

# Двигатель

Научно-технический журнал № 1 - 3 (157 - 159 + 244) 2025

**В номере:**

Двигатель внутреннего сгорания открывает новые возможности (стр. 2).

Вихрь как движущая сила (стр. 10).

Прошлое и будущее ЖРД на перекиси водорода (стр. 12).

Оружие XX века (стр. 27).

Покорители пятого океана (стр. 30).

Олимпиада по истории авиации и воздухоплавания (стр. 49).

Копилка для энергии (стр. 55).

Паровоз как микроТЭЦ (стр. 60).

Гипотеза о материи (стр. 62).







## 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. Люлька

**Равикович Ю.А., д.т.н.,**  
исполняющий обязанности проректора по  
инновационной деятельности 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

**Чуйко В.М., д.т.н.,**  
президент Ассоциации "Союз  
авиационного двигателестроения"

**Шатров М.Г., д.т.н.,**  
заведующий кафедрой "Теплотехника и  
автотракторные двигатели" МАДИ

## РЕДАКЦИЯ

### Главный редактор

Александр Иванович Бажанов,  
академик Международной  
инженерной академии

### Заместитель главного редактора

Аделия Юрьевна Бурова

### Ответственный секретарь

Александр Николаевич Медведь, к.т.н.

### Финансовый директор

Александр Иванович Бажанов

### Редакторы:

Андрей Иванович Касьян, к.т.н.

Инна Игоревна Тизенгауз

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(915) 119-1384

aib50@yandex.ru

www.dvigately.ru

Электронная версия журнала (2006-2024 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 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 1844 в общероссийском Перечне  
(на 15-04-2024 г.)

Научно-технический журнал "Двигатель"®

зарегистрирован в ГК РФ по печати.

Пер. № 018414 от 11.01.1999 г.

26-й (118-й) год издания.

Отпечатано

ООО "Эксперт" Москва.

Тираж 500 экз.

Периодичность: 6 номеров в год.

Цена свободная.



-

# ПУТЬ ПЛАМЕНИ ВО ВТОРОМ КОНТУРЕ ИЛИ ПОЧЕМУ ФАКЕЛ ПЛАМЕНИ ЛУЧШЕ, ЧЕМ ТОПЛИВНЫЙ ФАКЕЛ И ВОЗДУШНЫЙ ВИХРЬ

Андрей Олегович Миллер, ведущий специалист ГУАП, Санкт-Петербург

*В нашей стране были разработаны, изготовлены и испытаны двигатели внутреннего сгорания с новым двухконтурным рабочим процессом. Получены положительные результаты, подтверждающие перспективность новых двигателей. Новый рабочий процесс с послойным смесеобразованием и сгоранием в двух совместно работающих цилиндрах может быть использован для создания нового поршневого двигателя с существенно более высокими эффективными показателями и низкой токсичностью отработавших газов (ОГ).*

*Internal combustion engines with a new dual-circuit workflow have been developed, manufactured and tested in our country. Positive results have been obtained, confirming the prospects of the new engines. The new workflow with layered mixing and combustion in two co-operating cylinders can be used to create a new piston engine with significantly higher efficiency and low exhaust gas toxicity.*

**Ключевые слова:** двухконтурный рабочий процесс, факельное зажигание, послойное смесеобразование, качественное регулирование мощности, малотоксичный процесс сгорания.

**Keywords:** *ldual-circuit workflow, flare ignition, layer-by-layer mixing, high-quality power control, low-toxic combustion process.*

Улучшение эффективных показателей ДВС связано с возможностью управления процессами смесеобразования и сгорания, которые должны обеспечивать высокую эффективность рабочего процесса на всех возможных режимах работы двигателя.

Для решения этой задачи создаются опытные двигатели с изменяемой степенью сжатия и ходом поршня, с отключаемыми цилиндрами, с разделенными или добавленными тактами, с продолженным расширением; на практике широко применяется варьруемое газораспределение.

Однако для получения высокой экономичности необходимо обеспечить высокое качество самого главного процесса в рабочем цикле двигателя - процесса сгорания.

Техническое развитие ДВС пришло к тому, что в современных двигателях всех типов основным способом подачи топлива в цилиндры стал топливный факел из форсунки, установленной в камере сгорания. Однако такой способ подачи топлива имеет не только достоинства, но и недостатки.

Наибольшие проблемы имеются в дизельных ДВС. Изначально двигатель Дизеля создавался для работы на дешевых сортах топлива с низкими антидетонационными свойствами. Для рабочего процесса такого двигателя необходимо сильное сжатие чистого воздуха и поздний непосредственный впрыск топлива. Это позволяет избежать детонации топлива при высокой степени сжатия, но это происходит из-за ухудшения качества смесеобразования.

Поэтому в классическом двигателе Дизеля топливо впрыскивалось и распылялось в цилиндры посредством сжатого воздуха, который сжимался специальным компрессором. Однако сейчас применяется только гидравлический впрыск, одним из вариантов которого является топливная система аккумуляторного типа "common rail".

В ДВС с принудительным зажиганием применение топливного факела (прямого впрыска топлива - GDI) приводит к аналогичным результатам, несмотря на возможность использования более раннего впрыска и, следовательно, более качественного смесеобразования. Подобно дизельным двигателям, прямой впрыск топлива в двигателях с GDI создает богатые топливом карманы вблизи зоны впрыска, а особые условия сгорания в этих карманах способствуют образованию (в больших количествах, чем в двигателях с гомогенной смесью) углеродистых твердых частиц и особенно черного углерода (СН), негативное воздействие которого на окружающую среду значительно выше преимущества, полученного от снижения выбросов CO<sub>2</sub>. Что было подтверждено лабораторными исследованиями [1].

Решением проблем может служить турбулизация заряда вихрем воздуха или бедной смеси в момент развитого горения и сгорания на линии расширения. Такой вихрь может быть получен от потока воздуха, поступающего на такте впуска через впускной клапан.

Однако, к моменту развитого горения и сгорания на линии расширения вихревое движение заряда, полученное в процессе впуска, сохранить не удастся, так как от начальной кинетической энергии вихреобразования сохраняется лишь около 4 % [2].

Сам вихрь к этому моменту может быть загрязнен образующимися инертными газами и уже не содержать необходимое количество кислорода.

В ещё большей степени это может относиться к вихрям, которые генерируются вытеснителями на поршне или головке цилиндров.

Поэтому подобное вихревое движение в ряде случаев может не только улучшить показатели дизельного двигателя, но и привести к увеличению жёсткости работы из-за увеличения периода задержки самовоспламенения топлива, а в двигателе с принудительным зажиганием к увеличению задержки повышения давления.

Более эффективным было бы подавать вихрь чистого воздуха в зону топливного факела только в моменты развитого сгорания и сгорания на линии расширения. При этом сокращается время между созданием и использованием вихрей и, следовательно, могут быть уменьшены энергетические затраты на создание вихря.

Таким вариантом подачи воздушного вихря в зону топливного факела мог бы служить пневматический впрыск топлива, при котором, однако, будет необходимо применение компрессора, насос-форсунок или использование подпоршневых полостей цилиндров для сжатия воздуха до более высоких показателей давления, чем при обычном пневматическом впрыске. Это приводит к дополнительным затратам энергии и увеличивает массогабаритные характеристики двигателя и его стоимость.

В двигателе В.М. Кушуля (рис. 1) вихрь сжатого чистого воздуха подается в момент развитого сгорания из цилиндра 2 в цилиндр 1, в котором осуществляется зажигание и сгорание всего топлива, предназначенного для обоих цилиндров. Это обеспечивается фазовым сдвигом движения поршней кривошипно-шатунного механизма на соответствующий угол [3].

В этом случае обеспечиваются качественное регулирование мощности в широких пределах даже при внешнем смесеобра-

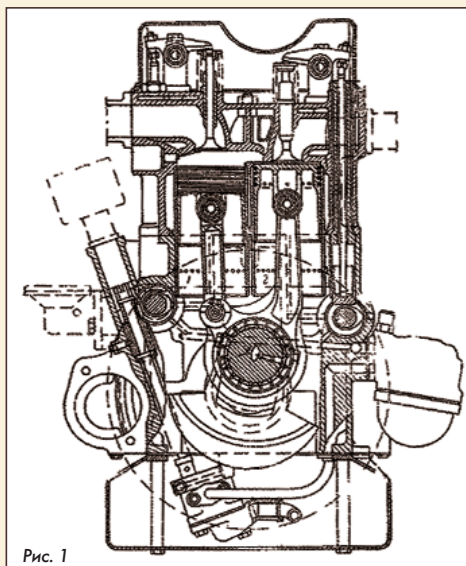


Рис. 1



зовании и работа без детонации на низкооктановом топливе при высокой степени сжатия. Поэтому почти все двигатели Кушуля были карбюраторными, где топливный факел отсутствует. Однако был построен двигатель Кушуля и с непосредственным впрыском топлива - дизельный двигатель ДК-9 (рис. 2), показавший низкую

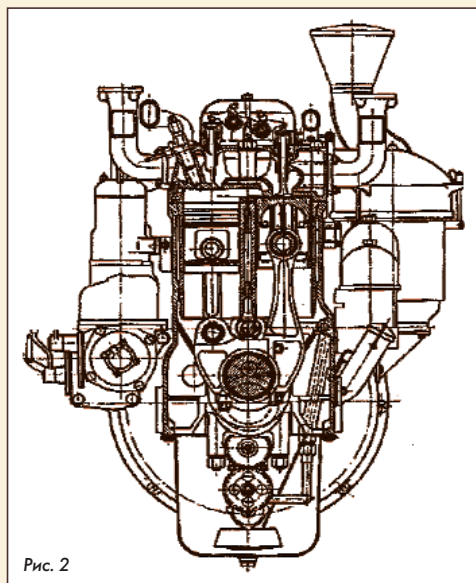


Рис. 2

токсичность отработавших газов при высокой экономичности [4, 5]. Таким образом воздушный вихрь доказал свою эффективность и в двигателе с топливным факелом.

В отличие от пневматического впрыска цилиндр 2, используемый в двигателе Кушуля для сжатия воздуха, является рабочим цилиндром, в котором происходит такое же расширение рабочих газов, как и в цилиндре 1. Поэтому в двигателе Кушуля могут полностью отсутствовать

компрессоры и другие агрегаты подачи воздуха в камеру сгорания, которые используются только для сжатия воздуха.

Некоторые авторы относят двигатель Кушуля к двигателям с разделенными тактами. [6] Что не совсем верно. В двигателях с разделенными тактами (например, в двигателе "Scuder Group", рис. 3) такты рабочего цикла, такие как сжатие и расширение рабочей смеси, осуществляются в разных цилиндрах, как правило, в двух. При этом такой двигатель, как и двигатель Кушуля, может состоять из двухцилиндровых модулей.

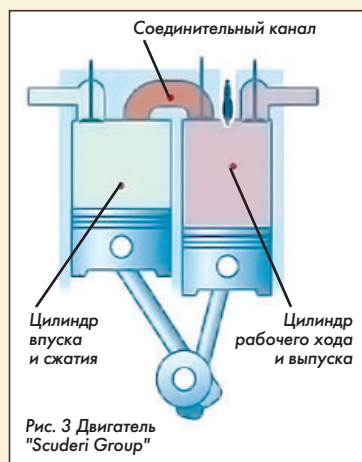


Рис. 3 Двигатель "Scuder Group"

Разделение в пространстве тактов рабочего цикла усложняет конструкцию двигателя и, как правило, ухудшает его массогабаритные показатели. Потенциальный выигрыш от разделения процессов сгорания и расширения частично нивелируется дополнительными энергетическими потерями при перетекании газов между полостями, а также потерями теплоты в технических решениях с дополнительными

камерами, размещенными в головке цилиндра. По этой причине двигатели с разделенными тактами до настоящего времени не нашли промышленного применения [6].

В двигателе Кушуля все такты рабочего цикла (впуск - сжатие - расширение-выпуск) осуществляются одновременно в каждом из двух цилиндров модуля, и только зажигание и сгорание всего топлива происходит в одном из двух цилиндров. Поэтому потери теплоты в двигателе Кушуля меньше, чем в обычном двигателе и, тем более, чем в двигателе с разделенными тактами [7].

Однако потери на перетекание газов между цилиндрами двигателя Кушуля примерно равны потерям двигателей с разделенными тактами, так как на такте сжатия примерно половина заряда модуля (воздух цилиндра 2) вытесняется в цилиндр 1, а после сгорания топлива примерно половина объема рабочих газов поступает через канал в цилиндр 2 на такте расширения заряда.

В двигателях с разделенными тактами (например, в двигателе "Scuder Group") весь заряд поступает сначала в один цилиндр, а потом после сжатия вытесняется через канал в другой цилиндр модуля. Поэтому полный рабочий цикл может происходить за

один оборот коленчатого вала несмотря на то, что двигатель четырёхтактный.

Другие авторы полагают, что В.М. Кушуль "Свой цикл осуществил на П-образном двигателе Цоллера" [8]. Это тоже только внешнее сходство. В двухтактных двигателях Цоллера с П-образной продувкой (рис. 4) камера сгорания выполнена общей для двух цилиндров, а разделены по цилиндрам впускные и выпускные продувочные окна и каналы. В двигателе Кушуля П-образная продувка не эффективна из-за недостаточно большого сечения канала между цилиндрами.

Сам процесс сгорания топлива в двигателях Цоллера не имеет никаких отличий от обычного сгорания. Это объясняется тем, что газораспределение такого двигателя улучшает наполнение цилиндра на полных нагрузках, но не обеспечивает ни расслоения, ни турбулизации заряда на режимах частичных нагрузок. Разделение заряда в двигателе Цоллера, показанном на рис. 4 обеспечивается только впрыском топлива.

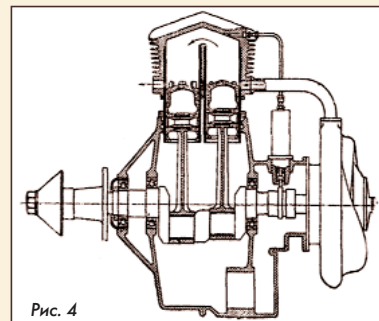


Рис. 4

Двигатель Кушуля является первым в мире поршневым двухконтурным двигателем внутреннего сгорания (ДДВС), где каждый из двух цилиндров одного модуля является контуром, в который в процессе впуска может поступать топливо - воздушная смесь разного состава, включая чистый воздух, а рабочий процесс может происходить с разными степенями сжатия при полном или частичном смешении зарядов первого и второго цилиндров.

Второй контур впервые появился в авиационных турбореактивных двигателях (ТРД) и большинство современных турбореактивных моторов являются двухконтурными (ТРДД).

Смысл применения второго контура заключается в экономии энергии при сжатии воздуха второго контура, которое осуществляется за счёт энергии, вырабатываемой в первом. То есть во втором контуре протекает воздух, получивший ускорение от вентилятора, который приводится от турбины первого контура. Так как ТРДД являются двигателями прямого действия, то они могут создавать тягу как благодаря истечению газов из сопла первого контура, так и благодаря истечению (расширению) сжатого воздуха второго контура [9].

В ДВС весь воздух должен использоваться только для сгорания топлива. Поэтому в двигателе Кушуля работа, производимая в цилиндре 1, обеспечивает сжатие воздуха в цилиндре 2 (воздуха второго контура), который затем подается в камеру сгорания цилиндра 1 (первого контура).

Недостатком двигателя Кушуля является недоиспользование воздуха цилиндра 2 из-за обязательного наличия зазора между поршнем и головкой, а также выточек под клапаны. Это приводит к неполному вытеснению воздуха из цилиндра 2 в цилиндр 1 и к некоторому снижению удельных мощностных показателей [5].

Таким образом, вихрь воздуха является эффективным средством воздействия на процесс сгорания, но его получение в нужное время и с необходимой эффективностью сопряжено с определенными проблемами даже в двухконтурных ДВС.

Недоиспользование воздуха в двигателях с топливным факелом - в дизельных двигателях и не рациональное разделение заряда по составу в цилиндрах в двигателях с GDI являются недостатками, требующими своего устранения. Однако ни факел топлива, ни вихрь воздуха сами по себе решить эти проблемы полностью не могут.

Однако известно, что подвижным факелом пламени достаточной интенсивности можно полностью сжечь смесь любого состава, находящуюся вне пределов воспламенения, включая чистый воздух [10]. Но для создания факела пламени в одном цилиндре необходима форкамера, то есть камера сгорания двигателя должна быть разделенной.



В 1936 году в СССР было предложено форкамерно-факельное зажигание (ФФЗ), в котором воспламенение рабочей смеси в цилиндре осуществляется факелом пламени, который образуется в форкамере, сообщаемой с основной камерой одним или несколькими каналами.

Факел пламени, выбрасываемый из форкамеры, является турбулентным очагом, как зажигания, так и горения, позволяющим осуществить более быстрое (по сравнению с искровым зажиганием в 2,0...2,4 раза) сгорание обедненных смесей до  $\alpha = 1,5...1,6$ . При дальнейшем обеднении смеси было необходимо переходить к количественному регулированию [11, 12].

В форкамере расположены свеча зажигания (рис. 5) и небольшой дополнительный впускной клапан, открывающийся од-

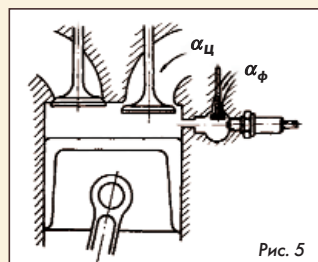


Рис. 5

новременно с основным впускным клапаном. Через дополнительную впускную систему, питаемую особой секцией карбюратора, форкамера продувается обогащенной смесью и при обеднении смеси в цилиндрах в форкамере поддерживается состав смеси, обеспечивающий воспламенение.

Недостатком ФФЗ является сложная зависимость состава смеси в фор-

камере от состава смеси в цилиндре и в работе [13] даже исследуется вопрос о создании послойного смесеобразования в самой форкамере. В многоцилиндровом двигателе имеет место неравномерность состава смеси по цилиндрам, на которую накладывается неравномерность питания форкамер, коррекцию состава которых сложно обеспечить даже на современном уровне развития техники, так как объем форкамеры составляет всего 2...3 % от объема камеры сжатия. Кроме этого, разделенные камеры сгорания имеют большие тепловые потери в развитые поверхности теплообмена и потери на перетекание газов.

Поэтому, в силу присущих им недостатков двигателя с ФФЗ почти не нашли применения в практике.

Между тем во время исследований ФФЗ было установлено, что бедную смесь в основной камере сгорания (рис. 5) быстрее воспламеняют не продукты сгорания, имеющие наиболее высокую температуру с  $\alpha = 0,9...1$ , а продукты сгорания с более низкой температурой, которые получаются при горении с большим недостатком воздуха (с  $\alpha = 0,4...0,6$ ). Такие продукты содержат химические более активные вещества (Н, ОН и др.) и значительно быстрее инициируют воспламенение, чем более горячие, но не активные продукты [14].

Именно такие продукты сгорания получались в цилиндре 1 двигателя Кушуля (рис. 1) на режимах близких к максимальной мощности. Однако в двигателе Кушуля в качестве средства воздействия на процесс сгорания служил не факел пламени, а вихрь воздуха, воздух которого не мог быть полностью использован для сгорания топлива.

Рациональнее было бы использовать заряд цилиндра 1 для создания факела пламени, который бы мог воспламенять и сжигать весь заряд цилиндра 2, обедняемый в широких пределах вплоть до чистого воздуха по мере снижения нагрузки на двигатель.

Такое решение было реализовано в новом рабочем процессе двухконтурного двигателя. В работе [15] А.И. Костин показал, что при разделении заряда по составу в двух отдельных цилиндрах, соединенных каналом, факел пламени позволяет использо-

вать весь воздух для сгорания топлива при последовательном воспламенении и сгорании зарядов обоих цилиндров.

Схема факельного зажигания в двух совместно работающих цилиндрах представлена на рис. 6.

Камеры сгорания цилиндров 1 и 2 соединены каналом. В цилиндр 1 на всех нагрузках подается смесь стехиометрического состава ( $\alpha \approx 1$ ), воспла-

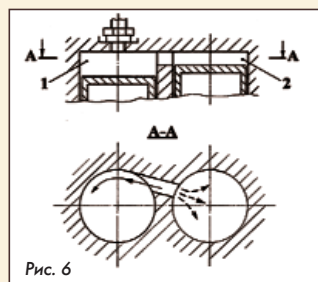


Рис. 6

меняемая свечой зажигания. В цилиндр 2 подается обедняемая по мере уменьшения нагрузки смесь в пределах от  $\alpha$  максимальной мощности до чистого воздуха. После воспламенения заряда факел пламени из цилиндра 1 перетекает в цилиндр 2 через канал и воспламеняет смесь, находящуюся в данном цилиндре. В данном случае скорость горения заряда цилиндра 2 определяется не скоростью распространения фронта пламени в обедненной смеси, величина которой недостаточна, а скоростью движения факела пламени.

После сгорания заряда в цилиндре 2 имеет место обратное реактивное перетекание горящих газов в цилиндр 1 (рис. 6), способствующее лучшему догоранию топлива заряда цилиндра 1. Последнее условие полностью согласуется с требованием теории процесса сгорания о необходимости завихрения в конечной фазе сгорания, при этом это завихрение происходит без применения вытеснителей на поршне или головке цилиндров и разделенных камер сгорания.

Новый рабочий процесс отличается от ФФЗ тем, что форкамера малого объема заменена на камеру сгорания цилиндра 1 которая помимо основной функции выполняет дополнительную - служит источником факела пламени для турбулентного зажигания смеси соседнего цилиндра 2, а камера сгорания цилиндра 2 дополнительно служит источником факела горящих и/или инертных газов для реактивной турбулизации (завихрения) заряда в цилиндре 1.

Наличие индивидуальных органов газообмена - впуска и выпуска - в каждом цилиндре и собственных систем питания камер сгорания обоих цилиндров создает независимый и хорошо контролируемый состав смеси в каждом цилиндре модуля на всех тактах, при этом заряды обоих цилиндров могут иметь высокое качество внешнего смесеобразования на всех режимах работы двигателя.

Таким образом, отсутствуют трудности ФФЗ, связанные с созданием требуемого состава смеси в форкамере при перетекании заряда из форкамеры в цилиндр в процессе всасывания и из цилиндра в форкамеру в процессе сжатия.

К разделению заряда, которое достигается без применения факела топлива (непосредственного впрыска), прибавляется преимущество факельного зажигания, но при этом отсутствуют как разделенная камера сгорания, так и отдельная форкамера, а, следовательно, и их недостатки.

При этом все преимущества неразделенной камеры сгорания сохраняются, так как дополнительная поверхность теплообмена пары цилиндров обусловлена лишь поверхностью канала, которая очень мала и, в отличие от ФФЗ, где у каждого цилиндра есть своя форкамера, распределяется на два цилиндра. Получить такие преимущества при организации рабочего процесса в одном цилиндре невозможно.

По сравнению с двигателем Кушуля новый рабочий процесс обладает следующими преимуществами:

1. Отсутствует необходимость полного вытеснения воздуха из цилиндра 2 в цилиндр 1, так как сгорание происходит в обоих цилиндрах одного модуля и воздух цилиндра 2 полностью используется для сгорания топлива.

2. Синхронное движение обоих поршней устраняет потери на "холостой ход поршней" и может устранять потери на перетекание между цилиндрами до начала сгорания заряда, если степени сжатия равны.

3. На такте всасывания оба цилиндра наполняются свежим зарядом через собственные впускные клапаны, а перетекание воздуха из одного цилиндра в другой на такте сжатия отсутствует, что устраняет потери на перетекание газов.

4. На режиме максимальной мощности в обоих цилиндрах модуля сгорает примерно одинаковое количество топлива и расширение рабочего тела так же происходит в обоих цилиндрах. Отличие от обычного двигателя состоит только в факельном зажигании заряда цилиндра 2. Таким образом, отсутствует перетекание расширяющегося рабочего тела из одного цилиндра в другой и, тем самым, устраняются связанные с этим потери.

5. Устраняется переобогащение заряда цилиндра 1 на режи-



мах близких к максимальной мощности, поэтому отсутствуют трудности с организацией смесеобразования очень богатой смеси, характерной для заряда этого цилиндра двигателя Кушуля.

6. Возможное использование для создания факела пламени более бедной смеси цилиндра 1, чем в двигателе Кушуля, компенсируется тем, что воспламеняемая этим факелом пламени однородная смесь цилиндра 2 имеет стехиометрический состав на режиме максимальной мощности и её воспламеняемость лучше, чем у чистого воздуха воздушного вихря из цилиндра 2 двигателя Кушуля.

Для надежного и быстрого сгорания бедной смеси в цилиндре 2 скорость движения факела пламени должна быть больше скорости сгорания смеси в обычном бензиновом двигателе, что обеспечивается выбором сечения канала, угла опережения зажигания, составом смеси в цилиндре 1 и др. При испытаниях опытного ДДВС с новым рабочим процессом скорость распространения фронта пламени в канале превысила 300 м/с что в 4...8 раз больше, чем в обычном двигателе [16].

Очевидно, что такая высокая скорость является результатом сочетания скорости движения части заряда цилиндра 1 и скорости распространения фронта пламени по перетекающему в канале заряду смеси.

Интенсивность факела пламени, перетекающего из цилиндра 1 со свечой зажигания, должна увеличиваться по мере обеднения смеси в цилиндре 2. В рассматриваемом способе работы этот процесс является саморегулируемым, так как с обеднением смеси цилиндра 2 происходит увеличение доли перетекающего заряда из цилиндра 1, который достигает максимума при наличии в цилиндре 2 только воздуха.

Новый двигатель с искровым зажиганием обеспечивает более высокую экономичность, чем у дизеля. Это связано с тем, что новый двигатель, как и дизель, имеет качественное регулирование мощности в широких пределах коэффициентов избытка воздуха  $\alpha = 1...2,4$ , а у дизеля  $\alpha = 1,4...4$ . Кроме этого, благодаря использованию оптимальной степени сжатия ( $\epsilon = 11...13$ ), его механический КПД выше, чем у дизеля при  $\epsilon = 16...20$ .

В результате эффективный КПД нового двигателя, а, следовательно, и экономичность будет выше, чем у дизеля на 9 % из-за уменьшения величины механических потерь и сокращения продолжительности сгорания топлива по углу поворота коленчатого вала (механический КПД равен 0,83 вместо 0,78 у дизеля) при увеличении литровой мощности на 14 % [17].

Дополнительные преимущества нового двигателя с искровым зажиганием по сравнению с дизелем:

1. Снижение уровня шума из-за уменьшения максимального давления сгорания (в 1,5 раза) и снижение жёсткости рабочего процесса.

2. Уменьшение массы двигателя при одинаковой мощности примерно в 2 раза.

3. Возможность увеличения мощности увеличением частоты вращения до  $n = 6000$  об/мин, тогда как нормальная работа дизеля ограничена  $n = 4000$  об/мин.

4. Себестоимость изготовления нового двигателя в 1,3...1,6 раза ниже дизеля (на уровне стоимости современного бензинового двигателя).

5. Стоимость используемого низкооктанового бензина А-80 на 20 % ниже стоимости дизельного топлива.

Однако в некоторых случаях применение принудительного зажигания в двигателе является неприемлемым по соображениям пожаробезопасности, наличия помех от системы зажигания и др.

Вместе с тем, условия взаимодействия зарядов совместно работающих цилиндров могут быть столь разнообразны, что представляется возможным найти новые способы организации рабочего процесса дизельного двигателя.

Начальное воспламенение в дизеле носит многоочаговый характер, что обеспечивает большую скорость сгорания в этот период. В дальнейшем часть топлива, поступающего из форсунки в среду горящего топливного факела, воспламеняется почти мгновенно. Однако условия сгорания этого топлива менее благоприятны, так как в процессе сгорания происходит постепенное загрязнение среды топливного факела образующимися инертными газами. Скорость сгорания при этом зависит от интенсивности подачи топлива в цилиндр и условий поступления кислорода в зону горения. Последняя часть подаваемого топлива обычно сгорает на линии расширения в условиях недостатка кислорода [18].

Возникает проблема не полного использования воздуха в цилиндрах - лучшие вихрекамерные дизели работают на режиме максимальной мощности с  $\alpha \approx 1,2$ , а в более экономичных двигателях с неразделенными камерами сгорания на максимальной мощности величина коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  не менее 1,3...1,4. Другие значения  $\alpha$  не обеспечивают хороших мощностных и экономических показателей и нормальной работы дизельного двигателя.

Основным недостатком неразделенных камер является несогласование форм и размеров топливного факела и камеры сгорания, вихревого отношения и частоты вращения коленчатого вала при работе на нерасчетных режимах. Кроме того, жесткая связь условий смесеобразования с качеством топлива исключает использование в таких двигателях топлив различных сортов [19].

На режимах холостого хода с малым числом оборотов работа дизельного двигателя так же неудовлетворительна. Это связано с уменьшением стабильности работы топливного насоса при уменьшении подачи топлива, падением давления впрыска и возможным переобеднением смеси в отдельных зонах цилиндра исключая её догорание.

В результате опытов с ФФЗ было установлено, что при факельном зажигании равномерно-распределенного топлива в объеме камеры сгорания обеспечивается бездымное сгорание вплоть до  $\alpha = 1,05...1,1$  [20].

Таким образом, при факельном зажигании, в вихрекамерном дизельном рабочем процессе и в двухконтурном двигателе возможно улучшение использования воздушного заряда и форсирование мощности дизеля по  $\alpha$ .

Однако, в двухконтурном двигателе Кушуля имеются потери на перетекание газов, а в разделенных камерах сгорания кроме потерь на перетекание газов еще имеются тепловые потери в развитые поверхности теплообмена. Но это не большие потери, по сравнению с тепловыми потерями от значительной задержки воспламенения в дизельных двигателях [21].

В новом двухконтурном рабочем процессе может отсутствовать перетекание воздуха на такте сжатия из одного цилиндра в другой и отсутствует перетекание рабочего тела на такте расширения из одного цилиндра в другой, что устраняет потери на перетекание газов. Меньше и тепловые потери по сравнению с разделенными камерами сгорания, так как дополнительная поверхность теплообмена пары цилиндров обусловлена лишь поверхностью канала, которая очень мала и распределяется на два цилиндра.

Таким образом, применение нового двухконтурного рабочего процесса целесообразно для дизельного двигателя. Схема совместно работающих цилиндров представлена на рис. 7.

В обоих цилиндрах камеры сгорания соединены каналом и в них установлены форсунки. Поршни в цилиндрах двигаются синхронно. Несмотря на наличие канала 4, перетекание через него не происходит, так как степени сжатия в цилиндрах одинаковые ( $\epsilon_1 = \epsilon_2$ ) и равны степени сжатия существующих дизелей.

В предлагаемом способе работы дизеля используются два фактора, положительно влияющих на повышение литровой мощности, экономичности и снижения токсичности отработавших газов: факельное зажигание распыленного дизельного топлива и завихрение заряда в конечной фазе сгорания.

#### 1. Факельное зажигание распыленного дизельного топлива.

После самовоспламенения от сжатия впрыснутого топлива в

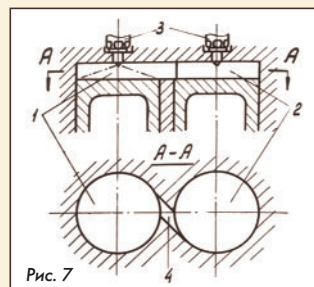


Рис. 7



цилиндре 1 горящие газы в виде факела пламени перетекают в цилиндр 2, способствуя воспламенению топлива с минимальной задержкой воспламенения; цилиндр 2 так же служит своеобразным демпфером, позволяющим уменьшить скорость нарастания давления. Топливо в цилиндре 2 впрыскивается с задержкой по сравнению с цилиндром 1.

Таким образом, реализуется известное преимущество двухфазного впрыска по снижению максимального давления сгорания  $P_z$  (примерно на 20 %) и жесткости рабочего процесса. Но, в отличие от известного двухфазного впрыска, в предлагаемом способе работы факелом пламени в цилиндре 2 формируется вихрь, который обеспечивает принудительное воспламенение, ускорение и более полное сгорание заряда этого цилиндра.

Замена взрывного многоочагового самовоспламенения в цилиндре 2 факельным зажиганием от постороннего источника позволяет в значительной мере устранить влияние фазы неуправляемого горения (уменьшить период задержки воспламенения). Появляется возможность получения управляемого вихря требуемой интенсивности (для каждого конкретного скоростного и нагрузочного режима) что позволяет создать полностью управляемый процесс сгорания (УПС) для дизельного двигателя, который определяется законом подачи топлива в цилиндр 2.

В современных условиях УПС проще всего реализуется при использовании системы топливоподачи "common rail" посредством перепрограммирования системы управления.

## 2. Завихрение заряда в конечной фазе сгорания.

По мере развития сгорания в цилиндре 2, газы перетекают обратно в цилиндр 1, где интенсивно турбулизуют догорающий заряд.

При испытаниях быстроходного дизеля с неразделенной камерой сгорания турбулизация горячей смеси в течение периода развитого сгорания обеспечивалась подачей завихряющего агента от отдельного агрегата, причем в качестве завихряющего агента выступали не только воздух, но и инертные газы.

Подобное завихрение уменьшило удельный расход топлива на 7...9 % в области малых коэффициентов избытка воздуха  $\alpha$  и расширило пределы устойчивой и бездымной работы вплоть до  $\alpha = 1,1...1,15$ . Количество газа (безразлично воздуха или инертного газа), идущего на завихрение, составляло 5...6 % заряда цилиндра воздухом [22, 23, 24].

В предлагаемом способе работы расчётная величина перетекающего заряда составляет около 9 % общего заряда цилиндров. Потери энергии на завихрение заряда составляют по расчетам 22 % от аналогичных потерь на перетекание заряда вихрекамерного двигателя [15].

Таким образом, разделение впрыска по цилиндрам и воспламенение части заряда горящими газами позволяет существенно воздействовать на динамику процесса сгорания и осуществить бездымное сгорание при  $\alpha = 1,15$ . Кроме того, имеется возможность управлять интенсивностью вихря, оптимального для конкретного скоростного и нагрузочного режима. Поэтому управляемость нового процесса сгорания выше, чем в обычном дизеле.

В предлагаемом способе работы, при работе с  $\alpha = 1,15$  литровая мощность будет выше в 1,2...1,3 раза, чем в обычном дизеле с  $\alpha = 1,4...1,5$ .

При работе предлагаемого дизеля при тех же значениях  $\alpha$ , что и в обычном дизеле, его экономичность будет выше на номинальном режиме на 5...8 %, на режимах малых нагрузок при низкой частоте вращения коленчатого вала примерно на 10 %, а токсичность отработавших газов будет соответствовать нормам Евро 5 [25].

Для дополнительного снижения токсичности могут быть использованы средства по снижению токсичности отработавших газов, применяемые в современном дизелестроении.

Применение двухконтурного рабочего процесса с использованием факела пламени в качестве основного средства воздействия на процесс сгорания обеспечивает дальнейшее развитие рабочего процесса ДВС и поэтому необходимо активное прове-

дение НИОКР в этой области, в которой наша страна обладает неоспоримым приоритетом.

## Список источников

1. <https://naukatehnika.com/naskolko-ekologichen-zelenyj-motor.html> naukatehnika.com
2. Чирков А.А. Проблемы управления турбулентностью при смесеобразовании и горении в дизелях // Энергомашиностроение. 1971. № 6.
3. Кушуль В.М. Новый тип двигателя внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1965. 212 С.
4. Кушуль В.М., Костин А.И., Устименко Г.А. Токсичность отработавших газов двигателя нового типа. Выпуск 125. Л.: ЛИАП, 1978.
5. Миллер А.О. Двухконтурная организация рабочего процесса, как техническая основа создания нового класса поршневых ДВС // Двигатель. 2020. № 4-6. С. 82-95.
6. Тер-Мкртчян Г.Г. Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными циклами. Учебное пособие. М.: МАДИ, 2015.
7. Кушуль В.М. Термодинамические основы и рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания нового типа. Труды ЛИАП, выпуск № 38. Л.: ЛИАП, 1962.
8. Митрофанов С. О ДВС, его резервах и перспективах развития глазами специалиста // Моторевю. 2011. № 11 и № 12. <https://reaa.ru/threads/rabochii-protsess-dvs.18596/#post-969769> <https://reaa.ru/threads/rabochii-protsess-dvs.18596/#post-969770>
9. Миллер А.О. Некоторые особенности рабочего процесса в двухконтурных ДВС (ДДВС) // Двигатель. 2023. № 1-3. С. 48-54.
10. Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания. М.: Машгиз, 1960. 409 с.
11. Кобаидзе В.Ш. Исследование теплонапряженности деталей двигателя при факельном и искровом зажигании. Труды, вып. 96. М.: НАМИ, 1968.
12. Гуссак Л.А. Новый принцип воспламенения и горения в двигателях // Изв. АН СССР, Сер. Энергетика и транспорт. 1965. № 12. С. 3-5.
13. Кобаидзе В.Ш. Исследование газообмена между полостями камеры сгорания двигателя с факельным зажиганием в ходе сжатия. Труды, вып. 112. М.: НАМИ, 1969.
14. Л.А. Гуссак. Диплом № 142 (СССР) Явление высокой химической активности продуктов неполного сгорания богатой горючей смеси // Открытия. Изобретения. 1974. № 38.
15. Костин А.И. Исследование некоторых особенностей осуществления рабочего процесса двигателей в двух сообщающихся цилиндрах при последовательном воспламенении их зарядов. Диссертация. Л.: ЛИАП, 1973. 137 с.
16. Герзон П.С. Улучшение экономических и токсических показателей двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой. Диссертация. М.: МАДИ, 1983. 168 с.
17. Костин А.И. ДВС с послойным смесеобразованием. Владимирский Гос. Университет. Материалы X Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы управления качеством производства и эксплуатации автотракторных средств", 2004. С. 254-256.
18. Артамонов М.Д., Морин М.М. Основы теории и конструирования автотракторных двигателей. М.: Высш. Школа, 1973. 207 с.
19. Еников Р.Д., Гаринов М.Д. Рабочий процесс перспективного поршневого ДВС, Вестник УГАТУ Т. 7, № 3 (16). Уфа: УГАТУ, 2006. С. 12-22.
20. Соколик А.Е., Карпов В.П. Форкамерно-факельное воспламенение как основа нового класса двигателя // Сб. Сгорание и смесеобразование в дизелях. АН СССР, 1960.
21. Дорохов А.Ф., Ханов Ш.М. Анализ тепловых потерь в охлаждающую воду судового вспомогательного дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. Сер. 4. Вып. 10. М.: ЦНИИЭТТяжмаш, 1986. С. 4-6.
22. Ронинсон Л.С. Улучшение параметров дизелей при малых коэффициентах избытка воздуха путем завихрения рабочего тела // Энергомашиностроение. 1965. № 5.
23. Ронинсон Л.С., Болдырев И.В. Улучшение индикаторных параметров дизелей со струйным смесеобразованием при малых избытках воздуха путем завихрения рабочего тела // Энергомашиностроение. 1965 г. № 5.
24. Писчаненко В.В. Об особенностях смесеобразования в цилиндре тихоходного дизеля большой мощности, Автореферат диссертации, Труды Одесского института инженеров морского флота, 1955.
25. Костин А.И., Миллер А.О. Повышение эффективных показателей и снижение токсичности отработавших газов судовых дизелей, стр. 102, Материалы V Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции "Актуальные проблемы морской энергетики", Санкт-Петербургского Гос. Морского Технического Университета, 2016.



# ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА РЕЗЬБОНАРЕЗАНИЯ, А ТАКЖЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ МЕТЧИКОВ И РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НОВОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ

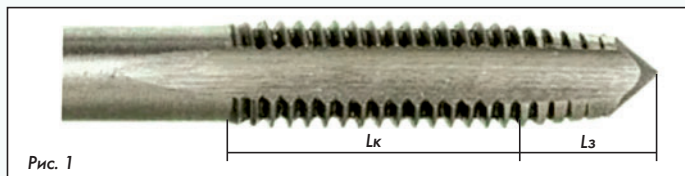
Юрий Владимирович Комаров, аспирант МГТУ Станкин

*Технологический процесс резьбонарезания осуществляется стандартными инструментами – как правило, трехрезовыми метчиками, у которых выполняется заборная и калибрующая части. Заборная часть выполняется затачиванием конуса на резьбонарезной гребенке и она, как принято, в несколько раз меньше по длине калибрующей части. В данной статье показано, что изменение соотношения между калибрующей и заборной частью и применение законов новой импульсной теории резания позволяют одновременно повысить стойкость инструмента, производительность процесса резьбонарезания и в разы долговечность инструмента, а также точность профиля резьбы минимум на два качества!*

*The technological process of thread cutting is carried out using standard tools, such as three-point taps, which have a cutting and calibrating part. The cutting part is sharpened using a thread-cutting comb, and it is usually several times shorter than the calibrating part. This article demonstrates that changing the ratio between the calibrating and cutting parts and understanding the principles of the new cutting theory can simultaneously improve the tool's durability, the efficiency of the thread cutting process, and the tool's longevity, as well as the accuracy of the thread profile by at least two grades!*

**Ключевые слова:** стойкость инструмента, точность профиля и шага резьбы, скорость резания, минутная подача, метчик.  
**Keywords:** tools durability, precision of the profile and thread pitch, cutting speed, minute feed, tap.

