет надеяться на более эффективное использование топлива. Однако открытый ториевый топливный цикл здесь не дает существенных преимуществ; лучшая экономичность достигается в закрытом цикле при среднем обогащении по урану-235.

Можно предложить следующий проект реактора на ториевом топливе. В его основу положен принцип использования упомянутого термоядерного инициатора. В качестве активной зоны реактора представим себе цилиндр, поделённый на четыре сегмента. В центре расположен термоядерный инициатор, который генерирует импульсы нейтронов, порождаемые реакцией синтеза. Каждый сегмент представляет собой прочную конструкцию, оснащённую системой теплосъёма, в которую вставляется вкладыш из коррозионностойкого материала. Один из секторов - ре-

зервный, а в остальных находится расплав солей, содержащих торий. Реактивность невысокая, а обогащение незначительно. Реактор работает в импульсном режиме. Свободный цилиндрический сектор используется для ряда целей. В нем могут размещаться капсулы с дожигаемыми актинидами, бланкеты с торием (для получения урана-233) или комплекс для наработки трития (третий образуется при облучении лития-6 нейтронами). По истечении определенного срока жидкий солевой расплав из какого-то одного сектора переливается в резервный. В опустошенном секторе производится замена вкладыша из коррозионностойкого материала. Через некоторое время проводится замена остальных вкладышей. Так решается проблема с коррозией. Получаем реактор "револьверного" типа. Процесс можно автоматизировать. Как говорилось ранее, реактор типа ЖСР относительно безопасен. При нештатном разгоне топливо расширяется и реактивность естественным образом уменьшается. Конструкция реактора такого типа масштабируема, что позволяет создавать необходимые маломощные АЭС.

Итак, можно констатировать, что ядерное топливо на основе тория испытано в реакторах различного типа: легководных и тяжёловодных, высокотемпературных и т.д., но фактически в атомную энергетику не внедрено.

Многолетние исследования натолкнулись на всевозможные трудности, поэтому работы по использованию тория в атомной энергетике были прекращены. В настоящее время только в Индии продолжают работы, так как страна располагает большими запасами тория.



Монацит (торийсодержащий минерал) на берегу Индийского океана

**Главные преимущества ториевого цикла:**

1. Торий в 3-4 раза более распространён в земной коре элемент, чем уран.
2. Природный торий состоит из одного изотопа, и его вовлечение в топливный цикл в отличие от урана не требует трудоёмкого разделения изотопов.
3. Торий имеет некоторые более привлекательные ядерные свойства по сравнению с ураном (резонансный интеграл - среднее сечение по промежуточным энергиям нейтронов составляет треть от такового для урана-238 и т.п.). Поэтому ториевое топливо можно использовать в тепловом бриддерном реакторе.
4. Ториевое топливо обладает некоторыми благоприятными физическими и химическими свойствами, упрощающими эксплуатацию реактора. По сравнению, например, с наиболее распространённым реакторным топливом на основе диоксида урана (UO<sub>2</sub>), диоксид тория (ThO<sub>2</sub>) имеет более высокую температуру плавления и, в отличие от диоксида урана, не склонен к дальнейшему окислению.



Минералы, содержащие торий. Известно почти 100 торийсодержащих минералов

5. Поскольку уран-233, произведённый в ториевом топливе, неизбежно загрязнен ураном-232, то это ядерное топливо в какой-то мере защищает себя от хищений. Высокая радиологическая опасность таких материалов требует использования средств дистанционной обработки.

6. Длительная радиологическая опасность обычного используемого ядерного топлива на основе урана определяется плутонием и минорными актинидами. Торий более привлекателен, и его применение возможно в смешанном оксидном (МОКС) топливе, где достигается уменьшение накопления трансуранов.

7. В отличие от плутония, уран-233 может быть легко денатурирован путём смешения его с природным или обеднённым ураном.

8. Ядерные реакторы на ториевом топливе более безопасны по сравнению с обычными урановыми, поскольку первые не обладают запасом реактивности. В связи с этим никакие разрушения аппаратуры реактора не способны вызвать неконтролируемую цепную реакцию.

**Недостатки ториевого цикла:**

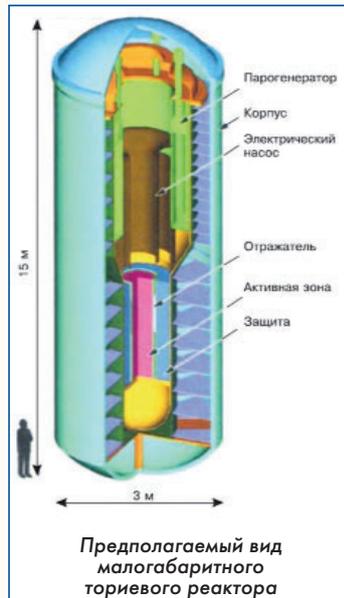
1. Торий - рассеянный элемент, не образующий собственных руд и месторождений.
2. Вскрытие монацита - процесс намного более сложный, чем вскрытие большинства урановых руд. Производство тория затруднено. Поэтому торий и его соединения дороже аналогичных продуктов на основе урана.
3. Из-за плохих механических свойств тория из него затруднительно изготовить какие-либо изделия точной формы.
4. В отличие от урана естественный торий не содержит никаких делящихся изотопов; чтобы достигнуть критичности необходимо использовать (хотя бы на начальном этапе) делящийся материал: уран-235 или плутоний.
5. При использовании тория в открытом топливном цикле для достижения нейтронной эффективности необходимы высокие степени выгорания. При замыкании топливного цикла использование глубокого выгорания облегчит переработку.
6. Если торий используется в закрытом топливном цикле, в котором уран-233 подвергается экстракции, то интенсивная радиация (жёсткое  $\gamma$ -излучение с энергией до 2,6 МэВ) обуславливает необходимость дистанционного управления всеми операциями топливного цикла, что увеличивает затраты по сравнению с урановым топливным циклом.
7. Хотя ториевое топливо производит намного меньше долгоживущих трансуранов, чем топливо на основе урана, некоторые долгоживущие актиниды оказывают длительное радиологическое воздействие, особенно палладий-231.

Можно сделать обобщающий вывод, что ториевый цикл в настоящее время несколько дороже уранового. К тому же он не полностью проработан. Тем не менее, опрометчиво сбрасывать со счетов ториевую энергетику. Следует продолжить исследования по замкнутому ядерному топливному циклу на основе тория и, при государственной поддержке, обосновать его оптимальную структуру. С использованием электроядерных и термоядерных источников нейтронов на основе использования тория имеется возможность решить проблему создания безотходного по актинидам топливного цикла. □

**Литература**

1. А.Н. Медведь, И.А. Нестеров. Ядерная энергетика неизбежна, потому что она нужна. // Двигатель № 6, 2011 г.

Связь с авторами: a.kasyan1@yandex.ru



# КОПИЛКА ДЛЯ ЭНЕРГИИ

Александр Идин

Человечеству постоянно необходима энергия. Разная. И с каждым годом всё больше. Одновременно всё острее становится задача временного хранения выработанной энергии. Требования по сохранению простые: хранить столько, сколько надо; хранить без потерь как можно дольше. Понятно, что добиться этого непросто, но учёные, инженеры и другие специалисты находятся в постоянном поиске, создавая и предлагая новые решения, которыми мы пользуемся сейчас и будем пользоваться в будущем.

Итак, энергию копить желательно в том виде, в котором она потребуется, например, если речь идёт об электроэнергии, то надо воспользоваться электроаккумуляторами. Тогда потеря при преобразовании будет меньше. Но так не всегда удобно и возможно. Например, как хранить тепловую энергию? Причём ту, которая уже выработана, но не вся употреблена, и есть её излишек. Выбрасывать жалко, да и для экологии вредно.

В этом случае есть возможность воспользоваться тепловыми аккумуляторами, а есть возможность преобразовать тепловую энергию в другой вид, благо Природа дала возможность преобразовывать один вид энергии в другой. Самый распространённый и всем знакомый пример такого преобразования - маятник часов, в котором потенциальная и кинетическая энергии маятника постоянно переходят друг в друга. Для компенсации потерь при качении маятника в часах предусмотрены гири, потенциальная энергия которых через специальный механизм расходуется на подталкивание маятника.

К настоящему времени придумано немало способов хранения энергии с разной степенью эффективности. Количественная мера эффективности - коэффициент полезного действия - КПД, показывающий отношение полезно использованной энергии к суммарному количеству запасённой энергии. Кстати, существует КПД и для процесса накопления энергии, так как потери есть всегда, например, тепловые. Любой, имеющий у себя телефон, обращал внимание на то, что при зарядке его корпус тёплый от нагретой внутри батареи.

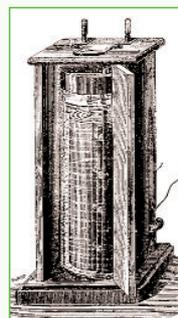
Начнём рассматривать проблему сохранения энергии с помощью электрических аккумуляторов. В настоящее время самыми востребованными накопителями энергии являются литий-ионные аккумуляторы, которые обеспечивают работу практически всех гаджетов. Да и в промышленности их предостаточно, особенно на транспорте. И все замечали, что с течением времени они разряжаются быстрее, а вот зарядка длится дольше, да и заряжаются они не до своего максимального значения. В этом случае говорят о деградации батареи. Чем больше при эксплуатации аккумулятора отклонение какого-то параметра от нормальных значений (указанных в спецификации), например, температуры окружающей среды, тем значительнее снижение его ёмкости.

Но даже при идеальной эксплуатации ёмкость аккумулятора всё равно снижается до таких значений, что дальнейшая работа с ним становится экономически затратной и крайне неудобной. Например, если на электромобиле с новой батареей можно было проехать на одной зарядке 500 км, то при падении ёмкости на 50 % от максимальной можно будет преодолеть не более 200 км (при деградации падает и КПД отдачи энергии потребителю).

Помимо литий-ионных аккумуляторных батарей есть и другие типы электрохимических аккумуляторов. Отличия заключаются в применяемых материалах, принципах действия, условиях эксплуатации и т.д. Соответственно у них разные ёмкость, количество цик-

лов зарядки-разрядки, энергетическая плотность, КПД, максимальный ток,... и, конечно, стоимость.

Первым перезаряжаемым электрохимическим аккумулятором была свинцово-кислотная батарея, изобретённая в 1859 году французским физиком Гастоном Планте. Хотя, по правде говоря, первым, кто сконструировал перезаряжаемый источник тока (вторичный элемент питания) был немецкий химик Иоганн Риттер, который ещё в 1803 году сложил столб из 50 медных кружков, разделённых смоченным в соленом растворе сукном. Эта батарея, получив энергию от вольтового столба, могла хранить её некоторое время, а затем отдать её.



Аккумулятор Планте

В дальнейшем история создания и развития электрохимических аккумуляторов будет рассмотрена более подробно. Тем более, что постоянно, а в последние годы особенно, совершаются новые открытия в этой области.

К электрическим накопителям электроэнергии также относятся ёмкостные и индуктивные аккумуляторы.

Из ёмкостных накопителей наиболее перспективны электрохимические конденсаторы (суперконденсаторы), у которых удельная энергоёмкость на порядок больше, чем у обычных электролитических конденсаторов. В перспективе вполне возможно, что они смогут прийти на смену электрохимическим аккумуляторам. А вот катушка индуктивности хоть и может накапливать энергию в магнитном поле, но время удержания этой энергии весьма незначительно из-за больших потерь на сопротивление в проводниках. Выход пока видится в применении низких температур, при которых обеспечивается сверхпроводимость.

Также есть возможность сохранить электроэнергию, переведя её в другие виды энергии, с последующим обратным преобразованием, например, воспользоваться гравитационными системами хранения энергии. Принцип прост - пользуясь излишками электроэнергии совершается работа электродвигателем для подъёма некоторых масс, в результате чего у них повышается потенциальная энергия. При недостатке электроэнергии (в часы пик) ранее поднятые массы, опускаясь, совершают работу - приводят во вращение электрогенераторы. Техническая реализация этой идеи может быть любой, о чём более подробно будет рассказано позднее.

Кроме потенциальной энергии можно воспользоваться переводом лишней электроэнергии в кинетическую энергию вращающегося маховика. В процессе разгона маховик запасает кинетическую энергию, при равномерном вращении энергия сохраняется. Когда требуется электроэнергия маховик приводит во вращение генератор, при этом происходит замедление вращения. Здесь есть одна проблема - необходимо обеспечить равномерное вращение генератора. Одно из решений - применение вариатора, но это тоже не простая инженерная задача.

Есть ещё один путь: с помощью электродвигателя и компрессора сжимать газ до высоких давлений и направлять его в ёмкость. Здесь основное ограничение - прочность стенок. Для получения электричества теперь будет достаточно сжатый газ направить в поршневую газорасширительную машину или газовую турбину, приводящие во вращение электрогенератор.

Кроме перечисленных способов хранения электроэнергии есть и другие. Поэтому в дальнейших публикациях более подробно будет рассказано обо всех известных способах. Отметим только, что по оценкам специалистов к 2040 году мировой рынок систем накопления и хранения энергии вырастет в 122 раза от уровня 2018 года. При этом их совокупная мощность превысит 1000 ГВт.

(Продолжение следует.)



Электромобиль Москвич Зе

# АНТРОПОГЕННАЯ МЕХАНИКА - МНОГОМЕРНЫЙ МИР ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ЗНАНИЙ (ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ АНТРОПОЛОГИИ)

*Тот, кто, обращаясь к старому,  
способен открывать новое,  
достоин быть Учителем*  
Конфуций,  
Выдающийся философ гуманизма  
всех времён и народов,  
"Беседы и суждения"



**Проф. Анатолий Сперанский,**

Научный руководитель РАНО "Инженерная академия Антропогенной безопасности"

**Проф. Фэн Шоучжун,**

Председатель правления Anhui Zhongyi New Material Science and Technology Co., Ltd.

**Проф. Андрей Рогов,**

Директор НИЦ Антропологической биологии РАНО "ИААБ"

## ВВЕДЕНИЕ. АКТУАЛЬНОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ БЕЗОПАСНОСТИ

По данным международного Center for Research on the Epidemiology of Disasters, основная часть преобладающих "индустриально-транспортных" техногенных катастроф происходит по причине недоверности инструментов контроля, диагностики и прогнозной экспертизы. Потери мировой экономики от техногенных катастроф за сто лет XX века совокупно составили ~\$175 млн.

Мировое метрологическое сообщество пытается **решать проблемы техногенной безопасности** путём повышения информативности увеличением количества индустриальных скалярных измерителей разного типа, для чего создан научно-технологический клуб SHM (Structural Health Monitoring), продвигающий псевдопространственные MEMS-технологии в виде комплектов 1D-скалярных сенсоров в общем корпусе. Но это паллиативное решение с анализом усредненных измерений.

При этом, значительный прогресс в скоростном транспорте, машиностроении, мощной энергогенерации и высотном строительстве одновременно демонстрирует опасно низкую эффективность консервативных методов и регламентов усредненных статистических оценок, в результате чего **наблюдается взрывной рост трагических гуманитарных, экотехнологических и экономических последствий** на рубеже тысячелетий: аварии на атомных станциях Фукусима и Чернобыль, Саяно-Шушенская гидротехническая трагедия, крупнейшая по экологическим последствиям катастрофа планетарного масштаба на платформе British Petroleum в Мексиканском заливе, железнодорожная катастрофа на скоростной эстакаде Вэньчжоу, самая жертвенная техногенная катастрофа на химическом заводе Union Carbide в индийском Бхопале, и целая вереница сокрытых с участием страховых компаний аварий.

По статистике CRED, потери экономик промышленно развитых стран от экотехнологических катастроф в первое десятилетие XXI века **увеличились в 1540 раз**, со \$144,4 млн в 2001 г., после чего наблюдается взрывной рост - до \$63 млрд в 2009 г. и до \$222,4 млрд в 2010 г. при погибших более 260 тыс. чел. Потери оцениваются в 1,5...4,5 % валового национального продукта (ВНП), что превышает совокупные расходы стран на здравоохранение с экологией и по информации ООН превосходит мировой ВНП +2,5 % за 2019 г. накануне пандемии.

Такова **цена несовершенства и технологического отставания** в области мониторинга и экспертизы состояний любых машин, механизмов и силовых конструкций. Поэтому важнейшей и проблемной задачей в эксплуатации механических систем является **объективная оценка текущего ресурса конструкционной прочности с предиктивным анализом аварийных состояний**.

Доминирующие в мире усредненные статистические методы измерения и анализа информации привели к существенному проектному завышению запаса прочности, который совокупно компенсирует проектные, производственные и эксплуатационные "огрехи" по всему жизненному циклу, удорожая затраты, снижая энергоэффективность, ухудшая эксплуатационные характеристики объектов и игнорируя ресурсосбережение, системно порождая аварии и катастрофы.

Два поразительных индустриальных примера, связанных с авиатехникой:

1. В АО "Газпром" для перекачки магистрального газа используются авиационные двигатели наземного исполнения (ГПА), имеющие 5...10-кратный проектный запас прочности по авиационным стандартам (при 0,5...2-кратном запасе по гражданским нормам). При этом, в газотранспортной отрасли действует 3,8-кратный норматив складского резерва ГПА для оперативного аварийного ремонта в обеспечение бесперебойной транспортировки газа. Это не только удорожает стоимость газа, но и противоречит доктрине ресурсосбережения. Решению проблемы может помочь перевод ГПА с эксплуатации по жесткому **плановому регламенту** на эксплуатацию **по текущему состоянию**. Но при условии создания **достоверных надежных средств контроля, диагностики и прогнозной экспертизы реального времени**.