Для процессов резьбонарезания используют метчики стандартной конструкции, выполненные по ГОСТ 3266-81. Внешний вид режущей части показан на рис. 1.



Из рисунка видно, что калибрующих ниток на метчике в четыре раза больше, чем у заборного конуса, и угол заборного конуса очень большой. Из этого следует, что удаление полного припуска или равностороннего треугольника обрабатываемого металла высотой для резьбы М6•1 равной 0,6 мм, конструкция метчика уже задает подачу на одну режущую кромку или на зуб равную  $S_z = 0,6/4 = 0,15$  мм/зуб. Следовательно, с учетом точности исполнения инструмента по 4 качеству точности (ГОСТ 16093-2004), фактическое сечение стружки по подаче будет равно  $m = 0,3$  мм. Из работы [1] следует, что величина результирующей силы резания зависит от прочности обрабатываемого материала и площади сечения стружки, удаляемой режущей кромкой за проход, а именно:

$$F_{\max} = 1,7 \sigma_b \cdot S_{\text{п.к.}}, \quad (1)$$

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

В среднем максимум сечения будет зависеть от длины основания треугольника резьбового профиля и его высоты, деленной на число ниток заборного конуса:

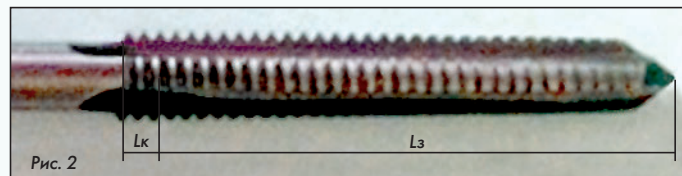
$$S_{\text{п.к.}} = m \cdot t / 2,$$

где  $t = 1$  мм - шаг резьбы.

Сила  $F_{\max}$ , действующая на один режущий элемент метчика наряду со скоростью резания определит энергию и температуру нагревания зубчика метчика, которая не должна превысить значения красностойкости режущего материала. Иначе произойдет катастрофический износ.

Если изменить соотношение калибрующей части метчика и заборной, сделать калибрующую часть метчика наоборот в 4 раза меньше заборной (рис. 2), то получим следующие соотношения. Подача на зуб будет равна  $S_z = 0,6/16 = 0,038$  мм/зуб. Из-за снижения количества калибрующих ниток в 4 раза, в 4 раза будет меньше накопленная ошибка по шагу и профилю резьбы.

Фактическое сечение стружки по подаче будет равно  $m = 0,1$  мм. Максимальная площадь сечения стружки снизится в 3 раза. Следовательно, и энергия теплоты также снизится в 3 раза.



Уравнение, полученное на основе дифференциального выражения теплопередачи в однородной среде, в которой действует импульсный источник тепловыделения [1], имеет вид:

$$\Delta T_k = \frac{0,85 \sigma_R \cdot S_{\text{п.к.}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot \sqrt{V}}{\sqrt{\pi \lambda_{\text{ср}} \rho_{\text{ср}}} \cdot \sqrt{L_{\text{ср}} S_{\text{АКТИЗ}}}} \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \left( \frac{1}{\sqrt{i}} \right). \quad (2)$$

Установившийся минимальный износ происходит только тогда, когда температура в зоне резания или стружкообразования, (где нет СОЖ), меньше температуры начала деструктивных превращений режущего материала. Поэтому при нарезании резьбы М6•1 на гайконарезных автоматах в материале Сталь 20 (ГОСТ 1050-2013) один из режимов уже определен конструкцией метчика. В первом случае фактическое сечение стружки  $m = 0,3$  мм. А во втором  $m = 0,1$  мм. Поскольку режущий материал в обоих случаях одинаков, - быстрорежущая сталь марки Р6М5, частота вращения метчика, определяющая скорость резания, будет существенно отличаться. В первом случае, согласно уравнению (2) она равна  $n = 500$  об/мин. Во втором  $n = 1500$  об/мин. Длина всей резьбовой части у метчиков одинакова и равна 40 мм. Поэтому время прохождения гайки равно:

$$T_m(1) = 40 / (n \cdot t) = 40 / 500 = 4,8 \text{ с};$$

$$T_m(2) = 40 / (n \cdot t) = 40 / 1500 = 1,6 \text{ с}.$$

Очевидный рост производительности в 3 раза. Апробация в производственных условиях показала, что во втором варианте кроме роста производительности качество гайки по точности выросло в 2 раза, а стойкость метчиков - в 4 раза. Это изменение в расходе инструментов было так же обосновано теоретически в работе [1] и подтверждено актом внедрения. **П**

## Список источников

1. Комаров В.А. Повышение эффективности технологических процессов на основе совершенствования обработки резания. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 164с.



# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ОБЛАСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ

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

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

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

*Предлагается новый подход к описанию турбулентного течения в противоположность к традиционному представлению динамики турбулентного течения через пульсационные движения, обосновывается динамика вихревых течений. Предлагаются количественные выражения, описывающие возникновение турбулентного течения, и определяются границы существования турбулентности на всём протяжении дозвуковых потоков.*

*A new approach to the description of turbulent flow is proposed in contrast to the traditional representation of the dynamics of turbulent flow through pulsation movements, the dynamics of vortex flows is substantiated. Quantitative expressions describing the occurrence of a turbulent flow are proposed, and the boundaries of the existence of turbulence throughout the subsonic flows are determined.*

**Ключевые слова:** турбулентность, возникновение вихревых течений, границы турбулентности.

**Keywords:** turbulence, occurrence of eddy currents, turbulence boundaries.

Традиционно под турбулентным течением понимается концепция О. Рейнольдса, которая сформирована на базе его исторических опытов, после которых он предположил, что поток делится на ламинарный и пульсационный. Далее он "распульсировал" уравнение Навье-Стокса, где ввёл понятие течения по руслу - некое среднее течение вдоль стенок и пульсационное, случайное, которое формируется вблизи первого. Вводя непосредственно такой способ или как сам О. Рейнольдс назвал его приёмом, он сильно упростил запись уравнения Навье-Стокса, вводя при этом большое количество допущений, предположений и способов осреднения параметров.

Такой приём позволил интерпретировать уравнение движения, правда, при этом с использованием моделей турбулентности. Таким образом Рейнольдс привёл феноменологически верное уравнение Навье-Стокса к статистической системе, которую начали решать численно.

Определение "пульсации" Рейнольдс после себя не оставил, и до сих пор нет чёткой газодинамической формулировки этого физико-математического объекта.

В качестве основного объекта исследования, в противоположность рейнольдсовскому, И. Тейлор предложил использовать вихрь и даже дал первые записи уравнения движения для одномерного случая через оператор - ротор. Ниже в тексте приводится вывод уравнения для ротора, с помощью которого можно описывать возникновение и угасание турбулентности.

Следует отметить, что до настоящего времени границы турбулентности фиксировались превышением критического числа Рейнольдса (для трубы ~2400).

Полученные соотношения позволили локализовать границы наступления турбулентности и зафиксировать критические значения чисел Рейнольдса во всём диапазоне течения.

### Уравнение движения сплошной среды

Пренебрегая объёмными силами, уравнение движения сплошной среды можно записать в векторной форме [1]:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = v \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{J} + v \Delta \vec{J} - \operatorname{grad} p - \frac{2}{3} v \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{J};$$

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = -\operatorname{grad} p + v \Delta \vec{J} + \frac{1}{3} v \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{J};$$

используя известную формулу векторного анализа:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{J} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{J} - \Delta \vec{J},$$

получаем уравнение движения в следующем виде:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = -\operatorname{grad} p + \frac{4}{3} v \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{J} - v \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{J};$$

### Уравнение Бернулли

На этапе преобразований градиентных членов в уравнении движения воспользуемся приближением модифицированного уравнения Бернулли, справедливого для линии тока. Для этого запишем уравнение движения после раскрытия субстанциональной производной:

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = -\frac{\vec{J}}{\rho} \operatorname{grad} \vec{J} - \operatorname{grad} p + \frac{4}{3} v \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{J} - v \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{J}.$$

Учитывая, что динамическая вязкость практически постоянная величина, после преобразований операторов получаем:

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} \frac{\vec{J}^2}{2} - \operatorname{grad} p + \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} \left( \frac{4}{3} \mu \operatorname{div} \vec{J} \right) - v \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{J}.$$

По аналогии с классическими уравнениями для баротропно-го газа выделим трехчлен с градиентами:

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = -\operatorname{grad} (I + p + N) - v \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{J},$$

члены которого представим в виде интегралов:

$$I = \int_{p_0}^p \frac{d}{\rho} \frac{\vec{J}^2}{2} \quad \text{и} \quad N = \int_{p_0}^p \frac{d}{\rho} \frac{4}{3} \mu \operatorname{div} \vec{J},$$

$$\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} \frac{\vec{J}^2}{2} = \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\vec{r}} \frac{\vec{J}^2}{2} = \frac{d}{d\vec{r}} \int_{p_0}^p \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\vec{r}} \frac{\vec{J}^2}{2} d\vec{r} = \operatorname{grad} \int_{p_0}^p \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\vec{r}} \frac{\vec{J}^2}{2} = \operatorname{grad} \int_{p_0}^p \frac{1}{\rho} \vec{J} d\vec{J}.$$

Введенные функции являются потенциалами, а  $\operatorname{grad} (I + p + N)$  - консервативная сила [2]. В таком приближении воздействуем оператором дивергенция на уравнение движения. В результате первый и последний члены обнуляются, а само уравнение превращается в следующее выражение:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} (I + p + N) = 0.$$

Это означает, что  $\operatorname{grad} (I + p + N) = \operatorname{const}$ . Полученная константа может принимать различные значения, в том числе и равное нулю. Последнее значение с практической точки зрения наиболее интересно, поскольку оно превращает уравнение в модифицированное уравнение Бернулли.

Если  $\operatorname{grad} (I + p + N) = 0$ , то  $I + p + N = \operatorname{const}$ , здесь  $p$  - статическое давление;  $I$  - динамическое давление, выраженное через импульс;  $N$  - потеря полного давления, связанная с вязкостью и сжимаемостью.

Возвращаясь к исходным определениям, получаем, что:

$$\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} \frac{\vec{J}^2}{2} + \operatorname{grad} p - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} \left( \frac{4}{3} \mu \operatorname{div} \vec{J} \right) = 0.$$

Воспользуемся этим выражением в дальнейших преобразованиях и получим следующее уравнение движения:

$$\frac{\partial \tilde{J}}{\partial t} = -v \operatorname{rot} \operatorname{rot} \tilde{J}.$$

### Уравнение Вулиса

Воспользуемся еще одним допущением. Применим уравнение обращения воздействия Вулиса для дальнейших преобразований. Это уравнение получается с использованием уравнения Бернулли и уравнения состояния Клапейрона и имеет такой же порядок точности. Очевидно, что все эти уравнения, а также добавленное к ним уравнение расхода, являются интегральными и выражаются не через локальные, а осредненные величины. Поэтому, строго говоря, они могут зависеть только от времени и рассматриваться как функции в точке. Записываем эти уравнения:

$$\begin{aligned} G &= pVF; \\ p &= pRT; \\ p + \frac{\rho V^2}{2} &= \text{const}, \end{aligned}$$

и берем от них дифференциалы аналогично [2]. Оставляя выкладки на авторитете автора последней работы, получаем:

$$(1 - M^2) \frac{dV}{V} = \frac{dJ}{J}.$$

После преобразований получаем зависимость для частной производной от импульса:

$$\frac{\partial \tilde{J}}{\partial t} = -(1 - M^2) \operatorname{grad} p.$$

### Основное соотношение для завихренности

Прежде всего, скалярно умножаем левую и правую части уравнения движения на величину вектора импульса:

$$\tilde{J} \frac{\partial \tilde{J}}{\partial t} = -\tilde{J} v \operatorname{rot} \operatorname{rot} \tilde{J}.$$

Далее воспользуемся теоремой № 2 о турбулентности [3]:

$$\tilde{J} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \tilde{J} = \operatorname{rot}^2 \tilde{J},$$

подставив его в уравнение:

$$\operatorname{rot}^2 \tilde{J} = \frac{\tilde{J}}{v} (1 - M^2) \operatorname{grad} p.$$

Последнее уравнение является критерием существования завихренности, которая в первую очередь зависит от знака градиента, а также от режима течения: дозвуковой ( $M < 1$ ) и сверхзвуковой ( $M > 1$ ).

В полученном уравнении не трудно выделить число Рейнольдса:

$$|\operatorname{rot} \tilde{J}| = \pm \sqrt{\frac{\rho}{d} \operatorname{Re} (1 - M^2) \operatorname{grad} p},$$

(где в число Рейнольдса входит составляющая скорости, направленная вдоль градиента давления).

### Режимы течения в ракетных двигателях

Анализ режимов течения в тракте ракетных двигателей проведем на основании полученной формулы:

$$\operatorname{rot}^2 \tilde{J} = \frac{\tilde{J}}{v} (1 - M^2) \operatorname{grad} p.$$

где  $M$  - число Маха.

Видно, что в дозвуковом потоке турбулентность возникает только при положительном градиенте давления, а ламинарность - при отрицательном. Для сверхзвукового потока однозначно сказать нельзя, так как в формуле выражение в скобках дает отрицательный результат. Кроме того, отрицательное значение имеет градиент давления, произведение этих членов положительно, сле-

довательно, в потоке может присутствовать турбулентность (ро- тор в квадрате может быть положительным).

Преобразуем данное выражение и рассмотрим вопрос о режиме течения газового потока с дозвуковой и сверхзвуковой скоростями в сопле двигателя. Поскольку уравнение движения записано в векторной форме, оно справедливо для линии тока, следовательно, рассматриваем течение вдоль криволинейной координаты  $\bar{s} = s/r_{kp}$  в проекции векторов на линию тока. Эта линия тока определяется ординатой  $\bar{r} = r/r_{kp}$  и углом наклона к оси  $\theta$ :

$$d\bar{s} = \frac{d\bar{r}}{\sin|\theta|}.$$

Из теории газодинамических функций известно [4], что:

$$\bar{r}^2 = 1/q,$$

где функция  $q = J/J_{kp}$  (отношение импульсов). Проведем преобразование уравнения движения в формате газодинамических функций. Сначала выделим из уравнения число Рейнольдса, которое традиционно характеризует наличие турбулентности:

$$\frac{Jd}{\mu} \cdot \frac{\rho}{d} = Re_d \cdot \frac{\rho}{d}.$$

Далее раскроем градиент давления вдоль линии тока:

$$\operatorname{grad} p = \frac{dp}{ds} = \frac{p_0}{r_{kp}} \cdot \frac{d\pi}{dM^2} \cdot \frac{dM^2}{d\bar{s}} = \frac{p_0}{r_{kp}} \cdot \frac{d\pi/dM^2}{d\bar{r}/dM^2} \sin\theta.$$

Введем в основное уравнение газодинамические функции, перейдя к безразмерным величинам, заменив для простоты  $M^2$  на  $x$ :

$$\operatorname{rot}^2 \tilde{J} = \frac{\rho_0 p_0}{2r_{kp}^2} \cdot \frac{\varepsilon}{\bar{r}} \left( \frac{d\pi/dx}{d\bar{r}/dx} \right) (1-x) \cdot Re_d \cdot \sin|\theta|,$$

где газодинамические функции зависят от аргумента  $x$ :

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2}x\right)^{\frac{1}{k-1}}};$$

$$q(x) = x^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{2}{k+1} \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2}x\right) \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}};$$

$$\bar{r}(x) = x^{-\frac{1}{4}} \left[ \frac{2}{k+1} \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2}x\right) \right]^{\frac{k+1}{4(k-1)}}.$$

Определяем производную от функции степени расширения:

$$\frac{d\bar{r}}{dx} = \frac{1}{4} \cdot \bar{r} \cdot \frac{x-1}{1 + \frac{k-1}{2}x} \cdot \frac{1}{x}.$$

Отношение производных имеет вид:

$$\frac{d\pi/dx}{d\bar{r}/dx} = \frac{\pi}{\bar{r}} \cdot \frac{2k}{1-x} x.$$

Произведение имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{\bar{r}} \left( \frac{1}{d\bar{r}/dx} \right) &= \varepsilon \cdot q \frac{4x \left(1 + \frac{k-1}{2}x\right)}{1-x} = \\ &= \frac{4}{1-x} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} x^{\frac{3}{2}} \left(1 + \frac{k-1}{2}x\right)^{\left(\frac{1}{k-1} - 1 + \frac{k+1}{2(k-1)}\right)}. \end{aligned}$$

После преобразований и сокращений получим:

$$\frac{\varepsilon}{\bar{r}} \left( \frac{d\pi/dx}{d\bar{r}/dx} \right) = \frac{4}{1-M^2} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} M^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{d\pi}{dx}.$$

Теперь основную формулу перепишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}^2 \tilde{J} &= 2 \frac{\rho_0 p_0}{r_{kp}^2} k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k-5}{2(k-1)}} \cdot M^{\frac{3}{2}} \cdot Re_d \sin|\theta| \cdot \frac{d\pi}{dx} = \\ &= 2 \frac{\rho_0 p_0}{r_{kp}^2} f(k, M) Re_d \sin|\theta| \cdot \frac{d\pi}{dx}. \end{aligned}$$



Величина  $d\pi/dx$  является производной газодинамической функции давления по квадрату числа Маха, т.е. ее знак определяется увеличением или уменьшением числа Маха вдоль линии тока.

Полученное выражение показывает, что вид режима течения в сопле двигателя не зависит от того, движется поток с дозвуковой или сверхзвуковой скоростью. Режим течения определяется исключительно градиентом давления в потоке: если градиент давления положительный, то турбулентность есть; если градиент давления отрицательный - режим течения ламинарный.

Таким образом, сверхзвуковой поток всегда ламинарный. Эти результаты еще раз доказывают справедливость пятой теоремы турбулентности [3].

Тем не менее в сверхзвуковом сопле (именно в сопле, а не в потоке) могут быть области турбулентности. Это дозвуковые пристенные слои и ударные волны. Первые могут возникать в местах отслоения линий тока от стенки как следствие неправильного профилирования или наличия технологического уступа; вторые из-за косога скачка на стенке, а также тоже из-за неправильного профилирования. Кроме того, может возникнуть прямой скачок вследствие перерасширения потока. Скачок уплотнения является зоной положительного градиента, и внутри него при торможении

потока происходит переход через звук, течение становится дозвуковым, а значит, может быть турбулентным. Заставляет задуматься малый размер скачка. Если он соизмерим с числом Колмогорова то, турбулентность также может отсутствовать.

Таким образом, турбулентность может появиться только в дозвуковом потоке после достижения критического числа Рейнольдса.

#### Перечень источников

1. Кочетков Ю.М., Подымова О.А., Кочетков Н.Ю. Инженерный метод расчёта химически неравновесных процессов // Вестник машиностроения. 2022. № 6.
2. Кочетков Ю.М., Подымова О.А. Образование и развитие вихрей в энергетических двигательных установках // Вестник машиностроения. 2024. № 4.
3. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Пять теорем как инструмент глобального преобразования уравнений сохранения в целях разработки новых подходов к вычислительной газовой динамике // Двигатель. 2019. № 4. С. 20-22.
4. Перумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990. 368 с.

Связь с авторами: swgeorgy@gmail.com

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ВНЕШНИХ СЛОЕВ ИЗОЛИРОВАННОГО ВИХРЯ НА ПОЛЕ ДАВЛЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА СТЕНКИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ВИХРЕВОГО КАНАЛА

УДК 532.527

Андрей Петрович Ушаков, к.т.н., ООО МикроДжет

**В статье приведены результаты численного исследования поля давления на стенках осесимметричного вихревого канала при неравномерном теплообмене. Показано, что в результате такого теплообмена вращательная скорость пристенных областей вихря становится неравномерной, а поле давления несбалансированным.**

**This article presents the results of a numerical study of the pressure field on the walls of an axisymmetric vortex channel with non-uniform heat transfer. It is shown that as a result of this heat transfer, the rotational velocity of the wall regions of the vortex becomes non-uniform, and the pressure field becomes unbalanced.**

**Ключевые слова: принудительный неравномерный теплообмен изолированного вихря со стенками осесимметричного канала, неравномерность вращательной скорости, поле давления на стенках вихревого канала.**

**Keywords: forced non-uniform heat exchange of an isolated vortex with the walls of an axisymmetric channel, non-uniformity of rotational speed, pressure field on the walls of a vortex channel.**

#### Введение

Рядом работ, посвященных изучению вращающихся потоков в присутствии центробежных полей, Кориолисовых и Архимедовых массовых сил выявлено, что их вращательная скорость не является неизменной и зависит от величины теплообмена между телом вихря и внешней средой [1].

Так, например, в работе [2], посвященной оценке трансформации подводимого внешнего теплового потока во вращательную скорость вихря с твердотельным ядром и вязким периферийным слоем показано, что величина вращательной скорости в кольцевой области ядра вихря линейно увеличивается при увеличении температуры и времени нагрева, рис.1.

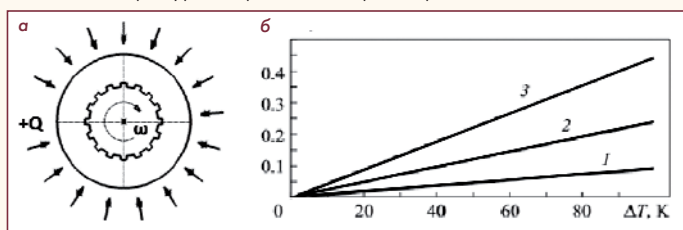


Рис. 1 Направление тепловых потоков (а) и б - зависимость относительного приращения вращательной скорости  $V_\phi$  в фиксированной точке от температуры нагрева  $\Delta T$  при длительности нагрева газа в кольцевой области ядра вихря:  $t = 0,15$  с (прямая 1),  $t = 0,01$  с (прямая 2) и  $t = 0,05$  с (прямая 3) [2]

Чем выше температура газа при тепловыделении и больше его длительность, тем больше увеличивается вращательная скорость вихря. Или, другими словами, КПД преобразования тепловой энергии во вращательную энергию увеличивается с увеличением  $\Delta T$  и времени нагрева.

Предлагаемый в этой работе процесс преобразования тепловой энергии в изменение вращательной скорости приведен на рис. 2, где рассматривается однородный вдоль оси  $Oz$  полярной системы координат закрученный поток с радиальным распределением скорости  $V_\phi(r)$ .

Предполагается, что увеличение вращательной скорости ( $V_\phi$ ) вихря происходит следующим образом. При выделении или подводе извне тепловой энергии к внешним слоям вихря температура газа  $+\Delta T$  во внешнем слое повышается, что приводит к уменьшению его плотности. В резуль-

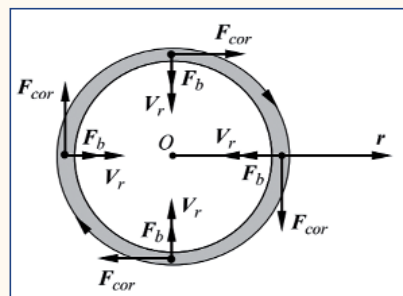


Рис. 2 Схематическое объяснение механизма увеличения вращательной скорости жидкости при выделении тепловой энергии в кольцевой области вихря.

Жидкость вращается по часовой стрелке относительно оси, проходящей перпендикулярно рисунку через точку О [2]

тате этого возникает сила плавучести ( $F_b$ ), направленная к оси вращения, под действием которой легкий газ за время  $\Delta t$  приобретает скорость  $V_r$ , направленную к центру вихря. Во вращающейся системе отсчета на движущийся к оси вращения легкий газ действует сила Кориолиса ( $F_{cor}$ ), направленная по касательной в сторону вращения.

Под действием этой силы за время  $\Delta t$  у движущегося к центру газа увеличивается скорость вращательного движения на величину  $\Delta V_\phi$ .

Однако (хотя интуитивно и понятно), формально из работы [2] не ясно, каким образом на величину вращательной скорости  $V_\phi$  скажется отрицательный тепловой поток (охлаждение границ вихря).

Так же не ясно и значение векторной суммы вращательной скорости в проекции на основные радиальные координатные оси и распределение давления при комбинированном теплообмене, когда одна половина наружной поверхности вихря охлаждается, а другая нагревается.

Разрешение этих вопросов, в продолжении работы [2], и явилось причиной проведения, а также целью настоящей работы.

Задачами работы являлись:

- оценка возможности уменьшения вращательной скорости вихря путём охлаждения его наружных областей (наружной поверхности);

- влияние комбинированного теплообмена (охлаждения и нагрева противоположных стенок вихревого канала) на вариации вращательной скорости элементарных объёмов вихря и связанным с этим распределением поля давления на стенках вихревой камеры (ВК).

## 1 Методика проведения работы

Работа проводилась численным методом, без привлечения физического эксперимента.

Для лучшей достоверности получаемых результатов использовались различные "легкие" и "тяжелые" специализированные пакеты газодинамического расчета (Flow Simulation, Flow Fision, Ansys Fluent, Siemens NX, ...) с применением стационарных и нестационарных методов на сетках различного типа.

Решалась чисто внутренняя задача.

Рассматривался неподвижный, осесимметричный (в данном случае цилиндрический) пустотелый, герметично закрытый со всех сторон стакан (рис. 3), длиной 50...100 мм, внутри которого с частотой 50...100 тыс. об/мин вращается оребренный вал (завихритель).

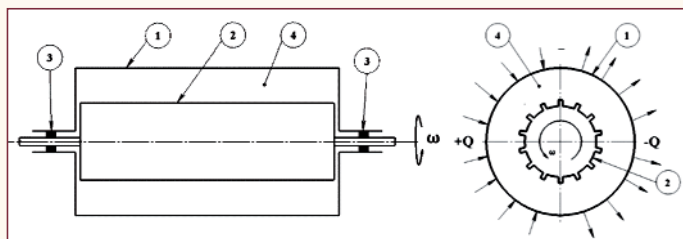


Рис. 3 Рассматриваемая модель:  
1 - неподвижный стакан; 2 - завихритель; 3 - уплотнения; 4 - рабочее тело (газ)

Внутренний диаметр стакана составлял 40 мм, а наружный диаметр вала - 28 мм.

При проведении параметрических исследований рассматривалось влияние различных параметров рабочего тела (РТ), некоторые из которых приведены в табл. 1, при различных значениях (сочетаниях) давления и температуры торможения РТ (1...500 ата, 300...1000 К), а также частоты вращения завихрителя (40...100 тыс. об/мин).

Таблица 1

Значения параметров исследованных рабочих тел при нормальных условиях				
Рабочее тело	Плотность кг/м³	Теплоёмкость Дж/(кг·К)	Теплоёмкость Дж/(м³·К)	Теплопроводность Вт/(м·К)
Воздух	1,23	1005	1299,5	0,0240
Аргон	1,78	523	500	0,0180
СО <sub>2</sub>	1,98	849	1579	0,0120
Ксенон	5,89	159	122	0,0057

Поверхностными целями расчетов являлось выявление распределение поля давления действующего на внутренние стенки стакана и наружные стенки завихрителя.

Глобальная цель расчетов - определение значения результирующей боковой силы, действующей на внутренние стенки стакана и завихрителя.

## 2 Результаты исследований

### 2.1 Результаты оценки изменения вращательной скорости вихря при охлаждении стенок канала

Результаты оценки отрицательного теплообмена (охлаждения) наружных слоёв вихря с окружающей средой (стенками вихревого канала) на среднюю вращательную скорость вихря приведены на рис. 4.

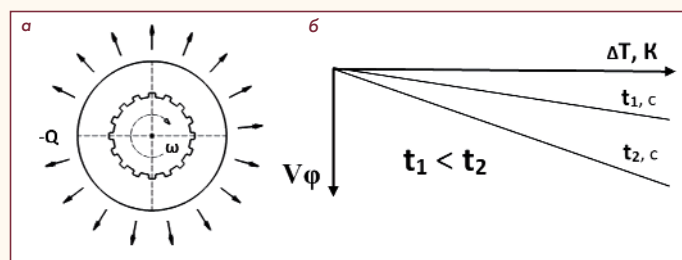


Рис. 4 Результаты оценки отрицательного теплообмена наружных слоев вихря с окружающей средой (стенками вихревого канала):  
а - направление тепловых потоков; б - зависимость скорости вращения от температуры стенки канала,  $\Delta T$  - разность между температурой стенок,  $t$  - время в секундах

Как видно из этих рисунков, точно также, как это было показано в работе [2], уменьшение температуры стенок влияет на среднюю вращательную скорость вихря.

Однако, как это интуитивно и предполагалось, если нагрев стенок приводит к увеличению средней вращательной скорости, то их охлаждение, наоборот, к её уменьшению (рис. 4б).

### 2.2 Результаты оценки суммарной скорости элементарных объёмов вихря, поля распределения давления и радиальной силы при комбинированном теплообмене

Результаты исследования параметров вихря и распределения поля давления (суммарной силы) на стенках вихревого канала при комбинированном теплообмене приведены на рис. 5 - 8.

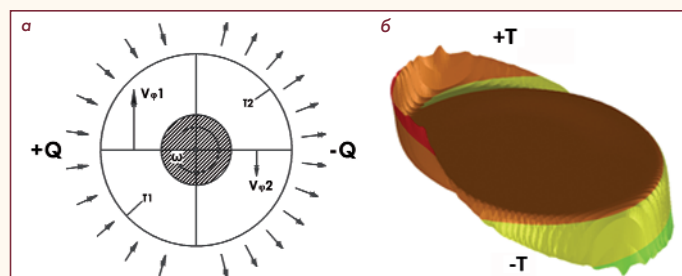


Рис. 5: а - направление теплообмена и величина вращательной скорости (условно), б - 3D-поле распределения температур внутри вихревого цилиндрического канала при комбинированном теплообмене

В этом случае, как это видно из рис. 5а, величина вращательной скорости не является постоянной по всему периметру ВК.

Со стороны подвода энергии (горячей стенки) вращательная скорость ( $V_{\phi 1}$ ) становится больше, чем со стороны холодной стенки ( $V_{\phi 2}$ ), в результате суммарная вращательная скорость вихря, в проекции на основные радиальные оси  $X$  и  $Y$ , и его импульс, становятся отличными от нуля, см. рис. 6.

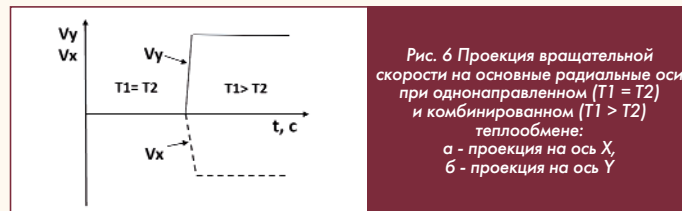
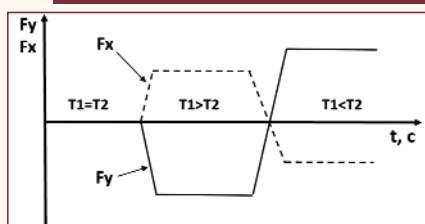
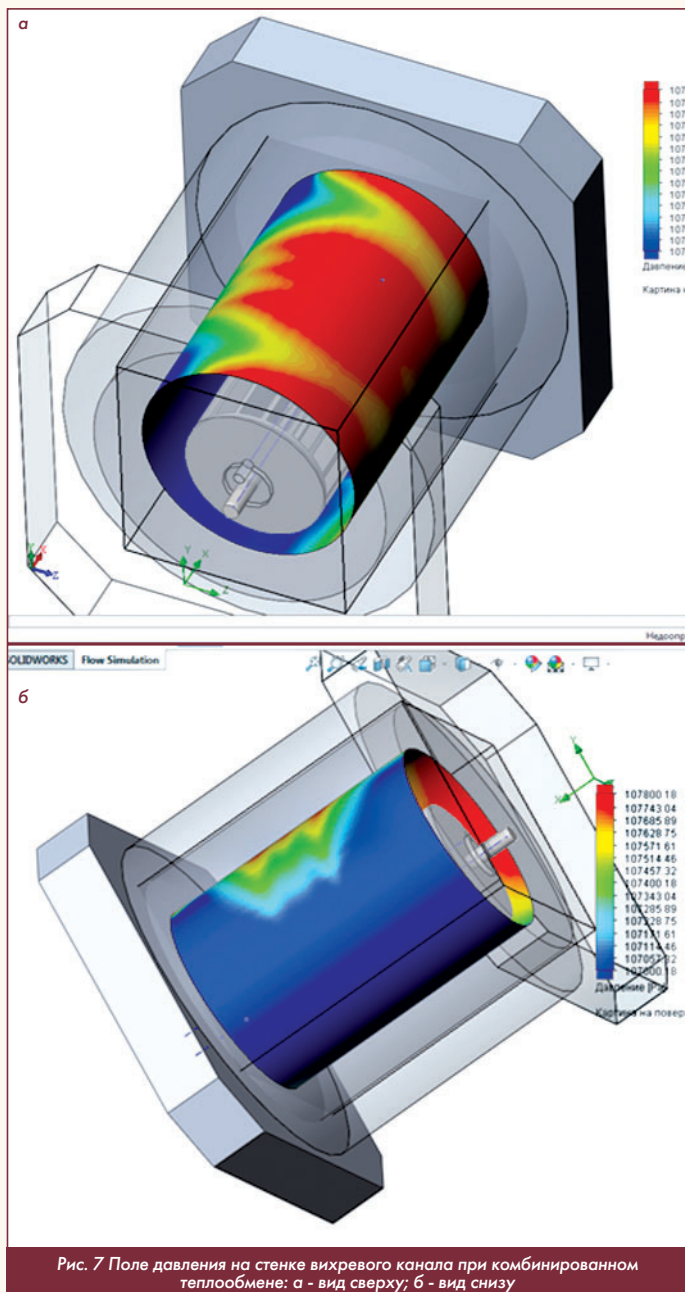


Рис. 6 Проекция вращательной скорости на основные радиальные оси при однонаправленном ( $T_1 = T_2$ ) и комбинированном ( $T_1 > T_2$ ) теплообмене:  
а - проекция на ось  $X$ , б - проекция на ось  $Y$



В результате такого распределения вращательной скорости вихрь, как система, становится неравновесным, а его положение неустойчивым.

В итоге, в полном соответствии с принципом Ле Шателье-Брауна (1864 г.) [3], вихрь под действием эмерджентных энтропийных сил [4] начинает двигаться, стараясь выровнять свою вращательную скорость (перейти в новое равновесное состояние) и, упираясь в стенку ВК, создает на ней область повышенного давления (рис. 7), обуславливающую появление не сбалансированной боковой силы, рис. 8.



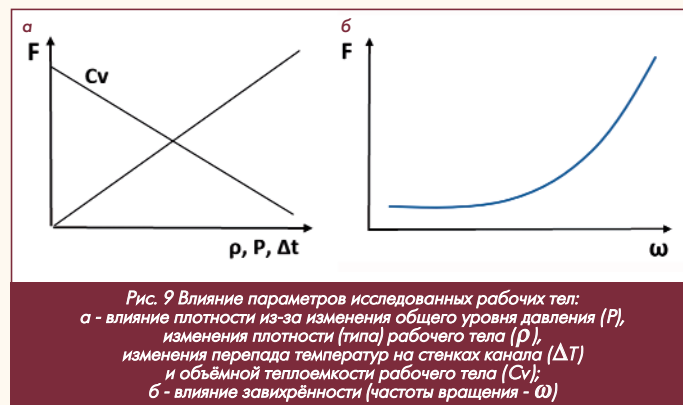
Величина и направление такой силы зависит от направления тепловых потоков и направлена (условно) от горячей к холодной стенке, сдвигая равновесие в сторону эндотермических (поглощающих тепло) процессов.

Выявлено, что величина возникающей боковой силы (для некоторых практических применений обнаруженного эффекта) может быть весьма значительной, более 20 Н (при длине ВК 50 мм, первоначальном давлении в ВК 500 ата, частоте вращения завихрителя 100 тыс. об/мин и использовании в качестве РТ ксенона).

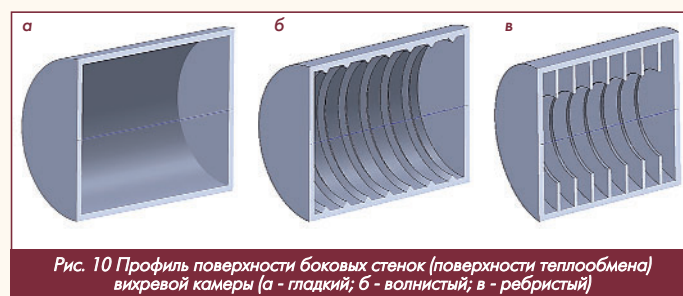
При этом удельное энергопотребление, определяемое как разница между подводимым и отводимым теплом, не превышает 60...120 Вт на возникающую одну грамм-силу.

### 2.3 Результаты параметрических исследований влияния начальных и граничных условий на результирующую боковую силу

Качественные результаты параметрического исследования по исследованию влияния некоторых параметров потока (уровня давления, плотности РТ, разницы в температуре стенок, степени завихренности потока и т.д.) приведены на рис. 9.



Увеличение плотности РТ ( $\rho$ ), которая может быть также обеспечена и увеличением давления РТ ( $P$ ), а также разницы в перепадах температур ( $\Delta T$ ) на противоположных стенках ВК приводит к линейному увеличению результирующей боковой силы. Влияние интенсивности генерируемого вихря (частоты вращения завихрителя) не линейно и подчиняется гиперболическому закону с наибольшим нарастанием значений боковой силы при больших скоростях вращения от 70 тыс. об/мин и выше (рис. 9б). Увеличение поверхности теплообмена также приводит к увеличению результирующей боковой силы ( $S$ ), рис. 10. Однако, увеличение объемной теплоёмкости РТ ( $C_v$ ) приводит к линейному уменьшению боковой силы.



Выбор типа РТ, исследованные варианты которого приведены в табл. 1, также существенно влияет на величину возникающей боковой силы. Наилучшие её значения были получены для ксенона и далее по мере снижения значений объемной теплоёмкости для аргона, воздуха и углекислого газа.

Геометрические размеры двигателя: длина, отношение диаметров завихрителя и ВК, форма поверхности завихрителя (рис. 11), также существенным образом влияют на обнаруженную силу.

Например, обнаружено, что увеличение длины ВК прямо пропорционально увеличивает исследуемую силу, а отношение диаметров завихрителя и ВК обеспечивает определенный оптимальный значения боковой силы при определенном соотношении их диаметров.

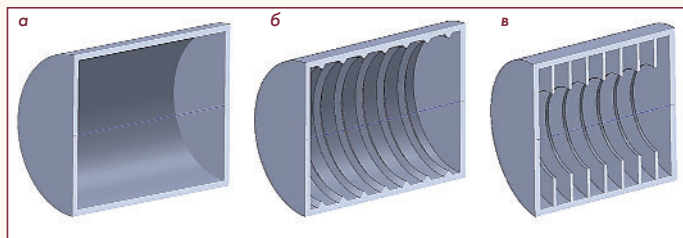


Рис. 11 Форма поверхности некоторых исследованных вариантов завихрителя: а - типа "белчье" колеса; б - с прямым зубом; в - пилообразным зубом

Наличие обнаруженной силы не зависит от способа создания вихря, что показано исследованием различных конструктивных вариантов вихревых каналов - ВК без завихрителя и вихревой камеры в виде межстеночного оребренного зазора, см. рис. 12.