2. Проектная прочность вертолетов дифференцирована по функциональной важности узлов и агрегатов в пределах 5...10-кратного запаса. По мнению выдающегося американского авиаконструктора вертолетов Сергея Сикорского, озвученному его главным финансистом и председателем жюри всемирного Форума малой авиации Н. Хардтманом, в случае равнопрочного проектирования компонентов, боевые вертолеты могут быть на 25...35 % легче в пользу дополнительных опций вооружения для повышения боевой эффективности. Это компетентное мнение подтверждено на скоростном вертолете RIDER при сохранении установленных летно-технических характеристик. Дополнительным условием озвучено **создание системы достоверного интеллектуального диагностического контроля и прогнозной экспертизы полетных состояний систем вертолета в реальном времени**.

Приведенные экономический анализ реальных техногенных угроз и примеры из авиационной ресурсной практики убедительно демонстрируют обоснованную перспективу экономической эффективности создания и применения **интеллектуальных инструментов непрерывного ресурсного мониторинга и предиктивного анализа исправности объектов высокой техногенно-технологической опасности**.

## ФИЛОСОФСКИЙ ВЗГЛЯД НА ИСТОРИЧЕСКОЕ ЛИДЕРСТВО ЗНАНИЙ

В контексте антропогенного сохранения цивилизации представляется полезным возврат к лингвистической триаде Знаний "Философия - Знания - Наука". Наука, которой от роду всего триста лет, есть вид производственно-хозяйственной научной деятельности по коммерциализации приложений новых Знаний. В то же время, Философия (любовь к мудрости) хронологически насчитывает 2500 лет реализации религиозно-познавательного просветительского антропогенного интеллекта Человека в качестве фундаментальной науки о наиболее общих законах и принципах развития природы, общества, мышления и познания (Пифагор, VI в. до н.э.), пройдя 5000 веков от примитивного интеллекта биологического выживания и инстинктивного познания к интеллекту философских Знаний антропогенного Разума.

Основа **ФИЛОСОФИИ** в триаде - отношение сознания к материи<sup>1</sup>, духа к природе<sup>2</sup>, мышления к бытию<sup>3</sup>, образует системный исторически сложившийся спектр научных Знаний: **Онтология** с общей теорией бытия, миропорядка и сознания; **Гносеология** с общей теорией познания; **Диалектика** с учением о всеобщих законах развития природы, общества, мышления и методом научного познания единства противоположностей; **Этика** с учением о добре, зле, морали, нормах нравственности и высшем благе; **АНТРОПОЛОГИЯ** - наука о происхождении, эволюции и творческих умственных способностях человека во взаимодействии со средой обитания и культурой (Аристотель, IV в. до н.э.); **Логика** как наука о формах и способах мышления; **Эстетика** с учением о сущности прекрасного в творчестве, природе и жизни; **Социология** как наука о личностно-социальном поведении.

Первоначально **ФИЛОСОФИЯ** включала все теоретические знания о мире, позднее выделившиеся в конкретные кластеры науки: естественные, технические, гуманитарные, общественные. Аналогично **дуализму ЭНЕРГИИ и Вещества в триаде с Информацией** об их взаимной энергетической трансформации, **дуализм ФИЛОСОФИИ и Науки в триаде с ПОЗНАНИЕМ** интегрирует прорывные фундаментальные научные Знания (Habitat) и креативные инженерно-технологические Умения (Открытие) в качестве научно-технологического базиса **ЛИДЕРСТВА** в **Культуре Земной цивилизации**.

**ФИЛОСОФИЯ** науки раскрывает общие закономерности и тенденции познания в производстве научных знаний. В социально-культурном историческом контексте гносеологический приоритет является более фундаментальным Знанием по сравнению с конкретными Науками. **Науки изучают общие законы в частных областях Знаний**. Мудрый Н.А. Бердяев в трактате "Смысл творчества" дал одно из самых смелых определений о месте Науки в современной эпохе: "Научность есть рабство духа во власти необходимости".

Независимо от философских воззрений, господствующей морали, уровня развития, структуры и эквивалентов общества, **главной ценностью Земной цивилизации является ЖИЗНЬ Человека**. Антропология, являясь наукой об интеллектуальных возможностях Человека в среде обитания, призвана развивать приоритеты научно-технологических Знаний, решающие проблемы безопасной и комфортной жизнедеятельности Человека в Социуме. При этом, научно-инженерная деятельность триединая: она является главной причиной деградации мировых экономик<sup>1</sup>; Единственным инструментом преодоления Глобальных угроз<sup>2</sup>; Необходимым условием сохранения и Устойчивого развития цивилизации<sup>3</sup>.

## АНТРОПОЦЕН. 17 ГЛОБАЛЬНЫХ УГРОЗ ЗЕМНОЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ

Меморандум Генеральной ассамблеи ООН 1992 г. содержит трагический перечень угроз **техногенно-технологического (ТТ), биоэпидемического (БЭ), эко-климатического (ЭК), информационно-образовательного (ИО) и организационно-политического (ОП)** характера: **ТЕХНОГЕННАЯ**<sup>1</sup>, **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ**<sup>2</sup>, **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ**<sup>3</sup>, **МЕДИКО-ЭПИДЕМИЧЕСКАЯ**<sup>4</sup>, **ВОДНО-ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ**<sup>5</sup>, **НООСФЕРНАЯ**<sup>6</sup>, **КЛИМАТИЧЕСКАЯ**<sup>7</sup>, **УРБАНИСТИЧЕСКАЯ**<sup>8</sup>, **ИНФОРМАЦИОННАЯ**<sup>9</sup>, **ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ**<sup>10</sup>,

**ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКАЯ**<sup>13</sup>, **ПОЛИТИЧЕСКАЯ**<sup>14</sup>, **ВОЕННАЯ**<sup>15</sup>, **РЕЛИГИОЗНО-ТЕРРОРИСТИЧЕСКАЯ**<sup>16</sup> **безопасности**, а также системное **ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ВИДОВ**<sup>17</sup>.

Преодоление глобальных угроз стало необходимым условием достижения устойчивого развития, которое первым в истории сформулировал выдающийся русский философ-космист академик А.Л. Чижевский, мировой авторитет в понимании роли энергии Космоса для сохранения Жизни на Земле. В судьбоносном исследовании "Земное эхо солнечных бурь" (Париж, 1944 г.) впервые научно обосновано глубочайшее эволюционное содержание грядущего: **"Устойчивое развитие - суть безопасная и комфортная жизнедеятельность Человека в гармонии с Космосом"**. Природа суть порождение Космоса, но только спустя полвека мировое сообщество публично признало устранение глобальных угроз жизнедеятельности Человека условием сохранения Жизни и даже выживания цивилизации на Земле. И философская мудрость с её гуманитарной основой и опорой на **Онтологию** миропорядка, **Гносеологию** познания, **Диалектику** развития, **Этику** морали и **Эстетику** прекрасного оказалась существенно выше меркантильного потребительства современной **Науки** коммерциализации, мало приспособленной к устранению глобальных угроз.

**Антропология** Аристотеля (IV век до н.э.) системно популяризована в образовании великим русским просветителем и педагогом К.Д. Ушинским (трактат "Педагогическая антропология", 1869 г.) и Нобелевским лауреатом в химии атмосферы проф. Паулем Крутценом в 2000 г. в формате научной идеи Антропоцена - нового геологического термина и формальной единицы геохронологической шкалы, предложенной в 2008 г. на рассмотрение Комиссии по стратиграфии Геологического общества Лондона.

На Международном геологическом конгрессе в 2016 г. были представлены свидетельства изобретения Человеком и первых применений против людей в 1945 г. ядерного оружия в качестве начала новой геологической эпохи. **АНТРОПОЦЕН** рекомендован в качестве новой эпохи, начавшейся в 1950-е годы. Одобрение комиссии по стратиграфии и ратификация Международного союза геологических наук в 2019 г. ведут к признанию нашей эпохи официальной частью геохронологической шкалы.

На устранение глобальных угроз жизнедеятельности направлена актуальная область философской Антропологии - **Антропогенная безопасность**, междисциплинарная естественнонаучная область инженерных Знаний. Интеллектуальными инструментами антропогенной безопасности являются прорывные фундаментальные **Знания**<sup>1</sup> + креативные технологические **Умения**<sup>2</sup>, порождающие **ЛИДЕРСТВО**<sup>3</sup> в **КУЛЬТУРЕ** Земной цивилизации. При этом, как Знания интеллекта, так и творческие Умения являются частью **Культуры Социума**.

## АНТРОПОЦЕН. 17 ПРИОРИТЕТОВ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Спустя еще четверть века Меморандум Генеральной ассамблеи ООН 2015 г. определил главные приоритеты устойчивого развития Земной цивилизации:

Ликвидация **НИЩЕТЫ**<sup>1</sup>, Ликвидация **ГОЛОДА**<sup>2</sup>, **ЗДОРОВЬЕ** и **БЛАГОПОЛУЧИЕ**<sup>3</sup>, Доступное непрерывное **ОБРАЗОВАНИЕ**<sup>4</sup>, Гендерное **РАВЕНСТВО**<sup>5</sup>, Санитария **ВОДНЫХ** ресурсов<sup>6</sup>, Доступная зеленая **ЭНЕРГИЯ**<sup>7</sup>, Устойчивый рост экономики полной **ЗАНЯТОСТИ**<sup>8</sup>, Устойчивая инновационная **ИНДУСТРИАЛИЗАЦИЯ**<sup>9</sup>, Сокращение международного и территориального **НЕРАВЕНСТВА**<sup>10</sup>, **БЕЗОПАСНОСТЬ**, открытость, жизнестойкость и экологическая устойчивость поселений<sup>11</sup>, Рациональное производство и **ПОТРЕБЛЕНИЕ**<sup>12</sup>, Борьба с изменением **КЛИМАТА**<sup>13</sup>, Сохранение морских **РЕСУРСОВ**<sup>14</sup>, Защита и восстановление **ЭКОСИСТЕМ** суши<sup>15</sup>, Справедливое мирное открытое **ОБЩЕСТВО**<sup>16</sup>, Глобальное партнерство и **УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ**<sup>17</sup>. Особого внимания достоин тревожный факт усугубления образовательной безопасности, переместившейся за 23 года с двенадцатого места (1992 г.) на четвертое (2015 г.)!

Само принятие Меморандума-2015 свидетельствует об устой-

чивой тенденции нарастанию актуальности Меморандума-1992 о глобальных угрозах и низкой эффективности национальных и международных мер по их устранению. Убедительным фактом всеобщего регресса стала всемирная коронавирусная пандемия, которая в 2020 году опустила мировой Валовой национальный продукт в отрицательную область. И это на фоне неоднократных предупреждений ученых о реальности пандемийных угроз на мировых форумах. Бизнес, глобально озабоченный падением деловой активности, не только не сделал из трагедии никаких социально значимых выводов, но даже обратил глобальную трагедию в новый способ устойчивого корпоративного обогащения.

Закономерная цикличность негативного антропогенного влияния Человека на деградацию эко-социально-экономических цивилизационных процессов на планете привела к гуманитарной консолидации мирового научного сообщества в целях **интеллектуальной мобилизации антропогенных решений по сохранению Земной цивилизации**, в том числе, под эгидой Нобелевского комитета Высшего гражданского признания.

### **АНТРОПОЦЕН. НОБЕЛЕВСКИЙ ПРИЗЫВ К СОХРАНЕНИЮ ЦИВИЛИЗАЦИИ**

Чрезвычайный саммит интеллектуалов Нобелевского комитета в 2021 г., собравший беспрецедентный кворум Лидеров мирового научного сообщества, озвучил главный вопрос повестки дня: *"консолидация интеллектуальных ресурсов Планеты ради предотвращения Глобального разрушения среды обитания с гуманитарной целью создания, ускорения и срочного масштабирования АНТРОПОГЕННЫХ РЕШЕНИЙ для преодоления трагических вызовов и угроз цивилизованного мира Земли"*.

**АНТРОПОЛОГИЯ**, как наука об интеллектуальных способностях человека в природной среде обитания цивилизации Социума, с опорой на **ИНТЕЛЛЕКТ**, как феноменальную умственную биологическую способность Homo sapiens во взаимодействии с культурной средой обитания Земной цивилизации, нацелены на развитие присутствующего в фундаментальном генетического свойства **ЛИДЕРСТВА**:

1. **ФИЗИЧЕСКОГО ПРЕВОСХОДСТВА**, ведущего к выживанию в сложных природно-климатических условиях и конкурентных социально-личностных отношениях, и

2. **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРЕВОСХОДСТВА**, ведущего к привилегированному карьерному статусу в социуме, гарантирующему личную безопасность и комфортную жизнедеятельность. Лидерство породило диктатуру влияния способного и успешного меньшинства над пассивным большинством путем манипулирования общественной поддержкой и злоупотребления собственным превосходством.

В век Антропоцена, при всем философском понимании дуализма лидерства, носителями прорывного научного и креативного технологического интеллекта являются профессиональные Научно-инженерные сообщества, единственно способные преодолевать планетарную пандемию угроз при всеобщей осознанной мобилизации интеллекта в консолидации с материально-финансовыми и организационно-политическими активами власти. Как утверждал Уинстон Черчилль, *"Империи будущего будут империями разума"*.

Важнейшим научным приоритетом индустриальной эко-социально-экономической деятельности общества де-факто становится **Антропогенная безопасность**, системно интегрирующая интеллектуальные компоненты лидерства:

1. Прорывные фундаментальные научные **ЗНАНИЯ - ОТКРЫТИЯ** явлений, законов, свойств или объектов материального мира; научные идеи обобщенных теоретических принципов с объяснением сущности и научные гипотезы о неизвестном ранее с обоснованием актуальности предположений. Прорывные фундаментальные научные Знания опираются на глубокое понимание антропологической роли - **возможности, способности и мотивированности** Человека и Общества, что обеспечивает Антропогенную безопасность жизнедеятельности во всех актуальных сферах устойчивого эко-социально-экономического развития.

II. Цифровые информационно-аналитические **ИНСТРУМЕНТЫ** наблюдения, анализа и киберсинтеза процессов, режимов и состояний: научные **ОТКРЫТИЯ** по всему жизненному циклу "исследования - испытания - проектирование - валидация - производство - сертификация - эксплуатация - диагностика - ремонт - утилизация" на основе природоподобных саморегулируемых принципов, методов и решений Антропогенной безопасности жизнедеятельности во всех актуальных сферах многомерной спектральной метрологии.

III. Креативные конкурентоспособные инженерные технологические **УМЕНИЯ** своевременного прогнозирования - выявления - предупреждения - устранения потенциально возможных причин отказов, аварий и катастроф: прикладные научные **ОТКРЫТИЯ** в области гомеостаза неживых и живых систем. Креативные прикладные инженерные Умения и успехи интеллектуального дизайна - **возможности, способности и результативности** в материаловедении обеспечивают приложения интеллектуального синтеза наноматериалов с заданными и управляемыми свойствами для устойчивого эко-социально-экономического развития.

IV. Материально-финансовые **АКТИВЫ** как инструменты управления природным гомеостазом - **возможности, способности и эффективность** индустриальных механических и биологических систем обеспечивают прорывные фундаментальные естественнонаучные Знания и Умения для создания **цифровых ИНСТРУМЕНТОВ ВЫСОКОЙ МЕРНОСТИ** наблюдения и управления природными и антропогенными системами в обеспечение устойчивого **ЛИДЕРСТВА**.

Меморандумы Генеральной ассамблеи ООН "17 глобальных угроз" и "17 приоритетов устойчивого развития" вместе с резолюцией Нобелевского саммита образуют Целевую гуманитарную триаду приоритетов сохранения Земной цивилизации. Взрывным ростом рукотворных аварий и катастроф Общество обязано варварским корыстно-потребительским отношением к среде обитания Человека с присущими ему халатностью и некомпетентностью в проблемах техногенно-технологической и экологической безопасности.

Как показала мировая пандемия, отсутствие моральной ответственности перед Социумом привело к утрате культуры природного генетического стремления Человека к новым Знаниям через раскрытие феноменов, позволяющее успешно **противостоять глобальным угрозам выживанию цивилизации**. Общество призвано формировать морально-гуманитарные, интеллектуальные и материальные ресурсы в целях устранения Феноменов Антропогенной опасности в качестве еще непознанных Знаний на всех административно-территориальных уровнях Власти и Общества.

### **АНТРОПОЦЕН. КИТАЙ НА ШЁЛКОВОМ ПУТИ ЛИДЕРСТВА В ЦИВИЛИЗАЦИИ**

На фоне существенных успехов прорывных фундаментальных научных Знаний и креативных технологических Умений пяти Технологических укладов, цивилизация столкнулась с системной проблемой глобальных угроз жизнедеятельности человека, возникших по причине неумённого хищнического отношения бизнеса к природным ресурсам среды обитания в планетарных масштабах.

В условиях глобальных угроз и жесткого противостояния глобализованного Запада с социально ориентированным Востоком представляется чрезвычайно актуальной инициатива **Председателя Китайской Народной Республики Си Цзиньпина** о преодолении **"дефицита МИРА и дефицита БЕЗОПАСНОСТИ"** на саммите ШОС-2022 в Самарканде. **В согласии с Президентом РФ В.В. Путиным**, поставлена важнейшая стратегическая задача Земной цивилизации: *"реализация концепции общей, комплексной, системной и совместной безопасности через формирование сбалансированной и устойчивой её архитектуры с эффективным обеспечением безусловного приоритета международной энергетической и продовольственной безопасности"*.