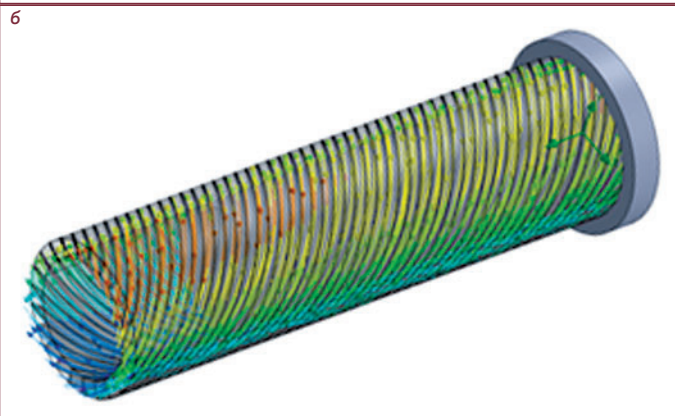
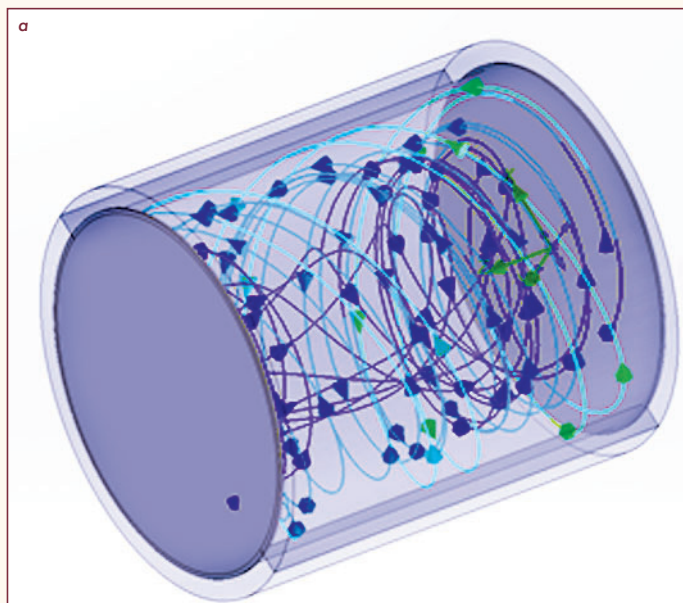


Рис. 12 Варианты конструкций исследованных вихревых камер: а - цилиндрический канал с вихревым потоком; б - вихревая камера в виде межстеночного оребренного канала

### 3 Выводы

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие основные выводы.

1. В дополнение к результатам работы [2], в которой было изучено увеличение вращательной скорости вихря при его положительном энергообмене с внешней средой (нагреве внешних областей), при отрицательном энергообмене с внешней средой, охлаждение стенок вихревого канала обеспечивает уменьшение вращательной скорости вихря.

2. При неравномерном теплообмене со стенками осесимметричного вихревого канала (при нагреве одной его половины и охлаждении другой) вращательная скорость вихря становится неравномерной (с горячей стороны больше, чем с холодной).

В результате, вихрь, как система, становится неравновесным и, в соответствии с принципом Ле Шателье - Брауна [3], он начинает движение в радиальном направлении, стараясь перейти в новое подвижное равновесное состояние с равномерным распределением вихревой скорости по всему его периметру.

В результате такого движения вихрь, упираясь в стенки канала, создает на них неравномерное поле давления и, как следствие, не скомпенсированную суммарную боковую силу.

3. Величина совокупного усилия зависит от сочетания целого ряда параметров: типа используемого рабочего тела; его плотности; давления; вязкости; теплоемкости; а также геометрических размеров ВК и завихрителя (если он есть). Наибольшее усилие среди рассмотренных газов достигается при использовании ксенона, отличающегося максимальной плотностью и наименьшей объемной теплоемкостью. Далее, по мере уменьшения удельной объемной теплоемкости, идут аргон, воздух и углекислый газ.

4. Обнаруженный эффект возникновения не скомпенсированной боковой силы при комбинированном теплообмене вихря с окружающей средой, судя по всему, не зависит от способа (конструктива) генерации вихря и имеет место для любых линейных вихрей.

### Перечень источников

1. Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1996.
2. У. Юсупалиев, Н.П. Савенкова, С.А. Шутеев, С.А. Складчиков, А.К. Маслов, В.Г. Еленский. Численное моделирование самоподдержания и усиления вихрей // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2013. № 4. С. 51, <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-samopodderzhaniya-i-usileniya-vihrey>.
3. Принцип Ле Шателье - Брауна. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF\\_%D0%9B%D0%B5\\_%D0%A8%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%B5\\_%E2%80%94%D0%91%D1%80%D0%B0%D1%83%D0%BD%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF_%D0%9B%D0%B5_%D0%A8%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%B5_%E2%80%94%D0%91%D1%80%D0%B0%D1%83%D0%BD%D0%B0) (дата обращения: 04.09.2025).
4. Энтропийные силы. URL: [https://ya.ru/neurum/c/nauka-i-obrazovanie/q/chto\\_takoe\\_po\\_suti\\_entropiynnye\\_sily\\_971edb67](https://ya.ru/neurum/c/nauka-i-obrazovanie/q/chto_takoe_po_suti_entropiynnye_sily_971edb67) (дата обращения: 04.09.2025).

Связь с автором: [au58@mail.ru](mailto:au58@mail.ru)

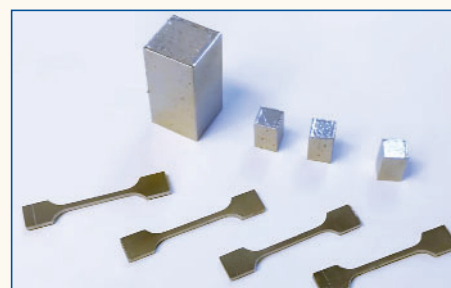
## ИНФОРМАЦИЯ. Аморфные сплавы

Аморфные металлические сплавы, имеющие разнупорядоченную структуру, в отличие от обычных металлов с кристаллической, образуется при крайне высоких скоростях охлаждения расплава (хотя есть и другие способы). Их особенность - более высокие сопротивление и магнитная проницаемость, коррозионная стойкость и твердость, а также лёгкость и упругость.

Все эти свойства позволяют применять аморфные металлы для изготовления инструментов, пресс-форм и др. В авиации и космонавтике детали из аморфных сплавов можно сделать тоньше и легче обычных, они сохраняют пластичность и упругость при экстремально низких температурах.

Но у аморфных сплавов металлов есть недостаток: это их метастабильная неравновесная структура, переходящая в кристаллическое состояние при повышении температуры, например, аморфные сплавы на основе циркония начинают кристаллизоваться уже при 350 °С. Тем не менее, российские учёные из Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН разработали технологию получения метал-

лического порошка на основе сплавов циркония, из которого с помощью 3D-печати на основе селективного лазерного плавления получают образцы объёмных аморфных сплавов больших размеров.





# РАЗРАБОТКА ЖРД НА ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА В НПО ЭНЕРГОМАШ ИМЕНИ АКАДЕМИКА В.П. ГЛУШКО

АО "НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко":

**Валерий Иванович Архангельский**, к.т.н.

**Пётр Сергеевич Лёвочкин**, к.т.н.,

заместитель генерального директора - главный конструктор,  
член-корр. Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского

**Владимир Сергеевич Судаков**, главный специалист,  
член-корр. Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского,  
лауреат премии Правительства РФ имени Ю.А. Гагарина в области космической деятельности

*В статье рассказывается о разработке ЖРД на перекиси водорода в НПО Энергомаш с кратким вступлением о начальном периоде разработок в мире в этом направлении. Основное внимание уделено ЖРД РД-502 и РД-510. Эти двигатели разрабатывались по схеме с дожиганием, с управлением вектора тяги качанием камеры в двух плоскостях.*

*The article describes the development of a hydrogen peroxide rocket engine at NPO Energomash with a short introduction about the initial period of development in the world in this direction. The main attention is paid to RD-502 and RD-510 rocket engines. These engines were developed on scheme with afterburning, with the thrust vector control by gimballing the chamber in two planes.*

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, перекись водорода, схема с дожиганием, управление вектором тяги.  
**Keywords:** liquid rocket engine, hydrogen peroxide, schematics with afterburning, thrust vector control.

Перекись водорода используется в промышленности еще с конца 19 века, а в ракетной технике нашла свое практическое применение в середине 30-х годов 20 века в Германии. Широко известны двигатели Хельмута Вальтера для истребителей-перехватчиков. Использовалась перекись водорода и в двигательных установках скоростных катеров, подводных лодок и торпед. Применялась перекись водорода и в самом мощном ЖРД того времени - ЖРД ракеты V-2 (А-4), но не как основной компонент топлива, а для вспомогательных целей - для привода турбонасосного агрегата.

После Второй мировой войны большое внимание перекиси водорода было уделено в Великобритании. Был разработан ряд двигателей на перекиси водорода и керосине в качестве ускорителей для взлета и маневров реактивных самолетов. Вскоре были разработаны двигатели серий "Альфа", "Бета" и "Гамма" для различных типов ракет. Наиболее известны двигатели серии "Гамма", которые использовались в ракете "Черный рыцарь" и в ракете "Черная стрела". Эти двигатели были разработаны по простой открытой схеме с относительно невысоким давлением в камере сгорания. Именно с помощью ракеты "Черная стрела" Великобритания стала космической державой.

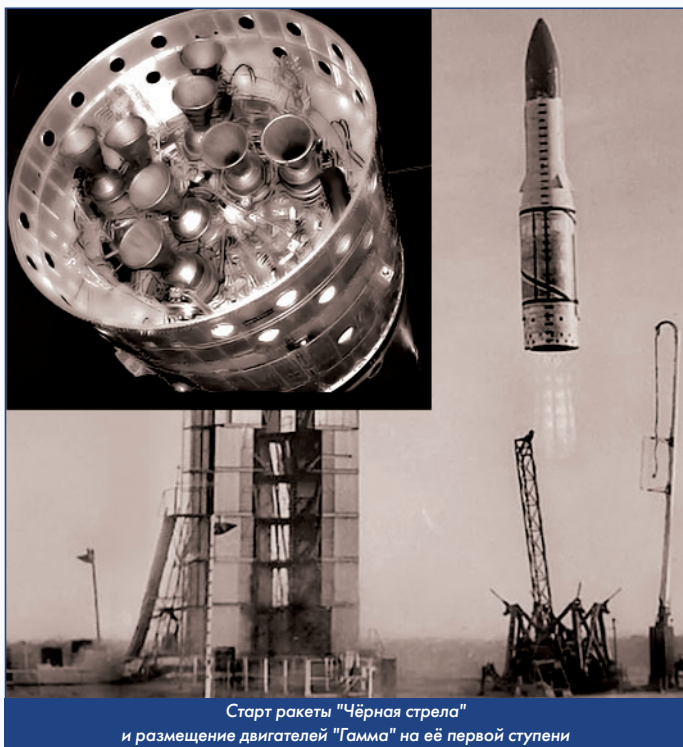
В Советском Союзе перекиси водорода после Второй мировой войны также было уделено достаточное внимание. Разрабатывались ЖРД на перекиси водорода и керосине, предназначавшиеся для работы в качестве ускорителей для истребителей - эти работы проводились в Воронеже под руководством Косберга и в Ленинграде под руководством Изотова. Но вскоре с развитием мощных турбореактивных авиационных двигателей эти работы были свернуты.

В НПО Энергомаш с середины 50-х годов была разработана большая программа исследований свойств различных топливных композиций, направленная на поиск наиболее перспективных вариантов. Для окислителя - перекись водорода концентрации 98...94 % - рассматривались различные типы горючего. Одной из перспективных пар высококипящего топлива считалась пара "высококонцентрированная перекись водорода (ВПВ) - гидрид бериллия", удельный импульс которой мало уступал наиболее эффективной криогенной топливной паре "фтор-водород". На переходном этапе к освоению гидрида бериллия осваивались пентаборан и суспензия алюминия в гидразине.

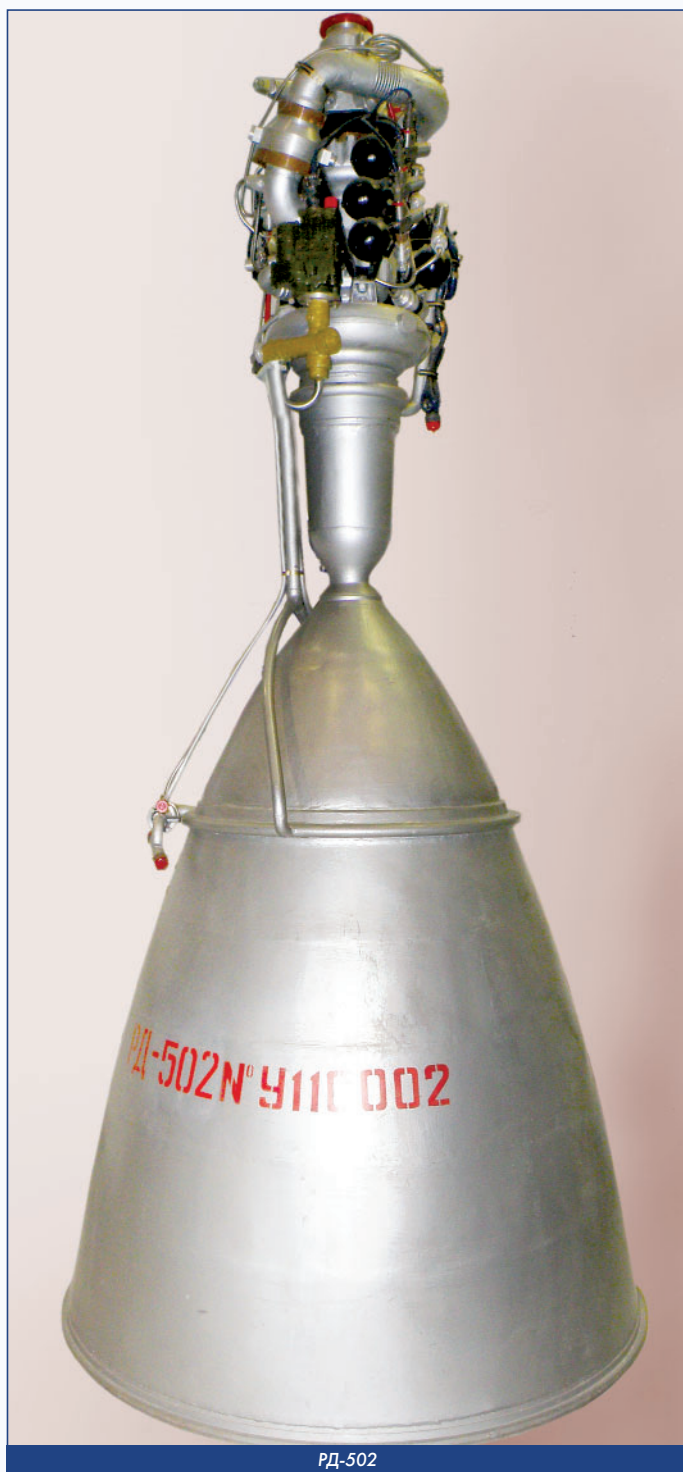
Так, в начале 60-х годов в НПО Энергомаш приступили к научно-исследовательской работе по созданию высотного двигателя РД-502 тягой 10 тс на ВПВ-98 - пентаборан. Этот двигатель разрабатывался по схеме с дожиганием в камере сгорания высокотемпературных продуктов разложения ВПВ, служащих рабочим телом привода турбины ТНА. Давление в камере сгорания составляло 150 атм. Разложение перекиси водорода осуществлялось в однокомпонентном газогенераторе с использованием твердого катализатора. Охлаждение камеры проводилось перекисью водорода ввиду недостаточной охлаждающей способности пентаборана. Система регулирования тяги двигателя предусматривала схему перепуска части перекиси водорода в обвод газогенератора и турбины с впрыском ее в затурбинный тракт.

Двигатель разрабатывался с многократным (5 - 7) включением. Продолжительность работы принималась около 1000 секунд. Кроме того, двигатель имел возможность глубокого дросселирования: с 10 тс до 2,5 тс и даже до 0,16 тс (при работе только на перекиси водорода).

Был проведен большой комплекс экспериментальных работ на модельных камерах сгорания для изучения процессов горения перекиси водорода и пентаборана в научно-исследовательских институтах СССР, а затем на полноразмерных экспериментальных камерах на территории Приморского филиала НПО Энергомаш. Там было проведено около 130 испытаний, включая 22 испытания на пентаборане. В результате этих работ была подтверждена реальная возможность создания высокоэффективного двигателя на высококипящем топливе ВПВ-98 - пентаборан с



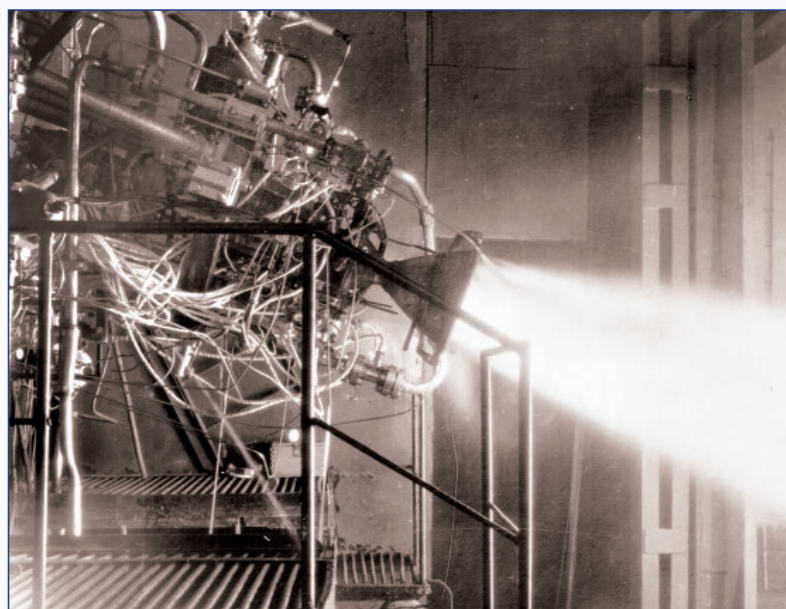
Старт ракеты "Чёрная стрела"  
и размещение двигателей "Гамма" на её первой ступени



RD-502

удельным импульсом 380 сек, что существенно - на 50 сек - превышало удельный импульс всех ранее освоенных высококипящих топлив и на 30 сек - кислородно-керосинового топлива.

Дальнейшие работы по освоению перекиси водорода продолжались в НПО Энергомаш в начале 70-х годов. Велась разработка и экспериментальная отработка двигателя РД-510 на ВПВ и керосине. Предусматривалось создать регулируемый в широком диапазоне, с многоразовым запуском и большим ресурсом 12-тонный двигатель для блока мягкой посадки и взлета лунного ракетного комплекса Н1-ЛЗМ. Но в связи с прекращением лунной программы в СССР в 1973 году работы по созданию двигателя РД-510 были продолжены как научно-исследовательские. Топливо перекись водорода и керосин имело преимущество по сравнению с освоенным высококипящим топливом АТ-НДМГ благодаря повышенной плотности при практически тех же значениях удельного импульса. Кроме того, применение перекиси водорода позволяло существенно уменьшить трудности в решении проблем экологической безопасности при использовании высококипящего топлива.



Огневые испытания ЖРД РД-502

Двигатель РД-510 разрабатывался по замкнутой схеме. Охлаждение камеры сгорания осуществлялась керосином. Кроме того, часть окислителя, поступающего на перепуск за турбину, использовалась для охлаждения газоведа, соединяющего турбину с камерой. Это позволило улучшить массовые характеристики двигателя (его масса составила 222 кг) и уменьшить количество тепла, остающегося в конструкции двигателя после его выключения. Это обстоятельство было важным для двигателя многократного включения в полете - по техническому заданию предусматривалось 4-кратное включение. Газогенератор двигателя разрабатывался в термокаталитическом варианте, когда меньшая доля перекиси водорода разлагалась под действием катализатора, а разложение его большей (около 75 %) части осуществлялось во второй зоне благодаря теплу, поступающего из первой зоны.

Первый этап отработки двигателя проходил на установках с использованием вытеснительной системы подачи компонентов топлива. В ходе работ были выбраны основные направления в разработке смесительной головки, применения завес для дополнительного охлаждения камеры сгорания. Затем были созданы экспериментальные установки с турбонасосной системой подачи топлива. Был отработан натурный ТНА и выбраны основные направления дальнейшей разработки газогенератора. После проведения ряда огневых испытаний на экспериментальных двигателях НПО Энергомаш перешел к огневым



RD-510



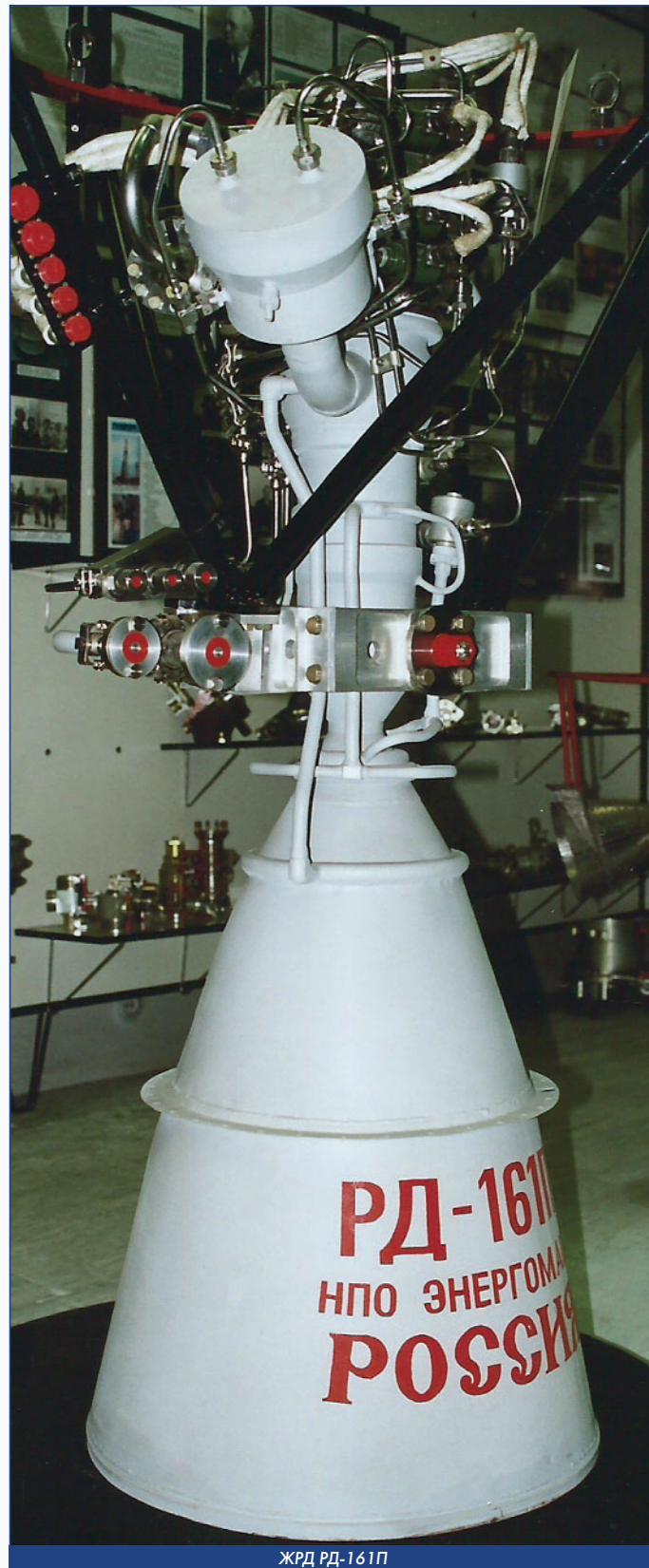
испытаниям двигателя РД-510Т - технологического варианта двигателя с фланцевыми разъёмами агрегатов. Этот этап испытаний подтвердил работоспособность большинства основных агрегатов и схемы двигателя в целом (в том числе в условиях многократного запуска без съёма со стенда) и соответствие его основных характеристик требованиям технического задания. Экспериментально был подтвержден удельный импульс в пустоте 329,5 сек. Исследования процессов каталитического и термокаталитического разложения перекиси водорода, испытания отдельных узлов и экспериментальных двигателей проводились на стендовой базе НПО Энергомаш. Одновременно велись работы по оптимизации исходной схемы двигателя и разработке её модификации, предназначенной для работы в условиях 10-кратного дросселирования двигателя до 1,5...2 тс. Двигатель РД-510, также как и двигатель РД-502 имел возможность качания в двух плоскостях в карданном подвесе для управления вектором тяги.

В конце 70-х годов в связи с большой нагрузкой НПО Энергомаш работами по новым кислородно-керосиновым двигателям РД-170/171 и РД-120 работы по двигателю РД-510 были приостановлены. В целом в результате этих работ создан весомый научно-технический и конструкторский задел, позволяющий при необходимости начать практическую разработку двигателя на перекиси водорода в сжатые сроки.

В последующие годы в НПО Энергомаш выполнялось несколько проектов двигателей на перекиси водорода для взлетно-посадочного космического комплекса, для системы орбитального маневрирования и т.п. Среди них можно выделить разработку проекта двигателя РД-161П на перекиси водорода и керосине тягой 2,5 тс в пустоте. Макет этого двигателя демонстрировался на Международном авиакосмическом салоне МАКС-1995 в Москве. Двигатель имел турбонасосную систему подачи топлива и был выполнен по схеме с дожиганием отработанного турбогаза. Газогенератор двигателя - однокомпонентный, термокаталитический: при проходе перекиси водорода через каталитический пакет происходит её разложение с образованием горячего парогаса с температурой порядка 850 °С. После срабатывания на лопатках турбины ТНА парогаз поступает в камеру сгорания, где дожигается с помощью горючего. Благодаря применению однокомпонентного газогенератора система подачи топлива и запуска РД-161П была существенно упрощена. Кроме того, двигатель имеет возможность работать и в однокомпонентном режиме - только на перекиси водорода при меньшей тяге. Удельный импульс в пустоте этого двигателя - 319 сек может быть увеличен на 10...15 сек благодаря применению удлинительного соплового насадка из углепластика. Проект РД-161П показал возможность создания сравнительно простого и компактного ЖРД, работающего на нетоксичных экологически чистых компонентах топлива с возможностью многократного запуска и практически неограниченным временем пребывания в космосе.

Перекись водорода как окислитель была признана весьма перспективной по критерию "стоимость/эффективность". Время разработки и изготовления двигателей на перекиси водорода и керосине меньше аналогичного времени для ЖРД на жидком кислороде и керосине, и тем более ЖРД на жидком кислороде и жидком водороде. Перекись водорода и керосин является весьма удобным топливом для использования в двигательных установках ракет, когда необходимо регулирование тяги в широком диапазоне. Кроме того, перекись водорода и керосин имеет одну из самых высоких плотностей топлива (примерно 1270 кг/м³), баки перекиси могут быть изготовлены из алюминиевых сплавов. Использование этой комбинации может гарантировать, что затраты на разработку и поставку ЖРД и РН будут относительно невысокими и минимизируют работы по подготовке ДУ к запуску.

Несмотря на ослабевший интерес к перекиси водорода в мире, она продолжает рассматриваться в ряде проектов: либо в качестве окислителя для ЖРД, либо как рабочее тело для газотурбинных установок, либо как источник кислорода, воды и тепла для жизнеобеспечения космонавтов.



#### Перечень источников

1. НПО Энергомаш. Путь в ракетной технике. Под ред. Каторгина Б.И. М.: Машиностроение, 2004.
2. Развитие отечественной ракетно-космической науки и техники. Том 5. История отечественных ракетно-космических двигательных установок. М.: Издательский дом "Столичная энциклопедия", 2018.
3. Архангельский В.И., Судаков В.С., доклад "Из истории разработки ЖРД на перекиси водорода в "НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко", Академические чтения по космонавтике, Москва, 2007.

Связь с авторами: sudakov\_vs@npoem.ru



Книга под таким названием вышла в свет в знаменательное время - в год, когда всё прогрессивное человечество отмечает 80-летие победы над фашизмом. Автор - Вячеслав Фёдорович Рахманин - тогда ещё школьник, видел чужеземцев на своей малой родине, и это он с документальной точностью отобразил в своём произведении "Детство, опалённое войной". Тогда, будучи школьником, он по ежедневным сообщениям Совинформбюро отслеживал изменения линии фронта и отмечал её на карте. И это стало первым шагом в исследовании исторических процессов.

И уже после окончания МАИ и работе в прославленном коллективе КБ-456 под руководством В.П. Глушко, создавая новые и перспективные ЖРД, Вячеслав Фёдорович Рахманин отдавал часть своего времени изучению истории мирового и советского ракетостроения и двигателестроения, что нашло своё отражение в многочисленных журнальных статьях и в капитальном произведении "В.П. Глушко и С.П. Королёв (достижения, разногласия, конфликты)".

Из историко-популярной и мемуарной литературы известно, что основной практический вклад в становление и дальнейшее развитие на начальном этапе разработки отечественной жидкостной ракетной техники в СССР принадлежит:

- ленинградской Газодинамической лаборатории (ГДЛ), (1929 - 1933 гг.);
- Группе изучения реактивного движения (ГИРД) (1931 - 1933 гг.);
- Реактивному научно-исследовательскому институту (РНИИ), организованному путем объединения коллективов ГДЛ и ГИРД с введением института в состав наркомата Тяжелой промышленности. За 90 лет своего существования РНИИ последовательно сменил несколько наименований: НИИ-3, НИИ-1 МАП, НИИ ТП, ИЦ им. М.В. Келдыша (1933 г. - н. вр.).

Однако изучение истории начального периода отечественного ракетостроения показывает, что упомянутые ГДЛ, ГИРД и РНИИ не охватывали все научно-производственные

организации, работавшие во второй половине 1930-х годов в области ракетной техники.

На фоне деятельности указанных организаций, оставивших основополагающий след в истории начального этапа развития отечественного жидкостного ракетостроения, малозаметной тенью промелькнули работы Конструкторского Бюро № 7 (КБ-7), функционирующего с августа 1935 г. по апрель 1939 г., сначала как Конструкторская группа в составе Артиллерийского Управления (АУ) РККА (1935 - 1936 гг.), после реорганизации группы в Конструкторское Бюро № 7 (КБ-7), а затем под наименованием КБ-7 в составе наркомата Оборонной промышленности (1937 - 1939 гг.) и наркомата Боеприпасов (1939 г.). В публикациях историко-популярной и мемуарной литературы используется только наименование КБ-7.

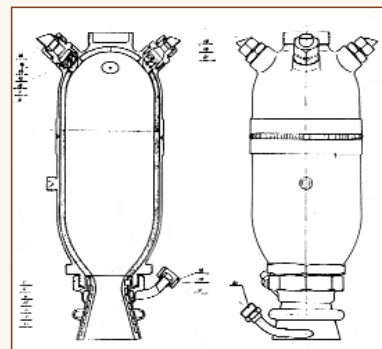
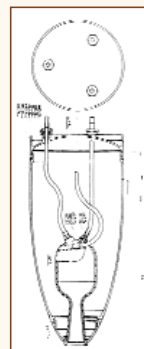
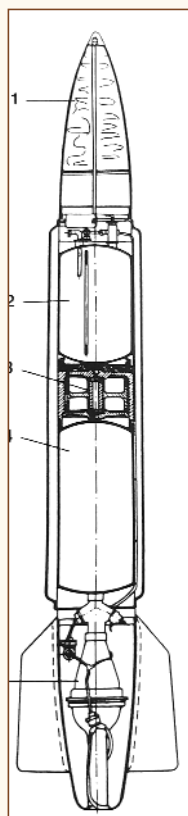
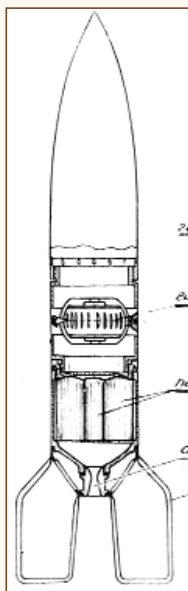
Следует отметить, что если создание специализированного подразделения по разработке жидкостной ракетной техники в ГДЛ и организация ГИРД в составе Осоавиахим являются эволюционным путём развития жидкостной ракетной техники в СССР, то создание КБ-7АУ стало результатом активной патриотической позиции, проявившейся в неоднократных индивидуальных обращениях в высшие партийные, государственные и военные инстанции энтузиаста изучения реактивного движения, бывшего работника ГИРД и РНИИ Л.К. Корнеева о необходимости срочной организации под его руководством отдельного конструкторского бюро для разработки жидкостного ракетного вооружения. Л.К. Корнеев как истинный патриот советского государства, в создании которого он участвовал с оружием в руках в гражданской войне, проявлял озабоченность в связи с успешным ведением работ в капиталистических странах по созданию современного реактивного вооружения и отставания в этом СССР, т. к. по его мнению РНИИ с этой работой не справлялся.

В результате этих обращений и действительно малопродуктивной в этот период времени работой РНИИ по жидкостной тематике маршал М.Н. Тухачевский в августе 1935 г. подписал приказ по наркомату Обороны об организации специализированной Конструкторской группы при АУ РККА во главе с Л.К. Корнеевым о работе которой и идёт речь в этой книге...

Одновременно, материалы, собранные из многочисленных первоисточников, скрупулёзно изученные и систематизированные, позволили дать максимально точно и аргументировано ответ на вопрос: почему в СССР ни в довоенные годы, ни в ходе войны так и не появилось ракетное оружие, подобное немецкой ракете Фау-2 (А-4).

Книга будет интересна всем любителям отечественной истории, работникам ракетно-космической отрасли и студентам специализированных вузов.

Для приобретения книги просьба обращаться в редакцию по электронной почте: aib50@yandex.ru



На взятых из книги рисунках приведены чертежи некоторых ЖРД и ракет, разработанных в КБ-7

Александр Иванович Бажанов,  
главный редактор журнала "Двигатель"



# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ДВУХФАЗНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ

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

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

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

**Мгер Каджикович Мкртчян**, аспирант

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований по отбору конденсированной фазы одновременно в двух местах в камере сгорания и на срезе сопла модельного РДТТ. Проведенный теоретический анализ показал, что кривая распределения среднемассового размера вдоль сопла имеет вид кривой насыщения. В области сверхзвукового сопла функция распределения не меняется по длине и сосредоточена вблизи одного размера. Проведен анализ различных расчётных работ, проделанных по точным газодинамическим методикам и программам. Установлено, что результаты качественно совпадают с результатами экспериментов. Теоретический и расчётно-экспериментальный анализ показали, что сложные газодинамические расчёты с учётом всех особенностей эволюции частиц, включая коагуляцию, дробление и сепарацию можно заменить траекторными расчётами двухфазных ламинарных течений с функцией распределения, локализованной вблизи среднемассового размера, соответствующего условиям предельного дробления частиц при числе Вебера критического.*

*The paper presents the results of experimental studies on the selection of condensed phase simultaneously in two places in the combustion chamber and on the nozzle section of the model RCTT. The theoretical analysis showed that the distribution curve of the average mass size along the nozzle has the form of a saturation curve. In the supersonic nozzle region, the distribution function does not change in length and is concentrated near the same size. The analysis of various calculation works performed according to precise gas dynamic methods and programs is carried out. It is established that the results are qualitatively consistent with the experimental results. Theoretical and computational-experimental analysis have shown that complex gas-dynamic calculations, taking into account all the features of particle evolution, including coagulation, crushing and separation, can be replaced by trajectory calculations of two-phase laminar flows with a distribution function localized near the average mass size corresponding to the conditions of maximum particle crushing at a critical Weber number.*

**Ключевые слова:** турбулентность, функция распределения, ламинарность, распределение частиц по размерам, среднемассовый размер.

**Keywords:** turbulence, distribution function, laminarity, particle size distribution, average mass size.

Газовая динамика ЖРД отличается от газовой динамики РДТТ тем, что последняя двухфазная. Это означает, что в потоках продуктов сгорания РДТТ летят жидкие или твёрдые мелкодисперсные частицы, как правило, это частицы  $Al_2O_3$ . В процессе движения частиц под воздействием высокоэнтальпийного газового потока, а также при взаимодействии друг с другом, спектр этих частиц эволюционирует, мелкие скоростные догоняют крупные и, либо коагулируют, образуя более крупные частицы, либо разбивают крупные, дробят, превращая в более мелкие. В зависимости от разности скоростей мишени и снаряда происходит либо процесс коагуляции, либо дробления. Кроме того, частицы, движущиеся вдоль криволинейных линий тока, сепарируют: траектории и линии тока расслаиваются, что приводит к осаждению конденсированной фазы на концевую часть стенки сверхзвукового сопла. Частицы существенно снижают величину удельного импульса тяги и дополнительно разрушают сопло. Кроме того, поскольку сопла РДТТ, изготовленные из углеродосодержащих уносимых материалов (УУКМ и УККМ) под воздействием частиц и газового потока изменяют свою геометрию, возрастают потери удельного импульса из-за искажения профиля сопла. В связи с этим очень важно по возможности точно определять дисперсные характеристики продуктов сгорания.

## Расчётные методы определения характеристик двухфазного течения

Течение двухфазных смесей, когда помимо газовой фазы содержится конденсированная фаза, представляет собой сложную многофакторную задачу, решению которой посвящено большое число работ отечественных и зарубежных авторов. Задача усугубляется тем, что сами частицы представляют собой полидисперсную субстанцию с большим размахом по размерам. Диаметры частиц согласно экспериментальным результатам [1] располагаются в интервале от нескольких сотен ангстрем до ста микрон. При этом функция их распределения является бимодальной и деформируется в процессе течения по тракту двигателя. Движение, как было упомянуто ранее, сопровождается коагуляцией и дроб-

лением частиц. В сверхзвуковом сопле особенно сильны процессы сепарации.

Точный и надёжный расчёт параметров двухфазного течения невозможен без корректного определения интенсивности взаимодействия газа с частицами. Это взаимодействие определяется размером частиц и разностью скоростей различных частиц. Кроме того, сама физика взаимодействия определяется критериями Рейнольдса, Маха и Кнудсена.

Рабочими критериями, в основном, являются коэффициент аэродинамического сопротивления, критерий Вебера и Лапласа. При определении процессов коагуляции и дробления комбинированные критерии, составленные из вышеперечисленных для различных диапазонов параметров. Все эти критерии подробно описаны в работах [2, 3, 4].

Критериальные зависимости получают только экспериментально и на модельных установках. При этом используются модельные жидкие капли, приводящиеся во взаимодействие друг с другом при помощи специальных дозаторов и микроскопов. Понятно, что точность таких экспериментов не очень высокая, но по своему значению они уникальны. Установки позволяют определять спектры частиц после взаимодействия капель, углы отскока при твёрдых ударах.

Эмпирические формулы взаимодействия частиц используются как дополнительные условия при газодинамических расчётах.

Для расчётов двухфазных течений разработано много сложнейших газодинамических программ и, как правило, они все базируются на исходных уравнениях Эйлера и Лагранжа. Решение задач с сопряжённым, трёхмерным, вязким, двухфазным, смешанным течением с теплообменом является практически нереальным, и, главное, нерациональным в настоящее время в силу недостаточной изученности процессов взаимодействия частиц конденсированной фазы между собой и газом.

Тем не менее, особенно в восьмидесятые и девяностые годы была сильна тенденция создания крупных комплексов и расчётных программ, максимально учитывающих пространственный и осесимметричный аспект и дифференцированный подход к взаимо-

действию между фазами и их влияние друг на друга. Появились научные школы в Москве, Томске, Новосибирске, Киеве и в других городах. Развивалась, очевидно, и зарубежная наука. Программы, созданные этими школами, конкурировали друг с другом. Они соревновались в точности предсказания результатов. В эти годы бурно развивалась ракетно-двигательная промышленность. Две самые мощные страны - СССР и США - в восьмидесятые годы достигли паритета в ракетно-космической отрасли. Было много возможностей для сравнения расчётных и экспериментальных результатов. Ракетная отрасль активно привлекала для разработок изделий академические и специализированные институты. Развитие науки ускорялось колоссальными темпами. Следует отметить работы таких научных корифеев в этой области как А.П. Тишина, И.М. Васенина, А.А. Глазунова, А.Н. Крайко, А.А. Шрайбера, М.Л. Куранова и других, которые создали целую библиотеку программных комплексов, необходимых для разработки перспективных изделий ракетной отрасли [5, 6, 7, 8].

Практически все разработанные комплексы и программы обладали одним общим существенным недостатком. Они были очень громоздкие и очень долго считали, поэтому их, как правило, использовали для единичных проверочных расчётов. Для мобильных расчётов использовались приближённые методы и методы, основанные на решении траекторных задач. При этом в известное газовое поле запускалась единичная частица среднего размера и определялась её траектория. Как правило, интересовало место, где эта частица пересекает стенку сопла. При таких расчётах использовался среднемассовый размер распределения частиц. Этот же размер использовался и при расчётах потерь на двухфазность.