При таком согласованном взгляде первых руководителей двух Великих держав, целесообразно развитие международных государственно-интегрированных межвидовых, межотраслевых и междисциплинарных Платформ индустриальных научно-технологических

приоритетов на основе эоинжиниринга Антропогенной безопасности, стимулируемых набором мер государственной поддержки при решающем участии национальных и Евразийских структур.

Мировая Китайская гуманитарная инициатива завершает полувекую линию дипломатических усилий Генеральной ассамблеи ООН и Нобелевского комитета высшего научного признания, у истоков которой находились три признанных мировым научным сообществом выдающихся русских ученых: великий просветитель и педагог профессор К.Д. Ушинский с учением о Педагогической антропологии, академик В.И. Вернадский с учением о Ноосфере и его ученик академик А.Л. Чижевский с учением об Устойчивом развитии.

Философия прорывных научных Открытий в качестве высшей формы проявления интеллекта **ЗНАНИЙ** (сфера науки) диалектически порождает креативные Шедевры творчества в качестве высшей формы проявления интеллекта **УМЕНИЙ** (сфера дизайна), вместе формирующие прогресс **ЛИДЕРСТВА** в **КУЛЬТУРЕ** Земной цивилизации. В случае деградации лидерства наступает смерть наций и исчезновение цивилизации.

Философия диалектики непрерывного циклического раскрытия феноменов (открытий) созданием принципиально новых фундаментальных научных **ЗНАНИЙ** также циклически непрерывно порождает естественное антропогенное творчество новых прикладных Шедевров (открытий) - новейших опережающих **УМЕНИЙ**, вместе формирующих циклический прогресс **ЛИДЕРСТВА** в устойчивом развитии. Но при необходимом условии **МИРА** и **БЕЗОПАСНОСТИ** цивилизации (Си Цзиньпин) на базе прогресса Земной **КУЛЬТУРЫ**. В ином случае, при деградации лидерства в культуре наступает исчезновение видов и крах цивилизации.

**ЛИДЕРСТВО** в **КУЛЬТУРЕ** наравне с экологией должно стать главным социально-экономическим фактором развития **ЛИДЕРСТВА** в **ЦИВИЛИЗАЦИИ**.

### **АНТРОПОЦЕН. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ЛИДЕРСТВА**

Известный американский физик-ядерщик японского происхождения Мичио Каку, многолетний лидер самых точных прогнозов развития естественнонаучных Знаний по версии Книги рекордов Гиннеса, в бестселлере "Физика будущего" озвучил выдающуюся по значимости сентенцию: **"Всю свою историю цивилизация зависела от наличия и владения инструментами наблюдения"**. Из этого следует, что подтверждение новых фундаментальных и прикладных научных Знаний уровня Habitat или Открытия возможно только при наличии соответствующих интеллектуальных инструментов адекватного наблюдения, измерения, регистрации, передачи, анализа, диагностики, прогностики и природоподобного киберсинтеза управления.

Обратимся к самой фундаментальной дисциплине в сфере естественнонаучных Знаний - **МЕХАНИКЕ**, природные и антропогенные объекты которой являются фигурантами крупнейших трагических техногенно-технологических аварий и катастроф в истории цивилизации. **Виброметрия** - главный и самый распространенный инструментальный метод наблюдений в механике напряженно-деформированных состояний (НДС) эксплуатационного ресурса прочности объектов упругих систем.

Все инструменты мониторинга состояний преобразуют наблюдаемые во времени диагностические параметры (смещение положения, виброскорость, виброускорение) в обоснованно выбранной топологии измерительных точек объекта контактного или дистанционного наблюдения. Параметры измерений характеризуются физическими свойствами чувствительных элементов и методами функционального преобразования физических параметров состояний в приборно измеряемые энергетические величины (электрический заряд, напряжение, ток или др.) для регистрации с целью анализа НДС в реальном времени для предиктивного прогноза состояний будущего.

Важнейшие параметры объектов, равно как и их сопрягаемых узлов и деталей, образуют причинно-следственную модель НДС, связывающую силовые и моментные упругие факторы простран-

ственных воздействий (напряжения) с нормально-сдвиговыми линейно-вращательными факторами объемного упругого сопротивления материала конструкции (деформации). А также структуру спектральных динамических портретов гомеостаза с учетом внешних полидинамических воздействий, резонансных реакций конструкций, анизотропных проявлений усталостно-прочностных дефектов конструкционных материалов, критических и нештатных режимов эксплуатации.

Среди ученых-философов бытует уверенность в том, что глобальные антропогенные угрозы цивилизации будут преодолены инструментами антропогенного лидерства.

### **АНТРОПОГЕННЫЕ ОРИЕНТИРЫ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

Корни метрологических проблем не в количестве аналоговых сенсоров, а в их мерности. В 60-е годы XX века эти проблемы сформулировал авторитетный ученый в области виброметрии **Ю.И. Юриш**, лауреат **Государственной премии СССР**. В фундаментальной монографии "Виброметрия" несколько раз обращается внимание на принципиально неразрешимые метрологические обстоятельства, неподвластные фундаментальной и прикладной науке. Правильно сформулированные актуальные проблемы позволяют надеяться на их успешное и корректное разрешение:

1) Невозможность доступными метрологическими инструментами разделения кинетической энергии линейных и/или вращательных воздействий (причины) с потенциальной объемной энергией упругого сопротивления материала конструкции (следствие) для целей энергетического анализа гомеостаза НДС.

2) Невозможность обоснованной установки измерительной (чувствительной) оси метрологического 1D-скалярного средства строго в направлении измеряемого физического вектора, который находится в периодическом траекторном движении по пространственному 2D-годографу, неизменная плоскость которого позиционируется тремя углами Эйлера в координатах наблюдаемого объекта.

3) Отсутствие антропогенной многомерной 4D-модели источников вибрации (резонансы, отражения), внешних источников колебаний (воздействия) и внутренних источников спектра (дефекты), каждый из которых может независимо трансформироваться в опасную последствиями полидинамическую пространственно-временную суперпозицию.

Двухвековая эпоха аналоговой метрологии, основной причины техногенно-технологических аварий и катастроф в энергетике, транспорте и строительстве, ушла безвозвратно в прошлое со всеми проблемами скалярности, усредненности, инерционности, термозависимости, нелинейности, резонансности и помехозащищенности, но тормозом смены эпох стал жесткий консерватизм государственных статистических регламентов, которые должны быть гарантом безопасности, но, как известно, устаревают с момента их законодательного принятия.

Современный уровень развития искусственного интеллекта позволяет надеяться на реальное освоение многомерной энергодинамики состояний гомеостаза неживых систем (академики А.М. Лягунов и А.Н. Крылов). Первым цифровым запатентованным решением 4D-формата стало создание в 2002 г. по заказу АО "Газпром" и последующая сертификация пьезоэлектрического 3D-виброакселерометра НПК ООО "Рэм-вибро" при поддержке Европейского акселератора "Имприматур". Учеными Института наукоемких инженерных технологий РАНО "ИААБ" в 2006-2008 гг. выполнен Грант АО "Газпром" №0246-06-2 по теме "Совершенствование системы диагностики газоперекачивающих агрегатов для перевода с регламента планового ремонта на обслуживание "по текущему состоянию", прошедший успешную защиту на НТС Газпрома.

### **ФИЛОСОФИЯ МЕРНОСТИ: ШЕСТАЯ КОНСТАНТА ВСЕЛЕННОЙ**

Особую важность представляет степень соответствия (адекватность и достаточная точность) приборно-информационной мерности инструментов наблюдения задачам контроля природной

**СТЕРЕОмерности** наблюдаемых режимов, процессов и состояний объектов. Со времен И. Ньютона в классической механике движения принято, что наша цивилизация существует в **"3D-пространстве, связанном 1D-временем"**. Векторно-фазовая связанная 4D-мерность является шестой константой Вселенной.

Фундаментальные свойства упругости и прочности существенно связаны с двумя постулатами Механики упругих систем: "принципом суперпозиции" и "принципом сплошности" или непрерывности. По принципу суперпозиции **"Полное движение состоит из линейного и вращательного"**, каждое из которых имеет пространственную мерность **"3D"**, образующих вместе бивекторное **"6D-пространство, связанное 1D-временем"**. Метрологически **7D-мерность** позволяет модельно реализовать бивекторно-фазовый формат достоверных наблюдений гомеостаза динамических нормально-сдвиговых энергетических состояний упругих материалов объемных конструкций с возможностью предиктивного контроля для предотвращения опасных и критических эксплуатационных состояний.

В настоящее время в мире сертифицировано и стандартизовано большое множество **1D-скалярных** (одномерно-усредненных) промышленных датчиков, сенсоров и вибропреобразователей на разных физических принципах, от пьезоэффекта до измерительных лазеров. Но все эти унифицированные решения при обработке спектральных сигналов на анализируемых частотах используют **энергетическую оценку гармоник** по **"усредненной мощности за полупериод"**, пропорциональную описываемой функцией площади, равной 0,707 максимума полуволны (среднеквадратичное значение, СКЗ).

Понятны исторические причины такого полиативного решения, но оно абсурдно по сути: колебательный процесс любой гармоники спектра, принципиально изменяемой во времени в плоскости или пространстве, усредняется обоснованным из лучших побуждений числом под названием "СКЗ", постоянным в первом полупериоде гармоники +СКЗ, и постоянным во втором полупериоде гармоники, но с противоположным знаком -СКЗ.

На основе такого сомнительного скалярно усредненного "измерения" горе-метрологи берутся оценивать **спектральные полидинамические энергетические процессы гомеостаза в механике упругих систем, которые по мнению русского академика А.М. Ляпунова сродни нейроанализу в биологических системах**. И весь этот скалярный абсурд скрывается под стандартизованным покровом легенды о "конструкционном запасе прочности", который стал одним из эффективных инструментов карьерного роста и даже наживы некомпетентных "мошенников от науки".

Корректное наблюдение состояний упругих систем также не позволяет **пренебрегать нелинейностями**, начиная с существенной температурной нелинейности пьезоэлектрических виброакселерометров, и **существенной квазистационарностью** всех динамических процессов балансировки силовых машин, роторных агрегатов и многоопорных конструкций, помпажных и флаттерных режимов эксплуатации.

На одном из метрологических конгрессов озвучено неправомерное применение усредненных статистических методов в **критических ситуациях**, которыми являются аварии и катастрофы: в госпитале среди выздоравливающих с нормальной температурой ~36,6 °С оказались два безнадежных больных - один уже остывший с температурой **30,7 °С**, а другой в бессознательном состоянии с предельно высокой несбиваемой температурой **42,5 °С**. При среднестатистической оценке отчетная температура по госпиталю с двумя покойниками оказалась нормальной - 36,6 °С.

Как следует из приведенного житейского примера, измерение компонентов векторов спектра гармонических колебаний, в общем случае пространственных, стандартными усредненными методами **неправомерно**. Важно, что достоверное **4D-измерение** векторно-фазовой информации на каждой частоте происходит в условиях непрерывного несинхронного изменения других колебательных гармоник актуального спектра, т.е. в условиях, строго говоря, **нестационарности**.

Помимо этого, важное понимание для метрологии, анализа и

диагностики НДС привнесло создание математического аппарата **тензорного анализа межкоординатных физических связей в пространствах упругих сред**. Этот инструмент открыл эпоху реальной **диагностики ресурсных эксплуатационных состояний** реального времени по всем этапам жизненного цикла механических объектов от проектирования до сертификации, диагностики и прогностики.

В связи с многообразием и сложностью инструментовки факторов, влияющих на динамические энергетические параметры гомеостаза НДС, помимо нелинейности и квазистационарности диагностических параметров режимов, процессов и состояний материалов и конструкций, следует изучать в теории и приложениях также динамику **производных диагностических параметров НДС**, существенно влияющих на вариативную энергетику дефектообразования и аварийность механических систем.

Приведенный анализ ведет к научно обоснованной стратегии полидинамической **ГОЛОграфической МЕРНОСТИ** интеллектуальных моделей Искусственного интеллекта безопасной эксплуатации в **АНТРОПОГЕННОЙ механике ресурсного гомеостаза и техогенеза неживых систем** ближайшего будущего. С последующим междисциплинарным переходом к **нейросетевой биомеханике иммунного гомеостаза живых систем** для интеллектуального безопасного взаимодействия человека с роботизированной средой комфортного обитания.

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ТРАЕКТОРНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

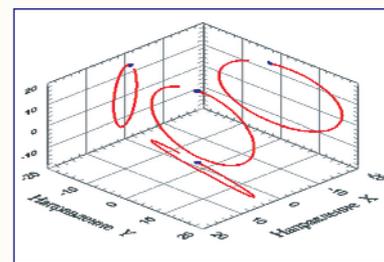
Первооткрыватели пространственных эллиптических уравнений напряжений Г. Ламэ и эллиптических уравнений деформаций О. Коши в конце XVIII века математически описали фазовые причинно-следственные пространственно-временные **Lt-траектории** в механике упругих систем. Триумф математиков укрепили гениальный автор теории упругости сплошных сред Л. Эйлер, а также автор теории вероятности П. Лаплас своим использованием эллиптических уравнений для описания траекторного движения планет в небесной механике:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

где X, Y и Z - текущие пространственно-временные координаты текущих диагностических параметров НДС в измерительной точке, привязанные к системе координат наблюдаемого объекта мониторинга; a, b и c - базовые нормированные (предельные) параметры годографа, определяющие граничные условия состояния упругости объекта.

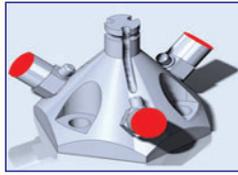
Векторно-фазовая 4D-траектория пространственного годографа описывается во времени эллиптическим уравнением, тензорно нормирующим динамические проекции (компоненты) энергетического вектора на координатные плоскости объекта мониторинга с центром в измерительной точке, при этом, конец **мгновенного вектора полной энергии на каждой частоте спектра** образует свой **4D-годограф** в плоскости Л. Эйлера, характерной для стационарных колебательных процессов.

Открытия выдающихся механиков послужили антропогенным основанием создания теории **ВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ (ВМС)**, на основании которой обоснована разработка **ВОЛНОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ (ВИТ)**, включающей в себя **Know-How** пяти технологий: Спектральный **Мониторинг Lt-состояний** упругих систем<sup>1</sup>; Сбор, передачу, хранение и **4D-реконструкцию** (модельно-дисплейную визуализацию) измерений параметров ВМС<sup>2</sup>; Диагностический траекторный векторно-фазовый **энергетический анализ** НДС в спектре актуальных частот гомеостаза<sup>3</sup>; Вариационный анализ текущего **ресурса конструкционной прочности** на основе цифровой модели **ТЕНЗОРНОГО**



ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ (ТЭПС)<sup>4</sup>; Предиктивный интеллектуальный анализ соответствия ТТХ для диагностики аварийных состояний и предупреждения катастроф<sup>5</sup>.

Инструментом инновационных цифровых решений ВИТ/ВМС стал первый в мировой метрологической практике 4D-вибропреобразователь, на основе которого реализована первая в мировой практике ЦИФРОВАЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА ВМС.



Метод траекторного анализа энергетической трансформации гомеостаза НДС решает все проблемные вопросы из монографии "Виброметрия" проф. Ю.И. Иориса:

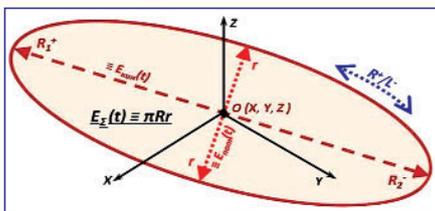
1) Элементарное разделение кинетической энергии линейных напряжений, пропорциональной сумме больших полуосей 4D-годографа, с потенциальной объемной энергией объемных деформаций, пропорциональной размаху малых полуосей годографа, для целей энергетического анализа гомеостаза НДС в реальном времени. При этом, в рамках стационарных состояний сумма мгновенных значений кинетической и потенциальной энергий соответствует мгновенному значению полной энергии состояния НДС  $E_{\Sigma} = \pi Rr$  на метрологической частоте и пропорциональна эффективной площади 4D-годографа.

2) Векторно-фазовая реконструкция траекторных параметров годографа не требует позиционирования измерительной оси метрологического средства в направлении измеряемого физического вектора, при условии, что точно известна координатная связь 3D-сенсора с системой координат объекта.

3) Спектральный мониторинг реализует системную антропогенную 4D-модель собственных источников вибрации (резонансы, отражения), внешних источников колебаний (линейные воздействия) и внутренних источников вибрации (стационарные дефекты), каждый из которых может быть структурным компонентом вариационного анализа и основой цифровой гомеостатической модели НДС, аппроксимирующей информацию дискретного минимума 3D-сенсоров.

Таким образом, ЦИАП ВМС, антропогенная по сути, позволила вместо пандемии усредненно-статистического 2-параметрического вибромониторинга (скаляр-амплитуда и скаляр-частота колебаний) вплотную подойти к нейросетевому модельному анализу неограниченной голографической мерности на основе озвученных гениальных открытий XVIII века в Механике упругих систем: энергетических траекторных годографов Роберта Гука - Готфрида Лейбница - Габриэля Ламэ - Огюстена-Луи Коши - Леонарда Эйлера - Жозефа-Луи Лагранжа - Жана-Батиста Фурье - Симеона Пуассона - Пьера-Симона де Лапласа, системно реализованных в ВИТ/ВМС.

Ниже представлен освоенный в научно-экспериментальных исследованиях и испытаниях перечень метрологических, расчетно-аналитических, энергетических и диагностических параметров траекторного векторно-фазового анализа НДС.



Типовая эллиптическая реконструкция (модель) траекторного энергетического анализа гомеостаза в измерительной точке объекта мониторинга в направлении мгновенного вектора полной энергии  $E_{\Sigma}$ , ортогональной к годографу состояния на актуальной частоте наблюдения.

Практически реализована возможность оценки в реальном времени Инерционных параметров упругости и Вариационного анализа энергетических суперпозиций, а также Прецизионной локализации (пеленгации) источников колебаний и вновь образовавшихся дефектов с применением ЦИАП ВМС:

I. Метрологические и диагностические параметры ( $\Sigma$  16):

1.  $X, Y, Z$  - координаты измерительной точки (3);
2.  $R1^+, R2^-$  - большие полуоси годографа (6);
3.  $r$  - малая полуось годографа (3);

4.  $\alpha, \beta, \gamma$  - Эйлеравы углы пространственной ориентации годографа (3);

5.  $t$  - время, синхронизирующее метрологические параметры (1).

II. Расчетные энергетические параметры ( $\Sigma$  12):

6.  $E_{\text{кин}}(t)$  - вектор кинетической энергии воздействий (4);

7.  $E_{\text{пот}}(t)$  - вектор потенциальной энергии упругого сопротивления (4);

8.  $E_{\Sigma}(t)$  - вектор полной энергии колебания (4):

$$\bar{E}_{\Sigma}(t) \equiv \pi r_i (R_{+1} + R_{-2})_t / 2.$$

III. Пеленгация источников гармонических колебаний ( $\Sigma$  7):

9.  $X_i, Y_i, Z_i$  - топология источника гармонического колебания (3);

10.  $P_i(t)$  - угловой пеленг источника колебаний (3);

11.  $R/L$  - направление вращения вектора по годографу (1).

BigData: Всего 35 измеряемых и расчетно-аналитических параметров с максимально возможным темпом обновления и дифференцировано обоснованной частотой связанных вычислений по всему актуальному частотному спектру  $f_i$  и полной топологии 3D-сенсоров на объекте. Массив может быть пополнен производными компонентов диагностических параметров.

IV. Параметры расчетно-аналитической и физической модели НДС ( $\Sigma$  67):

$N^1 - T^1 - N_2 - T_2$  физическая модель периодической трансформации гомеостаза - ТЕНЗОРНОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ:

12.  $\sigma_N(t_0) - \varepsilon_N(t_1) - \gamma(t_2) - \tau(t_3) / \sigma(t_4) - \varepsilon(t_5) - \gamma(t_6) - \tau(t_7)$  - прямой/обратный 1/4-циклы (полупериод) гомеостаза упругих НДС (16);

13.  $(t_{+1} - t_i)$  - элементарный фазовый сдвиг в периодическом цикле (16);

14.  $\kappa = N/\Delta l$  - коэффициент упругости/жесткости в измерительной точке (1);

15.  $\rho^+ = \tau/\varepsilon_N$  - коэффициент Пуассона в измерительной точке (16);

16.  $R = 1/\rho = \varepsilon/\tau_N$  - ресурсный диагностический коэффициент (16);

17.  $A_V$  - коэффициент анизотропии в измерительной точке (2).

DeepData: Всего 102 измерительно-аналитических динамических параметра в каждой измерительной точке<sup>1</sup> объекта наблюдения на каждой актуальной частоте спектра<sup>2</sup> с научно обоснованным темпом съема и обработки информации<sup>3</sup>.

Заключение:

ВОЛНОВАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ на базе ВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ послужила инновационной научно-методической основой создания универсального интеллектуального программно-аппаратного инструмента "ЦИФРОВАЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА" (ЦИАП ВМС). Платформа формирует спектральный модельный портрет томографирования гомеостаза функционирования объектов в соответствии с ТТХ, либо портрет раннего обнаружения для своевременного предотвращения патологий в соответствии с их анамнезом. ПЛАТФОРМА ЦИАП ВМС реализует пилотный метод обеспечения техногенно-технологической безопасности - первого из 17 направлений глобальных угроз.

## НЕКОТОРЫЕ ПРИЗНАКИ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОРЫВА

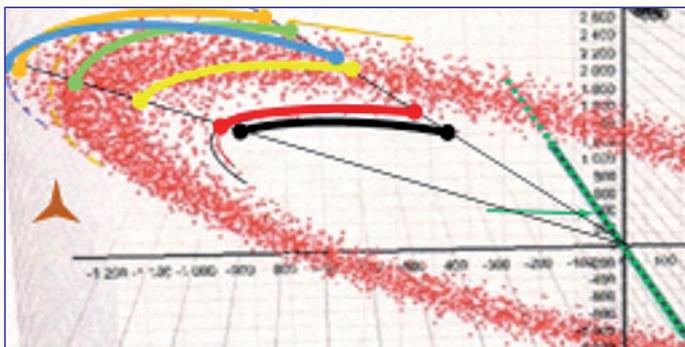
Современный уровень развития искусственного интеллекта позволяет надеяться на реальное освоение многомерной энергодинамики состояний. Наибольшая природная мерность биомеханических систем от микромира до макромира ожидает создания адекватного интеллектуального инструментария для цифровой диагностики и предиктивного анализа безопасной эксплуатации неживых (минеральных) и живых (органических) киберсистем. Ниже приводятся некоторые опубликованные исследования, подтверждающие высокую информативность томографирования гомеостаза природно-технических систем с беспрецедентным уровнем автоматизации обработки.

Новизна I. Впервые благодаря ВИТ/ВМС практически получено экспериментальное подтверждение фундаментальных гипотез лауреатов Нобелевских премий.

Альберт ЭЙНШТЕЙН: "Характерный для механических объек-

тов и систем многочастотный спектр гармонических колебаний можно рассматривать в качестве **осцилляторов механической природы**. Представляется объяснимым взаимное энергетическое влияние осцилляторов, которое во множестве мгновенных комбинаций может быть причиной, порождающей **квантованное событие изменения стационарного состояния**. Заявленная новизна требует подтверждения экспериментом". Выдающийся физик озвучил просто объяснимое, но никем экспериментально не подтвержденное свойство, требующее наличия пространственных **Lt**-инструментов наблюдения.

Свойство состоит в том, что при гармоническом воздействии на упругую среду распространяющаяся волна в **каждом новом периоде** взаимодействует с **неповторимой во времени конфигурацией** упруго устойчивой пространственной "галактикой энергетических траекторий" колеблющихся атомно-молекулярных частиц вещества иных частот спектра с их **переменным (нестационарным) фазочастотным рассогласованием**, демонстрирующим **квазистационарность** годографа анализируемой частоты спектра в реальном времени.



Впервые представлена физическая **4D**-реконструкция квазистационарности гармоники колебания на частоте **дефекта** в натуральном масштабе измерений. Выделен сегмент из семи машинных тактов периодической реконструкции **нелинейной последовательности мгновенных векторов годографа**. Для сравнения, прямая зеленая линия - реконструкция измерения серийно производимого скалярного **1D**-вибракселерометра.

**Илья ПРИГОЖИН** ввел системное понятие аттракторов гомеостаза в качестве характеристики **квазистационарности динамических процессов и состояний** в общей теории неравновесности, которое характеризуется потоками энергии, массы и энтропии. В классическом естествознании такие процессы принято считать непознанными **ФЕНОМЕНАМИ**, которыми пренебрегают, что существенно усложняет развитие, прежде всего, естественных наук.

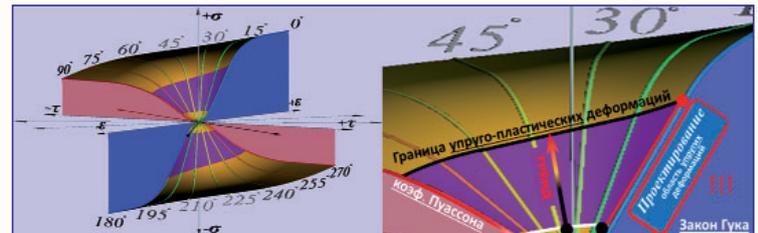
В современном контексте лингвистических трансформаций, наиболее глубоким понятием охватом обладает всеобъемлющее универсальное определение: "**ФЕНОМЕН** обозначает предмет, события, явления, процессы, свойства, состояния, сущности, виды и личности, касающиеся Природы, Общества и Человека; малоизвестные, необычайные, неизученные, необъяснимые, редкие или противоречащие общепринятым знаниям и закономерностям парадоксы, отличающиеся уникальными, необычными, неизвестными, не имеющими аналогов, неповторимыми или выдающимися качествами, характеристиками, талантами, поступками и прочими проявлениями, а также общее обозначение всего, что может стать объектом научного рассмотрения, исследования, изучения или прогноза с целью получения новых фундаментальных научных и опережающих прикладных технологических знаний".

Описание феномена является **изначальным основанием для его раскрытия**, что переводит его из области непознанного в новые прорывные Знания и даже **ОТКРЫТИЯ**.

Новизна II. Мировая традиция проектирования объемных конструкций на основе усредненных статистических нормативов на конструкционные материалы с регламентированным запасом прочности привела к тому, что **потеря прочности является главной причиной аварий и катастроф**. Сегментное выделение машинных тактов в периодической реконструкции непрерывной последова-

тельности годографов мгновенных векторов актуального спектра, помимо подтверждения открытия явления **КАЗИСТАЦИОНАРНОСТИ**, является инструментом **ТЕНЗОРНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ГОМЕОСТАЗА**, на основе которого возможна практическая реализация **Вариационного метода анализа энергетического спектра суперпозиций для пространственно-временной диагностики** перехода объектов механических систем из области упругости (ресурсно-прочностной безопасности) в область аварийной пластичности и дефектообразования.

Разработана проектно-эксплуатационная **цифровая 3D-модель обобщенного Закона Гука-Пуассона** в качестве Гомеостатического портрета объекта предиктивной диагностики и цифрового инструмента непрерывной энергетической online-оценки **текущего ресурса эксплуатационной прочности** в спектре собственных частот, внешних воздействий, дефектов материалов и конструкций.



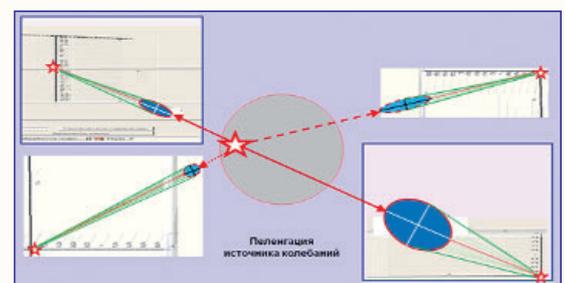
Модернизация проектной модели путем объединения **линейного Закона Гука** (модуль Юнга преобразования напряжений в деформации) с объемным параметром упругого сопротивления материала (коэффициент Пуассона) привело к седлоподобной модели метрологически диагностируемой области **эксплуатационного тренда ресурса прочности** в пределах от проектного запаса (100 %) до предельно минимального на границе упруго-пластических деформаций (нулевой ресурс).

Траекторный энергетический анализ эллиптических фазовых годографов открыл механизм гомеостатической трансформации кинетической энергии воздействий, в том числе, дефектов конструкционных материалов, в потенциальную энергию объемного сопротивления упругой среды. Этот механизм реализован и опробован впервые в мире и позволяет устранить одну из **главных угроз Земной цивилизации - техногенно-технологическую**.

Важно отметить одно важное обстоятельство. Для достоверной векторно-фазовой реконструкции диагностических параметров энергетических годографов частота опроса измерителей должна быть на два порядка выше анализируемой (100 точек за период при частоте характерных механических спектров 1...15 кГц). Но эллипс такая удивительная математическая фигура, которая позиционируется в пространстве координатами всего трех точек, что существенно экономит объемы памяти и время для анализа спектральных, особенно стационарных, процессов.

Новизна III. Известна ссылка на публикацию талантливого инженера-механика Леонидова первой половины XX века с идеей механической локации источников колебаний в сплошных упругих средах. Задача чрезвычайно актуальная, но отсутствие инструментов наблюдения волновых процессов отодвинуло её решение на сто лет.

Благодаря инструментам **ВИТ/ВМС** практически реализован спектральный метод Механической локации источников колебаний. Траекторный энергетический анализ эллиптических годографов позволяет через **Lt**-реконструкцию пространственной ориентации больших осей годографов оценивать ракурсы внешних воздействий или вновь образовавшихся механических дефектов на ранней стадии их зарождения.

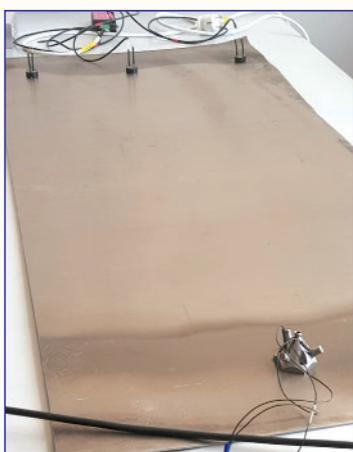


Эксперименты подтвердили возможность точной пеленгации пространственного ракурса  $R_r$  источника колебаний относительно измерительной точки в плоскости реконструированного годографа на его диагностической частоте.

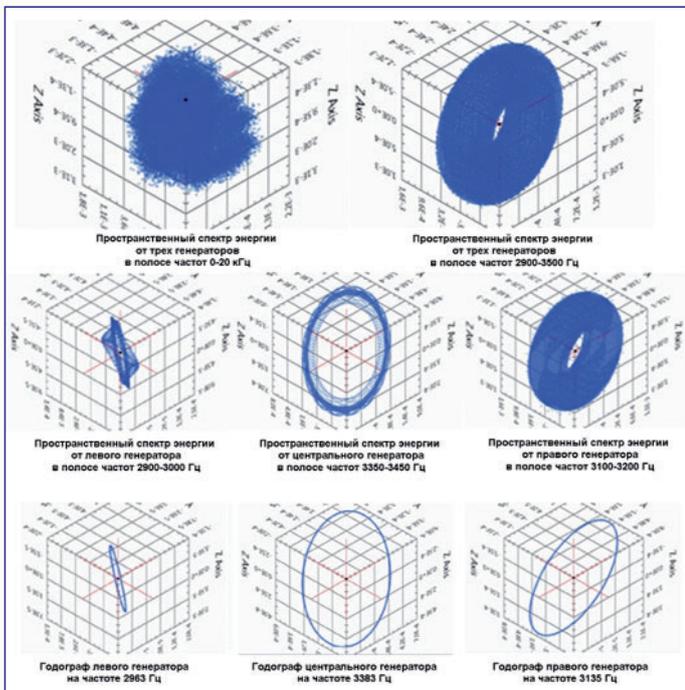
Площадь годографа пропорциональна полной энергии, излучаемой источником. При этом, направление прихода волны определяется направлением орбитального движения вектора относительно центра годографа ( $R^+ / L$ ). Энергия гармонического колебания в процессе распространения волны в упругой среде трансформируется с учетом влияния физико-химических параметров конструкционного материала: упругости, прочности, зернистости, анизотропности, которые могут быть предметом более тонких диагностических исследований.

Чистота представленного эксперимента подтверждается сходимостью ракурсов пеленгования от четырех разнесенных в пространстве 4D-сенсоров в координатах точки источника колебаний. Метод впервые позволил исследовать анизотропию и иные дефекты конструкционного материала в реальном времени эксплуатации.

Новизна IV. Лабораторное подтверждение эффективности механической локализации спектра источников колебаний получено на фрагменте обшивки летательного аппарата.

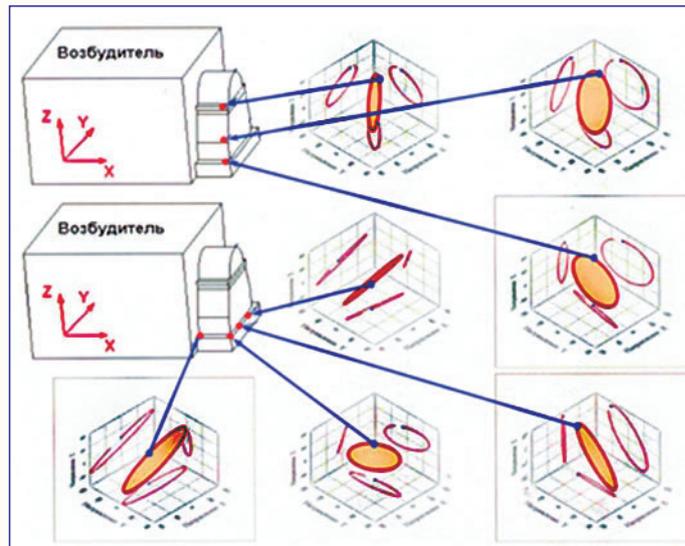


Механическая 4D-локация трех разночастотных источников вибрации (дальний край) 3D-сенсором (ближний край) позволила последовательной фильтрацией из широкого спектра (верхний ряд) перейти к узкому спектру (средний ряд), а затем к одночастотным годографам трех источников (нижний ряд), большие оси которых позволяют определить их ракурсы в двумерной плоскости 4D-пространственно-временных 3D-годографов.



Новизна V. Технические регламенты эксплуатации силовых агрегатов, машин и конструкций в энергетике и на транспорте предусматривают статистические нормативы вибрационных состояний вращающихся роторов и нагруженных статических опор. Цифровые инструменты ВИТ/ВМС позволяют в реальном времени в процессе штатной эксплуатации вести непрерывный мониторинг и пре-

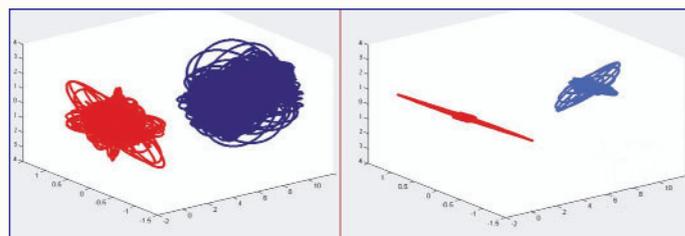
диктивный анализ неисправных вибросостояний роторных силовых турбинных агрегатов.