При использовании, так называемых, точных методов в расчёт закладывался полный спектр распределения частиц в продуктах сгорания, что позволяло определять плотности тока осаждения на концевом участке сопла и прогнозировать распределение уносов материалов стенки сопла.

В расчёт закладывались функции распределения частиц по размерам, полученные экспериментально путём отбора частиц из потока в камере сгорания [9].

Программы позволяют рассчитывать изменение функции распределения частиц по размерам в любой части сопла. Но при определении потерь удельного импульса тяги использовался интегральный параметр распределения - среднемассовый размер  $d_{43}$ . Как было показано в работе [10] этот размер лучше всего определяет потери тяги при двухфазном течении:

$$d_{43} = \sum_{i=1}^n g_i d_i$$

где  $d_i$  - текущий размер,  $g_i$  - его массовая доля.

#### Расчётный и экспериментальный анализ

В один из временных периодов наиболее популярными были томские программы [6]. Они отличались наиболее подробным учётом различных важных особенностей двухфазных течений так, например, они позволяли проводить расчёты с учётом дробления частиц при вращательном движении по тракту канала. В программах учитывалось обратное влияние частиц на газ и подробно были представлены самые современные экспериментальные закономерности, описывающие коагуляцию и дробление частиц. В программе были учтены все современные научные достижения того периода и многие конструкторские бюро активно пользовались этим высокосовременным математическим продуктом.

Проанализируем один очень важный для практики результат, полученный при расчёте одного из двигателей твёрдого топлива с помощью данной программы [6]. Было получено распределение среднемассового размера по длине сопла  $d_{43}(\bar{x})$ . В расчётах учитывалось кроме всего прочего дробление частиц при их вращении (рис. 1).

Из рисунка видно, что, начиная с сечения  $\bar{x} = 0$ , что соответствует критическому сечению сопла и началу сверхзвуковой области зависимость  $d_{43}(\bar{x})$  практически оставалась постоянной.

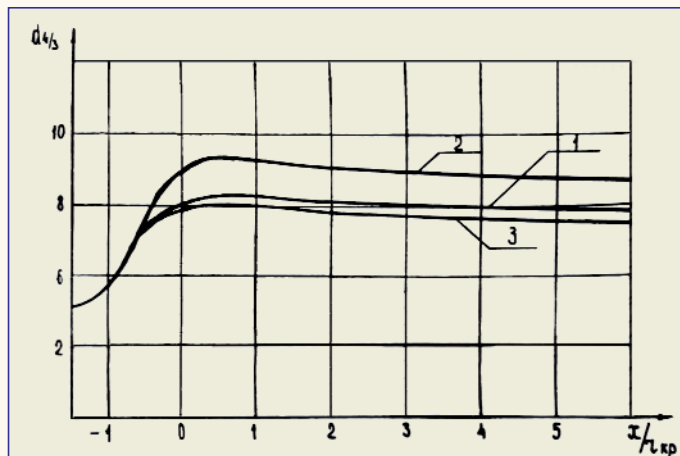


Рис. 1 Изменение среднего размера частиц  $d_{43}$  вдоль сопла:  
1 - с учётом дробления частиц при вращении;  
2 - без учёта вращении;  
3 - с учётом вращении частиц и влияния аэродинамических сил на коэффициент массообмена

Этот факт не случаен, он показывает, что, начиная с момента перехода течения через звук не происходит никаких изменений со спектром частиц. Процессы коагуляции и дробления закончились в дозвуковом потоке. Также видно, что само вращение не влияет на форму кривой и динамику аэродинамического воздействия массообмена газа и частиц. Расчёты без учёта вращении также показали постоянство параметра  $d_{43}$  вдоль оси сопла.

Такой результат хорошо подкрепляется экспериментальными результатами по отбору частиц, независимо проведённые ранее на модельной твёрдотопливной установке. Эксперименты были проведены на установке с диаметром критического сечения сопла  $d_{кр} = 50$  мм. При этом отбор частиц происходил одновременно из камеры сгорания и со среза сопла двумя отборниками (рис. 2).

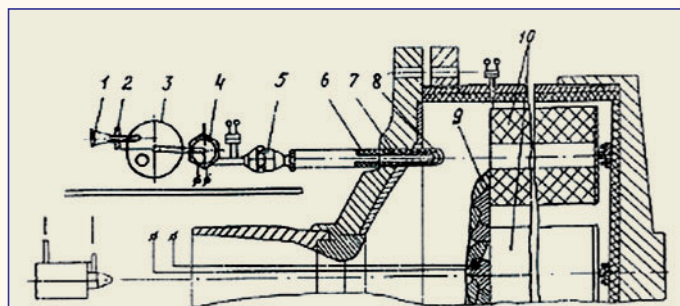


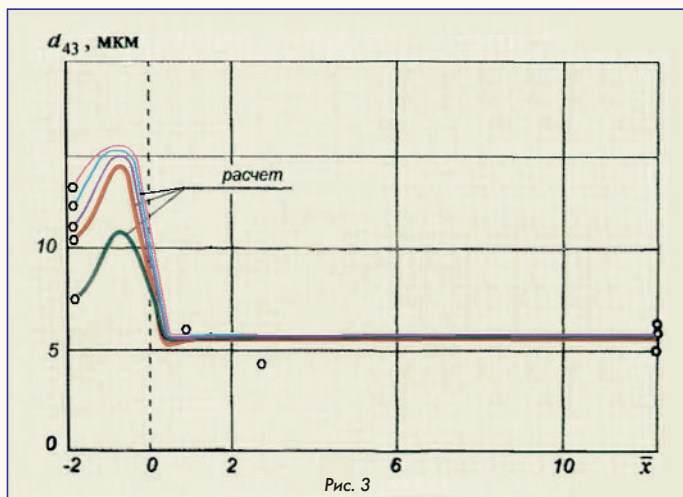
Рис. 2 Принципиальная схема отбора конденсированной фазы из камеры сгорания и из сопла модельного РДТТ: 1 - фильтр-элемент, 2 - дроссельная шайба, 3 - барботажная камера, 4 - циклон, 5 - обратный клапан, 6 - газозод, 7 - пробоотборник, 8 - заслонка, 9 - воспламенитель, 10 - заряд

Для получения экспериментальных точек по длине сопла сверхзвуковая часть последовательно обрезалась и на укороченных вариантах эксперименты повторялись [11].

После экспериментов полученные пробы подвергались тщательному дисперсному анализу. Выстраивались функции распределения частиц по размерам, при этом порошок конденсированной фазы обрабатывался вручную под электронным и оптическим микроскопами. Рассчитывались необходимые средние размеры функции распределения. Было установлено, что функции распределения частиц по размерам в камере сгорания имели характерную S-образную форму с бимодальной особенностью [8], а среднемассовый размер этих функций имел значительный разброс. При отборах на срезе сопла плотность массового распределения частиц по размерам, то есть производная от функции распределения имела пикообразный характер, похожий на функцию Дирака, и все частицы практически были сосредоточены вблизи математического ожидания. Причём разброс значений среднемассового размера был минимальным, а его абсолютное значение для данного вида топлива составляло величину близкую к 5 микрометрам.



На рис. 3 показано экспериментальное распределение среднemasового размера по длине сверхзвукового сопла.



Зависимость  $d_{43}(\bar{x})$  имела форму кривой насыщения. Правая сверхзвуковая часть этой кривой имела горизонтальный участок, свидетельствующий о том, что все эволюционные процессы с частицами закончились в сверхзвуке. В спектре остался только один размер. После экспериментов были проведены расчёты по программе А.П. Тишина [11]. В результате сравнения с экспериментами они дали хорошее совпадение.

#### Уравнение движения для сверхзвукового потока

Уравнение движения получим из общего уравнения движения Навье-Стокса:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{d\tau} + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} + \rho [\text{rot} \vec{V} \cdot \vec{V}] + \text{grad} p - \frac{4}{3} \mu \text{grad} \text{div} \vec{V} + \mu \text{rot} \text{rot} \vec{V} = 0.$$

Для этого потребуются доказать два утверждения.

Первое, что  $\vec{V} \cdot \text{rot} \text{rot} \vec{V} = \text{rot}^2 \vec{V}$  и второе, что  $\text{rot} \vec{V}$  в сверхзвуковом потоке равен нулю. Это вторая и пятая теоремы о турбулентности [12].

Рассмотрим скалярно-векторное произведение четырех произвольных векторов:  $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}$  и применим к ним тождество Лагранжа:

$$\begin{aligned} (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{d}) &= (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{d}) - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{c}), \\ (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{d}) - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{c}) &= (\mathbf{b} \cdot \mathbf{d})(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{c})(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d}), \\ \text{или: } \mathbf{b} \cdot \mathbf{d}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d}) &= \mathbf{b} \cdot [\mathbf{d}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})]. \end{aligned}$$

Применим перестановку смешанного произведения:

$$\mathbf{b} \cdot \mathbf{d}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d}) = -\mathbf{b}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) \cdot \mathbf{d} + \mathbf{b}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d}) \cdot \mathbf{c}.$$

Воспользуемся свойством дистрибутивности:

$$\mathbf{b} \cdot [\mathbf{d}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})].$$

Если принять в качестве псевдовектора набла  $\vec{\nabla}$  (оператор Гамильтона) вектора  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{c}$  ( $\mathbf{a} = \mathbf{c} = \vec{\nabla}$ ), а в качестве вектора скорости  $\vec{V}$  вектора  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{d}$ , то получим выражение через оператор Гамильтона:

$$\mathbf{b} \cdot [\mathbf{d}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})] = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \vec{V} - \vec{\nabla}^2 \vec{V}),$$

Откуда следует:

$$\vec{\nabla} (\text{grad} \text{div} \vec{V} - \nabla^2 \vec{V}) = (\vec{\nabla} \times \vec{V}) (\vec{\nabla} \times \vec{V}) = \text{rot}^2 \vec{V}.$$

Тогда, раскрывая левую скобку, получаем:

$$\vec{V} \cdot \text{rot} \text{rot} \vec{V} = \text{rot}^2 \vec{V}.$$

Определим какой угол между векторами, для этого перепишем:

$$|\vec{V}| \cdot |\text{rot} \text{rot} \vec{V}| \cdot \cos \varphi_1 = |\text{rot} \vec{V}| \cdot |\text{rot} \vec{V}| \cdot \cos \varphi_2.$$

Так как  $\varphi_2 = 0$  по определению, то

$$\cos \varphi_1 = \frac{|\text{rot} \vec{V}| \cdot |\text{rot} \vec{V}|}{|\vec{V}| \cdot |\text{rot} \text{rot} \vec{V}|}.$$

Но так как  $|\vec{V}|$ ,  $|\text{rot} \vec{V}|$  и  $|\text{rot} \text{rot} \vec{V}|$  не равны нулю, иначе не было бы движения, то  $\cos \varphi_1 \leq 1$ .

Очевидно, что нельзя подобрать взаимную конфигурацию векторов, при которых  $\cos \varphi_1 < 1$ , поэтому  $\cos \varphi_1 = 1$  однозначно равен единице, а  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ . Получается, что вектор  $\vec{V}$  параллелен

лен вектору  $\text{rot} \text{rot} \vec{V}$ .

Теорема № 2 доказана: скорость на кручение - суть квадрат вращения. Теорема справедлива для любого вектора и может считаться теоремой векторного анализа.

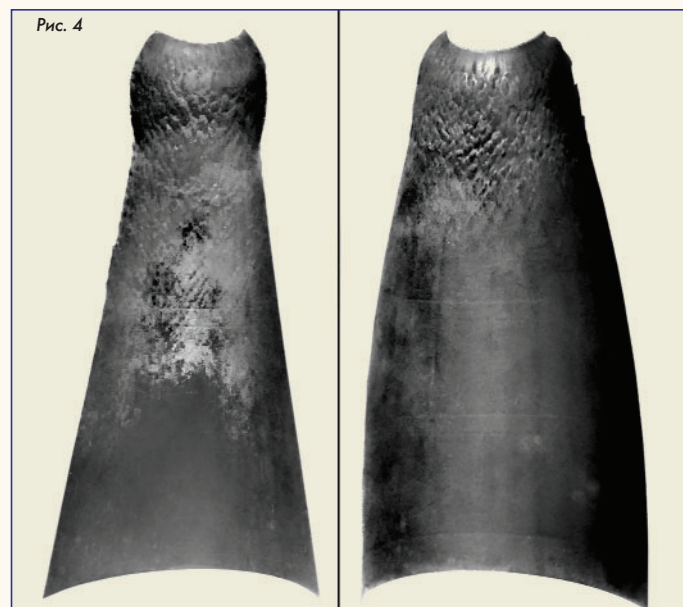
Полученная теорема была использована при преобразованиях и получении зависимости для ротора импульса [13]:

$$\text{rot}^2 \vec{J} = \frac{\vec{J}}{v} (1 - M^2) \text{grad} P.$$

Анализ полученного выражения показывает, что вид режима течения в сопле двигателя не зависит от того, как движется поток: с дозвуковой или со сверхзвуковой скоростью [14]. Режим течения определяется исключительно градиентом давления в потоке: если градиент давления положительный, то турбулентность есть. Если градиент давления отрицательный, то режим течения ламинарный.

Таким образом, сверхзвуковой поток всегда ламинарный. Эти результаты ещё раз доказывают справедливость пятой теоремы турбулентности [12].

Приведём ещё один экспериментальный факт. На модельном двигателе твёрдого топлива было испытано уносимое сопло из полиметилметакрилата. Сопло было спробирировано по линии тока и не предполагалось осаждения частиц на нём. Сопло изнутри обтекал однофазный чистый высокоэнтальпийный газ. Осмотр сопла после испытаний (рис. 4) показал, что его поверхность абсолютно гладкая, практически отполированная.



В сверхзвуковой его части отсутствуют следы уносов от каких-либо вихрей. На этом же рисунке показано коническое сопло после испытаний, проведенных в аналогичных условиях. Его поверхность так же была гладкая. Очевидно, что поток в этой области ламинарный. В связи с тем, что в сверхзвуковом потоке турбулентность отсутствует, а значит ротор скорости либо отсутствует, либо равен нулю, уравнение движения Навье-Стокса преобразуется в ламинарное. При этом вихри будут отсутствовать и тогда уравнение приобретает вид:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{d\tau} = -\text{grad} \left( \rho + \frac{4}{3} v \frac{dp}{d\tau} \right).$$

Это уравнение отличается от идеального уравнения Эйлера правым членом, указывающим на вязкоупругие свойства потока. Именно это уравнение целесообразно использовать для расчёта газового поля сверхзвуковой области течения.

#### Методика расчёта двухфазных течений

Строго говоря, уравнение Навье-Стокса справедливо только для замороженного течения, то есть для случая не реагирующего

газа [15]. Это, в частности, могут быть инертные газы восьмого ряда периодической таблицы Менделеева. Зафиксированным фактом является то, что, как показывают термодинамические расчёты, в сверхзвуковой части сопла течение, как правило, равновесное [15], и химическая реакция полностью завершается. Тогда ламинарное уравнение движения примет следующий вид:

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = -\text{grad} \left( \frac{2u}{k-1} p + \frac{4}{3} v \frac{dp}{d\tau} \right).$$

и будет определять газовое поле.

Предыдущий анализ показал, что в этом газовом поле в случае ламинарного течения будут присутствовать частицы, образованные при дроблении и коагуляции, размер которых соответствует

критическому числу Вебера. Сама задача расчёта сводится к траекторной задаче в ламинарном равновесном газовом поле.

И в заключение: как обойтись с обилием тех монстроидальных методик и программ, которыми нас снабдили классики предыдущего столетия? С уважением! Они на тот момент делали всё правильно, но весьма и весьма нерационально, считая единообразно и дозвуковой поток и сверхзвуковой. По своим программам они автоматически получали правильный результат. При этом, правда, затрачивали колоссальное время на расчёт несуществующих нюансов, которые в итоге получались равными нулю. Им бы надо было отключить отдельные куски программ за ненужностью. Но! Принципиальных ошибок в расчётах они не делали. □

#### Список источников:

1. Ю.М. Кочетков. Дисперсность частиц конденсированной фазы в продуктах сгорания РДТТ // Двигатель. 2001. № 1.
2. Л.Е. Стернин, Б.Н. Маслов, А.А. Шрайбер, А.М. Подвысоцкий. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1980.
3. И.М. Васенин, В.А. Архипов, В.Г. Бутов, А.А. Глазунов, В.Ф. Трофимов. Исследование полидисперсных течений в соплах с учётом вращения частиц. Томск: Изд. томского университета, 1985.
4. А.Д. Рычков. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988.
5. А.Н. Крайко, Р.И. Нигматулин, В.К. Старков, Л.Е. Стернин. Механика многофазных сред. М.: Изд. ВИНТИ. Итоги науки и техники. Том 6. 1972.
6. И.М. Васенин и др. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд. Томского университета, 1986.
7. В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980.
8. А.М. Губертов, В.В. Миронов, Ю.М. Кочетков и др. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твёрдого топлива. М.: Машиностроение, 2004.
9. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Опыты Куренкова и фундаментальные уравнения двухфазной газовой динамики сверхзвуковых сопел // Двигатель. 2015. № 2.
10. А.П. Тишин, Р.И. Хайрудинов. Обобщённые зависимости для определения потерь удельного импульса при неравновесном двухфазном течении в сопле // Изв. Вузов. Авиационная техника. 1972. № 1.
11. А.П. Тишин. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. М.: ВИНТИ АН СССР, 1971.
12. Ю.М. Кочетков, Т.Н. Кравчик, О.М. Подымова. Пять теорем турбулентности и их практические приложения // Вестник машиностроения. 2019. № 7.
13. Ю.М. Кочетков, О.М. Подымова, Н.Ю. Кочетков. Инженерный метод расчёта химически неравновесных процессов // Вестник машиностроения. 2022. № 6.
14. Ю.М. Кочетков, Н.Ю. Кочетков. Турбулентность. Возникновение и область существования // Двигатель. 2025. № 1-3.
15. О.Н. Кацкова. Расчёт равновесных течений газа в сверхзвуковых соплах. М.: Изд. ВЦ АН СССР, 1964.

Связь с авторами: [swgeorgy@gmail.com](mailto:swgeorgy@gmail.com)

### ИНФОРМАЦИЯ. Технология для турбинных дисков

**В** Китае учёные Даляньского технологического университета отрабатывают технологию изготовления турбинных дисков из суперсплавов.

Особенностью этих дисков являются условия их работы: высокие температуры и нагрузки во время полёта. Длительное время в китайском авиационном двигателестроении основные проблемы были в отсутствии передовых технологий как получения материалов, так и изготовления из них турбинных лопаток и дисков.

Китай долгое время сталкивался с трудностями в создании надёжных двигателей для своего истребителя пятого поколения J-20. Двигатели WS-10 имели ограничения, а разработка более мощных WS-15 заняла много времени. Лишь в июле 2023 года прототип J-20 с двумя двигателями WS-15 начал лётные испытания. Это произошло более чем через 10 лет после первого полёта J-20.

И вот специалисты университета разработали технологию быстрого охлаждения сплава диска с помощью равномерного распыления высокоскоростных струй воды, с помощью которых удалось в четыре раза улучшить распределение размеров кри-

сталлических зёрен. При этой технологии скорость охлаждения была в 3,75 раза выше, чем при использовании традиционных методов. В одном из проведённых экспериментов диск, нагретый до 1200 °С, охлаждался со скоростью 673 °С в минуту.

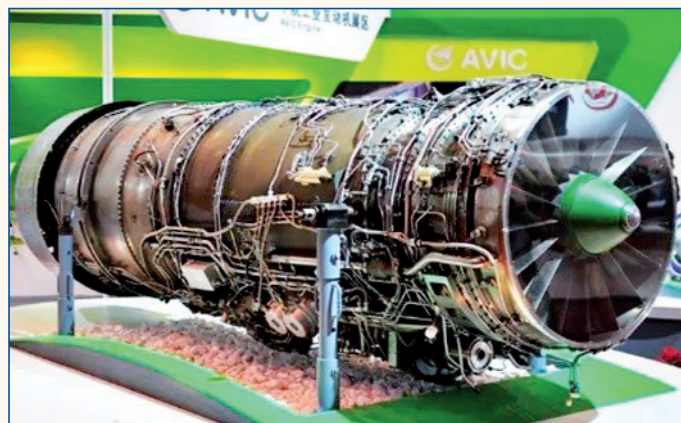
Достигнутый уровень охлаждения знаменует собой важный шаг китайских технологий в области материаловедения и может помочь Китаю сократить технологический разрыв с ведущими странами в разработке авиационных двигателей нового поколения. Теперь очередь за внедрением и практичес-

ким применением этой технологии. Это особенно важно для китайских программ создания как истребителей шестого поколения и гиперзвуковых летательных аппаратов, которые эксплуатируются в условиях крайне высоких тепловых нагрузок.

Ещё одно направление применения этой технологии - создание турбореактивных двигателей комбинированного цикла,

в которых турбинная секция должна выдерживать экстремальные температуры при переходе в прямоточный или гиперзвуковой прямоточный режим.

Вполне возможно, что с успешным применением суперсплава DD6 в двигателе WS-15 и сообщениями о разработке ещё более жаропрочного суперсплава DD9 для будущих двигателей, Китаю удастся продвинуться вперёд по нескольким направлениям: материаловедение, проектирование двигательных установок и высокоточное производство. □







# БАЛЛАСТНАЯ НАГРУЗКА ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Юрий Аркадьевич Ошев, д.т.н.

*Рассмотрена конструкция резистивной балластной нагрузки для системы энергоснабжения ядерной энергодвигательной установки космического аппарата. Конструктивные особенности обеспечивают максимальный двухсторонний энергосброс излучением с температурой на уровне 700 °С мощностью до 250 кВт при минимальной площади менее 3 м<sup>2</sup> и минимальной массе. Балластная нагрузка может быть использована для наземного применения с увеличением эффективности путём конвекции.*

*The design of a resistive ballast load for the power supply system of a spacecraft's nuclear power propulsion system is considered. The design features ensure maximum bilateral heat dissipation by radiation at a temperature of about 700 °C with a power of up to 250 kW, with a minimal surface area of less than 3 m<sup>2</sup> and minimal mass. The ballast load can be used for ground-based applications with increased efficiency due to convection.*

**Ключевые слова:** автономные системы электроснабжения, ядерная энергодвигательная установка космического аппарата, балластная нагрузка для избыточной мощности.

**Keywords:** autonomous electric power supply systems, spacecraft nuclear power propulsion system, ballast load for excess power.

Автономные системы электроснабжения (АСЭС) имеют мощность, незначительно превышающую или равную суммарной мощности потребителей. При повторяющемся разновременном включении и выключении потребителей происходит перестройка режима работы АСЭС. Для некоторых конструкций АСЭС при переходных процессах для сохранения электрических выходных параметров неизменными приходится воспринимать избыточную электрическую мощность АСЭС на омические сопротивления балластной нагрузки (БН). Особую значимость БН приобретает при организации работы ядерной энергодвигательной установки [1], функционирующей по замкнутому термодинамическому циклу с нагревателем - ядерным реактором. Для обеспечения ядерной безопасности БН должна быть в состоянии воспринимать полную электрическую мощность АСЭС. Вариант такой БН приведен, например, в [2].

Основным элементом БН является нагрузочный резистор, который образован двумя друг от друга послойно близко расположенными токопроводящими пластинами. Каждая пластина имеет вырезы с образованием зигзагообразной ленты с параллельными продольными 1, концевыми 2 и поворотными 3 участками (рис. 1).



Рис. 1 Нагрузочный резистор:

1 - параллельные продольные участки пластин; 2 - концевые участки пластин;  
3 - поворотные участки пластин; 4 - проушины подвода / отвода электротока;  
5 - краевые изоляторы; 6 - срединный изолятор;  
7.1 и 7.2 - верхняя и нижняя пластины

Ширина вырезов равна ширине параллельных продольных участков. Концевые 2 и поворотные 3 участки пластин нагрузочного резистора размещены в краевых изоляторах 5. Поперечное сечение поворотных участков 3 значительно превышает поперечное сечение параллельных продольных участков 1, что способствует снижению тепловыделения и температуры разогрева в области фиксации пластин в краевых изоляторах 5. Пластины 7.1 и 7.2 размещаются в изоляторах 5, 6 с зазором, достаточным для термокомпенсации при работе. Пластины 7.1 и 7.2 в поперечном сечении нагрузочного резистора сдвинуты относительно друг друга на ширину выреза (рис. 2).

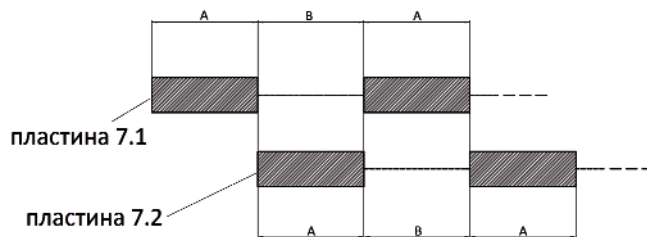
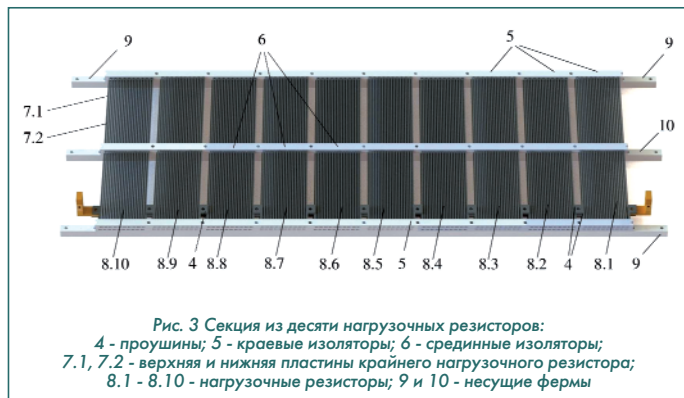


Рис. 2 Поперечное сечение нагрузочного резистора:  
А - ширина параллельных продольных участков пластин;  
В - ширина вырезов между параллельными продольными участками

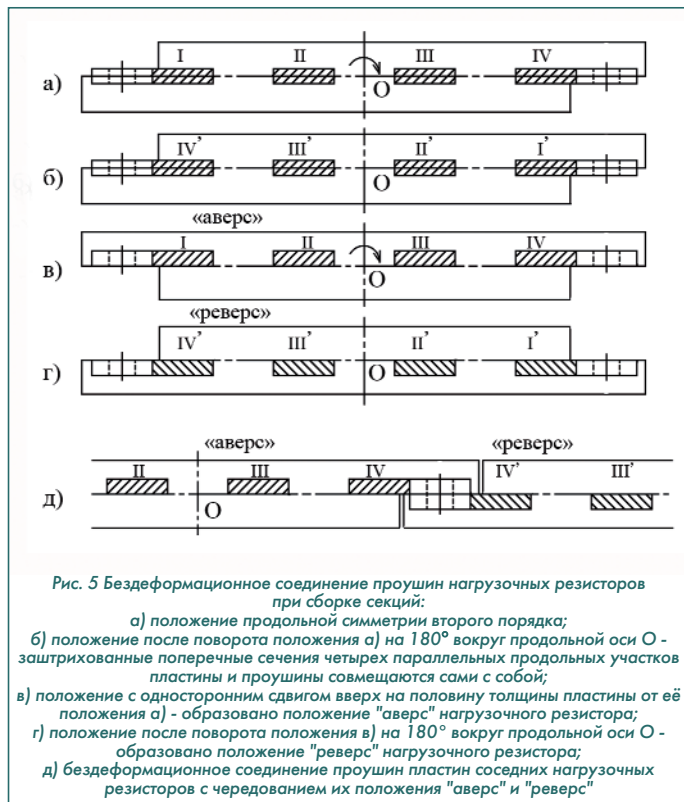
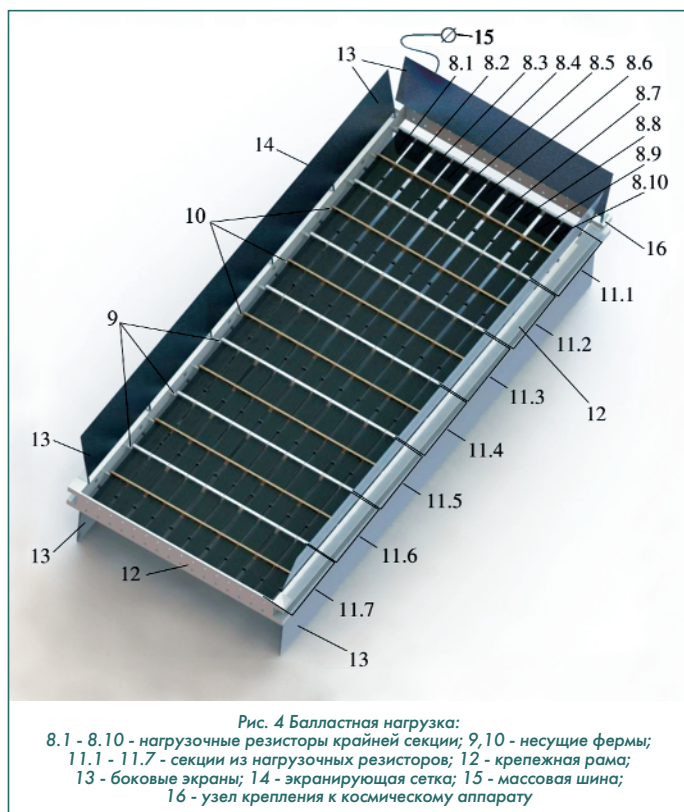
С внешней стороны концевых участков 2 расположены проушины 4 подвода и отвода электротока с отверстием эллипсообразной формы на размер сдвига пластин. Прουшины одного нагрузочного резистора соединяются с проушинами пластин соседнего нагрузочного резистора, с образованием последовательно-параллельного электрического соединения пластин. Перегорание ленты в одной пластине не приводит к выходу из строя нагрузочного резистора. Дублирование элементов значительно повышает надежность функционирования БН.

Объединение краевых 5 и срединных 6 изоляторов нагрузочных резисторов на несущих фермах 9, 10 (рис. 3) образует секцию, например, из десяти нагрузочных резисторов 8.1 - 8.10, соединенных последовательно. Срединные изоляторы 6 применяют в случае значительной протяженности пластин 7.1, 7.2 для увеличения их термомеханической устойчивости.



Объединение несущих ферм 9, 10 секций на крепежной раме 12 (рис. 4) образует БН, состоящую, например, из семи секций 11.1 - 11.7, соединенных параллельно. На крепежной раме 12 проложены коммутационные шины и установлены боковые экраны 13, экранирующая сетка 14 и массовая шина 15. Крепежная рама 12 снабжена узлом крепления 16 к космическому аппарату с возможностью расположения общей приведенной плоскости рамы 12 и секций 11.1...11.7 в меридиональной плоскости на внешней стороне космического аппарата. При необходимости возможна также иная коммутация нагрузочных резисторов и их секций.

Пластины нагрузочных резисторов выполнены из высокотемпературного углерод-углеродного композитного материала (УУКМ) или жесткого хромистого сплава. Для бездеформационного соединения проушин пластин при сборке секции из нагрузочных резисторов к последним применено создание и чередование их положения "аверс" и "реверс". Продольная осевая симметрия второго порядка [3] предполагает, что при повороте вокруг продольной оси на  $180^\circ$  поперечное сечение нагрузочного резистора совмещается само с собой. При сдвиге пластин в одну сторону на половину своей толщины от симметричного расположения у нагрузочных резисторов появляются два разных положения: сдвиг пластин вверх - положение "аверс", после поворота на  $180^\circ$  получается сдвиг вниз - положение "реверс". При объединении нагрузочных резисторов в секцию проушины у соседних резисторов без деформаций соприкасаются друг с другом при условии, что



нагрузочные резисторы объединяют в секцию с чередованием их положения "аверс" и положения "реверс". Для пластин из УУКМ или жестких хромистых сплавов данная особенность устраняет необходимость деформации проушин при сборке секций и возникновение упругих деформационных напряжений, что повышает надежность устройства в целом. На рис. 5 показано бездеформационное соединение проушин соседних нагрузочных резисторов при сборке секций (на примере одного слоя пластин).

По оценкам [2], электрической мощности 250 кВт при напряжении 4500 В соответствует температура излучающей поверхности пластин БН  $\sim 1000$  К ( $727^\circ\text{C}$ ) при двустороннем излучении с площади  $0,96 \times 2,75$  м. Температуростойкость УУКМ более  $2500^\circ\text{C}$ , керамики - более  $1800^\circ\text{C}$ . Запасы по термостойкости материалов дополнительно повышают надежность функционирования БН. Они позволяют в случае выхода из строя даже половины секций перегрузить по мощности остающиеся работоспособными секции БН за счет повышения, в конечном итоге, температуры излучающей поверхности. При использовании в АЭС системы управления с режимом ограничения тока изменение температуры пластин в холодном и в разогретом состоянии не оказывает влияния на рабочий процесс. БН занимает минимально возможную площадь. Пластины образуют "сплошную" тепловыделяющую и излучающую поверхность БН, для которой коэффициент использования площади боковой поверхности приближается к единице.

БН представляет интерес и для наземного применения при использовании высокотемпературных коррозионностойких хромистых сплавов. При этом конструкция БН легко доступна для конвекционного естественного и принудительного охлаждения за счет своей несплошной поверхности. Для унификации конструкции БН возможно применение в некоторых случаях повышающих трансформаторов [4]. В [2] разработан также второй вариант БН для силовых низковольтных систем, с сохранением всех основных особенностей конструкции.

#### Список источников

1. Коротеев А.С. и др. Ядерная энергодвигательная установка космического аппарата // Известия РАН, Энергетика. 2015. № 5. С. 45 - 49.
2. Патент РФ №2 602 837, 2016.
3. Симметрия. БСЭ, 1976, т. 23, с. 391.
4. Ошев Ю.А. Изготовление трансформаторов наименьшей массы // Двигатель. 2024. № 5-6. С. 8-12

Связь с автором: +79194610464



# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## В СОПЛАХ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА И БОЛЕЕ СТРОГОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ВТОРОЙ И ПЯТОЙ ТЕОРЕМ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

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

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

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

*Винтовые течения широко наблюдаются в энергодвигательных установках, в камерах и соплах ракетных двигателей. В авиационных двигателях имеется много вращательных агрегатов, в двигателях специального назначения имеется много поворотов – все это приводит к появлению вращательных движений рабочего тела. В этих конструкциях течения с вращением часто носят характер вторичных течений и поэтому, имея одинаковую физическую основу, тем не менее, они отличаются от закрученных потоков малой интенсивностью вращения. В целях исследования процессов газодинамики и теплообмена во вращающихся внутри двигателя потоках были проведены систематические испытания на модельных установках. Предварительно течения исследовались теоретически. Были доказаны повторно, более строго, вторая и пятая теоремы турбулентности.*

*Screw currents are widely observed in power propulsion systems, in chambers and nozzles of rocket engines. In aircraft engines, there are many rotary units, in special-purpose engines there are many turns – all this leads to the appearance of rotational movements of the working fluid. In these constructions, rotating currents often have the character of secondary currents, and therefore, having the same physical basis, they nevertheless differ from swirling flows by low rotational intensity. In order to study the processes of gas dynamics and heat transfer in streams rotating inside the engine, systematic tests were carried out on model installations. Previously, the currents were studied theoretically. The second and fifth turbulence theorems were proved again, more strictly.*

**Ключевые слова:** турбулентность, вихрь, закрутка, сверхзвуковой поток, модельный двигатель, винтовое течение.

**Keywords:** turbulence, vortex, spin, supersonic flow, model engine, screw flow.

Вращающиеся течения наблюдаются в соплах двигателей, совершающих в процессе полета ракеты вращение вокруг своей оси. При этом угловая скорость вращения ракеты задается в соответствии с циклограммой пуска и может сохраняться постоянной в течении всего полета. Целесообразность введения в движение ракеты вращающей составляющей обусловлена как минимум тремя возможными причинами:

1. Обеспечение стабилизации ракеты во время полета. Вращение придает ракете устойчивое направление, совпадающее с направлением вектора тяги. При этом не требуются дополнительные устройства для управления вектором тяги и приводы к ним. Благодаря снижению пассивной массы органов управления возможно увеличение полезной нагрузки и, как следствие, снижение общей стоимости ракеты.

2. Защита от лазерных пучков, способных повредить оболочку ракеты и нарушить функционирование двигателей и аппаратуры. При вращении пятно лазерного луча, направленного на ракету, "размазывается" по поверхности корпуса, и его энергетическое воздействие резко снижается.

3. Возможность некоторого повышения тяги двигателя путём увеличения давления газа на стенки сопла и добавления центробежной составляющей, направленной перпендикулярно к его поверхности.

При кратковременном вращении ракеты процессы в соплах двигателей носят нестационарный характер. Газообразные продукты сгорания под действием вязких сил увлекаются стенкой сопла и приобретают вращательное движение.

Через некоторое время поток стабилизируется. Устанавливается винтовое течение газов по соплу. Такое течение в отличие от поступательного осесимметричного может приводить к усилению воздействия потока на стенку как конвективной составляющей теплового потока, так и воздействием конденсированной фазы.

Винтовые течения широко наблюдаются и в несимметричных соплах, и в соплах с несимметричными условиями на входе. В этих соплах течения с вращением носят характер вторичных течений и поэтому они, имея одинаковую физическую основу, тем не менее,

отличаются от закрученных потоков малой интенсивностью вращения. Вторичные винтовые течения вялые и не превышают долей оборота в секунду. В то время как вращение потока в закрученных соплах может достигать ощутимых величин.

В целях исследования процессов газодинамики и теплообмена во вращающихся внутри двигателя потоках были проведены систематические испытания на модельных установках, а перед ними – течения исследовались теоретически.

### Механическая форма уравнения энергии

Уравнение энергии [1] для одного килограмма газа между двумя бесконечно близкими сечениями газовой струйки в неподвижной системе координат:

$$dQ - d(Pv) - dL - dL_{Tp} = du + d \frac{W^2}{2} + dz,$$

и в системе координат, движущейся с выбранным элементом газа:

$$dQ = du + Pdv,$$

и вычтем второе равенство из первого:

$$-dL - dL_{Tp} = d \frac{W^2}{2} + dz + d(Pv) - Pdv.$$

Подставляя выражение удельного объёма через плотность ( $v = 1/\rho$ ), получаем:

$$-dL = d \frac{W^2}{2} + dz + \frac{dP}{\rho} + dL_{Tp},$$

это есть механическая форма уравнения энергии, или, что то же самое, уравнение "живых" сил для единичной струйки.

Учитывая, что внешняя работа не совершается, потенциальная энергия весьма мала, а внутренняя работа вязкого трения может быть представлена через дивергенцию, то предыдущая запись упростится и после перехода к градиентам примет вид:

$$\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \operatorname{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} \mu \operatorname{div} \vec{V} = 0.$$

### Доказательство второй теоремы турбулентности

Доказательство основано на преобразовании уравнения Навье-Стокса, которое записывается в векторном виде и преобразуется с помощью формулы Ламба-Громеки к виду:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} + \rho [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] + \text{grad} P + \mu \text{rot rot} \vec{V} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div} \vec{V} = 0.$$

Далее на это уравнение накладывается операция дивергенция и производится сокращение двух членов уравнения:

$$\text{div} \left( \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} \right) + \text{div} \left( \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} \right) + \text{div} (\rho [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}]) + \text{div} (\text{grad} P) + \text{div} (\mu \text{rot rot} \vec{V}) - \text{div} \left( \frac{4}{3} \mu \text{grad div} \vec{V} \right) = 0.$$

Под скобками собираются члены с градиентами, которые в дальнейшем суммарно дают ноль и сокращаются:

$$\text{div} \left( \text{grad} P + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div} \vec{V} \right) + \text{div} (\rho [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}]) = 0.$$

Оставшаяся дивергенция раскладывается по правилу векторной алгебры:

$$\text{div} (\rho [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}]) = \rho \text{div} [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] + [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] \cdot \text{grad} P = 0.$$

Далее каждый член уравнения умножаем скалярно на вектор скорости слева:

$$\rho \vec{V} \text{div} [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] + \vec{V} \cdot [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] \text{grad} P = 0.$$

Правый член пропадает, а левый преобразуется к виду:

$$\text{div} [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] = \vec{V} \text{rot rot} \vec{V} - \text{rot}^2 \vec{V} = 0.$$

После чего теорема о соотношения движений [2] считается доказанной:

$$\vec{V} \text{rot rot} \vec{V} = \text{rot}^2 \vec{V}.$$

### Доказательство пятой теоремы турбулентности

В соответствии с работой [3] представим производную от импульса в следующем виде:

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = (M^2 - 1) \text{grad} P.$$

Далее сделаем преобразование, выделив дивергенцию:

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = \frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} = \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} - \vec{V} \text{div} (\rho \vec{V}).$$

Подставляем последнее уравнение в предыдущее:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \vec{V} \text{div} (\rho \vec{V}) + (M^2 - 1) \text{grad} P.$$

Уравнение Навье-Стокса, записанное для вязкого и сжимаемого случая в общем виде, слева умножим на вектор скорости:

$$\vec{V} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] = -\vec{V} \left( \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \frac{1}{\rho} \text{grad} \mu \text{div} \vec{V} \right) - \frac{\mu}{\rho} \vec{V} \text{rot rot} \vec{V}.$$

Далее, после применения теоремы № 2 и последующих преобразований, получим:

$$\vec{V} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nu \vec{V} \text{rot rot} \vec{V} = -\nu \text{rot}^2 \vec{V}.$$

Далее записываем:

$$\frac{\vec{V}^2}{\rho} \text{div} (\rho \vec{V}) + \frac{M^2 - 1}{\rho} \vec{V} \text{grad} P = -\nu \text{rot}^2 \vec{V},$$

и решаем относительно ротора:

$$\text{rot}^2 \vec{V} = \frac{1 - M^2}{\mu} \vec{V} \cdot \text{grad} P - \frac{\vec{V}^2}{\mu} \text{div} (\rho \vec{V}),$$

где:

$$a^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho}, \quad \partial \rho = \frac{\partial P}{a^2}.$$

После чего, получим:

$$\frac{\vec{V}^2}{\mu} \text{div} (\rho \vec{V}) = -\frac{\vec{V}^2}{\mu a^2} \frac{\partial P}{\partial \tau} = -\frac{M^2}{\mu} \vec{V} \text{grad} P.$$

Откуда:

$$\text{rot}^2 \vec{V} = \frac{1 - M^2}{\mu} \vec{V} \text{grad} P - \frac{M^2}{\mu} \vec{V} \text{grad} P = \frac{\vec{V} \text{grad} P}{\mu} \left( \frac{1 - M^2}{\mu} + \frac{M^2}{\mu} \right).$$

Далее получим окончательно:

$$\text{rot}^2 \vec{V} = \frac{\vec{V}}{\mu} \text{grad} P, \\ \text{rot} \vec{V} = \pm \sqrt{\frac{\vec{V}}{\mu}} \text{grad} P.$$

Извлекая корень, получаем условие существования вихрей и, в целом, вихревых течений, а, значит, и турбулентных течений.

Анализ полученной формулы показывает, что вихрь может существовать только при положительном градиенте давления. В сверхзвуковом потоке градиент всегда отрицательный, дискриминант также отрицательный и действительных корней нет. Положительный градиент в сверхзвуковом сопле (именно в сопле, а не в потоке) может быть только в скачках уплотнения, но это уже звуковые потоки.

Таким образом, ещё раз доказана пятая теорема турбулентности об её отсутствии в сверхзвуковом потоке.

### Экспериментальные исследования на соплах с закруткой потока в камере

Экспериментальные исследования проводились на твердо-топливных модельных установках со сверхзвуковыми профилированными и коническими соплами (рис. 1, 2). Сопла были изготовлены из фторопласта и в процессе работы двигателя уносились. По отпечаткам на соплах после испытаний производился анализ на предмет присутствия турбулентных течений. В составе двигательных установок в камере был завихритель импеллерного типа (рис. 3). Подбором геометрических параметров завихрителя обеспечивалась необходимая закрутка потока, которая условно генерировала вращающиеся потоки с частотой  $n = 40$  об/с.

Рис. 1

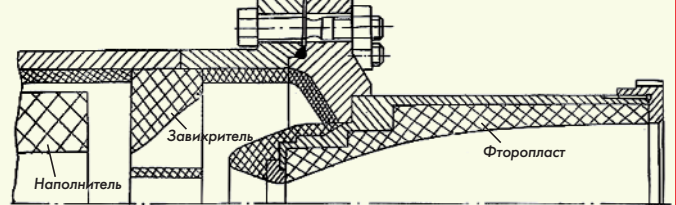
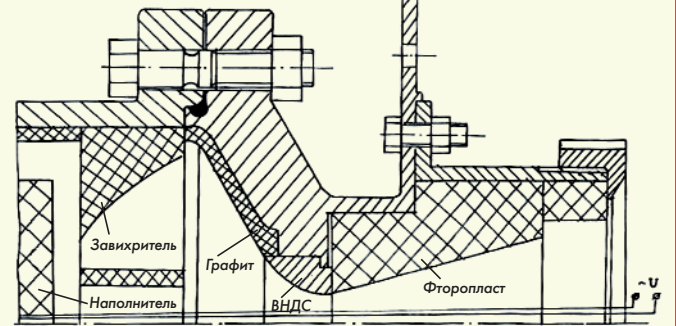


Рис. 2



Испытания проводились с использованием модельного твердого топлива, содержащего добавки металлического алюминия в количестве 18 % от общей массы топлива. Давление в камере сгорания при испытаниях составляло 6,4 МПа.

Рис. 3





### Результаты испытаний

В процессе экспериментов поток приобретал винтовое направление, что отразилось на отпечатках, образовавшихся на поверхности конической дозвуковой части сопла Лавала (рис. 4).

Поверхность после испытаний была покрыта слоем частиц конденсированной фазы, слившимися в пленку. При внимательном рассмотрении можно выделить характерные направления спиралеобразных сгущений, похожих на эвольвенты. Сгущения плавно под постоянным углом входят по поверхности вкладыша к горловине сопла. Все наблюдения говорят о присутствии турбулентных течений.

Результаты исследования разгара закритической части сопла показали, что вкладыш критического сечения в процессе эксперимента не разгорался. Закрутка потока привела к изменению картины течения в трансзвуковой области. В результате экспериментов было обнаружено качественное отличие в картине разгара по сравнению с осесимметричным течением продуктов сгорания по соплу. Картина получалась перекошенная (рис. 5) относительно осесимметричной.

При этом сохранились все три характерные зоны:

1. Зона вихрей Тейлора-Гертлера. Она имеет наклонный характер - направление борозд повернуто на угол равный  $10^\circ$ . Борозды по сравнению с осесимметричным натеканием более удлиненные с ярко выраженными границами очертаниями. Очевидно, что формирование продольных вихрей происходит вдоль вектора основного течения, которым в данном случае является вектор винтового течения, сформировавшегося за завихрителем и претерпевшем изменения направления движения по камере и горловине сопла.

2. Зона компактных жгутов сформирована непосредственно за зоной продольных вихрей в области выполаживания контура. Эта зона по размерам соизмерима с предыдущей и отличается от аналогичной в ассиметричном случае протяженностью и характерным скосом, обусловленным винтовым течением.

3. Зона волн Маха в данном случае выражена слабо, хотя и присутствуют в виде ромбовидных следов на поверхности.

Количественный анализ результатов показал, что распределения уносов материала по длине сопла носят аналогичный характер и принципиально ничем не отличаются от осесимметричного случая.

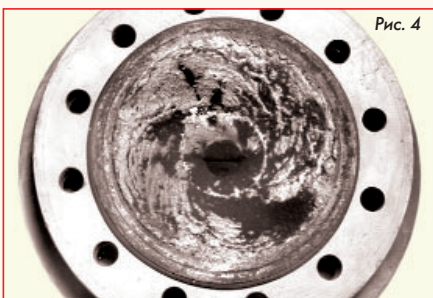


Рис. 4



Рис. 5

### Влияние вращения на разгар профилированного сопла

На модельной установке испытывалось сопло с профилированной сверхзвуковой частью. Профиль сопла был определен методом характеристик [4] по второй линии тока и имел начальные параметры вида:  $Mo = 3,393$ ;  $\kappa = 1,15$ . Диаметр критического сечения сопла равнялся  $d_{кр} = 22$  мм. По расчётам двухфазных течений было установлено, что на концевую часть сопла должна выпасть конденсированная фаза.

На фотографии (рис. 6) представлено сравнение разгоревшихся профилированных сопел.

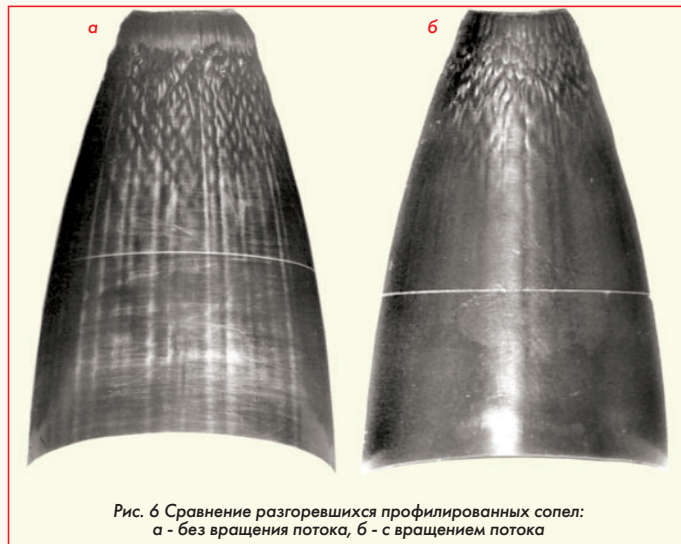


Рис. 6 Сравнение разгоревшихся профилированных сопел: а - без вращения потока, б - с вращением потока

Видно, что при появлении вращения (рис. 6,б) уменьшается рельефность разгара, т.е. поток в случае с вращением более однородный. Зона ячеистых уносов в трансзвуковой области уменьшается по длине. Характерные борозды в области развитого сверхзвукового течения постепенно исчезают. Увеличивается область гладкой поверхности в концевой части сопла. Видно, что в области развитого сверхзвукового течения поток ламинарный.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно заключить, что завихренность проявляется только в дозвуковых и трансзвуковых областях. В сверхзвуковых областях она не проявляется. Течение сверхзвуковых потоков всегда ламинарное.

### Перечень источников

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991.
2. Кочетков Ю.М., Кравчик Т.Н., Подымова О.А. Пять теорем турбулентности и их практические приложения // Вестник машиностроения. 2019. № 7.
3. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Пять теорем как инструмент глобального преобразования уравнений сохранения в целях разработки новых подходов к вычислительной газовой динамике // Двигатель. 2019. № 4.
4. Д.А. Мельников, У.Г. Пирумов, А.А. Сергиенко и др. Руководство для конструкторов по проектированию осесимметричных круглых сопел реактивных двигателей. М.: ГОНТИ-8, 1964.

Связь с авторами: [swgeorgy@gmail.com](mailto:swgeorgy@gmail.com)

## ИНФОРМАЦИЯ. Новый магнитоплазменный ускоритель

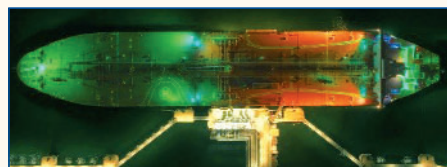
Учёные из Троицкого института "Росатома" сделали очередной шаг в разработке нового ракетного двигателя с магнитоплазменным ускорителем.

Этот, пока ещё лабораторный прототип использует электромагнитные поля для ускорения ионов водорода до очень высоких скоростей, что позволяет получить значительные значения тяги и импульса. Средняя мощность двигателя в импульсно-пери-

одическом режиме достигла 300 кВт.

Помимо применения этого ускорителя в космических исследованиях, эта технология может найти применение и в других областях науки и техники: в материаловедении для создания нанодисперсных порошков и новых материалов; в энергетике для разработки эффективных и безопасных источников энергии, что является актуальной задачей в условиях глобального изменения кли-

мата; в решении экологических проблем при очистке сточных вод и утилизации отходов путём разложения плазмой токсичных веществ и загрязнителей.



## ОРУЖИЕ

## XX ВЕКА

Вячеслав Фёдорович Рахманин

Оружие как средство самозащиты или нападения является неотъемлемым атрибутом в жизни человеческого общества во все времена. Палка в руках первобытного человека была одновременно и орудием труда, и его оружием. В борьбе за выживание человек совершенствовал как свои орудия труда, так и вооружение. Наличие оружия создавало у человека чувство безопасности и одновременно добавляло ему агрессии. После объединения людей по родовому и племенному признаку вооружённые конфликты приобрели коллективный характер. Переход человеческого общества к следующей организационно-экономической формации - государственному строю - привёл к созданию вооружённых формирований на постоянной основе - к профессиональной армии, которая либо совершала агрессию, либо оборонялась от нападающей стороны. Война стала наиболее острой формой разрешения возникших политико-экономических противоречий и территориальных претензий путём вооружённого насилия. Вооружение армии стало одной из первых и постоянной заботой государства, оружие принимало всё более совершенные формы. Вначале это была боевая дубина, затем меч и щит, вслед за этим появились средства поражения противника на расстоянии - праща, металлический дротик, затем лук со стрелами, различные катапульты, арбалеты и другие подобные устройства. Появление пороха и, следовательно, огнестрельного оружия привело к революции в ведении военных действий и созданию колониальных империй.

Огромное значение в совершенствовании вооружения во все времена имел научно-технический прогресс, причём его развитию зачастую способствовала постоянная потребность в создании новых видов оружия. Практически каждая война с участием развитого в научно-техническом отношении государства интенсифицирует разработку и применение новых вооружений. И чем крупнее военный конфликт, тем выше вероятность появления совершенно новых видов оружия, не применявшихся до тех пор. Так, Крымская война (1853 - 1856 гг.) между Россией и коалицией Великобритании, Франции и Турции закончилась поражением России, причём победу коалиции во многом обеспечило применение нарезного стрелкового оружия и одетые в броню корабли с паровыми двигателями, чего не было у России.



Французский паровой панцирный батарейный броненосец La Gloire

В XX веке произошли две мировые войны и в первой из них (1914 - 1919 гг.) в армиях воюющих стран появились качественно новые виды вооружений - пулемёт, танк, бронемашина, аэроплан, подводная лодка.



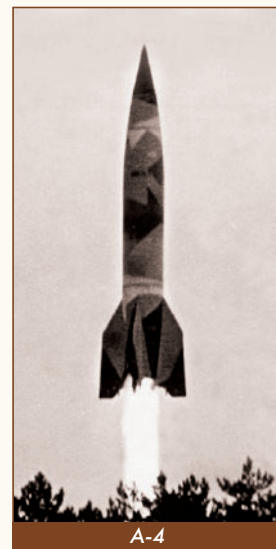
Российский Илья Муромец

Во Второй мировой войне (1939 - 1945 гг.) наряду с появлением усовершенствованных ранее известных вооружений: ручной стрелковый автомат, самоходная артиллерийская установка, мобильная реактивная установка залпового огня, функциональное разделение авиации на истребительную, штурмовую, фронтовые бомбардировщики и бомбардировщики дальнего действия, авианосцы - следует особо выделить появление качественно нового вооружения - атомную бомбу и жидкостную ракету дальнего действия.

Атомная бомба и жидкостная ракета дальнего действия во Второй мировой войне себя только обозначили, но появление ядерного оружия, а затем межконтинентальных баллистических ракет (МБР) кардинально изменили военно-стратегическую ситуацию в мире. Ни одно из крупнейших открытий прошлого в сфере вооружения не оказывало такого воздействия на всю международную политику, как повлияло на неё появление на вооружении противостоящих сторон ядерного и ракетного оружия.

Оба вида вооружений стали результатом длительной, наукоёмкой и дорогостоящей работы выдающихся учёных и инженеров. Разработка нового оружия перешла из технико-производственной сферы в научно-технологическую с преобладанием научного вклада.

Всемирная история развития науки и техники показывает, что наибольший прогресс происходит в области разработки новых вооружений и это является могучим стимулом для развития смежных отраслей.



А-4



В XX веке для получения качественно нового оружия понадобились огромные затраты на проведение глубоких научных исследований во многих фундаментальных науках и создание новых научных направлений, потребовалась кооперация научных и промышленных центров с хорошо спланированной работой. Такая организация работ, как и огромное финансовое их обеспечение, под силу только государству, которое и является заказчиком разработки и производства всей военной техники.

Совершенствование боевых характеристик оружия сказывалось существенным образом на количестве воинских потерь в процессе боевых действий. На протяжении длительного исторического периода в результате происходящих войн человеческие жертвы имелись только среди непосредственно участвующих в боях, причём в достаточно ограниченном количестве. Так, в Тридцатилетнюю войну 1618 - 1648 гг. численность погибших в боях составила около 600 тыс. человек, в Семилетнюю войну 1756 - 1763 гг. - около 500 тыс. человек, в Крымскую войну 1853 - 1856 гг. - 309 тыс. человек, в Русско-Японскую войну 1904 - 1905 гг. - 139 тыс. человек. Первая мировая война обошлась человечеству в 9,4 млн утраченных жизней, причём впервые в истории войн кроме погибших в сражениях лишились жизни около 500 тыс. мирных жителей. Это стало следствием нанесения ударов по населённым пунктам авиацией и дальнобойной артиллерией. Во Второй мировой войне общие потери среди военнослужащих в результате военных действий составили более 27 млн человек. Потери гражданского населения в годы этой войны превышают 15 млн человек, т.е. составляют больше половины числа погибших военнослужащих. В это количество включены погибшие от авиабомбардировок промышленных многонаселённых городов и обстрела дальнобойной артиллерией блокадного Ленинграда, осаждённых Одессы и Севастополя, в результате уличных боёв в Сталинграде, а также при обороне и последующем освобождении многочисленных городов на территории СССР, при обстреле ракетами ФАУ-2 Лондона и других европейских городов, при ковровых бомбардировках территории Германии авиацией США и Великобритании, при взрыве атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки. В число погибших включены казнённые и умершие в фашистских концлагерях, а также в результате геноцида и репрессий против участников сопротивления и партизанского движения.

Однако жестокие уроки Второй мировой войны не оказали должного воздействия на политических лидеров стран, мало пострадавших в процессе самой кровопролитной и разрушительной войны в истории человечества. Уже в 1946 г. появился призрак Третьей мировой войны, которая при монопольном наличии ядерного оружия у США могла до 1950 г. начаться в одностороннем порядке, а с 1950 г., после появления ядерного оружия у СССР, стать двухсторонней ядерной войной. Нарастающее с каждым годом количество ядерных боезарядов и совершенствование средств их доставки на территорию вероятного противника создавало возможность полного уничтожения целых государств. Учитывая стратегию ядерной войны - внезапное нападение и уничтожение военно-промышленного потенциала противостоящей стороны путём нанесения ядерных ударов по промышленным городам, политическим центрам и оборонным объектам с ядерным вооружением, эпицентр людских потерь переместится из фронтовой полосы противостояния войск в тыловые районы воюющей стороны. В результате таких ударов армия вероятного противника потеряет боеспособность, а массовые жертвы среди гражданского населения приведут к падению морального духа и способности народа к сопротивлению. Военные аналитики в начале 70-х годов прогнозировали, что в случае возникновения Третьей мировой войны потери среди гражданского населения в десятки раз превысят потери военнослужащих в ходе ведения боевых действий. Применение обеими противодействующими сторонами всего накопленного вооружения станет ядерным апокалипсисом. В такой войне победитель мало чем будет отличаться от побеждённого, а, вернее, победителя не будет. Интересно, по-моему, прогноз, на итоги будущей войны Альберта Эйнштейна. Когда его спросили,

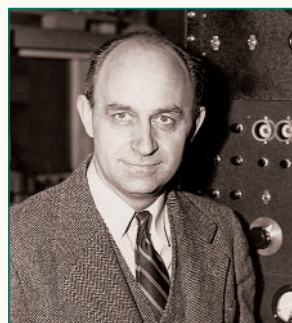
какое оружие будет применено в Третьей мировой войне, он ответил, что этого он не знает, а вот в последующей за ней войне, с его точки зрения, единственным оружием будет каменный топор.

Учитывая значимость для жизни человеческого общества создания атомной бомбы и межконтинентальной баллистической ракеты, сделаем краткий экскурс в историю появления каждого из этих стратегических вооружений.

### История создания атомной бомбы

С первой половины XX века выдающиеся учёные-физики в разных странах вели теоретические и экспериментальные исследования в области получения энергии при расщеплении атомного ядра. Свои научные достижения они опубликовывали в научных журналах, делали доклады и делились информацией на международных конференциях и конгрессах. В середине 30-х годов физики по совокупности проведённых исследований и полученных материалов вплотную приблизились к созданию технологии получения атомной энергии при расщеплении ядра урана. Однако после прихода к власти в Германии национал-социалистов во главе с А. Гитлером и провозглашением ими реваншистской политики появилась реальная опасность, что научные достижения в области ядерной физики могут быть использованы в Германии для получения боезаряда нового вида. В качестве превентивной меры на одной из международных научных конференций по ядерной физике учёные разных стран взяли на себя обязательство прекратить публикации о своих достижениях в этой области науки.

А вскоре европейские физики-ядерщики вынуждены были эмигрировать в США либо опасаясь преследования фашистов по национальному признаку, либо не желая работать в гитлеровской Германии над созданием ядерного оружия. Так, в конце 30-х годов в США собралась группа выдающихся физиков того времени: Лео Силлард, Энрико Ферми, Джеймс Чедвик, Карл Андерсон, Эрнест Лоуренс и др.

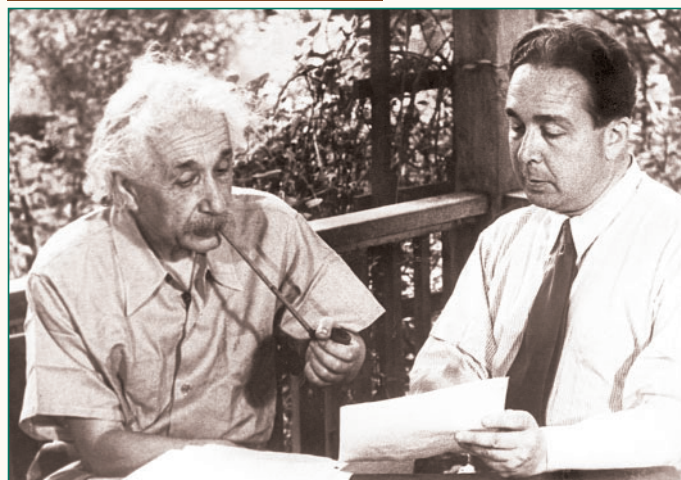


Энрико Ферми



Эрнест Лоуренс

С целью опередить разработку атомной бомбы в Германии Лео Силлард в августе 1939 г. убедил Альберта Эйнштейна, проживающего в это время тоже в США, подписать обращение группы физиков к президенту США Ф. Рузвельту с призывом уделить



Альберт Эйнштейн и Лео Силлард

внимание исследованиям в области работ по получению небывало мощного боезаряда. Президент США отнёсся к этому сообщению с некоторым сомнением, но всё-таки распорядился сформировать Урановый комитет во главе с руководителем Бюро стандартов Л. Бриггсом.

Малосведущий в ядерной физике Л. Бриггс с недоверием отнёсся к обещаниям ученых создать ядерное оружие. Со скептицизмом к такому предложению отнеслись и в Комитете начальников штабов армии США, хотя и согласились выделить средства на проведение исследований.

Исходя из необходимости интенсифицировать работы в этом направлении, Ф. Рузвельт в июне 1940 г. назначил В. Буша, президента Института Карнеги, руководителем правительственной программы научно-исследовательских работ по проблеме использования атомной энергии.

В этот же период времени, в середине 1940 г., эмигрировавшие германские ученые-физики О. Фриш и Р. Пайерле обратились к правительству Великобритании с меморандумом "О создании "супербомбы", основанной на ядерной цепной реакции в уране", в котором было показано, что для создания ядерной бомбы потребуется не тонны, а 5...10 кг обогащенного урана, и при интенсивной работе над этим проектом для получения положительного результата потребуется около 2 - 3 лет. В заключении было высказано предположение, что в Германии уже ведутся работы по созданию такой "супербомбы". Поскольку экономические и промышленные ресурсы Великобритании, находящейся в состоянии войны с Германией, не позволяли рассчитывать на достижение успеха в решении этого наукоёмкого проекта, английское правительство в феврале 1941 г. ознакомило с указанным меморандумом своих американских коллег.

В июне 1941 г. в США было организовано Управление по координации научно-исследовательской деятельности, которое возглавил В. Буш, доложивший в октябре 1941 г. Ф. Рузвельту о научно-технических достижениях в области создания урановой бомбы и свои предложения о проведении дальнейших практических работ. В начале декабря 1941 г. в США было принято решение о выделении крупных финансовых средств на разработку и производство атомной бомбы.

Весной 1942 г. научным руководителем работ по созданию атомной бомбы был назначен Р. Оппенгеймер, предоставивший вместе с В. Бушем в марте 1942 г. президенту США доклад, в котором утверждалось, что бомбу можно изготовить в 1944 г., а её мощь и военно-политическая значимость в сравнении со всеми остальными вооружениями оправдывает все финансовые и ресурсные затраты. По предложению В. Буша практическое выполнение работ по проекту было возложено на армию и военное министерство США. Обязанности непосредственного руководителя программы создания атомной бомбы возложили на ту пору полковника Л. Гровса.

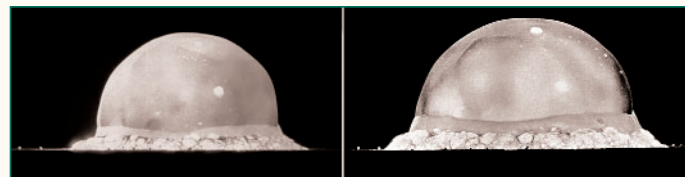


Джеймс Чедвик и Лесли Гровс

Так в августе 1942 г. появился объединяющий все работы по ядерной физике в США "Манхэттенский проект". Для его осуществления в пустынной части штата Нью-Мексико близ посёлка Лос-Аламос была создана промышленно-лабораторная зона повышенной секретности, где под научно-техническим руководством Р. Оппенгеймера работало свыше шести тысяч человек, включая учёных-ядерщиков США и эмигрантов из ряда европейских стран, в том числе 12 нобелевских лауреатов.

В декабре 1942 г. в г. Чикаго под руководством Э. Ферми был запущен первый в мире экспериментальный ядерный реактор. Получив в середине 1943 г. информацию о пуске реактора Э. Ферми, И.В. Курчатов писал, что это "сообщение о событии, которое нельзя оценить иначе, как крупнейшее явление в мировой науке и технике". Вслед за экспериментальным реактором в г. Хэнфорд были построены промышленные реакторы, которые начали нарабатывать плутониевое топливо для первых ядерных бомб. Все работы велись в высочайшем темпе. Движимым мотивом такой спешки являлось поставленная задача изготовить бомбу до окончания войны с Японией, т.к. война с Германией по прогнозам военных специалистов могла быть успешно завершена до фактического изготовления и испытания первого образца атомной бомбы. Так и получилось.

Первый в истории человечества взрыв боезаряда, созданный на новых физических принципах, состоялся в пустыне штата Нью-Мексико 16 июля 1945 г. и по разрушающей силе превзошёл все самые смелые ожидания как специалистов-физиков, так и представителей армии США.



Кадры первого взрыва через 0,016 и 0,025 секунд...

Но о факте проведения и результатах этого опытного взрыва держалось в секрете. Для получения ожидаемых военно-политических дивидендов требовалась публичная демонстрация небывалой мощности нового американского оружия. И фактически для этой цели были сброшены первые атомные бомбы на японские города Хиросима (6 августа 1945 г.) и Нагасаки (9 августа 1945 г.).

По данным советской разведки американское правительство при реализации программы создания атомной бомбы пошло на государственное планирование работ и затратило на разработку и производство ядерного оружия более двух миллиардов долларов, а в проекте занято было в общей сложности более ста тридцати тысяч человек.

Советские военные историки считали, что стратегической необходимости в тот период войны с Японией в нанесении ударов атомными бомбами, тем более по таким городам, как Хиросима и Нагасаки, у американского командования не имелось. Гибель со-



...через 10 секунд...



...через 15 секунд



тен тысяч жителей этих городов послужила демонстрацией силы нового американского оружия массового уничтожения. Правящие круги США укрепляли своё международное значение на основе монопольного владения оружием небывалой разрушительной силы. Это были первые аккорды прелюдии к предстоящей "холодной войне" с СССР.

Теоретические работы по получению атомной энергии велись и в СССР. В 30-е годы этим занимались в Радиовом институте под руководством академика В.Г. Хлопина, в институте химической физики с участием академика Н.Н. Семёнова. В эти годы получили известность своими теоретическими работами физики А.Ф. Иоффе, А.М. Алиханов, И.К. Кикоин, И.П. Курчатов, Л.А. Арцимович, К.А. Петржак, Г.Н. Флёрв, Ю.Б. Харитон, Я.Б. Зельдович и др. Однако после прекращения публикаций в зарубежных научных журналах статей по тематике получения атомной энергии интенсивность работ советских физиков заметно снизилась. Они решили, что "молчание" зарубежных коллег является следствием потери интереса к этой проблеме. Появились сомнения в возможности практической реализации теоретических исследований по получению энергии при расщеплении атомного ядра. Тем не менее Комиссия АН СССР по изучению проблем атомной энергии под председательством академика Хлопина рекомендовала отслеживать научные публикации западных специалистов по этой проблеме. Эти рекомендации послужили основанием руководству Отделения научно-технической разведки НКВД дать указание своим резидентам в Германии, Великобритании и США собирать информацию по проблеме атомной энергии. Несмотря на снижение интереса к этой проблеме в СССР, некоторые физики продолжали свои работы. Так, сотрудники Ленинградского физико-технического института И.В. Курчатов, Г.Н. Флёрв и К.А. Петржак обнаружили реакцию спонтанного деления ядра урана, а в 1939 г. Ю.Б. Харитон и Я.Б. Зельдович установили возможность осуществления цепной реакции деления ядер урана.



Г.Н. Флёрв

К.А. Петржак

Я.Б. Зельдович



И.В. Курчатов и Ю.Б. Харитон

В октябре 1940 г. сотрудники Харьковского физико-технического института В.А. Маслов и В.С. Шпинель подали заявку на изобретение "Об использовании урана в качестве взрывчатого и отравляющего вещества". Предложенная ими схема конструкции урановой бомбы была практически не пригодной для реализации, но она стала первым официальным предложением в нашей стране принципиальной конструкции ядерного боезаряда. Эта же заявка послужила основанием для докладной записки в президиум Академии на-

ук, в которой предлагалось интенсифицировать работы по "урановой проблеме" и "по примеру заграницы засекретить подобные работы". После этого Академия наук предложение харьковских физиков направила в Государственную комиссию по военно-промышленным исследованиям, которая переправила эти материалы в отдел изобретений Наркомата обороны, где предложения были признаны преждевременными и научно не обоснованными.

Отдельные, не объединённые в единую научно-техническую программу работы советских физиков не могли привести к получению практических результатов. Да и маститые учёные из руководства Академии наук и НИИ без особого энтузиазма отнеслись к предложению форсировать работы по урану. Президент Академии наук А.Ф. Иоффе считал, что *"вряд ли можно ожидать в ближайшем будущем практической отдачи от деления урана. [...] О создании уранопроизводящей индустрии говорить рановато"*. Директор Радиового института академик В.Г. Хлопин в апреле 1941 г. писал: *"Положение с проблемой урана в настоящее время таково, что практическое использование внутриатомной энергии, которая выделяется в процессе деления его атомов под действием нейтронов, является более или менее отдалённой целью, к которой мы должны стремиться, а не вопросом, сегодняшнего дня. [...] До настоящего времени нигде в мире ещё экспериментально осуществить цепную реакцию распада урана не удалось, однако по поступающим к нам сведениям, над этим вопросом усиленно работают в США и Германии"*. Далее, анализируя возможность практического применения внутриатомной энергии, он отмечает, что её *"целесообразно было бы использовать для приведения в действие двигателей, например, для самолётов или других целей, нежели взамен взрывчатых веществ"*.

Такое отношение в СССР к "урановой проблеме" сказывалось и на объёмах добываемых содержащих уран солей. Так, на весь 1941 г. плановое задание по их добыче составляло 0,5 т, в это же время в остальном мире ежегодная добыча металлического урана суммарно составляла 250...275 т.

Начавшаяся в июне 1941 г. война с фашистской Германией практически приостановила все работы по изучению "урановой проблемы". НИИ и другие научно-промышленные организации из западной части СССР, включая Киев, Харьков, Ленинград, Москву были эвакуированы в глубь страны, некоторые учёные-физики ушли добровольцами на фронт, остальные были привлечены к работам по совершенствованию существующего вооружения и военной техники. Работы по "урановой проблеме" с началом войны были свёрнуты. Война требовала использования научных достижений для решения оборонных задач сегодняшнего дня, а не разработки хотя и "супероружия", но без конкретного срока его получения.

Возобновление в СССР работ по атомной энергии началось в результате получения по каналам внешней разведки сведений о проведении в США и Германии интенсивных работ по созданию атомной бомбы. Эти материалы, получаемые в течение более 10 месяцев от зарубежных информаторов, прочно оседали в сейфах Управления внешней разведки. Основными "поставщиками" информации были немец Клаус Фукс и итальянец Бруно Пантекорво. Коммунисты по убеждению, они добровольно, по собственной инициативе стали агентами советской разведки. После накопления нескольких сотен листов полученной и переведённой на русский язык информации Л.П. Берия 12 марта 1942 г. представил Сталину доклад о проводимой за рубежом работах в области атомной энергии. Ни докладчик, ни его слушатель не разбирались в изложенных в материалах разведки физических терминах, схемах, формулах, но обильное количество материалов и важность их научно-технического содержания вызвали к ним повышенный интерес. В заключение доклада Берия просил разрешения ознакомить наших учёных-физиков с этой полученной агентурным путём информацией для оценки её полезности. Сталин разрешил, но оговорил, что привлекаемые для этой цели учёные должны дать оценку персонально и независимо друг от друга.

Для оценки научной значимости полученных материалов в кабинет начальника внешней разведки НКВД были приглашены ака-

демик Л.Ф. Иоффе, его молодые ученики И.В. Курчатов, А.И. Алиханов, И.К. Кикоин и академик П.Л. Капица. Иоффе и его ученики независимо друг от друга оценили полученную информацию об атомных исследованиях в США как огромную научную ценность и высказались о необходимости начать работы по созданию атомной бомбы в СССР. Капица высказался менее определённо. Он считал, что создание атомной бомбы является огромной научно-технической задачей, решение которой возможно только совместными усилиями наших физиков и учёных США и Великобритании, где повсюду фундаментальные исследования по атомной энергии.

В развитие доклада Сталину о работах за рубежом по созданию атомной бомбы, в мае 1942 г. уполномоченный ГКО по науке С.В. Кафанов собрал совещание, в котором приняли участие А.Ф. Иоффе, В.И. Вернадский, В.Г. Хлопин, Г.Н. Флёров и П.Л. Капица. В результате обсуждения полученных сведений было составлено и направлено в ГКО письмо о необходимости создания в СССР научного центра по проблеме атомного оружия.

И.В. Сталин серьёзно отнёсся к полученной информации и назначил куратором урановой проблемы заместителя председателя ГКО В.М. Молотова, а практическое руководство работами возложил на заместителя председателя Совнаркома М.Г. Первухина. Первым шагом вновь назначенных кураторов стало представление в сентябре 1942 г. на утверждение И.В. Сталину проекта распоряжения ГКО "Об организации работ по урану", которое обязывало Академию наук и её президента академика А.Ф. Иоффе возобновить работы по исследованию возможности получения энергии при расщеплении ядра урана с конечной целью создания боезаряда. Этим распоряжением предписывалось "организовать при Академии наук специальную лабораторию атомного ядра".

Фактически руководитель этой лаборатории становился научным руководителем работ по созданию в СССР ядерного боезаряда со всей вытекающей из этого назначения ответственностью. Президент Академии наук А.Ф. Иоффе и его академическое окружение из среды физиков-ядерщиков предпочли уклониться от ответственности за решение научно-технической проблемы, успешное осуществление которой было далеко не ясно, а во время войны провал такого задания мог стоить свободы, а то и жизни его руководителя. На должность руководителя лаборатории был рекомендован учёный-ядерщик, доктор технических наук И.В. Курчатов. Предложение назначить на столь ответственную должность неизвестного в правительственных кругах человека вызвало у И.В. Сталина сомнения, но В.М. Молотов и А.Ф. Иоффе охарактеризовали Курчатова как молодого, энергичного учёного, обладающего высокими организаторскими и научными способностями. Так Курчатов по распоряжению ГКО в феврале 1943 г. возглавил спецлабораторию, получившую в последствие известность как "Лаборатория № 2 АН СССР". Тогда же было принято решение сделать вопросы изучения атомной проблемы приоритетными в деятельности внешней разведки НКВД. Нарком НКВД Берия был назначен заместителем Молотова по обеспечению наших учёных информацией, получаемой от зарубежных агентов. К изучению добытых разведкой материалов были допущены Курчатов, Иоффе, Алиханов и Кикоин. Полученные научно-технические сведения Курчатов, как руководитель лаборатории, в собственном изложении, без ссылки на их происхождение передавал остальным сотрудникам для использования в работе.

Вскоре И.В. Курчатов представил на утверждение В.М. Молотову и М.Г. Первухину план, в котором предусматривалась организация расчётно-теоретических работ по обоснованию и проектированию атомного боезаряда, а также проектирование цеха для получения тяжёлой воды, получения на опытной установке 500 кг металлического урана с последующей постройкой цеха для его производства в необходимых количествах, поставка десятков тонн графитовых блоков. Планировалось также расширение геологоразведочного поиска залежей урановых и радиоактивных элементов.

Как видно из приведённого перечня, этот план нельзя назвать даже фундаментом предстоящих работ, так, первые намётки бу-

дущего грандиозного строительства. Но большинство работ и из этого плана осталось на бумаге. Если к расчётным работам были привлечены известные Курчатову физики-ядерщики, работу которых консультировали А.Ф. Иоффе, Л.Д. Ландау и П.Л. Капица, то работы по промышленному изготовлению оборудования не выполнялись. Руководители промышленности всех уровней, от наркома до директора завода несли личную ответственность за ежесуточное выполнение плана по военным заказам, работы для "науки", а так в целях секретности назывались заказы по атомному проекту, считались второстепенными с соответствующим к ним отношением. Ни подписи Молотова, ни подписи Первухина, а тем более неизвестного в промышленности академика Курчатова (по прямому указанию Сталина он был избран академиком осенью 1943 г., минуя статус член-корреспондента) не оказывали должного воздействия на "командиров производства". Оба куратора "урановой проблемы" понимали, что для успешной организации работ по этому направлению требуется руководитель не только государственного уровня, но и обладающий реальными возможностями применения санкций за невыполнение подписанных им заданий и поручений. Так появилась кандидатура зам. Председателя Совнаркома, Наркома внутренних дел Л. П. Берия, которого Молотов и Первухин предложили Сталину в июне 1944 г. Сталин согласился с предложением, но вначале поручил передать в ведение НКВД только работы по эксплуатации урановых месторождений, переработки урановых руд и по разработке технологии получения металлического урана. Полностью ответственность Л.П. Берии за проведение работ по "урановой проблеме" была определена в одном из последующих Постановлений ГКО, вышедшем в начале 1945 г.: "Возложить на тов. Берия Л.П. наблюдение за развитием работ по урану".

Это поручение привело к интенсификации работ по созданию атомной бомбы. Берия, наряду с его неоднозначной деятельностью в должности руководителя НКВД, в сфере создания атомной бомбы и ракетного вооружения на первом этапе его производства, проявил себя выдающимся организатором советской оборонной промышленности. Методы его руководства, как правило, вызывают возражения, но положительных результатов он, практически, всегда добивался. Ставя задачу или контролируя выполнение директивных правительственных указаний, он всегда предупреждал руководителей предприятия об их личной ответственности за неукоснительное выполнение задания, у него были в значительной мере развиты способности внушать людям чувство страха. Для директоров промышленных предприятий и научных организаций его личность во многом отождествлялась с карательными мерами органов безопасности. К сожалению, большинство людей из чувства страха работает лучше, чем "на совесть". Большие организаторские способности, проявленные Берией в период разработки в СССР атомной бомбы, признают участники нашей атомной программы в публикуемых после 1991 г. интервью и статьях.