Траекторный энергетический анализ силовых опор позволяет контролировать исправность подшипниковых узлов крепления роторов и валов, равномерность крепления опор к фундаменту, достоверно оценивать сбалансированность и проводить прецизионную виброналадку вращающихся узлов машин.

Опубликована история, когда на электростанции АО "Мосэнерго" после капитального ремонта четырехопорной энергетической турбины массой 200 т три года не могли с помощью статистических регламентов произвести многоплоскостную балансировку тяжелого ротора. Ученые Всероссийского теплотехнического института с коллегами из Московского энергетического института разработали научный метод на основе векторно-фазовых годографов, позволивший произвести 3D-виброналадку турбины с регламентированной точностью в течение двух недель на фоне почти от 150-недельного простоя.

Новизна VI. Самой сложной и актуальной опцией 4D-виброналадки является вибробалансировка двухопорных вращающихся объектов роторного типа: силовые машины и агрегаты, тепловые и энергетические турбины, двигатели, генераторы, трансмиссии.

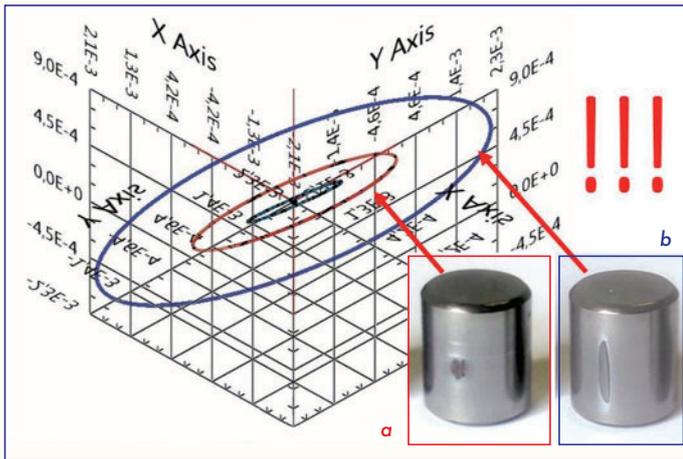


Спектральная итерационная вибробалансировка позволяет предельно снизить пространственные массовые дисбалансы объектов роторного типа путем системной установки балансировочных грузов-противовесов на основании траекторного энергетического анализа фазовых 4D-портретов.

Новизна VII. Высокую информативность продемонстрировали Цифровые инструменты ВИТ/ВМС при исследовании влияния дефектов роликов на динамику подшипника. Вибрация исправного подшипника на роликовой частоте отображается центральным, наименьшим по площади черным годографом с относительными параметрами размаха большой и малой эллиптических осей  $\{2R_n = 1 \text{ и } 2r_n = 1\}$ .

Ролик с имитацией начала коррозии в виде точечной выборки материала площадью менее 0,25 мм<sup>2</sup> представлен на рисунке в красной рамке (а). Ему соответствует красный годограф с относительными параметрами большой и малой эллиптических осей  $\{2R^{cl} = 6,0 \text{ и } 2r^{cl} = 2,6\}$ . При движении дефектной части ролика по внутреннему кольцу подшипника полная энергия колебаний, про-

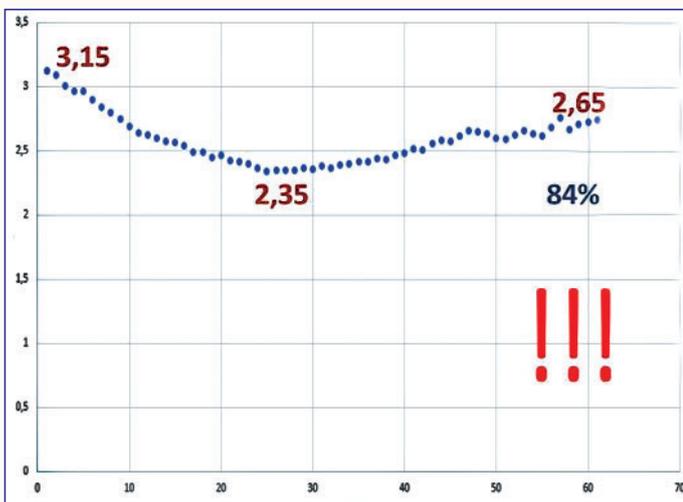
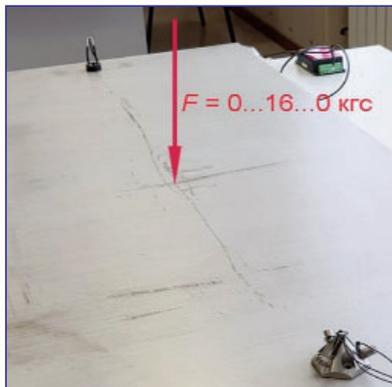
порциональной площади годографа  $\bar{E}_\Sigma = \pi R^{(b)} \cdot r^{(b)}$ , увеличивается в 15,6 раз.



Развитие дефекта в линейное истирание ролика (лыска) длиной 5...7 мм представлено на рисунке в синей рамке (b). Ему соответствует синий годограф с относительными параметрами осей эллипса  $\{2R^{(b)} = 20,3 \text{ и } 2r^{(b)} = 4,2\}$ . При движении дефектного ролика с лыской по внутреннему кольцу подшипника полная энергия колебаний, пропорциональная площади годографа  $\bar{E}_\Sigma = \pi R^{(b)} \cdot r^{(b)}$ , увеличивается в 85,6 раз! Можно сказать, что цифровая технология ВИТ/ВМС является "мощным" гомеостатическим инструментом, аналогичным микроскопу в биологии и материаловедении. Технология позволяет в реальном времени контролировать упрочняющую обкатку (притирку) новых подшипников.

Новизна VIII. Важнейшей опцией Цифровых инструментов ВИТ/ВМС являются анализ и прогноз Напряженно-деформированных состояний деталей силовых корпусных конструкций, как при статических, так и при динамических нагрузках в энергетическом и транспортном машиностроении, материаловедении и строительстве на всех этапах жизненного цикла от проектирования до реконструкции.

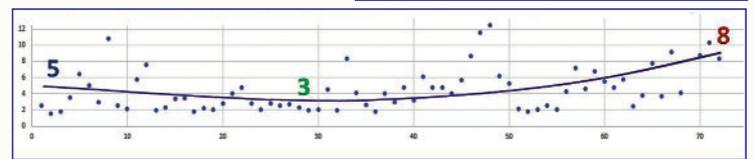
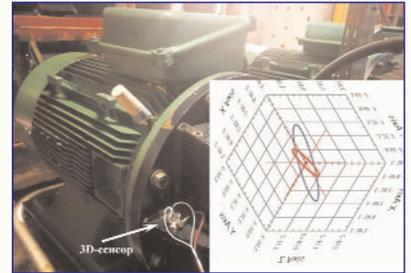
Кварцевый генератор в качестве калиброванного источника колебаний с 3D-приемником (датчик) расположены на линиях опор 8-мм листа из алюминиевого сплава обшивки в противоположных сторонах листа. На центр листа оказывается переменная статическая нагрузка, изменяющаяся плавно от 0 до 16 кгс и обратно.



Ресурсный диагностический параметр  $R = 1/\rho = \epsilon^T/\tau^N$  меняется пропорционально воздействию, **НО** при этом проявляется отставание ресурсного восстановления - несовпадение значений диагностического параметра в начале и в конце испытания указывает на наличие остаточных напряжений в обшивке, сохранившихся после снятия нагрузки.

Новизна IX. Новационной опцией Цифровых инструментов ВИТ/ВМС является методика оценки Ресурсных состояний шарикового подшипника SKF морского гидронасоса TICCURILA в процессе штатной регламентной технологической обкатки.

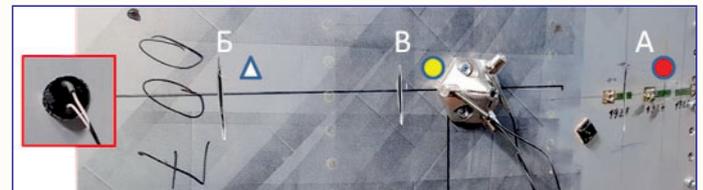
4D-годографы на шариковых частотах большими осями лоцируют подшипники гидронасоса. Красный годограф лоцирует дальний, менее нагруженный подшипник двигателя. Синий годограф указывает на ближний к 3D-сенсору подшипник гидронасоса, более нагруженный функционально.



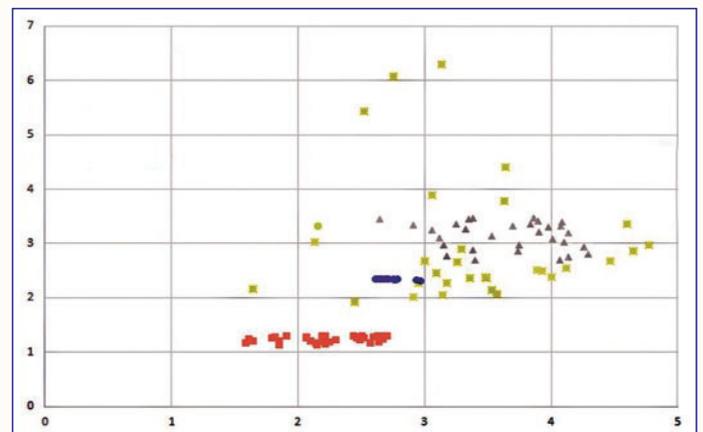
Подшипник SKF после механической сборки (по регламенту) обкатывался на ресурсном стенде в течение 4 суток, начиная с уровня диагностического параметра ресурса "5".

В процессе притирки диагностический параметр понижается до уровня "3", а затем **повышается в полтора раза до уровня "8"**, что метрологически в реальном времени заменяет сложные лабораторные испытания.

Новизна X. Лидирующей опцией Цифровых инструментов ВИТ/ВМС является исследование ресурсной прочности состояния панели фюзеляжа самолета MC-21.



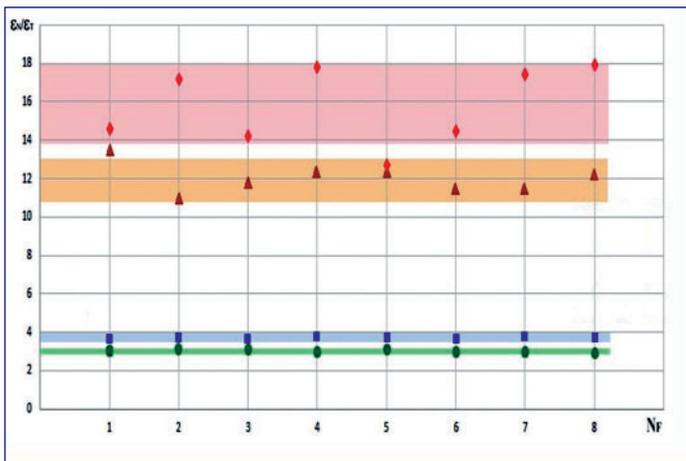
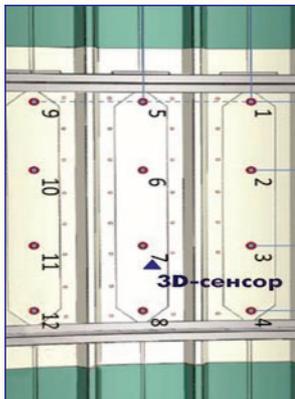
Последовательно на линии "частотный генератор" - "3D-сенсор" на фюзеляже имитировалась 2D-топология дефектов: трещины панели в актуальных координатах: "А - красная", "Б - серая" и "В - желтая" ортогонально трафику волны генератора.



Комбинаторика влияния дефектов в режимах: 1. Наддув и сброс давления без повреждений (синие точки); 2. НДС фюзеляжа при трещине "А" (красные точки); 3. при трещине "А" и трещине "Б" (серые точки); 4. при трёх трещинах "А", "Б" и "В" (жёлтые точки).

Новизна XI. Международной опцией Цифровых инструментов ВИТ/ВМС является испытание ресурса прочности композитной панели фюзеляжа SPACECRAFT AIRBUS.

Усредненные значения напряженно-деформированных состояний  $\epsilon_N/\epsilon_T$  композитной обшивки космического аппарата в функции количества пробоин (0-1-2-3). Применение диагностической оценки ресурса прочности в реальном времени методом ВМС позволило **сократить сроки испытаний мирового лидера компании LMS с 52 до двух недель при сходимости результатов исследований ~94 %.**



Исследования имели международный резонанс: Top-100 из 3900 конкурсных проектов Евроконкурса HELLO tomorrow при поддержке Минэкономики Франции.

Новизна XII. Проведены сравнительные виброиспытания авиадвигателя штатным скалярным пьезоэлектрическим 1D-виброакселерометром (канал "Z") и векторным 3D-сенсором, один из каналов которого сонаправлен с штатным 1D-каналом "Z", а два других "X" и "Y" образуют правую систему координат на общем адаптере.

$a_z = 4,3g$   
 $a_y = 0$   
 $a_x = 0$   
 **$a_z = 4,3g$**   
 $a_z = 4,3g$   
 $a_y = 7,0g$   
 $a_x = 11,5g$   
 **$a_z = 14,1g$**

При точном совпадении измерений 1D-виброакселерометра с сонаправленным каналом 3D-сensors, векторный 3D-виброакселерометр измеряет полный вектор величиной 14,1g.

**ОТЛИЧИЕ ИЗМЕРЕНИЙ 3,28 раза или ОШИБКА регламента 230 %.**

Шокирующая новизна XIII. Проведены сравнительные виброиспытания газоперекачивающего агрегата АО "Газпром" (наземный вариант авиодвигателя) штатным скалярным пьезоэлектрическим 1D-виброакселерометром (канал "Z") и векторным 3D-сенсором, один из каналов которого сонаправлен со штатным 1D-каналом "Z", а два других "X" и "Y" образуют правую систему координат на общем адаптере.

**стационарные режимы**  
**ОТЛИЧИЕ ИЗМЕРЕНИЙ  $a_x/a_z$  от 1,5 до 4 раз**  
**переходные режимы**  
**ОТЛИЧИЕ ИЗМЕРЕНИЙ  $a_x/a_z$  от 4 до 20 раз**

При точном совпадении измерений штатного 1D-виброакселерометра с сонаправленным каналом 3D-сensors, **ОТЛИЧИЕ ИЗМЕРЕНИЙ в стационарных режимах равно от 50 до 300 %, а в переходных критических режимах составляет от 300 до 1900 %.**

Обоснованный ресурс прочности механических систем, благодаря интеллектуальным инструментам АНТРОПОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, позволяет кардинально изменить рачительное отношение к потреблению сырьевых природных ресурсов Земной цивилизации для энергетического, транспортного и технологического машиностроения.

**АНТРОПОГЕННЫЙ ФЕНОМЕН БИОМЕХАНИКИ**

АНТРОПОГЕННАЯ МЕХАНИКА является связующим инструментальным звеном между физической неживой материей и органическими тканями и органами живой материи на основе понятий когерентности, квазистационарности, хиральности и фрактальности многомерных пространств в голографическом формате записи, воспроизведения, анализа, преобразования и синтеза спектральной интерференции волновых (колебательных) спектров.

Природоподобные модели Антропогенной механики могут не только активировать, но и интегрировать нейросетевые модели живых и неживых объектов. Более того, есть третье состояние, помимо живой и неживой материи, осваиваемое наукой, но еще малоизученное. Это состояние непознанных наблюдений и аргументировано предполагаемых идей, объединенных термином ФЕНОМЕН.

Квантовая механика описывает это состояние с помощью эффекта наблюдателя, когда результат эксперимента зависит от внутреннего состояния, компетентности и веры экспериментатора. В третьем состоянии материи проявляются все аномальные непознанные эффекты, такие как плазмоиды, шаровые молнии, НЛО, призраки, религиозные "чудеса", пока необъяснимые наукой явления и так далее.

В этом же феноменальном состоянии материи предположительно существует сознание и осознание человека за пределами жизненного цикла. В научной дисциплине теология третье состояние материи определено философской терминологией духа и души. Без третьего состояния материи невозможно объяснить и подвести научную базу к эффектам квантовой механики. Также без этого невозможно дальнейшее развитие медицины в научном решении проблем геронтологии, в том числе, предсказанное и ожидаемое продление жизни человека.

Без овладения нейромоделями АНТРОПОГЕННОЙ МЕХАНИКИ гомеостаза упругих систем невозможно создание искусственного интеллекта высокой МЕРНОСТИ, а главное, невозможно адекватное управление уже существующим искусственным интеллектом, который управляет жизнью социума и сознанием современного человека. Искусственный интеллект, не соответствующий критериям и МЕРНОСТИ природоподобия, уже существует и своим формальным несовершенством представляет большую антропогенную опасность для Земной цивилизации. Это не только теоретически доказуемо, но и практически подтверждается учеными.

Повышение МЕРНОСТИ наблюдения, анализа и синтеза еще важнее в живой природе в связи с тем, что большинству молекул, формирующих биологическую активность жизненных процессов, свойственна хиральность, а точнее гомохиральность - только один стереоизомер большинства веществ определенного вида. Например, модель аминокислот имеет левое вращение, а углеводы закручены вправо. При тех же химических и физических характеристиках их отражения не способны участвовать в биологических реакциях или даже смертельны (NATURE / The Scripps Research Institute). Сделан предположительный вывод о том, что закрученность органических молекул биологически активных веществ перед зарождением жизни на Земле стала следствием случайности: их дисбаланс породил Жизнь и цивилизацию.