К концу 1944 года в Лабораторию № 2 поступили новые материалы, добытые внешней разведкой. В одном из писем к Первухину Курчатов дал такую оценку полученной информации: "Получение данного материала имеет громадное неопределимое значение для нашего государства и науки. Теперь мы имеем важные ориентиры для последующего научного исследования, они дают возможность нам миновать многие, весьма трудоёмкие фазы разработки урановой проблемы и узнать о новых научных и технических путях её разрешения. [...] ...вся совокупность сведений указывает на техническую возможность решения всей проблемы урана в значительно более короткий срок, чем это думают наши учёные...". Так Курчатов и его сотрудники получили возможность сравнить разработанные ими схему и конструкцию ядерного боезаряда с разработками в Лос-Аламосе, уточнить или просто заимствовать ряд конструкторских решений и определиться с составом "взрывчатки" атомного боезаряда. В технической справке, выпущенной в мае 1945 г., Курчатов приводит схему, даёт описание устройства атомной бомбы, прогнозирует силу взрыва - "эквивалент-



ному по своему действию 1000 тонн тола" и указывает, что для этого необходимо иметь 2...5 кг урана-235 или плутония-239. И далее следует вывод: "Основная трудность осуществления атомной бомбы заключается в получении урана-235 и плутония-239".

Именно получение вещества боезаряда являлось главной проблемой для создания атомной бомбы в СССР. Если описание конструкции бомбы, результаты расчётов, физические константы, получаемые экспериментальным путём в лабораториях Лос-Аламоса, а также другие научные и технические сведения о разработке атомной бомбы были получены сотрудниками Лаборатории № 2 от внешней разведки, то изотоп урана-235 и плутоний-239 необходимо было получить на отечественных промышленных установках, а их в СССР не было. На это обстоятельство обращается внимание И.В. Сталина в направленной ему в мае 1945 г. докладной записке, подписанной Берия и Курчатовым: "В качестве первоочередной ставится задача спроектировать в 1945 г. завод диффузного получения урана-235 с тем, чтобы в 1946 г. произвести его, а в 1947 г. получить уран-235 и испытывать его в опытных конструкциях атомного снаряда - бомбы".

При всем ускорении проводимых в СССР работ по атомной энергии, они существенно отставали от аналогичных работ в США. Об этом на конференции в Потсдаме 27 июля 1945 г. напомнил И.В. Сталину американский президент Г. Трумэн. Улучив момент, когда Сталин оказался вдали от членов советской делегации, Трумэн подошел к нему и якобы доверительно сообщил, что у США "теперь есть оружие необыкновенной разрушительной силы". Сталин, уже имевший информацию от внешней разведки о произведенном в США 16 апреля взрыве атомной бомбы, на это сообщение отреагировал спокойно, поздравив Трумэна с достигнутым успехом.



И.В. Сталин и Г. Трумэн

Специально наблюдавшим за этим разговором У. Черчилль решил, что Сталин ничего не понял. Сталин же сразу после этого "случайного" разговора дал указание Молотову переговорить с Курчатовым об ускорении работ по созданию атомной бомбы.

Окончание войны с Германией позволило правительству СССР выделять больше средств для нужд "урановой проблемы", подключить к этим работам ряд предприятий, освободившихся от выполнения заданий по производству военной техники.

В развертывающихся промышленных работах было решено использовать имеющееся в Германии оборудование для получения урана-235. Для выявления и отбора пригодного оборудования в середине мая 1945 г. в Германию была направлена группа советских специалистов, среди них были ученые-физики Арцимович, Флёрер, Харитон, Кикоин и др. Прибывшие специалисты обнаружили, что большинство германских атомных объектов, расположенных на территории будущей советской зоны оккупации, за несколько дней до окончания войны подверглись интенсивной бомбардировке американской авиацией. Тем не менее, специалистам удалось собрать и переправить в СССР уцелевшее оборудование для обогащения урана и, главное, около 100 тонн уранового концентрата.

Одновременно с промышленным оборудованием ученые-физики обнаружили немецких физиков-ядерщиков, оставшихся на территории, оккупированной Красной Армией. В отличие от немецких специалистов-ракетчиков, немецкие физики-ядерщики американцев не интересовали, т.к. у них уже была ядерная бомба. А вот найденные американцами немецкие запасы урана были вывезены в США.

По списку, составленному нашими физиками, в период с 01.09.45 по 10.12.45 г. из Германии в СССР было депортировано 200 специалистов по атомной энергии, среди них Нобелевский лауреат Г. Герц, профессора Р. Дёппель, М. Фольмер, М. фон Ардене, Г. Позе, П. Тиссен, М. Штеенбек и др. Отдельно упомяну видного специалиста в металлургии урана Николауса Рилья, уроженца Петербурга, добровольно пожелавшего продолжить свою научную работу по атомной энергии в СССР. За свой вклад в развитие советской атомной промышленности Н. Риль был удостоен звания Героя Социалистического труда.

Немецкие специалисты использовались в работах по созданию аппаратуры и оборудования на предприятиях создаваемой атомной промышленности, в основном, по обогащению урана и получения плутония.

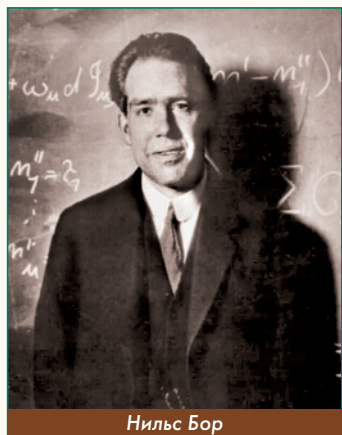
В ноябре 1945 г. в системе НКВД было организовано Управление специальными институтами для руководства работами, выполняемыми с участием немецких специалистов. И только спустя десять лет, в апреле 1955 г. было принято Постановление СМ СССР, которым регламентировались финансовые и организационные условия возвращения немецких специалистов на прежнее место жительства.

Новый импульс для интенсификации работ по созданию атомной бомбы дало применение этого оружия в войне с Японией. Атомная бомбардировка 6 и 9 августа 1945 г. японских городов Хиросима и Нагасаки показала всему миру мощь нового оружия, которым монопольно владеют США. В этой обстановке политическое руководство СССР не могло не принять действенных мер по ускорению получения собственной атомной бомбы. Впоследствии, при награждении создателей атомной бомбы И.В. Сталин напомнил о причинах ускорения проводимых работ: "Если бы мы опоздали на один-полтора года с атомной бомбой, то, наверное, испробовали бы её на себе".

Собственные научно-технические исследования, сверяемые с доставляемыми разведкой американскими достижениями, продвинули работы по атомной энергии с теоретически-лабораторного на промышленный уровень. В связи с этим был выпущен ряд правительственных постановлений и распоряжений по разработке технологии и созданию оборудования для получения ядерного боезаряда. 20 августа 1945 г. вышло Постановление ГКО, подписанное И.В. Сталиным, в котором атомному проекту придавался высший государственный приоритет. Организация и руководство "урановой проблемой" выводились на более высокий государственный уровень. Для координации работ и контроля за выполнением плановых заданий был создан наделённый чрезвычайными полномочиями Специальный комитет при Совнарком, а в качестве его рабочего органа - Первое Главное управление (ПГУ). Спецкомитет возглавил Л.П. Берия, освобождённый от должности Наркома внутренних дел, но сохранивший обязанности заместителя Председателя Совнаркома.

В состав Спецкомитета входили Г.М. Маленков, Н.Л. Вознесенский, Б.А. Ванников, А.П. Завенягин, М.Г. Первухин, И.В. Курчатов, П.Л. Капица и др. Начальником ПГУ был назначен Б.А. Ванников. Он же возглавил научно-технический совет при Спецкомитете. Скептическую позицию занял привлечённый к работе в Спецкомитете академик Капица. Ознакомившись с представленной в 1945 г. в Спецкомитет программой Курчатова, где были подробно изложены все этапы создания атомной бомбы, Капица через 3 месяца обратился с письмом к Сталину, в котором отмечал: "...секрет атомной бомбы нам неизвестен. Пока полученные сведения недостаточны, чтобы её создать, часто их нам дают, несомненно, для того, чтобы сбить с правильного пути".

Осенью 1945 г. научные руководители нашей атомной программы столкнулись с труднопреодолимой проблемой. Настало время начинать строительство первого советского атомного реактора (атомного котла, как называли в то время наши физики это сооружение). Однако по данным разведки американцы использовали два альтернативных варианта реактора: графитовый и на тяжёлой воде. Возник огромный риск выбрать малоперспективный вариант реактора и потерять массу средств и времени. Нужен был квалифицированный совет видного учёного, лучше всего от физика-участника "Манхэттенского проекта". Перебрав ряд возможных и невозможных консультантов, остановились на кандидатуре вернувшегося в это время в Европу Нильса Бора, известного советской разведке своими симпатиями к ряду советских физиков и СССР в целом. А кого послать? Кандидатуры известных учёных - физиков отменили органы безопасности, остановились на офицере разведки Терлецом, физике по образованию, сносно владеющему английским языком, недавно защитившем кандидатскую диссертацию, правда, по теме, не имеющей отношения к ядерной физике, но обладающего широкой эрудицией и осведомлённым в научно-технических вопросах.



Нильс Бор

Вопросы для беседы Терлецкого с Бором были подготовлены Курчатовым и Кикоиным, Капица дал Терлецу рекомендательное письмо и подарки для Бора. Встреча увенчалась успехом. Терлецкий получил ответы на ряд принципиальных вопросов, имеющих, по мнению Курчатова, определяющее значение для дальнейшей работы наших специалистов.

Полученных сведений от Н. Бора оказалось достаточно, чтобы построить, а затем и успешно запустить атомный реактор в 1946 г. После этого важного для успешного осуществления атомной программы в СССР события надобность в получении информации от внешней разведки практически отпала и Берия принял решение прекратить все контакты с американскими источниками информации. Это решение было принято очень своевременно, т.к. вскоре поступили сведения, что американская контрразведка близко подобралась к агентурной сети нашей внешней разведки.

В сферу деятельности Спецкомитета входила вся работа по атомному проекту - от разведки месторождения и добычи урановых руд до окончательного изготовления атомной бомбы. Обладая чрезвычайными полномочиями, Спецкомитет в соответствии с выпущенным Совнаркомом Постановлением "О дополнительном привлечении к участию в работах по использованию внутриатомной энергии научных учреждений, отдельных учёных и других специалистов" привлекал к работам по проблеме использования атомной энергии академические и отраслевые НИИ, научные организации и промышленные предприятия. Привлечение носило характер мобилизации, согласия у руководства и персонала не спрашивали.

Из мировой истории известно, что в сложных политических или экономических ситуациях правящие круги прибегают к методу "кнута и пряника". О "кнуте" сказано выше, теперь о "прянике". 27 марта 1946 г. вышло правительственное Постановление "О премиях за научные открытия и технические достижения в области использования атомной энергии и за работы в области космического изучения, сопутствующие решению этой проблемы". В Постановлении определялось 8 приоритетных проблем, за решение каждой из них руководителю работ назначалась первая премия в 1 млн рублей, он представлялся к званию Героя Социалистического труда, получал звание "Лауреат Сталинской премии" 1-й степени, государственную дачу, личный автомобиль, право на выезд в zahraniчные научные командировки, двойной оклад во время работы над проблемой, бесплатный проезд на всех видах транс-

порта для всей семьи, зачисление детей на учебу в любой ВУЗ страны. За решение проблем последующего уровня сложности устанавливались 2-я, 3-я, 4-я и 5-я премии с более низким уровнем льгот и вознаграждений.

Развёртывание работ привело к необходимости расширения головного подразделения - Лаборатории № 2, в которой весной 1945 г. работало немногим более 400 человек. На базе одного из секторов Лаборатории в апреле 1945 г. Постановлением Совета Министров СССР было организовано конструкторское бюро № 11. Местом расположения нового КБ-11 был выбран посёлок Сарово в Горьковской области, в лесистой местности, вдали от крупных населённых пунктов. Выделенная территория получила статус особо секретной зоны, в которой разместили вновь построенные лабораторные корпуса и опытный завод по изготовлению атомных бомб. В истории отечественной науки и техники этот научный центр известен по своему почтовому адресу "Арзамас-16". Главным конструктором производства отечественного атомного оружия назначили Ю.Б. Харитона, научное руководство по созданию атомного боезаряда сохранилось за И.В. Курчатовым.

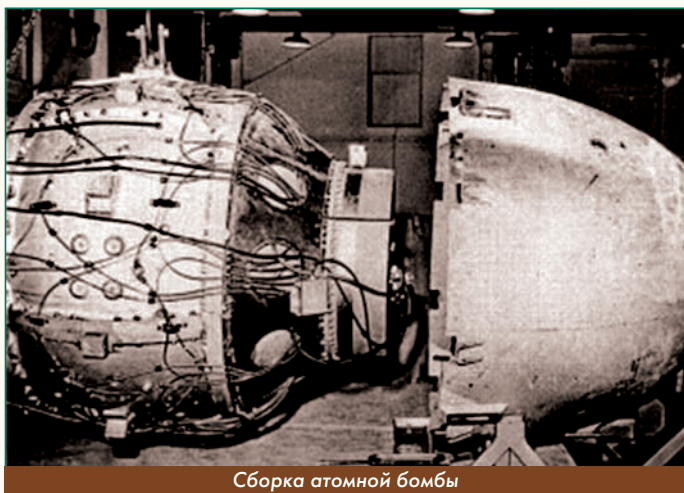
Госзаказом для КБ-11 стало создание по аналогии с американскими разработками атомной бомбы в двух вариантах: с боезарядом из урана-235 и из плутония-239. Первую бомбу планировалось поставить для государственных испытаний взрывом на наземной установке к 1 января 1948 г., а для сброса с самолёта - к 1 марта 1948 г. Аналогичные испытания второго варианта бомбы планировалось провести к 1 июня 1948 г. и к 1 января 1949 г. При создании конструкции бомбы и её ядерного боезаряда предписывалось максимально использовать все полученные по каналам внешней разведки научно-технические сведения и особенности конструкции, наработанные американскими специалистами. Таким образом, и при создании отечественной атомной бомбы были выставлены такие же требования, как и при воспроизводстве немецкой ракеты дальнего действия А-4 (Фау-2), получившей при изготовлении в СССР наименование Р-1, и при копировании американского четырёхмоторного бомбардировщика В-29 "Суперфорте", переименованного в Ту-4. Такой подход к использованию зарубежной техники позволял максимально сократить сроки получения как образцов вооружения, аналогичных уже имеющимся, так и пилотных проектов для последующих собственных разработок. Сомнения по соблюдению этики в области научно-технического приоритета при создании оружия никогда и ни у кого не возникали. В данном случае тоже нет ничего предосудительного. Использовали же американцы в "Манхэттенском проекте" интеллектуальный труд группы выдающихся европейских физиков, а позднее - инженерный талант немца Вернера фон Брауна как главного конструктора ракеты, доставившей американских астронавтов на Луну.

В отличие от создания в СССР ракеты Р-1 и бомбардировщика Ту-4, прототипы которых в виде натуральных образцов имелись в исполнении германских и американских заводов, по атомной бомбе советские специалисты располагали только технической информацией, изложенной на бумаге, да и та была не в полном объёме. Поэтому назвать создание в СССР атомной бомбы простым копированием американских образцов неправильно, существенная часть конструкции второго варианта бомбы с зарядом из плутония - 239 была разработана советскими учёными и инженерами. Что же касается разработки технологии изготовления как корпусной части бомбы и создания новых материалов, так и получения вещества ядерного боезаряда, то все вытекающие из этого трудности полностью легли на плечи отечественных специалистов.

Назначенные правительством сроки госиспытаний срывались. Объясняя причины отставания, Л.П. Берия в докладной записке И.В. Сталину писал: "Объём исследовательских и конструкторских работ из-за новизны и непредвиденных научно-технических трудностей проблемы создания атомной бомбы оказался значительно большим, чем предполагалось в 1946 г.". Основная задержка была с получением ядерной "взрывчатки". После получения в 1945 г. описания конструкции американской ядерной бом-



бы, главной и практически единственной крупной проблемой стало получение необходимого количества как уранового сырья, так и выделяемого из него урана-235 и получаемого плутония-239. По состоянию работ в 1948 г. КБ-11 было готово поставить бомбу на госиспытания через два месяца после получения необходимого количества плутония и урана-235. В августе 1948 г. в технической справке, подписанной Ю.Б. Харитонов, указывалось: *"На сегодняшний день разработаны и изготовлены в натуре все основные узлы плутониевой бомбы, за исключением деталей, изготовление которых связано с большими, ещё не имеющимися в наличии количествами плутония и полония. Также разработаны и изготовлены узлы урановой бомбы. По обоим типам бомб ведётся испытание и доводка узлов"*.



Сборка атомной бомбы

Для завершения указанных работ потребовалось ещё 8 месяцев. В апреле 1949 г. Ю.Б. Харитон и К.И. Щелкин направили Л.П. Берия "Краткий доклад о состоянии работ КБ-11", в котором указали, что силами КБ-11 и привлечёнными организациями *"решены все принципиальные и конструктивные вопросы, возникшие во время разработки атомной бомбы"*. Однако на самом деле и на этом этапе не всё ещё было готово для проведения взрыва. И только во второй половине августа 1949 г. на заседании членов Спецкомитета был принят проект Постановления Совмина СССР "Об испытании атомной бомбы". С этим проектом были ознакомлены все члены Политбюро, но его утверждение не состоялось, так что решение о проведении первого взрыва атомной бомбы в СССР фактически было принято членами Спецкомитета, подписавшими проект Постановления.

Взрыв атомной бомбы, установленной на 37,5-метровой стальной башне на специально подготовленном Семипалатинском полигоне, был произведён 29 августа 1949 г. Это знаковое в мировой истории событие имело двойственное значение. Во-первых, это было объективное подтверждение факта успешного завершения всех работ в СССР по созданию отечественного ядерного оружия. Во-вторых, огромное военно-политическое значение - разрушение монополии США на обладание таким оружием.

О произведённом взрыве каких-либо официальных сообщений от правительства СССР не последовало, т.к. по мнению политического руководства страны факт появления у СССР атомной бомбы мог обострить международное положение и в условиях "холодной войны" даже предполагалась возможность нанесения превентивного ядерного удара по СССР. Во всяком случае, по свидетельству



Испытание 29.08.1949 г.

академика Е.П. Велихова, ряд физиков-ядерщиков, а среди них академики Б.П. Александров, Ю.Б. Харитон, Н.А. Доллежал, всерьёз опасались такого развития событий. Но "шила в мешке утаить не удалось". 23 сентября 1949 г. президент США Г. Трумэн в своём выступлении отметил, что США *"располагает данными о том, что в одну из последних недель в СССР произошёл атомный взрыв"*.

Это сообщение вызвало нервное напряжение в правительственных кругах СССР, особенно у отвечающих за сохранение секрета создания атомной бомбы. Предполагалось проникновение вражеского агента в среду, причастную к разработке и изготовлению советского атомного оружия. Успокоение пришло только после получения информации, что о проведении в СССР атомного взрыва стало известно из анализа проб воздуха, отбираемого американскими самолётами - разведчиками в воздушном пространстве СССР. Далее замалчивать это событие не имело смысла и 25 сентября в газете "Правда" было опубликовано сообщение ТАСС о проведённом взрыве, причём формулировки информации позволяли предполагать, что СССР уже давно располагает ядерным оружием.

Вскоре после объявления о наличии у СССР атомной бомбы последовало первое награждение ее создателей: 29.10.49 г. вышел секретный Указ Президиума Верховного Совета СССР "О присвоении звания Героя Социалистического труда, награждении и премировании научных, инженерно-технических и руководящих работников научно-исследовательских, конструкторских организаций и промышленных предприятий за научные открытия и технические достижения по использованию атомной энергии". Награждение проводилось в соответствии с вышеприведенным Постановлением от 27.03.46 г. с некоторой корректировкой указанных в этом Постановлении наград и льгот. Звания Героя Социалистического труда были удостоены И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон, Я.Б. Зельдович, К.И. Щёлкин, Б.А. Ваников, Н.Л. Духов. Они же и Л.П. Берия стали лауреатами Сталинской премии I степени. (Берии звание Героя Соцтруда было присвоено в 1943 г. за организацию поставок фронту вооружения и боеприпасов). Курчатов и Берия получили специальные грамоты о пожизненном статусе "Почетный гражданин СССР". Кроме вышеуказанных наград ордена, медали, денежные премии и другие льготы получили многие сотни активных участников работ по созданию атомной бомбы. Не остались без наград и служащие внешней разведки, причастные к сбору материалов по "урановой проблеме". Они получили государственные награды и повышения в воинских званиях.

Появление ядерного оружия у СССР стало серьёзным предупреждением "ястребам" из противостоящего военно-политического блока: нельзя строить политику на временном соотношении сил, без учёта вероятной динамики научно-технического прогресса в области создания новых вооружений.

Второй взрыв атомной бомбы, также установленной на наземной башне, был произведён 24 сентября 1951 г. Следующий взрыв планировалось провести путём сброса с бомбардировщика Ту-4 атомной бомбы РДС-3. Такая операция состоялась 18 октября 1951 г. На специально подготовленном для этой операции полигоне были установлены различного вида образцы вооружения и военной техники, а также гражданские объекты: кирпичные и деревянные дома, железнодорожный и автомобильный транспорт, фрагменты мостов и т.д. После взрыва специальная команда тщательно изучила разрушения и повреждения в зоне взрыва. С этого момента созданная в СССР атомная бомба действительно стала оружием. С каждым годом количество атомных бомб, изготавливаемых для боевой авиации, увеличивалось: в 1949 г. - 2, в 1950 г. - 9, в 1951 г. - 25, в 1952 г. - 35, с 1953 г. началось их серийное производство.



Сброс бомбы РДС-3

Заключительным итогом многолетней истории создания для Советской Армии ядерного оружия стали общевойсковые учения, проведенные с реальным применением сброшенной с самолёта Ту-4 атомной бомбы 14 сентября 1954 г. в Оренбургской области, на Тоцком артиллерийском полигоне. Командовать этими учениями было поручено находящемуся в то время в опале Маршалу Советского Союза Г.К. Жукову.

С момента взрыва советского атомного боезаряда была нарушена монополия США на обладание ядерным оружием. Это привело к укреплению международного положения СССР, стало эффективным сдерживающим фактором для "горячих" голов у противостоящей стороны.

Значимость вклада в создание советской атомной бомбы



Памятник Рихарду Зорге - символ советской разведки

внешней разведки и учёными-физиками до сих пор нашей и зарубежной общественностью оценивается по-разному. Подводя итог семилетней воистину героической работе разведчиков и физиков, внесу в этот спор своё мнение и я, сделав следующий вывод: материалы, добываемые внешней разведкой, явились отправным моментом для начала развёртывания научных, а затем и развития промышленных работ по созданию советского ядерного оружия. Последующие материалы позволили существенно сократить время и затраты для завершения работ. Основную же работу выполнили советские учёные-физики, а также инженеры различных специальностей и огромное количество работников, начиная с добывающих урановую руду и заканчивая выполняющими сборку атомной бомбы.

Среди многих выдающихся ученых и организаторов работ в СССР по атомной энергии особое место занимает И.В. Курчатов. В историю науки и техники он

вошёл как руководитель советской программы создания ядерного оружия, в общенародном понимании он был создателем нашей атомной бомбы. Формально Курчатов был "назначенным" лидером, под его научно-техническим, а в начальный период и организационным руководством работала большая группа советских физиков, в том числе академиков, имеющих свои научные школы. Курчатов нёс личную ответственность за научную работу в годы войны перед ГКО, а в послевоенное время - перед Советом Министров СССР. Учитывая, что в то время руководителем этих органов был один и тот же человек, то есть перед И.В. Сталиным. И надо отдать должное научной смелости и патриотизму Курчатова, когда он при минимальном начальном задании отечественных теоретических разработок и разрозненных сведениях о работах в США, при практически нулевом уровне лабораторно-промышленного обеспечения предстоящих работ взялся за решение грандиозной научно-технической проблемы. Для Курчатова его научная работа всегда была подчинена интересам государства. Несанкционированное использование чужих научно-технических достижений, неправомерное с этической точки зрения в научной среде, парировалось внутренним убеждением необходимости создания оружия для защиты Отечества. Пусть это сейчас звучит пафосно и высокопарно, но патриотизм в годы войны был одной из самых действенных сил в сопротивлении фашистским агрессорам как на фронте, так и в тылу. Да и тыл в те годы был трудовым фронтом. Лозунг "Всё для фронта, всё для победы!" из пропаган-

дистского призыва перерос во внутреннее убеждение советского народа.

При назначении Курчатова на должность начальника "специальной лаборатории атомного ядра" не ошиблись. Он не был научным конкурентом ни для маститых ученых-академиков, ни для близких по возрасту докторов наук, привлеченных для работы в Лаборатории № 2, и его выдвижение на руководящую должность было принято без внутреннего сопротивления у сотрудников. Секретность источника поступающих через Курчатова сведений о достижениях физиков в США создавала Курчатову в среде работников лаборатории ореол выдающегося ученого, физика-теоретика, способного без проведения сложных расчетов и лабораторных исследований предлагать оптимальные научно-технические решения. Этим я не хочу принизить роль и значение Курчатова в создании отечественного ядерного оружия и его научного вклада в исследования проблем атомной энергии. Талант и научная эрудиция Курчатова проявились и в его способностях выбирать ценную информацию из разрозненных сведений, получаемых от внешней разведки, и увязывать её с результатами собственных исследований и принимать правильные решения. В процессе интенсивно проводимых работ Курчатов получил возможность реализовать свой научный потенциал и заслуженно занять место в ряду советских выдающихся ученых-физиков.

Взяв на себя ответственность за создание атомной бомбы, Курчатов вынужден был для сокращения сроков выполнения задания пойти по пути копирования устройства американского ядерного боезаряда. Но вынужден пойдя по этому пути, он в душе всё-таки тяготился таким положением и при возможности пытался несколько уменьшить роль в его работе получаемых материалов. По воспоминаниям П.А. Судоплатова (передача по телепрограмме "Совершенно секретно") Курчатов на совещании с руководителями внешней разведки НКВД, от которых скрывать источник получения сведений не имело смысла, на вопрос, как он оценивает получаемые материалы, ответил: *"Материалы внешней разведки не противоречат нашим научным взглядам и разработкам"*.

Отмечая заслуги и роль Курчатова в создании отечественного ядерного оружия, нельзя забывать и плеяду ученых, работавших рядом с ним и посвятивших свои лучшие годы жизни и научную работу решению одной из сложнейших научно-технических проблем. Они самозабвенно трудились в годы Великой Отечественной войны, вместе со всем народом создавая оружие для борьбы с фашистскими захватчиками. Но и после победы, в условиях послевоенной конфронтации с бывшими союзниками они продолжали быть "солдатами холодной войны" и оставались ими до успешного выполнения поставленной перед ними научно-технической задачи.

Прошли годы, ушли из жизни многие участники разработки советской атомной бомбы как разведчики, так и физики, изменились политические отношения между Россией и США, и в 1992 г. Ю.Б. Харитон заявил: *"Наша первая атомная бомба - копия американской. И я считал бы любое другое действие в то время недопустимым в государственном смысле. Важны были сроки: кто обладает атомным оружием, тот диктует политические условия"*.

Это воспоминание ещё раз подчеркивает роль внешней разведки в создании советского ядерного оружия. И нужно отдать должное разведчикам, сумевшим привлечь к работе на СССР ряд участников разработки американкой атомной бомбы. Их имена, как и имена агентов сейчас известны, в основном, из мемуарной литературы и не получили такой широкой известности, как имена ученых-физиков. Что делать, объективные издержки профессии.

Создание советского ядерного оружия практически ликвидировало угрозу развязывания "большой" ядерной войны на всё последующее время, чему должны быть благодарны народы всего мира.

Однако для СССР наличие ядерного боезаряда было решением только первой половины стратегической задачи, второй половиной являлось обеспечение гарантированной возможности нанесения ядерного удара по территории США. И эта часть задачи была решена созданием межконтинентальной баллистической ракеты.

(Продолжение в следующем номере.)



# МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

## ПРИЧИНА ВЧ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И БОРЬБА С НЕЙ

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 работе показано, что причиной возникновения колебаний и неустойчивости процесса горения при работе двигателей, работающих на химическом принципе, является турбулентность течения продуктов сгорания. Даны уравнения, описывающие автоколебательный процесс и показаны способы и физические принципы борьбы с неустойчивостью. The paper shows that the cause of fluctuations and instability of the combustion process during operation of engines operating on a chemical principle is the turbulence of the combustion products of combustion. The equations describing the self-oscillating process are given and the methods and physical principles of dealing with instability are shown.**

**Ключевые слова:** автоколебания, высокочастотная неустойчивость, опыты Рийке, ЖРД, газогенератор.

**Keywords:** self-oscillations, high-frequency instability, Rijke experiments, liquid propellant, gas generator.

Как было показано в двух предыдущих работах [1, 2] в главное уравнение колебательного звена входят одновременно частота вращения турбулентного газового потока и собственная частота колебаний. Это говорит о прямой зависимости частоты возникающих колебаний от частоты вращения потока (от турбулентности). При выполнении необходимого и достаточного условия:  $\Phi Z > 1/4$  и  $\omega = \text{const}$  - возникают автоколебания.

### Определение частоты вращения потока

Если выполняется условие автоколебаний, то главное уравнение колебательного звена приобретает следующий вид:

$$\frac{d^2 \tilde{p}}{d\tau^2} + 4\nu \frac{kM^2}{R^2} \frac{\partial \left( \ln \frac{R}{\omega} \right)}{dt} \tilde{p} = 0.$$

Это гармоническое уравнение, решением которого является синусоидальная функция, а коэффициент при втором члене есть квадрат собственной частоты колебаний. Тогда:

$$\omega_0^2 = 4\nu \frac{k\bar{V}^3}{a^2 R^4} \frac{d \frac{\bar{V}}{\omega}}{dt},$$

где  $\omega_0$  - собственная частота,  $\omega$  - частота вращения турбулентного газового потока.

Уравнение для частоты вращения можно переписать в следующем виде [3] относительно скоростей:

$$\omega^2 = 4 \frac{\bar{V}}{\mu} M^2 (1 - M^2) \text{grad} p.$$

Эта зависимость может быть получена, если известны все её составляющие. Вновь упоминаем о возможности получения газового поля с помощью ЭВМ. Аналитическая зависимость в отличие от такого подхода даёт возможность качественного анализа процессов, как турбулентности, так и устойчивой работы ЖРД.

И тогда:

1. При проектировании новой перспективной конструкции камеры ЖРД необходимо, прежде всего, выбрать наиболее подходящий прототип, который уже прошел отработку на ВЧ.

2. Рассчитать газовое поле внутри камеры и определить в каждой точке значение  $\omega$ . Для наглядности построить графическое изображение этого поля.

3. Выделить на графике зоны, где критерий  $\Phi Z > 1/4$ . Это необходимое условие возникновения колебаний.

4. Если в этой зоне  $\omega = \text{const}$ , то в двигателе есть неустойчивость, которую надо погасить.

В зависимости от области, занимаемой неустойчивостью, для её исключения можно применять различные мероприятия, снижающие интенсивность турбулентности.

### Известные методы борьбы с неустойчивостью

Наиболее распространенные методы, которые применяются на сегодняшний день, - эмпирические. Ранее было показано, что если в области форсуночной головки установить крест Исаева, то можно избежать неустойчивости. Можно, но не всегда. Так называемый крест Исаева - это пластины вдоль потока, которые разбивают вихри и тем самым можно подобрать их количество пять или шесть и т.д., когда двигатель не будет "частить". Для этого все-таки нужно сделать двигатель и его испытать на ВЧ. Если не частит, то это очень хорошо. Повезло. Он (двигатель), как правило, начинает частить. Тогда в лабораторных условиях его начинают доводить. И если это не получается, то двигатель бракуют. Как же понять, как устанавливать эти спасительные пластины? А никак. По наитию. Методом проб и ошибок. С учетом предыдущего опыта.

Есть ещё один способ. Этот крест сформировать из форсунок. Другими словами, часть форсунок выдвинуть вперёд к соплу, рассекая плоскость форсунок неким подобием креста. Этот способ, как показала практика, очень продуктивен. Сдвигается область перемешивания компонентов (окислителя и горючего), а значит, сдвигается область подвода в систему внешней энергии, необходимой для автоколебаний.

Пожалуй, наиболее вразумительным является метод борьбы с неустойчивостью, который был разработан на базе великолепных результатов опытов Рийке. Это красивый метод, но он чисто эмпирический. Для того, чтобы им воспользоваться, необходимо знание того факта, что двигатель частит и все, больше ничего! Тогда, памятуя об опытах Рийке, можно сказать, что если труба (у нас камера) "запела", то в области максимального подвода энергии сосредоточилась пучность волны и остается только отодвинуть место подвода энергии в сторону сопла. Другими словами, если переместить зону пресечения струй от форсунок дальше к срезу, то место подвода не будет совпадать с пучностью и автоколебания (неустойчивость) не возникнут. Таким способом часто пользовались при отработке камер сгорания и часто (конечно, не всегда) этот способ приводил к положительным результатам.

Отметим, что все способы, в том числе и описанный выше, основаны на изменении геометрии камеры сгорания. Но вот как её поменять? Существующие методы на эту тему в настоящее время далеки от совершенства. В отдельных книгах можно найти рекомендации по выбору длины камеры ЖРД, по соотношению её длины и диаметра, но этого мало. Ведь рекомендации даны по трубе, а камера сгорания далеко не труба.

### Физические принципы борьбы с неустойчивостью

Опираясь на полученную выше систему, можно предложить несколько мероприятий по устранению ситуаций, когда в процессе работы ЖРД возникает ВЧ неустойчивость.

Прежде всего, следует сказать, что ВЧ неустойчивость возникает исключительно в турбулентных потоках, а именно, в случае, когда сформируются такие устойчивые пространственные циклические движения в виде устойчивых вихрей, которые при соответствующих ограничениях перейдут во временную циклику:

$$\omega - \omega_0,$$

где  $\omega$  - угловая скорость вихря,  $\omega_0$  - собственная частота колебаний внутри системы.

Где же может возникать турбулентность? Ответ - только в камере. Но при правильно спрофилированном двигателе градиент давления всегда отрицательный, и в камере, и в сопле:

$$\text{grad } p < 0; \text{grad } |\vec{V}| > 0.$$

Тем не менее, в области форсуночной головки, начиная от ее стенки, до конца зоны горения, поток будет турбулентным [3]. За пределами зоны горения поток опять станет ламинарным. На протяжении всего последующего движения он таковым и останется. Конечно, если не возникнет особых предпосылок, когда градиент давления станет больше нуля.

Итак, прежде всего, с неустойчивостью нужно бороться, деформируя геометрию камеры непосредственно в области форсунок. Но это самое очевидное. Как было показано, так и делают, но методом проб и ошибок.

Какие еще способы устранения можно отметить? Сформулируем рекомендации:

1. Надо уходить от турбулентности, хотя это и противоречит основному требованию по смесеобразованию для обеспечения полноты сгорания топлива. Тем не менее, нужно стремиться уменьшать ротор:  $\text{rot } \vec{V} \rightarrow 0$ .
2. Надо замедлять поток, что опять же приводит к его ламинизации.
3. По возможности переходить на вязкие компоненты (увеличивать вязкость).
4. Необходимо снижать положительный градиент давления.
5. Необходимо снижать число Рейнольдса.
6. Необходимо снижать показатель адиабаты.
7. Повышать скорость звука в потоке или, что тоже самое, повышать газовую постоянную и температуру потока.
8. Можно для демпфирования колебаний добавлять в поток мелкие частицы.
9. Стремиться создавать турбулентность с малоразмерными вихрями, то есть мелкомасштабную турбулентность.
10. По возможности ликвидировать парность вихрей, например, устанавливая на головке нечетное количество форсунок.
11. И еще один очень тонкий момент. Для его иллюстрации преобразуем второе уравнение и представим его в виде:

$$\text{rot}^2 \vec{V} = -\frac{1}{\mu} M^2 (1 - M^2) \frac{dp}{dt}.$$

Получается, что положительный рост давления, его величина, влияет на возникновение турбулентности. Чем больше  $dp/dt$ , тем интенсивнее турбулентность. То есть чем больше производная или чем круче зависимость  $p(t)$ , тем жестче воздействие на колебательную систему. Другими словами, можно констатировать, что на режиме выхода двигателя на расчётную величину давления система может быть подвергнута жёсткому возбуждению. В этом случае могут возникнуть колебания с амплитудой тем большей, чем больше производная. Но эти колебания, скорее всего, затухнут, если не будет выполнено достаточное условие постоянства ротора. Именно постоянство ротора приводит к автоколебаниям. А это произойдет только в случае, если  $dp/dt = \text{const}$  (число Маха в цилиндрической камере практически не меняется). Но производная не может быть постоянной величиной, так как известно, что кривая выхода двигателя на режим имеет сильную зависимость от времени.

Таким образом, анализ физических принципов, заложенных в систему мероприятий по исключению неустойчивости в процессе работы камеры ЖРД, показывает направления построения оптимальных конструкций камеры сгорания и, главное, форсуночной головки. А сам разработанный метод прогноза неустойчивости позволяет проводить качественную экспертизу при проектировании, создании и отработке ЖРД.

В заключении, на основании проделанных систематических теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Установлена причина возникновения неустойчивости работы ЖРД и газогенераторов.
2. Получены необходимые и достаточные условия возникновения автоколебаний и неустойчивости, разработаны критерии.
3. Записан алгоритм действий при разработке ЖРД, работающих без ВЧ колебаний.
4. Зафиксированы физические принципы борьбы с неустойчивостью и правила применения мероприятий по его устранению. ▮

#### Перечень источников

1. Бажанов А.И., Сперанский А.А., Кочетков Н.Ю. Механика сплошных сред. Введение в теорию высокочастотной неустойчивости в камерах сгорания ЖРД и газогенераторах // Двигатель. 2024. № 5-6. С. 14-16.
2. Бажанов А.И., Сперанский А.А., Кочетков Н.Ю. Механика сплошных сред. Основные теоретические предпосылки создания метода прогноза ВЧ неустойчивости // Двигатель. 2024. № 5-6. С. 21-23.
3. Кочетков Ю.М., Кочетков Н.Ю. Турбулентность. Исследование ламинарного подслоя // Двигатель. 2024. № 5-6. С. 5-7.

Связь с авторами: kolabuy@gmail.com

С отечественными двигателями ПД-8 17 марта совершил первый полет опытный образец самолета «Суперджет». Тем самым положено начало летных и сертификационных испытаний ПД-8.

Самолет находился в воздухе около 30 минут, в ходе которого достиг скорости 500 км/ч и высоты 3000 м.

Силовая установка с двигателями ПД-8 показала стабильную работу, в полете проводилась оценка газодинамической устойчивости двигателей на постоянных и переменных режимах.

Для интенсификации сертификационных испытаний в апреле был подключён третий самолёт, собранный только из российских комплектующих. ▮



ИНФОРМАЦИЯ. ПД-8 на "Суперджете"



# ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ PRATT & WHITNEY ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ САМОЛЁТОВ



**Владимир Андреевич Зрелов**, д.т.н., профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов ФГАОУВО "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва"

(Продолжение. Начало в 5-2024)

Турбовентиляторный с низкой (от 0,96 до 1) степенью двухконтурности двигатель Pratt & Whitney TF30-P-1 (обозначение в компании - JTF10A (рис. 1.21) в 1960 году был выбран ВМС США для использования в дозвуковом Douglas F6D Missileer (рис. 1.22), но в апреле 1961 года этот проект был отменён.

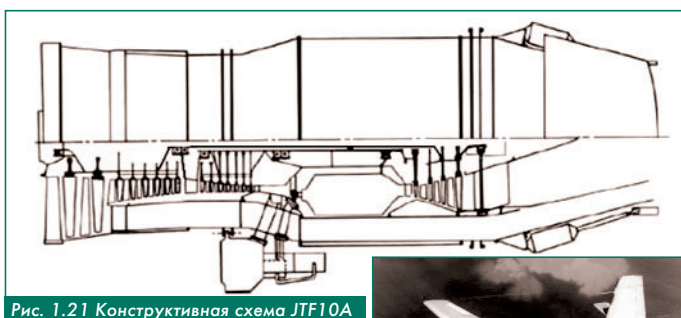


Рис. 1.21 Конструктивная схема JTF10A

Дата начала разработки:  
- 1959 год. Под обозначением JT10A (с использованием наработок JT8);

- 1960 год. Под обозначением TF30-P-1 для Douglas F6D Missileer, позже, как ТРДДФ TF30 (рис. 1.23) для F-111.