В свою очередь, МЕРНОСТЬ познания асимметрии в биологической жизни может привести к междисциплинарному прорыву в интеллектуальной синтезе уникальных конструктивных наноматериалов с заданными и управляемыми свойствами.

**ИТОГОВОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

"ЦИФРОВАЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА" / ЦИАП ВМС, в качестве новейшего интеллектуального IT-инструмента ВОЛНОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ мониторинга гомеостатических состояний упругих систем, демонстрирует многогранную прорывную новизну научных фундаментальных ЗНАНИЙ ЛИДИРУЮЩЕГО УРОВНЯ и креативные технологические решения экспериментальных прикладных исследований в задачах текущей (realtime) диагностики и предиктивной оценки ресурсных эксплуатационных состояний в атомной, теп-

ловой и гидро-ЭНЕРГЕТИКЕ, наземно-подземном скоростном, воздушно-космическом и морском ТРАНСПОРТЕ, гражданском, индустриальном, транспортном и специальном СТРОИТЕЛЬСТВЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ, ДЕФЕКТΟΣКОПИИ, АКУСТИКЕ, ГЕОЛОКАЦИИ и всех сферах АНТРОПОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.

АНТРОПОГЕННАЯ МЕХАНИКА в междисциплинарных, межотраслевых и межвидовых платформенных приложениях прорывных научных фундаментальных Знаний и креативных технологических Умений, демонстрирует высочайшую эффективность инструментальных цифровых методов повышения МЕРНОСТИ Знаний, обеспечивающую не только ЛИДЕРСТВО в понимании ресурсного гомеостаза неживых систем, но и содержит высокий потенциал философского осмысления создания голографических инструментов высокой МЕРНОСТИ Знаний для антропогенного освоения нейро-сетевой БИОМЕХАНИКИ иммунного гомеостаза живых систем в ЭКОЛОГИИ, БИОЛОГИИ, МЕДИЦИНЕ, ЭПИДЕМИОЛОГИИ, ГЕРОНТОЛОГИИ, ПИТАНИИ, сохранении ВИДОВ и сдерживании антропогенной деструкции КЛИМАТА (см. рис.)

Искусственный нейросетевой интеллект высокой МЕРНОСТИ природоподобия, порождает уникальную взаимно развивающую и дополняющую междисциплинарность ПРОЧНОСТИ Антропогенной механики и ИММУНИТЕТА Антропологической биологии. □



© Проф. Анатолий Сперанский. Антропогенная МЕХАНИКА - многомерный мир естественнонаучных Знаний, декабрь 2023 г. Цитирование требует ссылку на авторское право. Перепечатка только с письменного согласия авторов или издателя.

Связь с авторами: vibro-vector@yandex.ru

## Мировой стандарт сегодня (усреднённая статистическая оценка)





# Банк сильных людей

## Примѣненіе нафталина въ автомобильныхъ двигателяхъ.

Статья опубликована 110 лет назад. Но тема, поднятая в далѣкие от нас годы, актуальна и в наше время.

Уже давно в техническом мире появилось стремление отыскать для автомобильных двигателей пригодное, дешѣвое и, по возможности добываемое в пределах страны, горючее. В настоящее время широкие круги заняты решением этого, ставшего злободневным, вопроса. Введение моторных тележек в обиход и в некоторый отрасли промышленности увеличило потребление бензина и т. п. продуктов перегонки нефти, потому что автомобиль экономичен только при почти непрерывной работе в течение круглого года.

Производство бензина не могло идти в ногу с таким повышением потребления, и результатом этого должно было быть вздорожание бензина, не столько вследствие вздутия цен заинтересованными в их повышении продавцами, сколько благодаря относительно уменьшению производства. Главным образом проявилось вышеупомянутое явление в Соединенных Штатах, покрывавших до последнего времени около 80 % мирового потребления бензина; экспорт Соединенными Штатами бензина на мировой рынок понизился. С одной стороны, потребление бензина в самих Соединенных Штатах, вследствие непрерывного развития автомобильного сообщения, сильно возросло; с другой стороны производство бензина уменьшилось, хотя по количеству добываемой нефти этого нельзя обнаружить, дело в том, что возрастание добычи нефти происходит в последние годы главным образом за счёт калифорнийской нефти, которая почти не даёт бензина.

Подобное уменьшение добычи нефти наблюдается и в других странах: оказывается, что существующая в настоящее время буровые скважины, благодаря всё прогрессирующему спросу на более тяжелые сорта нефти, доставляют, соответственно, меньше бензина, в то время как открытие новых источников не может покрыть всё растущего спроса на бензин. Таким образом, несмотря на увеличение потребления бензина, производство его уменьшилось, что вполне объясняет его вздорожание.

Пытались, конечно, компенсировать понижение производства улучшением методов переработки нефти в бензин. Из этих попыток упомянем здесь о так называемом методе Cracking'a - обработки трудно кипящих составных частей нефти под давлением и при высокой температуре. Были сделаны также попытки сжижения натурального (земляного) газа в бензиноподобное горючее путѣм сжатия. Однако все эти пути до сих пор не привели к хорошему результату. Если, наконец, принять в соображение, что тяжелые составные части нефти, благодаря всё возрастающему распространению дизелей, находят расширяющуюся область применения, то нужно отбросить окончательно мысль о том, что цена на бензин может когда-либо снова понизиться.

Поиски подходящего заместителя бензина, как горючего для автомобильных двигателей, привели к применению спирта, которое оказалось, однако, неэкономичным. Красивым, но не долговечным результатом дальнейших поисков в этой области явился бензол. Едва только общество Daimler-Motoren-Gesellschaft попыталось повести планомерное снабжение бензолом своего рынка сбыта, как появилось на рынке большое количество т.н. тяжѣлого бензина, почти такого же дешѣвого, как и бензол и не нуждающегося для своего применения в особых карбюраторах. Опыт Daimler-Motoren-Gesellschaft, несмотря на свой неуспех, дал и некоторые положительные результаты: он доказал, что бензол - как горючее для автомобильных двигателей, безусловно пригоден. Когда стали выпускать автомобили, работающие на тяжѣлом бензине, то спрос на последний так возрос, что в настоящее время тяжѣлый бензин стоит столько, сколько стоил лёгкий несколько лет тому назад. Вздорожание тяжѣлого бензина не создало, однако, выгодных условий для применения бензола, несмотря на то, что и в конструкции карбюраторов в этом отношении был сделан шаг вперѣд - теперь каждый карбюратор одинаково хорошо распыляет, как тяжѣлый бензин, так и бензол. Дело в том, что цена бензола за это вре-

мя настолько поднялась, что он не может уже так легко конкурировать с бензином. Кроме того, то количество добываемого бензола, которым можно располагать для автомобилей, в Германии, например, пока что ограничено, т. к. большая часть бензола идёт для химических целей, часть же постоянно вывозится за границу. Правда общество Deutsche Bensol - Vereinigung имеет в виду уже в ближайшие годы выпустить большое количество бензола, но нельзя забывать, что бензол всегда останется лишь побочным продуктом, получающимся при процессе коксования угля, и ради него едва ли стоит расширять существующие установки коксовых печей. Наконец, довольно прочно установившаяся в настоящее время цена бензола 30 пфенингов/килограмм (для Германии) не настолько низка, как можно было бы желать употребления его для дальнейшего успешного развития автомобилей.

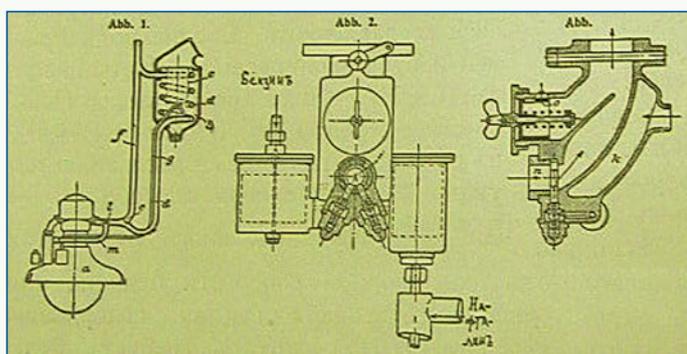
Обращает на себя внимание то обстоятельство, что у нас до сих пор очень мало занимались постановкой опытов с применением нафталина в автомобильных двигателях, хотя нафталин производится в больших количествах, и пригодность его, как горючего для двигателей внутреннего сгорания была доказана уже несколько лет тому назад заводом газовых двигателей Deutz.

Нафталин - главная составная часть каменноугольного дѣгтя, получающегося на газовых заводах или в коксовых печах. Нафталин содержится в т. н. средних маслах, которые выделяются при перегонке дѣгтя между температурами 170 °С и 230 °С. Сырой, слабо окрашенный нафталин получается из этих масел охлаждением и фильтрованием под давлением. Его очищают промывкой и вторичной перегонкой. Чистый нафталин (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>) - белое кристаллическое тело; плотность - 1,15 при 15 °С, плавится при 79,7 °С, в то время как неочищенный расплавляется уже при 75 °С; теплотворная способность - 9700 калорий/кг, что лишь немного отличается от теплотворной способности бензина или бензола. Благодаря высокому содержанию углерода (97,7 %) нафталин требует больше воздуха для горения, чем, например, бензол с 93,2 % содержанием углерода.

Главное преимущество, которое сулит нафталин, как горючее, это его поразительная дешевизна. Так как широкому производству нафталина пока ещё противостоит незначительный рынок сбыта, то можно считать его цену около 10 пф/кг (1/3 цены бензина), прочно установленной надолго. С другой стороны, трудности работы на нафталине в настоящее время не так уже велики, чтобы препятствовать надежному действию автомобиля. Эти трудности и неудобства - следующие. Прежде всего радиус действия такого автомобиля ограничен, ибо горючее он возит с собою в тѣрдом состоянии, что требует, соответственно, больше места. Далее, сама работа двигателя благодаря этому усложняется, т. к. в резервуар над карбюратором можно вводить только определённые небольшие порции нафталина. Главное же затруднение, заключающееся в том, что горючее должно расплавиться, прежде чем оно распылится и смешается с воздухом в карбюраторе, должно считаться побѣждённым, после того, как сконструированные для этой цели двойные карбюраторы оказались вполне отвечающими своему назначению. Необходимо только пуск в ход двигателя произвести на каком-либо летучем горючем и перейти к работе на нафталине, когда расплавится содержимое резервуара над карбюратором. Во время работы на нафталине необходимо следить за тем, чтобы не было больших пауз, ибо иначе придется снова повторить весь процесс пуска, который, впрочем, продолжается всего несколько минут. Расход легко улетучивающегося горячего во всяком случае до того незначителен, что не может оказать никакого влияния на дальнейшее повышение цен бензина и бензола.

Опыты с работой автомобилем на нафталине пока были произведены только во Франции, в одном случае с моторным экипажем, в другом - с тяговым рельсовым локомотивом с очень интересным передаточным механизмом (от вала мотора к колесам). В пер-

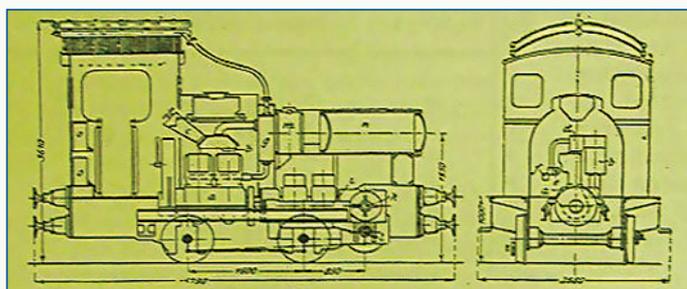
вом случае испытанию подверглась коляска Renault с двухцилиндровым двигателем. Диаметр каждого цилиндра - 102 мм, ход поршня - 120 мм, мощность - 12 л.с. Двигатель был снабжен карбюратором для нафталина системы Noel (рис. 156).



Резервуар для нафталина (б) помещается довольно высоко над мотором (а). Внутри резервуара находится сетка (с), наполняемая нафталином, который расплавляется нагревательным змеевиком (d); по змеевику циркулируют отходящие газы, ответвляющиеся из выпускной трубы (f). Заслонкой (e) регулируется количество ответвляющихся в змеевик газов. Расплавленный нафталин стекает по трубе (g) к карбюратору. Температура его поддерживается на этом пути газопроводом (d). В камере смешения (i) карбюратора, рубашка которого (к) также обогревается газопроводом (f), регулируемым заслонкой (l), встречаются два сопла, питаемые из отдельных камер с поплавками; Мимо концов сопел засасывается "главный" воздух в (n). Когда горючее уже распылено, к нему подводится некоторое количество добавочного воздуха, регулируемое передвижением поршневого золотника (о), снабжённого пружиной.

Испытание было произведено под наблюдением уполномоченная от "Conservatoire des Arts et Metiers" в Париже на дороге в 52,7 км, между Saint-Germain-en-Laye и Vernon во время пути туда и обратно, т. е. на общем протяжении 105,4 км; средняя скорость пробега - 33,4 км/ч, максимальная - 42,3 км/ч. При этом было израсходовано 0,142 кг/км нафталина, что при цене 10 пф/кг даёт 1,42 пф/км. Работа на бензине обошлась бы в 4 пф/км. После пуска мотора, находившегося в холодном состоянии, можно было через 13 минут 37 сек. перейти с бензина на нафталин, хотя ещё не всё содержимое резервуара было расплавлено. После 10-ти минутной остановки можно было двигатель привести в действие прямо на нафталине, разогнав его ручкой; после остановки в 16 минут мотор пускался таким же образом, если предварительно был вбрызнут в цилиндр бензин. Особенности дальнейшая работа также не представляла. Выпуск был почти бездымный; при осмотре разобранного после испытания двигателя были обнаружены небольшие загрязнения на цилиндрах, поршнях и клапанах.

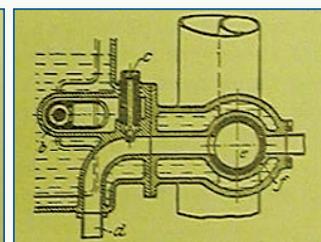
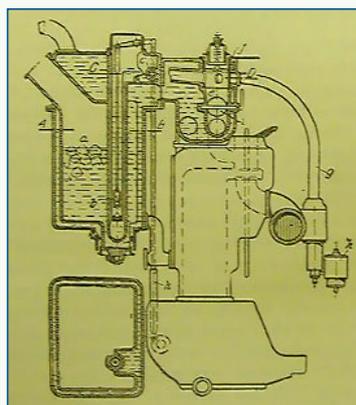
Второй опыт был произведён с тяговым локомотивом, сооруженным фирмой Schneider & Co. для движения в туннеле между двумя отделениями завода Creuzot (рис. 157). Вес локомотива в рабо-



чем состоянии 19 тонн; максимальная сила тяги 2500 клг (кгс). Двигатель его - автомобильного типа - имеет четыре попарно отлитых цилиндра, диаметром по 140 мм; ход - 200 мм; мощность, развиваемая при работе на бензоле до 72 HP (л.с.) при 1000 об/мин; расход горючего на силу - 250...280 гр/силу. Двигатель снабжён охлаждением с автоматической циркуляцией (термосифон). Охлажде-

ние рассчитано так, что отходящая от цилиндров охлаждающая вода достигает температуры кипения. Вода эта омывает прежде всего резервуар с нафталином а затем поступает в другой резервуар, который соединяется паропроводом с трубчатым конденсатором, находящимся над будкой машиниста. Конденсат стекает назад и вода, таким образом, совершенно не расходуется.

В стороне находится ящик с запасом твердого нафталина. Нафталин забрасывается в резервуар (рис. 158 и 159), расплавляется там и насосом с сетчатым дном, постоянно работающим от мотора, поднимается до уровня сопла (С). Сопло входит своим концом в трубу (d), которая тоже обогревается отходящей водой. Камера смешения (e) карбюратора, в которую может проникнуть добавочный воздух сверху через автоматический клапан, соединяется при помощи заслонки (f) или с трубой (d), или с всасывающей трубой (g) бензолового карбюратора (h). Дроссельный клапан (i), регулирующий мощность двигателя, так же как и камера смешения, один и тот же, как для случая работы на нафталине, так и на бензоле.



Пока двигатель не разогрелся, пружина (к), связанная с коромыслом насоса, удерживает его неподвижно в нафталиновом резервуаре. В качестве горючего применяется сырой нафталин, ценой в 8 - 10 пфеннигов/килограмм.

Локомотив снабжён передачей системы Haulier, основанной на применении сжатого воздуха. Эта передача даёт возможность повысить силу тяги при трогании с места до 3500 кгс, хотя двигатель при непосредственной передаче может дать только 750 кгс.

Перед троганием с места все рычаги находятся в положениях, изображённых на рисунке. Двигатель пускается в ход сжатым воздухом из резервуара (i), который питает также тормоза и сигнальный свисток. Так как все клапаны компрессора всё время остаются открытыми, то двигатель работает в холостую - вал неподвижен. Чтобы тронуться с места, переводят рычаг 1 в "ходовое" положение, чем приводится в действие компрессор. Развиваемый двигателем вращающий момент теперь передаётся на вал частью непосредственно через брусок, частью через кожух компрессора и машину (h), работающую сжатым воздухом, который доставляется компрессором. Локомотив медленно трогается с места. С возрастанием скорости движения, дросселируют с помощью рычага доступ сжатого воздуха в двигатель (h); благодаря этому сопротивление компрессора повышается, и, соответственно, увеличившаяся часть момента переносится на вал (e) непосредственно. При полном ходе компрессор совершенно неподвижен и мощность двигателя передается исключительно через брусок (d).

Подъёмы в тысяч.	Скорость в км/ч при весах поездов			
	50 тонн	75 тонн	100 тонн	125 тонн
0	20	20	20	20
2	20	20	20	15
4	20	20	14	11
6	20	14	11	8
8	20	11	8	6
10	15	8	6	5

Локомотив обнаружил во время пробных пробегов достаточную силу тяги, что подтверждается вышеприведенной таблицей, содержащей данные относительно скоростей при различных нагрузках и подъемах. Данных эксплуатационных до сих пор ещё не имеется.



# ТАНКИ ОТ И ДО

**Олег Никитич Брилёв,**

д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
начальник кафедры танков ВАБТВ (1975-1987 гг.)



(Продолжение. Начало в 6-2014 - 6-2023)

В своё время на экранах телевизоров демонстрировался многосерийный фильм "Четыре танкиста и собака". Фильм польского режиссёра, но танк был советский - Т-34-85. Но в тот период в польской армии были не только эти танки, но и другие, и не только советские.

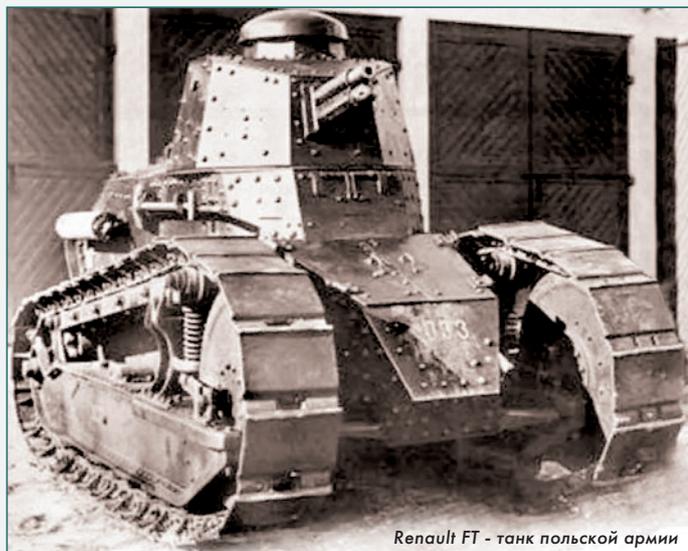
После поражения Польши в сентябре 1939 года её армию снова начали воссоздавать, но уже не на польской территории. Были сформированы и её танковые части. Так, во Франции в мае 1940 года на вооружение польских подразделений поступили танки Renault R-35 и R-40, которые сразу были направлены на франко-германский фронт.

Танковые части Польши создавались и в Шотландии. Они формировались по штату британских танковых войск и оснащались пехотными танками Matilda и Valentine, а также крейсерскими Covenant и Crusader. Но в ходе высадки во Франции летом 1944 года на вооружение польских танковых частей стояли танки M5A1 Stuart VI, M4A4 Sherman V, Centaur Mk 1 и Cromwell Mk 4. На юге в Италии у польских танкистов были американские M4A2 Sherman II и M3A3 Stuart V.

Сформированные на территории СССР танковые части польской армии получили на вооружение в основном танки Т-34-76 и Т-34-85. Но были на вооружении как тяжелые танки ИС-2, так и лёгкие Т-70 (ранее снятые с вооружения Красной армии).

Но Вторую мировую войну польская армия встретила имея на вооружении как зарубежные, так и свои собственные танки, о создании которых надо непременно рассказать, тем более что кое-что польскими танкостроителями было предложено первыми или почти первыми в мире.

После Первой мировой войны политическая карта Европы существенно обновилась, кое-кто территории потерял и стал задумываться о реванше, а к кому-то они отошли, и теперь надо было думать об их сохранении. Вот и у Польше немного прибавилось, что не вызвало восторга у соседей, что и потребовало принять меры по укреплению армии.



Renault FT - танк польской армии

Первыми польскими танками стали французские Renault FT. К закупленным поляки построили и свои машины, которые внешне выглядели как оригинальные, но были изготовлены из неброневой

стали в Центральных автомобильных мастерских (Centralne Warsztaty Samochodowe). Поэтому танк получил название CWS FT, и было их сделано аж 27 штук.



CWS FT на ходовых испытаниях

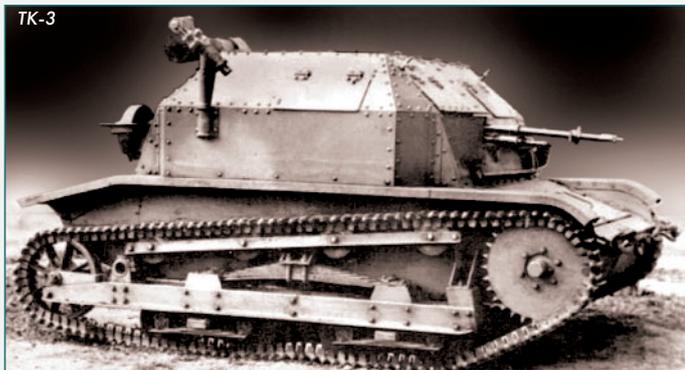
Понятно, что в боевых действиях эти машины принимать участие не могли, поэтому вскоре их направили в учебные подразделения.



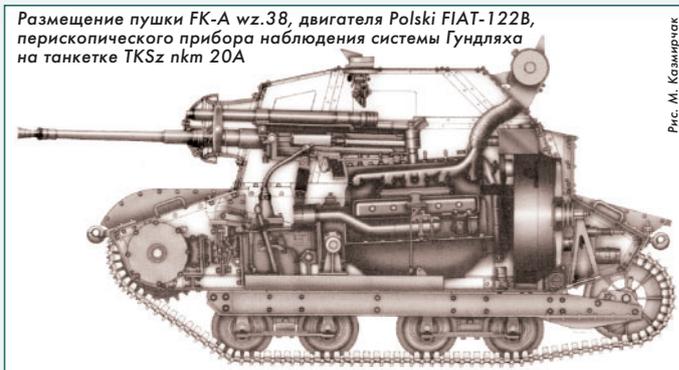
Учебные CWS FT

Попутно поляки смотрели, что делается в Америке и в Англии. И если приобрести ни танк, ни лицензию у Д. Кристи в Америке не удалось, то в Англии в 1929 году они смогли приобрести 10 танкеток Vickers-Carden-Loyd Mk.VI и 38 легких танков сопровождения Vickers Mk.E вместе с лицензиями на их производство.

Проведя опытную эксплуатацию танкеток Vickers-Carden-Loyd Mk.VI польские инженеры приняли решение об установке более мощного двигателя (вместо двигателя Ford T мощностью 22 л.с. ставили четырёхцилиндровый двигатель Ford A4 - 40 л.с.) и новой коробки передач, а также были усилены рессоры и установлена стальная броневая крыша. В июле 1931 года эта танкетка была принята на вооружение польской армии под наименованием ТК-3, в этом же году началось её серийное производство. За три года (1931-1933) было выпущено свыше 300 танкеток. Опираясь на полученный опыт производства и эксплуатацию в строевых частях в конструкцию ТК-3 были внесены изменения: броневые листы толщиной до 10 мм в лобовой проекции и до 8 мм по бортам корпуса были установлены (крепление к каркасу корпуса на заклёпках) под более рациональными углами, в подвеску усилили от-



TK-3



Размещение пушки FK-A wz.38, двигателя Polski FIAT-122B, перископического прибора наблюдения системы Гундляха на танкетке TKSz pkm 20A

Рис. М. Казмирак

дельные элементы и увеличили ширину гусениц. Двигатель и коробка передач размещались посередине корпуса и ничем от экипажа отделены не были. Рядом размещались топливные баки, для которых другого места просто не было. И впервые в танкостроении был установлен перископический прибор наблюдения системы Гундляха (на советских танках этот прибор наблюдения появился только в 1943 году). Танкеток, получивших название TKS, было выпущено 282 штуки.

На базе шасси танкетки TKS был создан двухтонный гусеничный тягач C2P для буксировки 75-мм полевой пушки wz.1897, лёгкого орудия (например, 40-мм зенитной автоматической пушки Vofors wz. 36), боеприпасов и орудийной прислуги. На самом тягаче никакого вооружения предусмотрено не было. До войны их успели изготовить 196 штук.



TKS



C2P

А 18 танкеток TKS, на которых были установлены 4-тактные 6-цилиндровые двигатели Polski FIAT-122B мощностью 46 л.с., назвали ТКФ.

Но буксировать могли и боевые танкетки, например, такие как TKS, для которых были разработаны гусеничные тележки.

На вооружении танкеток находился один 7,92-мм пулемет Hotchkiss wz. 25 и 1920 патронов к нему. Бензиновый двигатель мощностью 46 л.с. позволял разогнать танкетку массой 2650 кг на шоссе до 40 км/ч и проехать 160 км, имея 60 литров бензина в баках. При этом в танкетке находился экипаж из двух человек: командира и механика-водителя.



Танкетка TKS с прицепом

В конце 30-х годов 7,7-мм пулемёт "Виккерс" (танковый вариант пулемёта "Максим") было решено заменить на 20-мм пушку. После сравнительных испытаний 20-мм пушки "Мадсен" датской фирмы Dansk Rekylriffel Syndikat и 20-мм противотанкового ружья швейцарской компании Solothurn Waffenfabrik AG, остановились на польской 20-мм автоматической пушке FK-A wz.38 (с боекомплектом 80 снарядов). Но к началу войны успели установить её только на 24 машинах, получивших название TKSz pkm 20A.



Танкетка TKSz pkm 20A

Таскать за собой пушку - это одно, а иметь её у себя на борту - совсем другое. Первые попытки создать САУ на базе танкеток были предприняты ещё в 1932 году. В апреле того года был разработан проект легкой САУ с 47-мм противотанковой пушкой wz.25 (Pocisk), а уже в мае был готов прототип танкетки с этой пушкой. Так быстро изготовить САУ удалось благодаря небольшому объёму доработок конструкции ТК-3. Доработке подвергся только корпус прототипа, который изготовили из обычной стали. Усилению подверглись узлы подвески и были установлены более широкие гусеницы. Пушка устанавливалась за бронещитом над корпусом, у которого убрали крышу. Внутри САУ находились три члена экипажа: командир, водитель и заряжающий. Машина получила обозначение TKD.

Пушка обладала скорострельностью порядка 16 выстр./мин. Максимальная дальность стрельбы пушки 6,5 км, и на расстоянии 1025 м она могла пробить 20-мм броню.



CAU TKD

Было изготовлено всего 4 машины, которые прошли испытания летом 1932 года. Но, несмотря на удовлетворительные результаты испытания CAU в качестве средства огневой поддержки пехоты, в серийное производство CAU не запустили из-за недостаточной бронезащиты и высокой стоимости модернизации.

Чуть позже, когда возникла необходимость иметь в армии противотанковое орудие на гусеничном ходу и была принята на вооружение танкетка TKS, было предложено установить на неё 37-мм зенитную пушку Vofors. В феврале 1936 года началась проработка проекта легкой противотанковой самоходки, а в июне проект поступил на рассмотрение военной комиссии. Машина получила официальное обозначение TKS-D.

Ходовую часть взяли от тягача C2P, установив на каждый борт по две тележки с двумя катками и ведущие колёса. Масса ходовой части и корпуса с пушкой составила 3,1 т. Корпус собирался из листов катаной броневой стали, а пушку установили со смещением к левому борту. На TKS-D устанавливался двигатель Polski Fiat 122B. В экипаже четверо: командир, механик-водитель, наводчик и заряжающий. Противотанковая CAU, созданная из TKS и C2P могла дополнительно буксировать лёгкое орудие, а также специально разработанный для неё колёсный прицеп.

Противотанковая CAU TKS-D



Изготовление двух опытных образцов выполнили к маю 1937 года, и с 13 мая начались ходовые испытания, завершившиеся в 1938 году. И опять, несмотря на неплохие результаты, CAU TKS-D на вооружение принята не была.

Как закупленные танкетки во Франции, так и созданные на их основе польскими танкостроителями машины хоть и решали в армии Польши определённые задачи, но слабое вооружение и совсем никуда не годная бронезащита сводили их преимущества на нет. Но определённый опыт создания танков был приобретён, и он пригодился при закупке, освоении и модернизации закупленных в Англии 38 лёгких танков Vickers Mk.E. Причём модернизация осуществлялась в процессе выполнения заказа.

В 1927 году англичанами был создан танк Vickers Mk.E, и в этом же году польская делегация смогла увидеть опытный образец этого танка с двигателем Dorman.

6 Ton Tank Experimental Vehicle. Опытный образец



Поляки примеривались закупить три десятка этих машин, но высокая цена охладил их запал. Только закупка 15 Vickers Mk.E (1930 г.) Советским Союзом и двух (одного двухбашенного пулеметного Vickers Mk.E Type A и другого Mk.E Type B с одной двухместной башней и пушечно-пулеметным вооружением) Грецией, вновь заставили поляков присмотреться к этому танку.

Начали они с того, что осенью 1930 года в Польше провели ходовые испытания одного Vickers Mk.E, который прошёл 600 км от Варшавы до Львова и обратно со средней скоростью порядка 23 км/ч. Естественно, что в ходе этих испытаний были выявлены дефекты ходовой и перегрев рядного 4-цилиндрового двигателя воздушного охлаждения Armstrong-Siddeley (на него заменили двигатель Dorman, установленный на первой опытной машине).

Эти и другие дефекты дали покупателям из Польши возможность снизить стоимость одного танка Vickers Mk.E Type A с 3800 фунтов стерлингов до 3165 и получить лицензию на собственное производство. Такая цена была согласована при условии заказа на изготовление 38 танков и закупки запчастей ещё на 18500 фунтов стерлингов.

Первые 8 машин были готовы к июлю 1932 года, вторые 13 танков изготовили к декабрю того же года, последние машины - в апреле следующего года.



Выполнение польского заказа

Но танки польского заказа отличались от исходного варианта, причём изменения осуществлялась как в процессе изготовления машин, так и после их поставки в Польшу. Во-первых, были установлены польские 7,92-мм станковые пулеметы Skm wz.25. Из-за этого верхняя часть башни приобрела дополнительные выступы.



Vickers Mk.E Type A из польского заказа

Затем, к концу 1933 года, на 16 танках в правой башне установили крупнокалиберный 13,2-мм пулемёт Hotchkiss wz.30.

Один из 16 польских Vickers Mk.E Type A с 13,2-мм пулемётом



Одновременно на 6 других танках в правой пулеметной башне установили 37-мм орудие SA 18.

Vickers Mk.E с 37-мм орудием SA 18 в правой башне



В это же самое время в польской армии началось перевооружение с 7,92-мм пулемёта Skm wz.25 на Skm wz.30 того же калибра, что привело к необходимости замены пулемётов и на танках. Замену осуществили в 1934 году сначала в одной из башен 16 танков, а затем (после 1936 года) и во второй башне этих машин.

Демонстрация возможностей ходовой части танка Vickers Mk.E с двумя пулеметами Skm wz.30



Кстати, детская болезнь - перегрев двигателя - осталась, и для борьбы с ней было предложено установить коробчатые воздухоулавливатели, которые должны были при движении танка захватывать воздух и направлять его к двигателям. Чем быстрее едем, тем больше воздуха идёт на охлаждение двигателя. Остальные 22 танка после поставки в польскую армию некоторое время оставались вооружёнными 7,92-мм пулемётами Skm wz.25, но уже в конце 1933 года стало понятно, что пулемётные танки Vickers Mk.E не обладают необходимой огневой мощностью. Поэтому был заключён контракт с Vickers на поставку 22 башен с 47-мм пушками (как на Vickers Mk.E Type B). Уже в марте 1934 года башни прибыли в Польшу, и к концу года они были установлены на танки.

Vickers Mk.E с новой башней и 47-мм пушкой



Приобретая английские танки и лицензию на их производство, в Польше не стали дожидаться прибытия купленных Vickers Mk.E, и приняли решение, не повторяя исходный вариант, создать на его основе свой лёгкий танк. Проектирование началось в конце 1932 года и завершилось в июне 1933 года. Ходовая часть танка изменений не претерпела, полностью перейдя от "Виккерса". В отличие от ходовой части корпус польского танка был доработан: толщина лобовых листов корпуса была доведена до 17 мм, бортовых - до 13 мм, а над моторным отделением смонтировали бронированный кожух.

Вооружение разместили в двух башнях, в каждой из которых стоял 7,92-мм пулемёт Skm wz.30, пробивающий на дистанции 200 метров 8-мм броню. Конструкция пулеметной установки предусматривала установку других пулеметов: Maxim wz.08 или Hotchkiss wz.35.

Самое основное, что было сделано - это был заменён английский бензиновый двигатель на 6-цилиндровый дизельный двигатель жидкостного охлаждения Sauger мощностью 110 л.с. Двигатель позволял двигаться по шоссе с максимальной скоростью до 37 км/ч. В топливных баках, размещённых в передней части танка, вмещалось 110 литров горючего. Двигатель съедал по 80 литров каждые 100 км при движении по шоссе и 100 литров при движении по пересеченной местности. Поэтому на всякий случай на борту танка находилась 20-литровая канистра.

Надо отдать должное польским конструкторам - они практически первыми стали устанавливать на серийные танки дизельный двигатель. К первым, кто применил дизельный двигатель на танке можно отнести французов (в 1930-м году на шести танках Char Renault FT (Kegresse) были установлены дизельные двигатели) и японцев, которые с 1933 года на серийный танк Type 89 начали устанавливать 6-цилиндровые дизели "Мицубиси" воздушного охлаждения мощностью 120 л.с.