Рис. 1.22 Douglas F6D Missileer

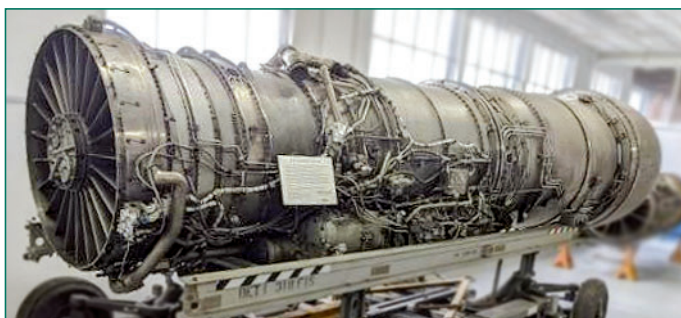


Рис. 1.23 Pratt & Whitney TF30 в авиационном музее Окленда

Серийное производство осуществлялось с 1960 года и продолжалось до 1986 года [32]. Всего к началу 1987 года было изготовлено 3750 двигателей.

Позднее двигатель был снабжён форсажной камерой и адаптирован для сверхзвуковых General Dynamics F-111 (рис. 1.24) и Grumman F-14A Tomcat (рис. 1.25), а его бесфорсажный вариант - для ранних версий Ling-Temco-Vought (LTV) A-7A, B и C Corsair II (рис. 1.26). В результате оказалось три военных применения двигателя TF30: F-111, A-7 и F-14 [33].



Рис. 1.24 F-111

Рис. 1.25 F-14A Tomcat

Рис. 1.26 A-7 Corsair II

В рамках программы ATEGG компания Pratt & Whitney в 1964 году запустила первый проект STF200 [6].

Первый полёт F-111A с YTF30-P-1 состоялся 21 декабря 1964 г. в Fort Worth, штат Техас. Первоначальный план ВВС был на 1469 самолётов, но впоследствии он был сокращён до 520. Количество изготовленных самолётов F-111 разных модификаций приведено в таблице 1.3 [8, 35].

F-111 являлся развитием "сотой серии" самолётов, разработанных в 1950-х и 1960-х годах, таких как F-100, F-101, F-105, F-106 и т.д., в которых использовались новые сверхзвуковые технологии. Все "сотки" включали в себя достижения в аэродинамике, двигательной установке и системах управления, направленные на создание сверхзвуковых боевых самолётов. В частности, в F-111 использовалась каждая из этих новых технологий [6].

Это был первый серийный самолёт, использовавший крылья изменяемой стреловидности. Стреловидные крылья применялись и в других самолётах серии 100, но большинство из них были оптимизированы для высоких дозвуковых и сверхзвуковых скоростей

Таблица 1.3

Модификации и применение самолёта F-111				
Модификация	Изготовлено, шт.	Тип	Применение	Комментарий
F-111A	159	Штурмовик	ВВС США	Первый серийный самолёт
F-111B	7	Истребитель	ВМФ США	Палубный вариант. Выпуск прекращён
F-111C	24	Штурмовик	ВВС Австралии	Гибридная версия, содержащая фюзеляж от F-111A и крылья от FB-111A
F-111E	94	Штурмовик	ВВС США	Улучшенная версия 111A с усовершенствованными воздухозаборниками
F-111D	96	Штурмовик	ВВС США	Улучшенная версия F-111E. Усовершенствованная электроника
F-111F	106	Штурмовик	ВВС США	Модификация F-111D, но с упрощёнными электронными системами и самыми мощными двигателями
FB-111A	76	Бомбардировщик	ВВС США	Стратегический бомбардировщик
FB-111H	0	Бомбардировщик	ВВС США	Модификация FB-111A с более мощными двигателями General Electric F101. Отменён в пользу B-1B
RF-111A	1	Разведчик	ВВС США	Разведывательный самолёт на базе F-111A
RF-111C	4	Разведчик	ВВС Австралии	Фоторазведчик
EF-111A	42	Самолёт РЭБ	ВВС США	Самолёт радиоэлектронной борьбы на базе F-111A
F-111G	60	Штурмовик	ВВС Австралии	Версия FB-111A с системами F-111F
YF-111A	2	Штурмовик	ВВС США	Предсерийный образец отменённого в Великобритании истребителя F-111K

и, как следствие, требовали очень большую взлётную полосу. Предполагалось, что F-111 будет летать с небольших аэродромов и с палуб авианосцев, поэтому изменяемая стреловидность была единственным способом обеспечить выполнение всех требований.

Опытные самолёты F-111A для ВВС строились на заводе General Dynamics в Fort Worth, а F-111B для ВМФ - на заводе Northrop в Bethpage.

Предполагалось, что F-111B станет самым совершенным проектом своей эпохи. Это был не только первый серийный военный самолёт с крылом изменяемой стреловидности, но и первый, оснащённый турбовентиляторными двигателями с форсажной камерой, способными разгонять самолёт до скорости  $M = 2$ , сохраняя при этом большую дальность полёта при экономичном расходе топлива. Новый радар сверхдальнего действия должен был обнаруживать цели для новой ракеты класса "воздух-воздух" Hughes AIM-54A, которая сама имела 100-мильную дальность полёта (160 км) [35].

27 июля 1996 года на церемонии, посвящённой выводу F-111 из боевого состава ВВС США, было узаконено неофициальное наименование F-111 - Aardvark ("Трубказуб"). Самолёты, состоявшие на вооружении ВВС Австралии, имели неофициальное прозвище Pig ("Свинья") [49].

Таблица 1.4

Основные параметры самолёта F-111A [2, 6, 35, 40]	
Самолёт	F-111A
Разработчик	General Dynamics Corporation
Годы производства	1964 - 1967
Изготовлено, шт.	159
Масса пустого, кг	21 394
Максимальная взлётная масса, кг	45 359
Масса боевой нагрузки, кг	-
Масса топлива во внутренних баках, кг	14 700
Силовая установка	2хТРДДФ Pratt & Whitney TF30-P-1
Максимальная скорость на высоте, км/ч	2655 ( $M = 2,5$ )
Максимальная скорость у земли, км/ч	1475
Крейсерская скорость, км/ч	-
Дальность (перегоночная), км	5190
Практический потолок, м	17 985
Разбег при нормальной взлётной массе, м	900...910
Длина пробега, м	730...915

К концу 1964 года TF30-P-1 применялся для самолётов ВВС (General Dynamics F-111A и Grumman F-14) и ВМФ (F-111B).

На рис. 1.27 показана хронология развития двигателей JT8 - JTF10A (TF30) [3].

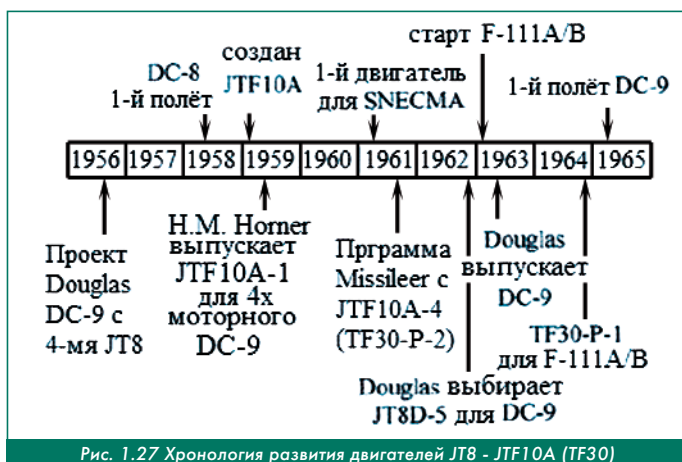


Рис. 1.27 Хронология развития двигателей JT8 - JTF10A (TF30)

С самого начала испытаний проявились серьёзные недостатки, связанные с компрессором и катастрофические отказы роторов при высокой скорости полёта. Для устранения этих явлений компаниями General Dynamics, PW, а также правительством было затрачено огромное количество денег и времени. Доводка TF30

осуществлялась как минимум 12 лет, в течение которых проводилась работа, направленная на повышение надёжности, однако полностью проблемы решить не удалось.

Лётные испытания General Dynamics F-111A с двигателем PW YTF30, начались в 1964 году. Grumman F-111B совершил свой первый полёт в мае 1965 года, и вскоре возникли проблемы с двигателями.

Турбовентиляторные двигатели Pratt & Whitney TF30 хорошо работали на крейсерском режиме, но с ними были проблемы во время маневрирования в полёте, типичного для военного применения. Серия проблем с компрессорами омрачила программу испытаний F-111, запятнав репутацию самолёта среди пилотов.

"F-111 нанёс ужасный урон пилотам-испытателям", - говорит Джордж Марретт, потерявший друзей в результате авиакатастроф [13].

В 1968 году ВМФ вышел из программы F-111B. Компания Grumman, которая работала над военно-морским F-111B в составе команды General Dynamics, стала развивать проект Grumman F-14 - палубного многоцелевого истребителя, предназначенного для обеспечения ПВО, завоевания превосходства в воздухе и сопровождения тактических бомбардировщиков. Этот новый истребитель военно-морского флота также использовал двигатель TF30. Первый полёт F-14 состоялся в декабре 1970 года.

Самолёты дали собственное имя "Tomcat", что отражало традиции фирмы Grumman давать своим морским истребителям "кошачьи" названия. В то время большим энтузиастом проекта F-14 был вице-адмирал Томас Ф. Коннолли (Tomas F. Connolly) (рис. 1.28) - заместитель начальника Командования морских операций по авиации. На ранней стадии F-14 называли "Кошка Тома" - "Tom's cat", а со временем это трансформировалось в "Tomcat".

В 1967 году Томас Ф. Коннолли совершил полёт на экспериментальном варианте F-111A и обнаружил, что он с трудом набирает сверхзвуковую скорость и плохо подходит для посадки на авианосец. Позже он выступил перед Конгрессом с докладом о своих опасениях по поводу официальной позиции ВМФ, и в мае 1968 года Конгресс прекратил финансирование F-111B, позволив ВМФ искать решение, соответствующее его требованиям.

В самолёте было установлено двухкилевое хвостовое оперение. Это должно было обеспечить лучшую устойчивость в случае отказа одного из двигателей. Кроме того, в самолёте просматривалось большое влияние революционного советского МиГ-25 [36].

Самолёт, оснащённый PW TF30-P-412A, поступил в эксплуатацию в 1972 году, а с 1977 года на него стали устанавливать двигатель TF30-P-414. Этот вариант

Рис. 1.28  
Томас Ф. КонноллиРис. 1.29  
F-14 взлетает с авианосца

Рис. 1.30 Бомбардировщик Ту-22М2 в сопровождении самолёта F-14A



"Блок 130" ознаменовался установкой последней версии TF30 - варианта TF30-P-414A, на котором удалось добиться одного случая срыва потока с лопаток вентилятора на 1000 ч наработки. К концу 1986 года в эксплуатации не осталось ни одного "Томса" с более ранними модификациями двигателя. Стоимость доработки варианта TF30-P-412A в вариант TF30-P-414A составила около 800 тыс. долларов (в ценах 1980-х годов) [36].

Производственная программа завершилась в 1987 году после того, как было произведено 514 самолётов.

Как и в проекте F-111, TF30 столкнулся с серьёзными проблемами в программе F-14. Работы над F-14A были омрачены потерей первого прототипа в декабре 1970 года, однако, несмотря на это, в ВМФ США было поставлено 478 машин и ещё 79 были проданы Ирану в 1976 - 1978 годах (модификация F-14A-GR).

Но ненадёжность двигателя TF30-P-412 продолжала преследовать самолёты. Двигатель, обладавший недостаточной для тяжёлого самолёта тягой, был склонен к помпажу на больших углах атаки, а также при резкой работе РУДом на сверхзвуковых скоростях. Усовершенствованная в 1977 году модификация двигателя - TF30-P-414 положение не улучшила, поскольку и так не очень приёмистый двигатель стал ещё тяжелее. На середину 1984 года в авариях и катастрофах разбилось около 70 истребителей. Основные причины - пожар двигателей и сваливание самолёта в штопор. Из-за высокой аварийности и чрезмерной дороговизны самолёта корпус морской пехоты отказался принимать на вооружение "Томса", предпочтя более надёжный и простой F-18, который к тому же был и более универсальным.

На борту авианосца находилось не менее восьми ТРДДФ TF30, предназначенных для установки на самолёты взамен вышедших из строя. Нормальной ситуацией было, когда восемь из двенадцати "Томса" эскадрильи были пригодны к выполнению боевых заданий.

Аварии и катастрофы, произошедшие с "Томса" по причине неполадок с двигателями, побудили министра ВМФ Джона Лемана (John Lehman) в 1984 году на слушаниях в конгрессе в сердцах заявить, что "самолёт F-14A с ТРДД TF30, вероятно, является иллюстрацией наихудшего согласования характеристик самолёта и двигателей в авиации ВМС за многие годы. Двигатель TF30 - ужасен, он послужил причиной потери 28,2 % самолётов из всех разбившихся F-14. Самолёт F-14A может выполнять требуемые задачи, но пилотировать его следует очень осторожно, полёт самолёта на больших высотах с малыми скоростями связан в некоторых случаях с большим риском".



Рис. 1.31 Дефекты турбины высокого давления [37]

На протяжении полутора десятков лет предпринимались попытки оснастить F-14 другими двигателями вместо TF30. Так, совместно с BBC прорабатывался вариант применения для F-14 модификации двигателя General Electric F101-X, используемого на бомбардировщике B-1 [38].

В 1974 году проходил испытания F-14B, оснащённый ТРДДФ F401-PW-400, имевшего тягу на форсажном режиме 124,6 кН (12 700 кгс). Разработка этого двигателя была прекращена в апреле 1974 года в связи с техническими трудностями и высокой стоимостью.

Лётные испытания выявили ряд серьёзных недостатков нового двигателя и необходимость его доработки, которая оказалась слишком дорогой, и опытный F-14B (первая модификация с обоз-

начением "В") был поставлен на консервацию. С 1977 года на F-14 стали устанавливать очередную версию TF30 - ТРДД TF30-P-414, а с 1983 года - TF30-P-414A. Доработки увеличили надёжность двигателя, однако при этом возросла его масса, а тяга осталась прежней, так что лётные характеристики самолёта с ТРДД TF30-P-414 не улучшились [39].

В течение полутора десятков лет для F-14 подыскивали более подходящие двигатели, но вопрос решился только к концу 1980-х годов, после установки двигателя General Electric F110-GE-400, которым оснащали истребители F-15 и F-16. Процесс переоснащения новыми двигателями происходил в течение 1988 - 1990 годов и серийные самолёты F-14A в мае 1991 года получили обозначение F-14B. Стоимость этой операции была оценена в \$1,7 млрд. [39].



Рис. 1.32 Самолёт F-14A Tomcat с двигателями TF30 P-414

Рис. 1.33 Компоновочная схема и вооружение самолёта F-14A



Рис. 1.34 F-14 сопровождает советский бомбардировщик Ту-95РЦ, 1991 г.



Рис. 1.35 Хронология разработки и производства самолёта F-14 Tomcat

Двигатель TF30 был новаторской разработкой, но его многочисленные проблемы серьёзно повредили репутации PW как в BBC, так и в ВМС.

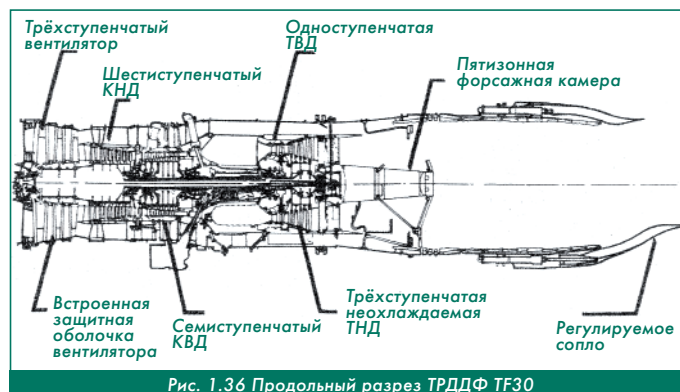


Рис. 1.36 Продольный разрез ТРДДФ TF30

Основные параметры модификаций двигателя TF30 [3, 4, 13, 22, 29, 30, 32, 33, 40 - 48]

Двигатель	TF30-P-1 (JTF10A-20)	TF30-P-1A	TF30-P-2 (JTF10A-7)	TF30-P-3 (JTF10A-21)	TF30-P-5	TF30-P-6 (JTF10A-8)	TF30-P-6A	TF30-P-6C	TF30-P-7 (JTF10A-27D)	TF30-P-8 (JTF10A-9)	TF30-P-9 (JTF10A-36)	TF30-P-12 (JTF10A-27A)	TF30-P-14	1
Применение	F-111A	-	-	F-111A/E/F	-	LTVA-7A	-	-	F-111A	LTVA-7B/C/E, TA-7C	F-111D	F-111B, F-14A	-	2
$P_{\text{ф}}$ , кН (кгс)	82,8 (8437)	-	-	82,3 (8390)	-	-	-	-	90,6 (9230)	-	91,9 (9360)	90,1 (9180)	-	3
$C_{\text{уд.ф}}$ , кг/кН·ч (кг/кгс·ч)	254,7 (2,5)	-	-	254,7 (2,5)	-	-	-	-	307 (3,013)	-	266 (2,61)	309,7 (3,04)	-	4
$P_{\text{вэл.}}$ , кН (кгс)	47,9 (4876)	-	-	47,8 (4875)	-	50,1 - 51,2 (5100-5220)	-	-	55,6 (5670)	54,3 (5535)	55,4 (5640)	54,7 (5575)	-	5
$C_{\text{уд.вэл.}}$ , кг/кН·ч (кг/кгс·ч)	-	-	-	-	-	63,2 (0,62)	-	-	-	64,2 (0,63)	-	-	-	6
$C_{\text{уд.кр.}}$ , кг/кН·ч (кг/кгс·ч)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
$G_{\text{в}}$ , кг/с	-	-	-	112	-	-	-	-	-	116	-	-	-	8
$T_r$ , К	1373	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1425	1439	-	9
$m$	1,1	-	-	1,1	-	-	-	-	1,05	0,99	0,85	1,05	-	10
$\pi_{\text{к}}$	17	-	-	17	-	17,1	-	-	17,5	18,1	18	17,5	-	11
$\pi_{\text{в}}$	-	-	-	2	-	2,14	-	-	-	-	-	-	-	12
$n_{\text{ВД}}, n_{\text{НД}}$ , об/мин	-	-	-	/9500	/9500	-	-	-	-	14 575/9820	-	-	-	13
$M_{\text{дв}}$ , кг	-	-	-	-	-	1130-1230	-	-	1869	1146	-	1826	-	14
$L_{\text{дв}}$ , м	6,44	-	-	4,528	-	-	-	-	-	-	-	6,13	-	15
$D_{\text{дв}}$ , м	1,219	-	-	-	-	-	-	-	1,288	-	-	1,288	-	16
$D_{\text{вх}}$ , м	-	-	-	0,965	-	0,965	-	-	0,965	1,068	-	-	-	17
1	TF30-P-16	TF30-P-18 (JTF10A-15)	TF30-P-100 (JTF10A-32C)	TF30-P-103	TF30-P-107	TF30-P-108	TF30-P-109	TF30-P-401	TF30-P-408 (JTF10A-16A)	TF30-P-412 (JTF10A-27F)	TF30-P-412A	TF30-P-414	TF30-P-414A	TF30-P-420
2	-	LTVA-7E	F-111F	F-111C	F-111G	F-111G	F-111G, EF-11A	F-14A	A-7P, EA-7L, TA-7C/P	F-111B, F-14A	-	F-14A	F-14A	LTVF-8J
3	-	-	111,8 (11395)	-	-	-	90,6 (9230)	92,3 (9700)	-	90,1 (9180)	93,0 (9480)	-	93,2 (9500)	87,2 (8890)
4	-	-	249,7 (2,45)	-	-	-	-	-	-	283,3 (2,78)	283,3 (2,78)	-	283,3 (2,78)	-
5	-	66,7 (6800)	64,9 (6610)	-	-	-	55,6 (5670)	-	55,4 (5640)	54,7 (5575)	55 (5600)	-	55 (5600)	-
6	-	-	69,6 (0,686)	-	-	-	-	-	64,9 (0,64)	-	-	-	70,3 (0,69)	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64,3 (0,631)	-
8	-	-	118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	110	-
9	-	-	1450	-	-	-	-	-	1420	1439	-	-	1500	-
10	-	-	0,73	-	-	-	-	-	0,878	1,05	-	-	0,9	-
11	-	-	21,8	-	-	-	-	-	19,8	17,5	19,8	-	19,8	-
12	-	-	2,14	-	-	-	-	-	2,4	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14 780/10 000	-
14	-	-	1816	-	-	-	-	-	1178	1826	1800	-	1905	-
15	-	-	6,14	-	-	-	-	-	-	6,13	-	-	6,0	-
16	-	-	1,245	-	-	-	-	-	1,067	1,288	1,295	-	1,3	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## Особенности конструкции ТРДДФ TF30-P-100

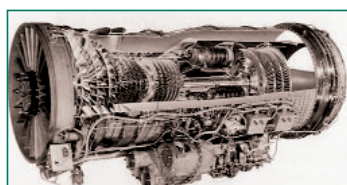


Рис. 1.37 ТРДДФ TF30-P-100



Рис. 1.38 TF30 - двухроторный ТРДДФ со смещением потоков

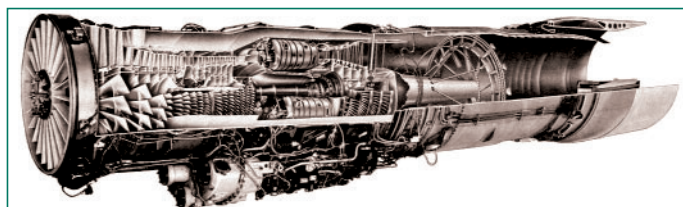


Рис. 1.39 TF30-P-100

Конструктивно-силовая система двигателей семейства TF30 включает семь подшипников, в том числе один (№ 41/2) межвальный и два сдвоенных (№ 2, 2A, 4, 4A), а также 4 силовые опоры (рис. 1.40).

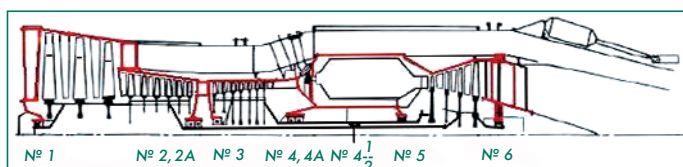


Рис. 1.40 Расположение подшипников и опор на конструктивно-силовой схеме ТРДДФ TF30

**Воздухозаборник** - прямой кольцевой типа "Питон" с 23 неподвижными полыми направляющими лопатками (у модификаций TF30-P-8 и TF30-P-408 этих лопаток 19), обогреваемые воздухом для защиты от обледенения.

**Вентилятор** - трёхступенчатый (у модификаций TF30-P-8 и TF30-P-408 - двухступенчатый), выполнен из титанового сплава. Рабочее колесо 1-й ступени имеет 28 лопаток, 2-й и 3-й ступеней - по 36 лопаток. Все рабочие лопатки снабжены антивибрационными полками и замками типа "ласточкин хвост". Направляющие аппараты всех трёх ступеней имеют соответственно 44, 44 и 48 лопаток, которые закреплены электроклёпкой. Ротор общий с ротором КНД.

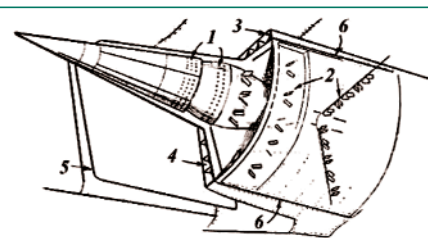


Рис. 1.41 Схема воздухозаборника двигателя TF30-P-1 на самолёте F-111 [31]:  
1 - отверстия для слива пограничного слоя с поверхности конуса; 2 - заливчики; 3 - канал слива пограничного слоя с нижней обшивки крыла; 4 - канал слива пограничного слоя с разделителя; 5 - канал слива пограничного слоя с фюзеляжа; 6 - направляющие рейки для перемещения передней части обечайки

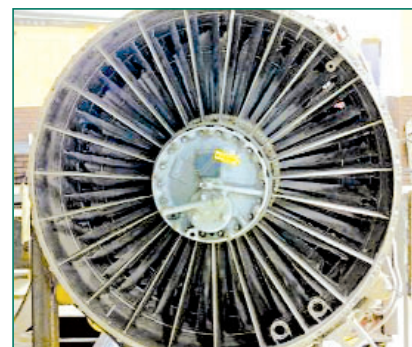


Рис. 1.42 Вентилятор двигателя TF30. Видны лопатки, повреждённые посторонними предметами



В отличие от предыдущих версий, в TF30-P-100 изменён профиль внутренней стенки воздушного канала в последней ступени вентилятора и при входе в КНД, что позволило получить более высокую окружную скорость у корня рабочих лопаток с целью обеспечения необходимой степени повышения давления воздуха у втулки вентилятора. В результате была обеспечена необходимая производительность КНД [30].

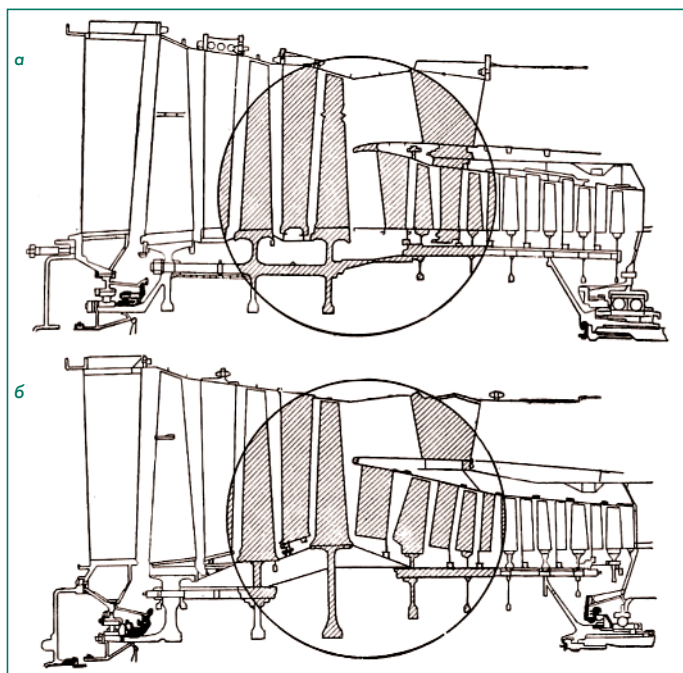


Рис. 1.43 Изменение формы внутренней стенки воздушного канала на входе в КНД:  
а) - конструкция в ранних модификациях ТРДДФ TF30;  
б) - конструкция, принятая в двигателе TF30-P-100

В опытных двигателях TF30 испытывалось рабочее колесо 3-й ступени вентилятора с лопатками, изготовленными из боралюминиевого композитного материала. Масса такого колеса снизилась на 36 %.

**Компрессор низкого давления** - шесть ступеней (у модификаций TF30-P-8 и TF30-P-408 - семь). Рабочие лопатки изготовлены из титанового сплава. Конструктивно ротор КНД объединён в один узел с ротором вентилятора. Корпус состоит из четырёх частей и изготовлен из титанового сплава. Ротор барабанный-дискового типа. Отбор воздуха - за шестой ступенью. Статорные лопатки стальные. Рабочие и направляющие лопатки первых двух ступеней выполнены наклонными, что повысило КПД. КНД благодаря уменьшению отрыва пограничного слоя [30]. Рабочие колёса имеют лопатки с замками типа "ласточкин хвост". Лопатки направляющих аппаратов зафиксированы штифтами.

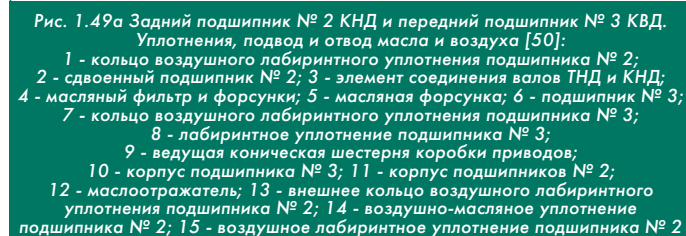
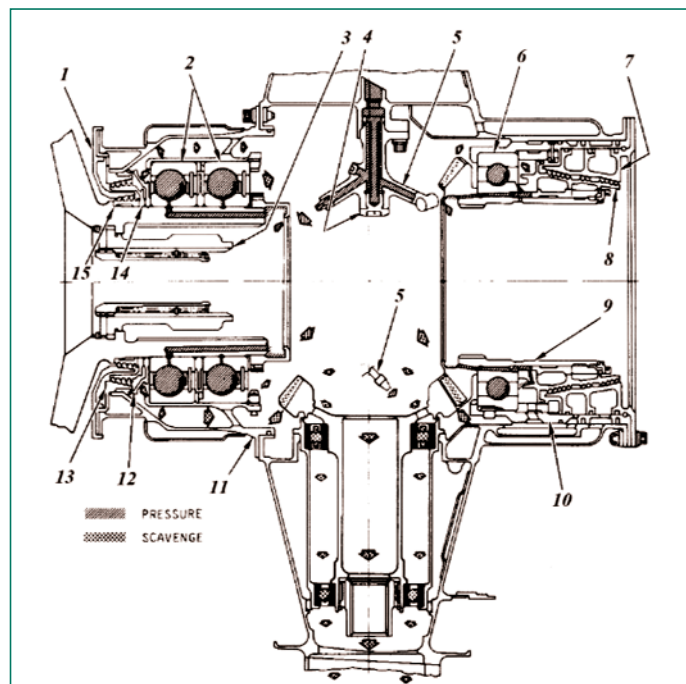
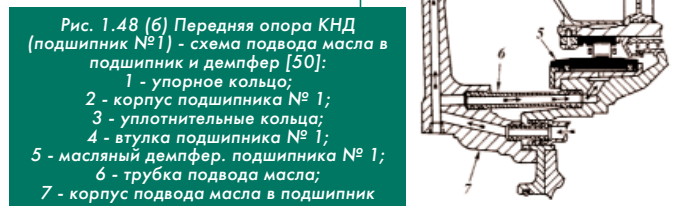
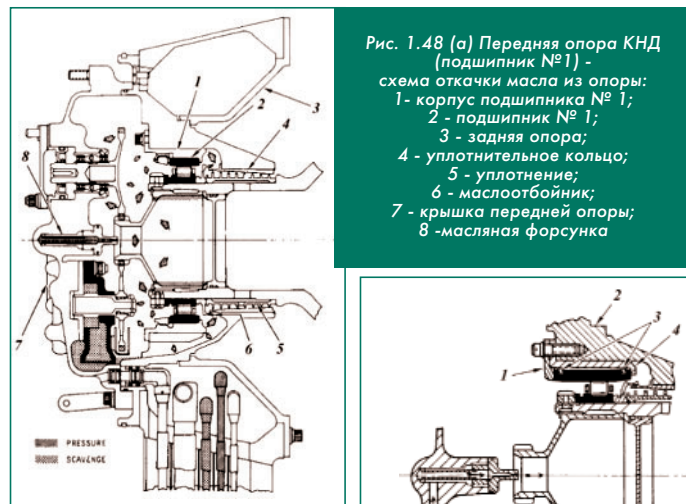
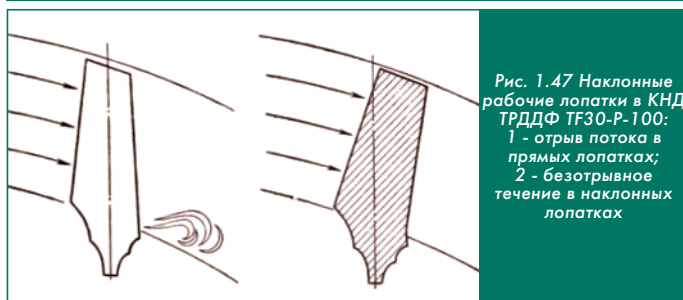




Рис. 1.50 Схема обнаружения дефекта "стружка в масле". При разборке двигателя было обнаружено, что наружное кольцо подшипника не было закреплено в корпусе и оно провернулось в посадочном месте. Это привело к износу и появлению металлических частиц в масле

**Компрессор высокого давления** включает семь ступеней. Роторная часть изготовлена в основном из сплава на основе никеля. Корпус изготовлен из титанового сплава.



Рис. 1.51 КВД

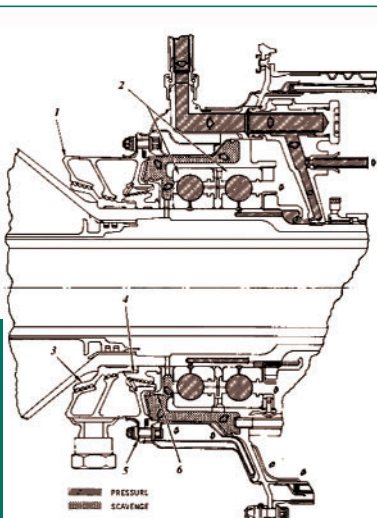


Рис. 1.52 Задние подшипники КВД (№ 4):  
1 - статорная часть воздушного лабиринтного уплотнения;  
2 - сдвоенный подшипник № 4;  
3 - роторная часть воздушного лабиринтного уплотнения;  
4 - воздушно-масляное лабиринтное уплотнение;  
5 - защитный экран;  
6 - маслоотражающее кольцо

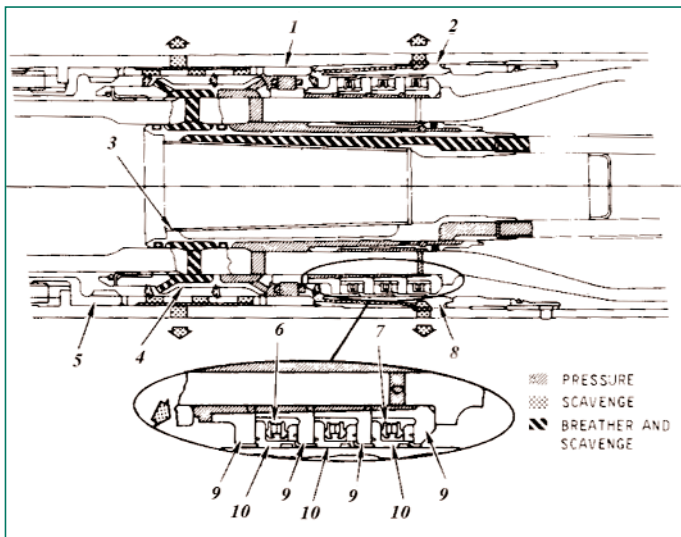


Рис. 1.53 Межвальная опора (подшипник № 4 1/2) [50]:  
1 - подшипник № 4 1/2; 2 - корпус уплотнения; 3 - система подвода и отвода масла; 4 - стопорная гайка внутреннего кольца; 5 - фиксатор; 6 - пружина; 7 - контактное кольцо; 8 - корпус уплотнения; 9 - вращающееся кольцо; 10 - уплотнение

**Камера сгорания** - трубчато-кольцевая с восемью бездымными жаровыми трубами Hastelloy X Flame, каждая из которых во фронтальной части снабжена четырьмя горелками с двухканальными форсунками. Искровые запальные свечи расположены в 4-й и 5-й жаровых трубах. Жаровые трубы имеют двустенную конструкцию "Finwall" с ребристыми стенками, между которыми образуются продольные каналы для охлаждающего воздуха.

Такая конструкция существенно повышает эффективность охлаждения и позволяет снизить потребность в охлаждающем воз-

духе на 50 %. Одновременно повышается прочность труб, что позволяет уменьшить их массу на 20 % [30, 50].

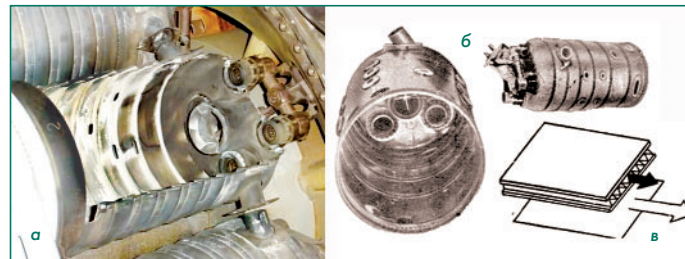


Рис. 1.54 Камера сгорания с жаровой трубой двухстенной конструкции типа "Finwall": а) - размещение жаровой трубы в камере сгорания; б) - внешний вид жаровой трубы; в) - схема стенки "Finwall"

**Турбина высокого давления** - одноступенчатая. Рабочее колесо имеет 98 лопаток, изготовленных из никелевого сплава методом направленной кристаллизации. Лопатки безбандажные, полые, с вставным дефлектором, охлаждаются воздухом.

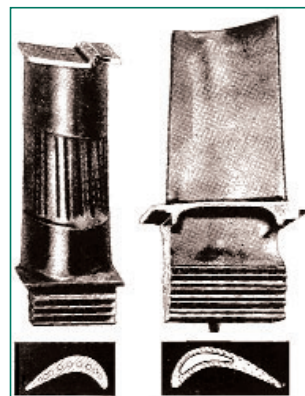


Рис. 1.55 Рабочие лопатки 1-й ступени ТВД двигателя TF30-P-100 (справа) и более ранних модификаций TF30 (слева)

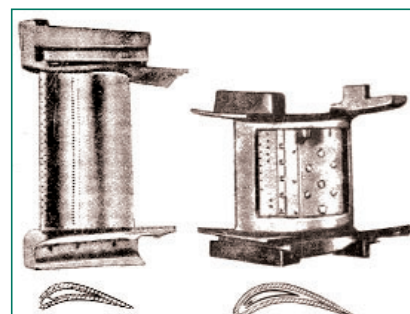


Рис. 1.56 Конструкция сопловых лопаток ТВД двигателей TF30-P-100 (справа) и более ранних модификаций TF30 (слева)

КПД турбины ВД с лопатками такой конструкции при испытаниях превышал 90 %. Сопловые лопатки (40 штук), отлитые из кобальтового сплава с направленной кристаллизацией, имеют конвективно-плёночное охлаждение. Сопловые лопатки с таким охлаждением были испытаны на опытных двигателях и показали хорошие результаты. Максимальная температура газа в ранних моделях составляет 1410K, у модификации TF30-P-100 - 1533K [30, 51].

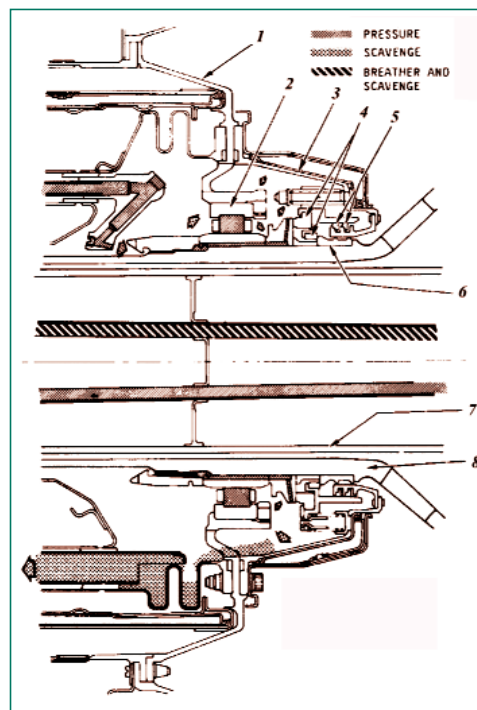


Рис. 1.57 Передний подшипник ТВД (№ 5) [50]:  
1 - корпус подшипника № 5;  
2 - подшипник № 5;  
3 - корпус уплотнения;  
4 - масляные уплотнения;  
5 - контактные кольца;  
6 - воздушное уплотнение;  
7 - вал ротора НД;  
8 - вал ТВД



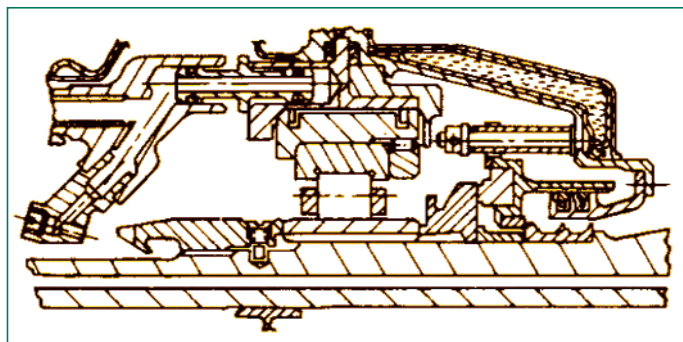


Рис. 1.58 Масляный демпфер переднего подшипника ТВД (№ 5)

**Турбина низкого давления** - трёхступенчатая. Рабочие колеса имеют соответственно 88, 86 и 72 лопатки, изготовленных из никелевого сплава и закреплённых замками ёлочного типа. Температура газа на выходе из турбины составляет 823K.