Экипаж состоял из механика-водителя, находящегося в передней части корпуса, командира танка, занимавшего правую башню, и стрелка, находящегося в левой башне.

Испытания первого изготовленного лёгкого танка под названием 7TP (7-Topowy Polsky) начались в августе 1934 года. Во второй половине августа были проведены ходовые испытания, в течение которых танк прошел 1100 км. Через год был готов второй прототип, и, как и первый танк, он частично был изготовлен из не броневой стали. Их испытания подтвердили, что польским инженерам удалось сделать танк более надежным.

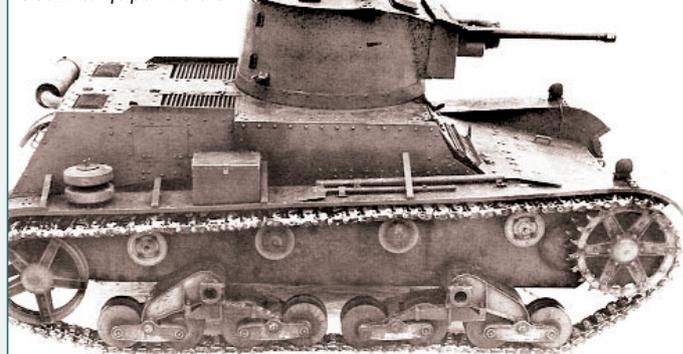
Создавая двухбашенный лёгкий танка 7TP, польские танкостроители думали над созданием однобашенного варианта танка с пушечным вооружением. Вопрос был один - какую пушку выбрать. С 1934 по 1936 годы было рассмотрено 6 разных пушек калибром от 37 до 55 мм. Остановились на 37-мм пушке шведской компании Vofors, которую "вставили" в английскую башню.

Выбор не случаен: на тот момент 37-мм пушка Vofors на дистанции 300 метров пробивала броню толщиной до 60 мм, на дистанции 500 метров - 48 мм, на 1000 метров - 30 мм. Максимальная скорострельность достигала 10 выстр./мин.

Руководство шведской компании, желая удержать польских заказчиков, предложило изготовить прототип башни бесплатно, причём внесли и свою лепту - поставили прицелы компании Zeiss.

Шведы за год - с декабря 1935 по ноябрь 1936 - изготовили башню вместе с 37-мм пушкой и она была установлена на прототип.

Прототип 7TP с башней фирмы Vofors



Но затем вместо неё на прототип танка 7TP польскими конструкторами была установлена башня собственного изготовления, у которой лобовая часть, борта, корма и маска орудия были собраны из одинаковых бронелистов толщиной 15 мм, а крыша имела толщину 8...10 мм.

Башню из-за особенностей компоновки корпуса пришлось ставить на танк со смещением на левый борт.

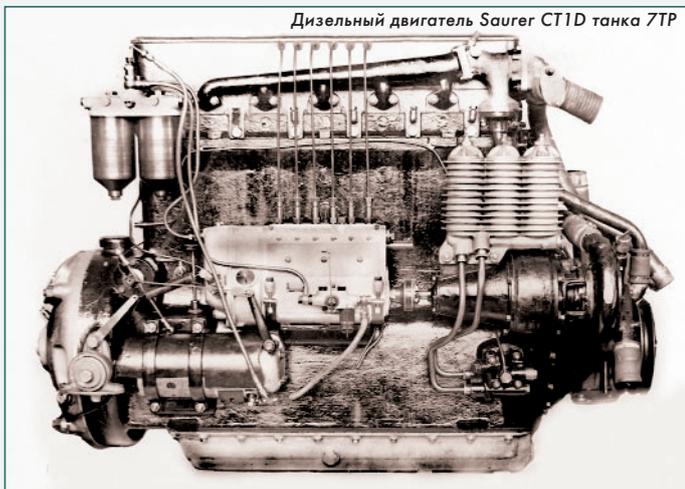
В феврале 1937 года проведёнными испытаниями была подтверждена работоспособность башни в составе танка. Путь в серию был открыт: единственное отличие серийной башни от её от прототипа заключалось в наличии кормовой ниши для установки туда радиостанции и перенесённого с кормы на крышу башни люка. Башни строили сами, т.к. от изготовления башен в Швеции поляки отказались.



7TP с башней собственной конструкции

Основным местом производства танков 7TP с 1935 по 1939 год был завод, расположенный в Чеховицах, где изготовили 139 таких машин, из которых первые 24 были двухбашенными. Впоследствии и на этих танках установили орудийные башни.

В конечной комплектации масса танка составила 9900 кг. Шестицилиндровый дизельный двигатель Saurer CT1D мощностью 110 л.с. разгонял танк до 37 км/ч (по шоссе). А 130 литров дизельного топлива хватало при этом на 160 км.



Дизельный двигатель Saurer CT1D танка 7TP

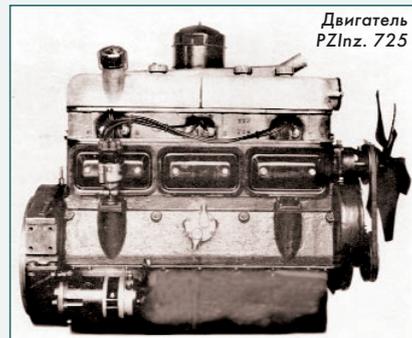
Экипаж, как и на двухбашенном танке, состоял из трёх человек: механика-водителя, командира (он же заряжающий) и наводчика. Боекомплект орудия состоял из 80 снарядов. Для спаренного с орудием 7,92-мм пулемета Skm wz.30 было припасено 3960 патронов.

Пока шло производство танка 7TP, конструкторская мысль не останавливалась, да и военные не унимались со своими требованиями. Одно из них - повышение защиты. Естественно, что удовлетворение этого требования приводило к росту массы и снижению манёвренности. Следовательно, надо было повышать мощность двигателя и искать пути снижения массы корпуса и башни с одновременным увеличением толщины бронелистов.

Для снижения массы корпуса было предложено перейти от соединения бронелистов клёпкой и болтами к сварке.

С двигателями всё было намного сложнее, т.к. их разработка и

производство в Польше только начиналось. В 1936 г. польскими инженерами был создан карбюраторный двигатель PZInz. 705 и его более мощная модификация - шестицилиндровый рядный двигатель PZInz. 725 (масса 345 кг, мощность 95 л.с. при 2800 об/мин [на испытаниях мощность достигала 120 л.с.], степень сжатия - 6,35).



Двигатель PZInz. 725

И был ещё, напомним, импортный 6-цилиндровый рядный дизельный двигатель Saurer CT1D, который в польском массовом производстве был известен под названием PZInz. 155 (масса - 600 кг, мощность - 100 л.с. при 1800 об/мин, степень сжатия - 16).

Соответственно, было два проекта модернизации танка 7TP.

В первом проекте с бензиновым двигателем благодаря его меньшей массе и габаритам удалось сохранить общую массу танка при увеличении толщины лобового листа до 30 мм, уменьшить высоту сварного корпуса и сделать наклонной переднюю панель боевого отделения.

Во втором проекте с двигателем PZInz. 155 толщина брони в лобовой части корпуса и передней части башни была увеличена до 40 мм. При этом масса танка возросла до 10 594 кг, из-за чего пришлось усиливать подвеску.

Оба проекта рассмотрели в мае 1939 года, и были заказаны два опытных образца под названием 7TP мод. 1939 с двигателем PZInz. 155. В конце июля эти машины были готовы и прошли испытания. Но в производство они не попали - началась война. Существует версия, что этот танк должен был получить в соответствии с его массой наименование 9TP.

Польские военные постоянно присматривались к мировым новинкам в танкостроении. Отправной точкой создания нового класса боевых машин стал сентябрь 1932 года, когда компания Vickers-Armstrongs представила в Польше один из первых экземпляров экспортного английского 4-тонного танка. Не имея возможности закупить этот танк, было принято решение самим разрабатывать боевую машину лёгкого класса. Тем более, что в 1934-1935 годах этими английскими лёгкими танками обзавелись Латвия и Литва.

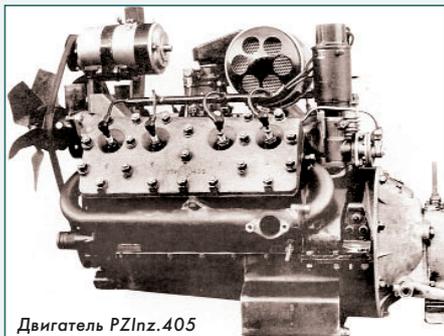
Военные разработали тактико-технические требования на танк-разведчик в 1935 году. В них в качестве вооружения была прописана 20-мм автоматическая пушка. В конце 1936 года документация на PZInz 140 (такое официальное название получила разрабатываемая машина, 4TP - другое название, соответствующее массе танка).

Несмотря на то, что внешне PZInz 140 очень сильно походил на Vickers-Carden-Loyd, польским конструкторам удалось улучшить английского предшественника. Так, если англичане использовали блокированную подвеску с листовыми рессорами, то у PZInz 140 была установлена торсионная подвеска тележек с попарно заблокированными опорными катками.



Опытный образец лёгкого танка PZInz 140

Мощнее должен был быть V-образный восьмицилиндровый двигатель PZInz.425 (95 л.с. вместо 88 л.с. у "Виккерса 4-тонного"),



Двигатель PZInz.405

но его доводка из автомобильного PZInz.405 затянулась, что повлияло на начало испытаний. На PZInz 140 предусматривалась установка одностойной башни с 20-мм автоматической пушкой и спаренным с ней пулемётом Skm wz.30.

Испытания PZInz 140 начались в августе 1937 года без установленной пушки из-за её неготовности. К концу года пробег составил 1861 км, при этом максимальная скорость достигла 55 км/ч.

Основные проблемы были связаны с поломками торсионной подвески и возникновению раскочки из-за отсутствия амортизаторов, гасящих вертикальные колебания.

Летом следующего года наконец была установлена 20-мм пушка FK-A wz.38A, а двигатель заменили на PZInz.725 мощностью 120 л.с. Испытания продолжались до мая 1939 года, к этому моменту танк прошёл 4300 км.

Пора было принимать решение о начале серийного производства, тем более, что ещё в 1937 году планировалось направить в армию 480 лёгких танков PZInz 140 для замены танкетки ТК-S. Но от танка отказались сами польские военные из-за всё возрастающей уязвимости легкобронированных машин на поле боя.



Так мог бы выглядеть PZInz 140...

Эта же участь ожидала и разрабатываемого польскими конструкторами разведывательного танка-амфибии PZInz 130, у которого броня была и того меньше - 8 мм. Она пробивалась из ружья с 500-метровой дистанции.



...а так - танк-амфибия PZInz 130

В начале статьи о танкостроении в Польше было упоминание о контактах с американцем Д. Кристи. Первый разработанный им для Польши колёсно-гусеничный танк заказчика не удовлетворил, а дальнейшее сотрудничество не заладилось.

В это же время компания American LaFrance получила заказ на изготовление танка Convertible Medium Tank T3E2. По всей видимости, полякам удалось ознакомиться с этой машиной, так как то, что впоследствии у них появилось, внешне очень сильно было похоже на неё; да и двигатель был приобретён у American LaFrance.

Работы над колёсно-гусеничным танком, получившим название 10ТР, начались в 1932 году, но основательно за проектирование взялись только в начале 1936 года. Опытный образец собрали в

июле 1938 года, и уже в следующем месяце начались ходовые испытания, которые показали недостаточную мощность двигателя.



10ТР - опытный образец

Корпус был местами сварной, местами - клёпаной из стальной катанной поверхностно закалённой брони. Толщина средней части лба составляла 20 мм, верхний и нижний листы лба и других частей корпуса были 8-мм толщины. Лоб башни из 16-мм брони.

Танк был рассчитан на экипаж из четырёх человек. Двое, как и на 7ТР, находились в башне, а вот справа от механика-водителя находился его помощник, которому вручили курсовой пулемёт.

В ходовой было по четыре сдвоенных опорных катка на борт. Движение на гусеницах обеспечивалось ведущим колесом, расположенным сзади, а при движении на колёсах от него через шестерёнчатую передачу вращение передавалось заднему опорному катку. Изменение направления движения обеспечивалось передними колёсами, а вторые колёса немного приподнимались вверх.

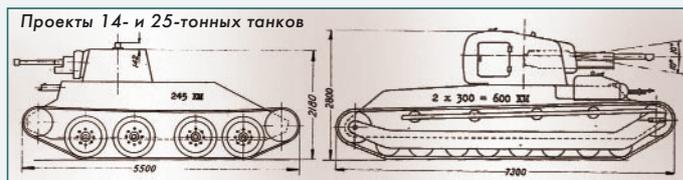


10ТР на колёсном ходу

На вооружении танка стояла пушка Vofors wz. 37 с 80 снарядами. Один пулемёт Skm wz.30 стоял слева от пушки, а второй - курсовой - в правой части почти вертикального листа корпуса.

При массе танка 12,8 тонн и мощности 12-цилиндрового карбюраторного двигателя равной 210 л.с. скорость по шоссе на гусеницах составляла всего 34,5 км/ч. С января 1939 года по май танк преодолел 2000 км, но интерес к нему пропал - он не соответствовал требованиям того времени, особенно в части защиты. Прототип так и остался единственной машиной, хотя задумывалось выпустить 64 танка.

Остальные проекты дальше чертежей не продвинулись.



Проекты 14- и 25-тонных танков

В послевоенные годы в танковых войсках Польши на вооружении стояли советские танки, произведённые на советских предприятиях и польских по лицензии.

В следующем номере рассмотрим танки Швейцарии.  
(Продолжение следует.)



# MIMS automobility MOSCOW

Международная выставка запасных частей,  
автокомпонентов, оборудования и товаров  
для технического обслуживания автомобиля

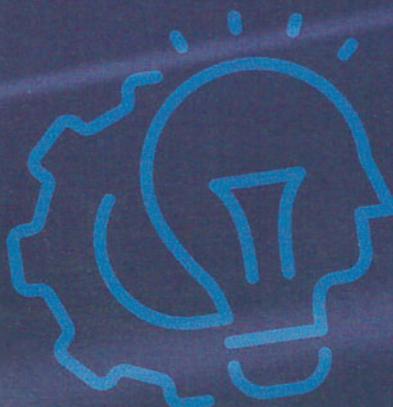
**19 – 22 августа 2024**

ЦВК «Экспоцентр», Москва



Организатор

**ITEMIF**  
EXPO

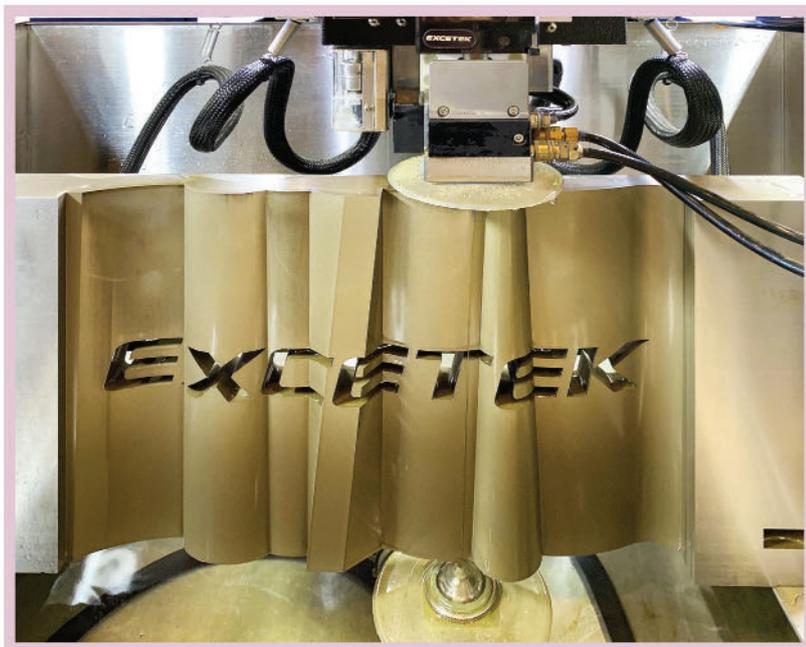


[www.mims.ru](http://www.mims.ru)

# ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ (электроэрозионные) СТАНКИ

+ проволочно-вырезные  
+ прошивные  
+ супердрели

 **EXCETEK**



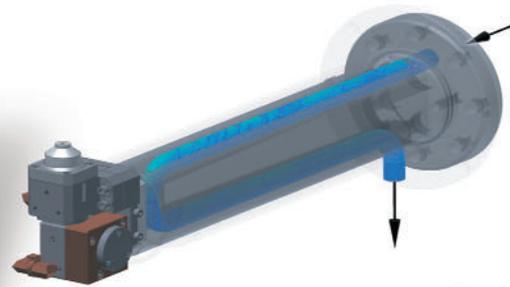
**ПЕРЕДОВЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
ЭЛЕКТРОЭРОЗИИ ОТ  
ВЕДУЩЕГО ТАЙВАНЬСКОГО  
СТАНКОСТРОИТЕЛЯ  
МИРОВОГО УРОВНЯ**

**ЭКСПОРТ В  
ДЕСЯТКИ СТРАН,  
ВКЛЮЧАЯ ЯПОНИЮ,  
США И ЗАПАДНУЮ  
ЕВРОПУ**



Ra 0,18 мкм

**ВО ВСЕХ ВЫРЕЗНЫХ СТАНКАХ:**  
*термостатирование нижнего  
кронштейна водой из гидроагрегата  
предотвращает тепловое расширение  
и повышает конечную точность.*



CE

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНДОСКОПИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ



 ВНЕСЕН В ГОСРЕЕСТР СИ № 89037-23