Рис. 1.59 Сопловая и рабочая лопатки первой ступени ТНД ТРДДФ TF30-P-100 [30]

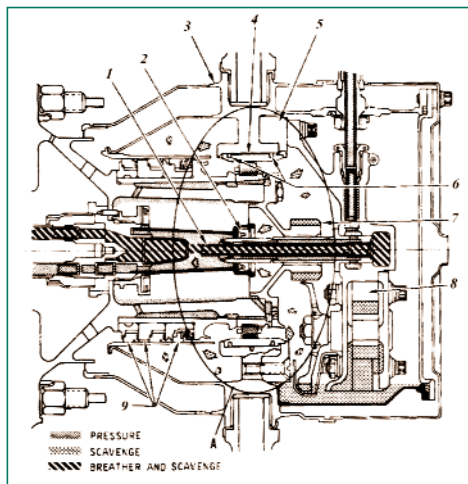


Рис. 1.60 Задний подшипник ТНД (№ 6):  
1 - масляная форсунка; 2 - уплотнение;  
3 - корпус подшипника № 6; 4 - подшипник № 6;  
5 - корпус опоры; 6 - уплотнительные кольца;  
7 - привод откачивающего насоса;  
8 - откачивающий насос;  
9 - масляные уплотнения подшипника № 6

**Форсажная камера** - пятизонная с широким диапазоном регулирования. Смешение потоков газа и воздуха осуществляется в диффузорном канале за цилиндрической разделительной стенкой. Стабилизация пламени - с помощью кольцевого стабилизатора, имеющего ряд радиальных стабилизаторов, отходящих от него к внешней стенке и внутрь камеры. Топливная система форсажной камеры состоит из семи кольцевых топливных коллекторов со струйными форсунками. Топливо подается насосом, обеспечивающим расход топлива до 1815 кг/ч. При больших значениях расхода подача топлива производится центробежным насосом. Зажигание осуществляется с помощью вспомогательной форсунки, находящейся в диффузоре форсажной камеры и соединённой с основной форсункой в корпусе горелки № 4, которая создаёт горячую струю топлива от турбины. В двигателе TF30-P-100 полностью регулируемое включение с помощью электрической системы зажигания мощностью 4 джоуля. По мнению специалистов фирмы, использование этой системы зажигания вместо системы зажигания методом "огневой дорожки", применяющейся на более ранних модификациях ТРДДФ TF30, позволило снизить скачок давления в начальный период запуска на 30...40 %. Максимальная температура газа 1763K [30].

Система регулирования форсажной камеры обеспечивает изменение степени форсирования путем последовательного (зон-

ного) включения подачи топлива в коллекторы. Последовательность включения коллекторов указана цифрами на рисунке 1.61. Применение различных сочетаний пяти зон горения обеспечивает плавное изменение тяги во всём рабочем диапазоне работы форсажной камеры. Форсирование обеспечивает увеличение тяги от 20 до 100 %.

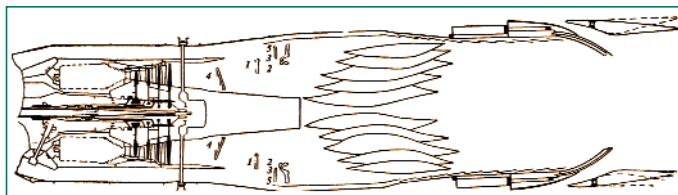


Рис. 1.61 Схема пятизонной форсажной камеры с всережимным регулированием



Рис. 1.62 Стабилизаторы пламени форсажной камеры TF30-P-1. В поздних модификациях (слева) кольцо 3 (стабилизатор горения зоны 1) было расширено и снабжено завихрителями, а кольца 1 и 2 (стабилизатор горения зоны 5) поменяли своё расположение [31, 37]

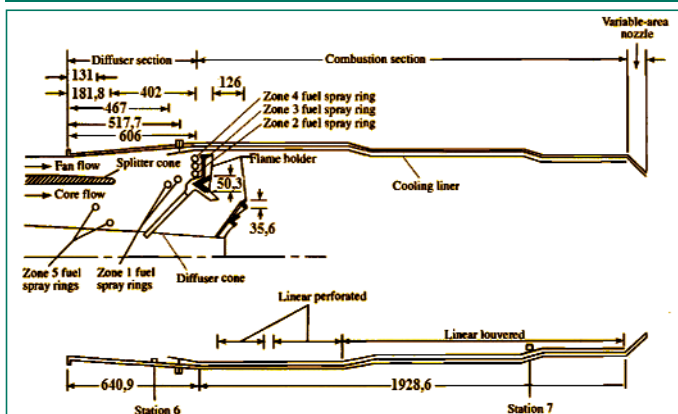


Рис. 1.63 Элементы форсажной камеры TF30-P-3 и их размеры (в мм)

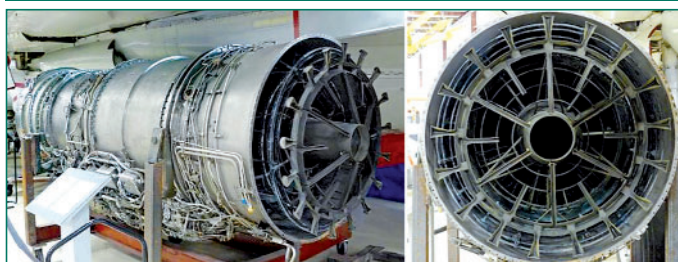


Рис. 1.64 Pratt & Whitney TF30 в Air Victory Museum - слева; форсунки и стабилизаторы форсажной камеры - справа

**Реактивное сопло** - сверхзвуковое, эжекторное, всережимное с проходным сечением на форсированном режиме площадью 0,7 м<sup>2</sup>. Основное сопло - ирисовое, имеет переменную площадь, регулируемую шестью шарнирными сегментами, приводимыми в действие топливными гидроцилиндрами (в модификации двигателя TF30-P-100 используется 18 сегментов, перемещаемых по криволинейному профилю шестью гидроцилиндрами). Вторичное сопло - эжекторный насадок с шестью впускными

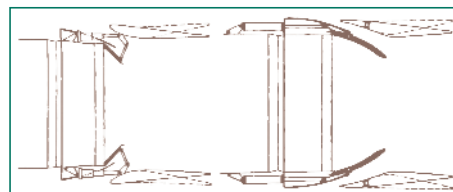


Рис. 1.65 Схемы обычного створчатого сопла (слева) и эжекторного сопла ТРДДФ TF30-P-100



створками, оборудованный свободно плавающими концевыми створками [30].



Рис. 1.66  
Эжекторное сопло на самолёте F-111



Рис. 1.67 Сопло TF30-P-109



Рис. 1.68 Pratt & Whitney TF30-P-109 самолёта F-111 австралийских ВВС



Рис. 1.69 Сопла двигателей PWT30-P-100 самолёта F-111

**Привод агрегатов.** Основная коробка агрегатов, расположенная под компрессором, приводится от ротора ВД через коническую передачу. На коробке агрегатов расположены приводы к топливным насосам - основному и форсажной камеры, основному масляному насосу, тахометру вала ВД, стартеру, гидронасосу и валу отбора мощности.

**Система регулирования** - гидромеханическая. Система ограничения максимальной температуры газа в турбине состоит из датчика температуры и электронного регулятора, сравнивающего температуру газа с заданным её предельным значением и при необходимости уменьшающего подачу топлива для защиты от перегрева.

**Топливная система** - высокого давления ( $77 \text{ кгс/см}^2$ ) с гидромеханическим управлением. Основные элементы системы: топливный насос, фильтр, теплообменник, топливный регулятор.

Для форсажной камеры используется отдельная топливная система.

Марка топлива - JP-4, JP-5.

**Масляная система** - циркуляционная, с горячим маслобаком. Масло MIL-L-7808. Нагнетающий насос подаёт масло под давлением  $3,2 \text{ кгс/см}^2$ . Теплообменники: воздушно-масляный расположен на планере и два топливомасляных - на двигателе (один из них для форсажной камеры). Масло возвращается в бак откачивающими насосами через воздухоотделитель. Масляный бак изготовлен в одной отливке с коробкой агрегатов.



Рис. 1.70 Бомбометание с самолёта-бомбардировщика FB-111 A-1 action



Рис. 1.71 Самолёт-бомбардировщик FB-111 A-1 action в полёте

Автономная система подогрева масла с сухим поддоном. Корпус дополнительного редуктора образует резервуар объёмом 15 литров. Масло циркулирует при давлении 3,1 бар через насос, фильтр, теплообменники (воздушно-масляный на корпусе, топливомасляный в двигателе и топливомасляный теплообменник кондиционера) и три основных подшипника. Возвращается с помощью откачивающих насосов и воздухоотделитель.

**Система запуска.** Воздушный турбостартер, установленный на коробке агрегатов. Запуск двигателей на самолёте F-14A осуществляется воздушно-турбинным стартером ATS200-50 фирмы AiResearch.

**Крепление двигателя** осуществляется в двух плоскостях. Передняя пара фланцев воспринимает вертикальные, боковые и тяговые нагрузки. Задняя пара фланцев (на уровне подшипника № 6 - за турбиной НД) воспринимает вертикальные и боковые нагрузки.

**Ресурс** в 1971 - 1972 годах составлял 300 ч, в 1973 г. - 400 ч, в 1974 году - 600 ч с последующим увеличением до 1000 ч.

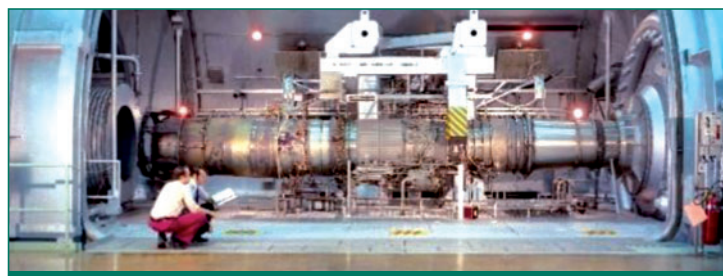


Рис. 1.72 Двигатель PWT30 на испытательном стенде [37]



Рис. 1.73 Компонировочная схема и вооружение самолёта F-111 с двигателями PW TF30-P-100

(Продолжение следует.)



# МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

## ОБОСНОВАНИЕ ДОПУЩЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

Александр Иванович Бажанов, академик МИА  
Николай Юрьевич Кочетков, к.т.н., старший преподаватель ФГБОУ ВО "МАИ (НИУ)"  
Анатолий Алексеевич Сперанский, президент ИААБ, DExpert ISCED

**В статье представлены материалы по анализу уровня сравнительных величин членов уравнений сохранения, позволяющих на основании критических оценок провести преобразования для получения аналитических решений, необходимых для расчетов при разработке и проектировании энергодвигательных установок. Приведены примеры получения главного уравнения колебательного звена неустойчивой системы и соотношения для прогноза возникновения турбулентных течений.**

**The article presents materials on the analysis of the level of comparative values of the terms of conservation equations, which make it possible, based on critical estimates, to carry out transformations to obtain analytical solutions necessary for calculations in the development and design of power propulsion systems. Examples of obtaining the main equation of the oscillatory link of an unstable system and the ratio for predicting the occurrence of turbulent flows are given.**

**Ключевые слова:** уравнения сохранения, допущения в газовой динамике, турбулентность, неустойчивость, двухфазность.

**Keywords:** conservation equations, assumptions in gas dynamics, turbulence, instability, two-phase.

В процессе теоретического анализа основной проблемой является получение определяющих уравнений сохранения и их решений в конечном виде. Такие представления дают мощный аппарат для анализа происходящих процессов, позволяют выявить тенденции и дать прогноз в диапазоне широких интервалов по координатам и по времени. В отличие от вычислительного анализа теоретический метод позволяет получать непрерывные взаимосвязанные решения во всей допустимой области определения, выявлять специальные точки, линии и поверхности, где решения существуют. А также локализовать сингулярности и другие нехарактерные особенности. Аналитические решения позволяют доказывать теоремы, находить точно предельные состояния и выявлять экстремальные и асимптотические значения.

Часто для получения конечных зависимостей приходится делать допущения и упрощения. Эти операции можно сделать строго, например, тщательно оценивая пренебрегаемые члены уравнений, а можно с помощью простого механического их отброса. Во втором случае можно потерять качество и даже приобрести новый смысл, который в последствии может дать неправильный результат. Главное, при такой операции не поменять постановку задачи.

Сложность решений термогазодинамических уравнений сохранения предполагает предварительный глубокий физический анализ исследуемых областей течений. Часто, прежде чем численно решать сложное дифференциальное уравнение, целесообразно выявить в происходящем процессе определяющие области. Так, например, в сверхзвуковом потоке не нужно решать задачу турбулентности и неустойчивости, а для двухфазного течения в сверхзвуке не нужно решать задачу коагуляции и дробления частиц [1, 2, 3]. При этом уравнения сильно упрощаются, а постановка задачи не меняется.

Тонким моментом при исследованиях является учёт вязкости и сжимаемости. Отбрасывая вязкость, получаем уравнение для, так называемого, идеального газа. В этом случае не удастся сохранить постановку задачи. Граничные условия прилипания на стенке, вынужденно заменяются на условия непротекания. В результате чего в решении получается конечная скорость на стенке.

Переход к несжимаемой модели жидкости не позволяет решать задачи неустойчивости в дозвуке. Для сверхзвукового потока уравнения несжимаемого течения также несправедливы, так как нарушается эксклюзивное свойство сверхзвуковой сжимаемой среды.

### Упрощение уравнений сохранения

К уравнениям сохранения в термогазодинамике относят три основополагающих уравнения: векторное уравнение движения, уравнение неразрывности и уравнение энергии. Удобно эти уравнения записывать для линии тока или, что тоже самое, вдоль линии тока. На этой линии параметры имеют абсолютные значения: скорость, плотность и давление.

Уравнение движения [4]:

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\text{grad} p + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad div} V.$$

Уравнение неразрывности [5]:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \text{div} V.$$

Уравнение энергии в механической форме [6]:

$$\frac{1}{\rho} d\rho + d \frac{V^2}{2} + dL_{Tp} = 0.$$

Записанные уравнения отражают динамику процесса вдоль линии тока и учитывают вязко-упругие эффекты. Они достаточно полно описывают все виды течения: ламинарное, переходное и турбулентное. Но эта система, естественно, не учитывает особенности неравновесного и двухфазного течений.

### Вывод уравнения энергии

Уравнение энергии [6, 9] в неподвижной системе координат:

$$dQ - d(Pv) - dL - dL_{Tp} = du + d \frac{W^2}{2} + dz,$$

Совместно с уравнением:

$$dQ = du + Pdv.$$

После преобразования превращается в уравнение:

$$\frac{1}{\rho} d\rho + d \frac{V^2}{2} + dL_{Tp} = 0.$$

Или

$$\text{grad} P + \rho \text{grad} \frac{\bar{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div} \bar{V} = 0.$$

### Преобразование уравнения движения

Как уже было показано, уравнение движения в форме Навье-Стокса записывается в виде:

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\text{grad} p + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad div } V.$$

Раскрывая субстанциональную производную и лапласиан, получаем:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} + \rho [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] + \text{grad} P + \mu \text{rot rot } \vec{V} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} = 0.$$

Собираем все градиенты под скобку:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left( \text{grad} P + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} \right) + \rho [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] + \mu \text{rot rot } \vec{V} = 0,$$

или:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left( \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \nu \text{grad div } \vec{V} \right) + [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] + \nu \text{rot rot } \vec{V} = 0.$$

Учитывая, что значение в круглых скобках равно нулю, получаем:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + [\text{rot} \vec{V} \times \vec{V}] + \nu \text{rot rot } \vec{V} = 0.$$

Умножая далее уравнение на  $\rho \vec{V}$ , имеем:

$$\frac{\rho \vec{V} \partial \vec{V}}{\partial t} + \mu \vec{V} \text{rot rot } \vec{V} = 0.$$

Преобразуем механическую форму уравнения энергии

$$\text{grad} P + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} = 0$$

с помощью тождества Лагранжа:

$$\text{grad} P + \text{grad} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} - \frac{M^2}{2} \text{grad} P - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} = 0;$$

$$\left( 1 - \frac{M^2}{2} \right) \text{grad} P + \text{grad} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} = 0.$$

#### Численные оценки членов уравнения

Произведем оценку величин значений второго члена в скобке и последнего члена.

Вначале оценим третий член под градиентом, учитывая, что:

$$\beta = a_{кр}/\kappa \pi_{кр}, \text{ то}$$

$$-\frac{4}{3} \mu \text{div } V = \frac{4}{3} \mu \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \frac{V_{кр}}{V_{кр}} = \frac{4}{3} \mu \frac{dm}{\rho V_{кр} dt} =$$

$$= \frac{4}{3} \mu \frac{P_{кр} F_{кр}}{\rho V_{кр} \beta} = \frac{4}{3} \mu a^2 \frac{\pi_{кр} \rho_{кр} d_{кр}}{\rho_{кр} a_{кр} d_{кр} L_{эф}}.$$

Далее, оцениваем порядок полученного члена:

$$\frac{4}{3} a^2 \frac{\pi_{кр} \rho_{кр} d_{кр}}{Re_{кр} L_{эф}}$$

по результатам анализа параметров большой выборки натуральных советских, российских и зарубежных двигателей. С помощью термодинамических программ АСТРА и RPA были определены параметры более 50 двигателей. Были выявлены интервалы, в которых они находятся. Определены их средние величины и разбросы. Наиболее надежные значения были сгруппированы и представлены в виде графиков. Интересной представлялась зависимость числа Рейнольдса в критическом сечении для большой выборки двигателей. Она представлена на рис. 1:

Из расчетов видно, что самое большое число Рейнольдса не превышает значения  $10^8$  и, в среднем составляет величину, равную  $16,5 \cdot 10^6$ .

С учетом того, что самое большое число Рейнольдса в критике, после преобразований получаем, что:

$$\eta = \frac{\nu}{a_{кр}} = \frac{\mu}{\rho a_{кр}},$$

где  $\eta$  - колмогоровский масштаб;  $\mu$ ,  $\nu$  - динамическая и кинемати-

ческая вязкости;  $\rho$  - плотность рабочего тела;  $a_{кр}$  - скорость звука в критическом сечении.

Расчеты показали, что отношение  $\mu/a_{кр}$  является величиной, примерно постоянной (рис. 2), а величина  $\eta$  существенно зависит от плотности продуктов сгорания (рис. 3).

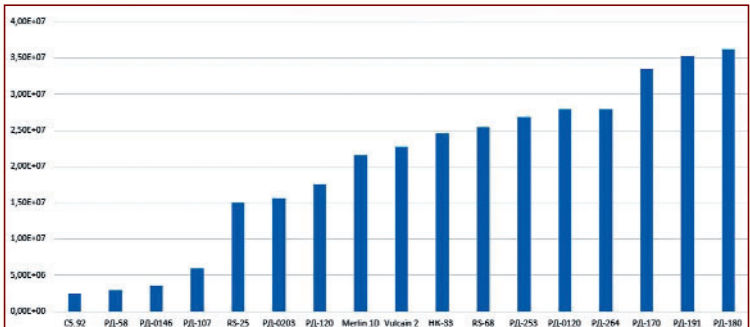


Рис. 1 Число Рейнольдса в критическом сечении

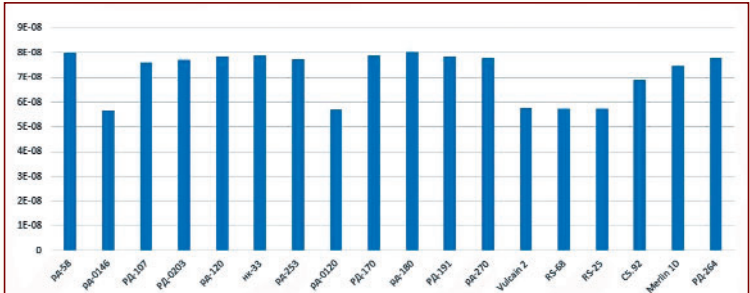


Рис. 2 Отношение динамической вязкости к скорости звука в критическом сечении



Рис. 3 Число Колмогорова

Продолжаем оценивать члены. Проведенные термогазодинамические расчеты показали, что число Маха в камерах более пятидесяти двигателей не превышает значения  $M = 0,27$ . При этом значение  $M^2/2 = 0,03$ , что составляет 3 % по сравнению с единицей.

Становится справедливым уравнение, записанное через  $0(M)$  - функцию, учитывающую сжимаемость:

$$\left( 1 - \frac{M^2}{2} \right) \text{grad} P + \text{grad} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} = 0;$$

$$(1 - 0(M)) \text{grad} P + \text{grad} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} = 0.$$

и тогда:

$$\text{grad} P + \text{grad} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} = 0.$$

Здесь  $0(M)$  - нулевая функция, зависящая от числа Маха.

Далее сделаем оценки для величины вязко-упругого члена в уравнении, записанного в механической форме энергии. Для чего выбираем из полученных в расчетах интервалов их средние значения:  $K = 1,18$ ;  $\pi_{кр} = 0,56839$ ;  $\rho_{кр} = 4,3 \text{ кг/м}^3$ ;  $L_{эф}/d_{кр} = 12,43$ ;  $a^2 = 1,7978 \cdot 10^6$ ;  $Re_{кр} = 16,5 \cdot 10^6$  и подставляем их в следующее выражение:

$$\frac{4}{3} a^2 \frac{\pi_{кр} \rho_{кр} d_{кр}}{Re_{кр} L_{эф}} = \frac{4 \cdot 1,7978 \cdot 10^6 \cdot 0,56839 \cdot 4,3}{3 \cdot 16,5 \cdot 10^6 \cdot 12,43} = 0,0286 < 3 \%.$$



Вспоминая понятие сжимаемость:

$$B = \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{a^2}$$

и, учитывая его малость, записываем вязко-упругий член также в виде нулевой функции, зависящей от вязкости и сжимаемости:

$$\frac{4}{3} a^2 \frac{\pi_{кр} \rho_{кр} d_{кр}}{Re_{кр} L_{эф}} = O(\mu, B).$$

Тогда вновь записывая уравнение энергии с учетом полученного факта:

$$\text{grad} P + \rho \text{grad} \frac{\bar{V}^2}{2} + O(\mu, B) = 0,$$

имеем:

$$\text{grad} P + \rho \text{grad} \frac{\bar{V}^2}{2} = 0.$$

Или, переходя к производным, получаем зависимость:

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = - \frac{dP}{dt}.$$

### Получение главного уравнения колебательного звена

Полученные достаточно строгие оценки позволяют получить важные для практических расчетов уравнения. Получим главное уравнение колебательного звена, необходимое для расчетов процессов неустойчивости в ЖРД. Исходим из полученного выше соотношения:

$$\rho \bar{V} \cdot \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \mu \bar{V} \cdot \text{rot rot} \bar{V} = 0.$$

Используя полученное уравнение энергии, переходим к записи через давление:

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \mu \bar{V} \cdot \text{rot rot} \bar{V} = 0.$$

Берем частную производную в точке, тем самым предполагая получить в каждой точке поля осциллятор:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial (\bar{V} \cdot \text{rot rot} \bar{V})}{\partial t} = 0.$$

Правую производную расписываем как произведение:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \mu \cdot \text{rot rot} \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} - \mu \bar{V} \frac{\partial (\text{rot rot} \bar{V})}{\partial t} = 0.$$

Опуская преобразования, изложенные в [8], окончательно получаем главное уравнение колебательного звена, справедливое для точки. Другими словами, получаем обыкновенное дифференциальное уравнение колебания осциллятора в каждой точке поля:

$$\frac{d^2 P}{dt^2} + \frac{4v}{R^2} \frac{dP}{dt} + 4v \frac{kM^2}{2R^2} P \frac{\partial \ln \left( \frac{\bar{\omega} R}{\bar{\omega}^2} \right)}{\partial t} = 0.$$

Статическое давление представим в виде суммы среднего давления в камере и возможного колебательного давления в случае возникновения неустойчивости процесса:  $P = \bar{P} + \tilde{P}$ , тогда:

$$\frac{\partial^2 \tilde{P}}{\partial t^2} + \frac{4v}{R^2} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial t} + 4v \frac{kM^2}{2R^2} \tilde{P} \frac{\partial \ln \left( \frac{\bar{\omega} R}{\bar{\omega}^2} \right)}{\partial t} = 4v \frac{kM^2}{2R^2} \bar{P} \frac{\partial \ln \left( \frac{\bar{\omega} R}{\bar{\omega}^2} \right)}{\partial t}.$$

Полученное уравнение содержит вынуждающую силу справа (нелинейный член уравнения), внутри которой присутствует давление  $\bar{P}$ , полученное в результате химической реакции с выделением тепловой энергии.

### Получение условий существования турбулентности

Учитывая, что турбулентное течение - это вихревое течение, получим условие существования вихря. В соответствии с работой [1], где используется преобразованное уравнение энергии с уче-

том 0-функции, представим производную от импульса в следующем виде:

$$\frac{\partial \bar{J}}{\partial t} = (M^2 - 1) \text{grad} P.$$

После преобразований получаем:

$$\rho \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = \bar{V} \text{div}(\rho \bar{V}) + (M^2 - 1) \text{grad} P.$$

Уравнение Навье-Стокса слева умножим на вектор скорости и после применения второй теоремы турбулентности и последующих преобразований, получим:


$$\frac{\bar{V}^2}{\rho} \text{div}(\rho \bar{V}) + \frac{M^2 - 1}{\rho} \bar{V} \text{grad} P = -v \text{rot}^2 \bar{V}.$$

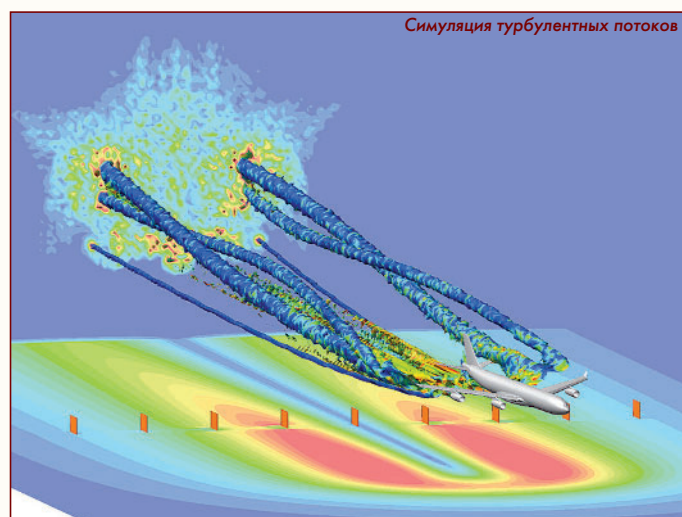
И решаем относительно ротора:

$$\text{rot}^2 \bar{V} = \frac{1 - M^2}{\mu} \bar{V} \text{grad} P - \frac{M^2}{\mu} \bar{V} \text{grad} P = \frac{\bar{V} \text{grad} P}{\mu} \left( \frac{1 - M^2}{\mu} + \frac{M^2}{\mu} \right).$$

В итоге получаем:

$$\text{rot} \bar{V} = \pm \sqrt{\frac{\bar{V}}{\mu}} \text{grad} P.$$

Таким образом на двух конкретных примерах показана возможность получения кондиционных уравнений, необходимых при разработке изделий. 



### Список источников

1. Кочетков Ю.М. Турбулентность и математическое доказательство её невозможности в сверхзвуковом потоке // Двигатель. 2018. № 3.
2. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Прогноз и экспертиза устойчивой работы ЖРД на стадии проектирования и экспериментальной отработки // Двигатель. 2019. № 1.
3. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Опыты Куренкова и фундаментальные уравнения двухфазной газовой динамики сверхзвуковых сопел // Двигатель. 2015. № 2.
4. В.В. Струминский. Основные направления теоретических исследований проблемы турбулентности. Сборник. Механика турбулентных потоков. М.: Наука, 1980.
5. Л.Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М.: ДРОФА, 2003.
6. Г.Н. Абрамович. Прикладная газовая динамика. М.: ИТЛ, 1953.
7. Г.В. Липман, А. Рошко. Элементы газовой динамики. М.: Изд. Иностранной литературы, 1960.
8. Кочетков Ю.М. Турбулентность и неустойчивость в ЖРД // Двигатель. 2011. № 6.
9. Кочетков Ю.М., Кочетков Н.Ю. Турбулентность в соплах с предварительной закруткой потока и более строгое доказательство второй и пятой теорем турбулентности // Двигатель. 2025. № 1-3.

Связь с авторами: kolabuy@gmail.com

# XXII ОЛИМПИАДА ПО ИСТОРИИ АВИАЦИИ И ВОЗДУХОПЛАВАНИЯ

ОЛИМПИАДА



**Светлана Валентиновна Александрова**, старший менеджер Союза авиастроителей  
**Александр Иванович Бажанов**, академик Международной инженерной академии

**М**олодёжный симпозиум - финал XXII Международной олимпиады по истории авиации и воздухоплавания им. А.Ф. Можайского, посвящённой 200-летию со дня рождения А.Ф. Можайского состоялся 25 апреля 2025 года.

Олимпиада стала традиционной и проводится каждый учебный год с целью популяризации достижений технической мысли в области авиации и воздухоплавания, выявления творческой молодёжи и её профессиональной ориентации на специальности, связанные с созданием и эксплуатацией авиационной техники. Олимпиада проводится для юношей и девушек в возрасте от 12 до 18 лет, независимо от гражданства и места проживания, добровольно изъявивших желание принять участие в олимпиаде. Рабочий язык олимпиады - русский. Олимпиада привлекает подростков, увлекающихся авиацией, из различных регионов России, ближнего и дальнего зарубежья. В течение всего учебного года участники публикуют свои работы, получают отзывы на них как от своих сверстников, так и от профессионалов, общаются с интересными людьми. Тот факт, что первый тур олимпиады проходит в сети интернет, а второй - очный - в виде Молодёжного симпозиума финансируется спонсорами и меценатами, позволяет подросткам участвовать в мероприятии независимо от благосостояния их семей. В этом году в первом туре олимпиады приняли участие юноши и девушки из 35 регионов России, а также из Республики Казахстан и Государства Япония - всего 141 человек. Победителями первого тура стали 10 человек. Региональными представителями в финале - 3 человека.

Олимпиада проводится Союзом специалистов в области авиастроения "Союз авиастроителей", Академией наук авиации и воздухоплавания и Институтом истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова Российской академии наук при поддержке Общероссийской общественной организации "Союз машиностроителей России" и Национального исследовательского университета "МЭИ", оказавшего поддержку в проведении олимпиады и предоставившего просторный актов зал для молодёжного симпозиума.

А накануне финалисты Олимпиады и региональные представители (с сопровождающими) сначала посетили Научно-мемориальный музей профессора Н.Е. Жуковского. Замечательную экскурсию по залам музея провёл Владимир Алексеевич Офицеров, который рассказал о жизни и работе профессора Н.Е. Жуковского, его учеников и соратников, о создании и развитии ЦАГИ и об истории отечественной авиации. В заключении экскурсии всех приветствовал Вячеслав Гамлетович Каркашадзе - директор филиала ГМИК им. К.Э. Циолковского в г. Москве "Научно-мемориальный музей профессора Н.Е. Жуковского". Он подарил финалистам симпозиума книги на память о посещении музея. После

окончания экскурсии Стукова Марина Александровна - заведующий обособленным подразделением "Дом-музей А.Ф. Можайского" бюджетного учреждения культуры Вологодской области "Вологодский государственный историко-архитектурный и художественный музей-заповедник" - представила презентацию по теме: "А.Ф. Можайский - офицер, изобретатель, гражданин".

В этот же день участники симпозиума посетили Военный учебный центр при "НИУ "МЭИ", в котором экскурсию провёл полковник Владимир Анатольевич Светлов.

После обеда финалисты приняли участие в серии тренингов и консультаций, направленных на сплочение команды и снятие излишнего эмоционального напряжения. Тренинги и консультации провёл профессор Московского государственного психолого-педагогического университета, кандидат педагогических наук, доцент, Лауреат Премии Правительства России в области образования, Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации Бронюс Броневич Айсмонтас. По окончании тренингов ребята в зале симпозиума освоили подготовленное для них презентационное оборудование и проверили готовность своих презентаций.

И вот, 25 апреля 2025 года вице-президент Союза авиастроителей по образовательным и профориентационным проектам, кандидат технических наук Сергей Викторович Кувшинов открыл молодёжный симпозиум.



**С.В. Кувшинов**

С приветствием к участникам симпозиума обратился ректор Национального исследовательского университета "МЭИ", доктор технических наук, профессор Николай Дмитриевич Роголёв.

А затем участники финала представили свои историко-исследовательские работы. Их внимательно слушали члены жюри: его председатель, доктор философских наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баума-



**Н.Д. Роголёв**





Финалисты олимпиады - участники Симпозиума

на, Почётный работник высшего образования РФ, академик Российской академии естественных наук Надежда Гегамовна Багдасарьян; главный редактор журнала "Двигатель", генеральный директор ООО "Рэм-вибро", действительный член Международной инженерной академии Александр Иванович Бажанов; первый вице-президент Союза авиастроителей, Лауреат Государственной премии, действительный член Академии транспорта, действительный член Академии наук авиации и воздухоплавания, доктор технических наук, профессор Виктор Иванович Зазулов; вице-президент Союза авиастроителей по образовательным и профориентационным проектам, директор международного Института новых образовательных технологий РГГУ, кандидат технических наук Сергей Викторович Кувшинов; вице-президент Российской инженерной академии, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат Премии Президента Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор Марк Рахмилевич Либерзон; ведущий научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, академик Российской инженерной академии, генеральный директор ООО "Сенсорика", доктор технических наук, профессор Валентин Евгеньевич Пряничников; директор Проектного комплекса "Гражданские самолёты" Национального исследовательского комплекса "Институт имени Н.Е. Жуковского", академик Академии военных наук, доктор технических наук, Андрей Александрович Пухов; учёный секретарь Жуковского городского музея, историк авиации, сценарист документального кино, писатель Андрей Анатольевич Симонов; руководитель Проблемной группы истории авиации Института истории естествознания и техники им. А.С. Вавилова Российской академии наук, историк, писатель, кандидат технических наук Дмитрий Алексеевич Соболев; заведующий обособленным подразделением "Дом-музей А.Ф. Можайского" бюджетного учреждения культуры Вологодской области "Вологодский государственный историко-архитектурный и художественный музей-заповедник" Марина Александровна Стукова; военный лётчик, авиажурналист, Почётный член Авиационного содружества "Свети Илия", Кавалер Почётного Золотого знака пилота ВВС и ПВО Армии Сербии, профессор Радмила Дмитриевна Тонкович (Республика Сербия); специалист в области аэрокосмической техники, кандидат технических наук, доцент Владимир Николаевич Шауров; инженер-авиастроитель, старший преподаватель кафедры "Инновационные технологии наукоемких отраслей" НИУ "МЭИ", ведущий конструктор инжинирингового центра "Энергетика больших мощностей", пилот-парашютист, член Союза авиастроителей Михаил Юрьевич Шмаёв; кандидат философских наук, доцент, старший научный сотрудник сектора философских проблем творчества Института философии РАН, профессор РАЕ Елена Ивановна Ярославцева.

В качестве почётных гостей в симпозиуме приняли участие: академик Академии наук авиации и воздухоплавания, главный редактор журналов "Авиация и космонавтика" и "Мир техники для детей" Виктор Александрович Бакурский; арт-продюсер, журналист, внучка Заслуженного лётчика-испытателя Героя Советского Союза Марка Лазаревича Галлая Валерия Юрьевна Галлай; специалист Ассоциации технических университетов, ведущий аналитик Межотраслевого учебно-научного центра технологического развития и евразийской интеграции МГТУ им. Н.Э. Баумана Андрей Сергеевич Друкаренко; инженер-испытатель вертолётов марки "Ми", писатель Валерий Алексеевич Голубев; начальник ЦМ ВВС Филиала ФГБУ "Центральный музей Военно-воздушных сил Российской Федерации" Александр Михайлович Зарубецкий; президент Фонда М.Л. Миля Надежда Михайловна Миль; генеральный директор Ассоциации "АВИСА", член Союза авиастроителей Виктор Викторович Согачёв; директор ИИЕТ им. С.И. Вавилова РАН, доктор исторических наук Роман Алексеевич Фандо; директор Союза промышленников и предпринимателей Заполярья, член рабочей группы Правительственной комиссии по вопросам развития беспилотных авиационных систем, кандидат экономических наук, профессор Российской академии естествознания Александр Валентинович Федотовских; президент Ассоциации "Союз авиационного двигателестроения", президент Академии наук авиации и воздухоплавания, член Союза авиастроителей Виктор Михайлович Чуйко и др.

Поддержать участников симпозиума приехали победители прошлых олимпиад: Василиса-Анастасия Васильевна Бадакова, Венедикт Владимирович Дорожко, Елена Викторовна Алиева и др.

Все финалисты олимпиады получили Сертификаты победителей первого тура олимпиады и подарки от меценатов.

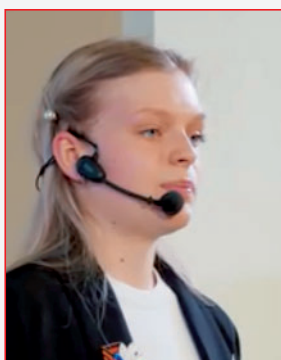


На трибуне очередной докладчик

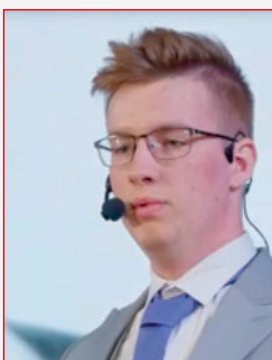




Артём Анкудинов



Диана Полянцева



Егор Попов



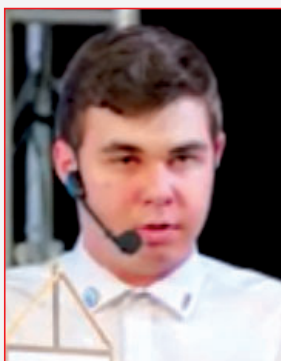
Лидия Люст



Анастасия Радионова



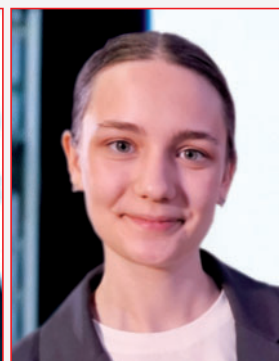
Максим Фурсов



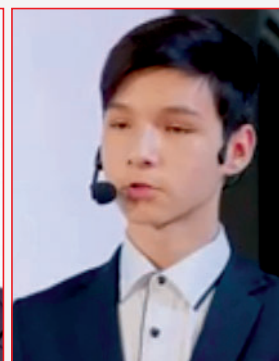
Евгений Теленгатор



Назар Файзуллин



Стефания Алексеева



Егор Полковников

Победителями XXII олимпиады стали:

1 место - Максим Владимирович Фурсов, 13 лет, Центр технического творчества города Таганрог. Тема историко-исследовательской работы: "Ил-2 символ победы в Великой Отечественной войне".

2 место - Егор Андреевич Попов, 16 лет, Центр технического творчества города Таганрог. Тема историко-исследовательской работы: "Забытый проект М-50".

3 место - Назар Рустемович Файзуллин, 18 лет, Институт среднего профессионального образования Уфимского университета науки и технологий. Тема историко-исследовательской работы: "Как проявляются законы развития технических систем в авиационных конструкциях?".

Жюри приняло решение и наградило дополнительными призами в номинациях:

- "За освещение малоизвестных страниц жизни А.Ф. Можайского" - Харуки Омори, 17 лет, средняя школа Шокан в Йокогаме, префектура Канагава, Государство Япония. Тема историко-исследовательской работы: "А.Ф. Можайский и Япония", (приз предоставлен Домом-музеем А.Ф. Можайского, филиалом Вологодского музея-заповедника; А.А. Пуховым и А.А. Симоновым);

- "За раскрытие темы инновационных технологий" - Лидию Алексеевну Люст, 16 лет, Средняя общеобразовательная школа № 31 города Стерлитамак, Республика Башкортостан. Тема историко-исследовательской работы: "Летательные аппараты на солнечных батареях", (приз предоставлен кафедрой "Инновационные технологии наукоёмких отраслей" МЭИ).

- "За освещение истории использования экологических технологий" - Стефанию Евгеньевну Алексееву, 15 лет, Гимназия № 5 города Давлеканово, Республика Башкортостан. Тема историко-исследовательской работы: "Космическая оранжерея", (приз предоставлен С.В. Михеевым);

- "За освещение вклада А.Ф. Можайского в развитие авиации" - Евгения Анатольевича Теленгатора, 15 лет, Лицей № 176 города Новосибирск. Тема историко-исследовательской работы: "Историко-технический контекст и личный вклад А.Ф. Можайского в создание первой летающей машины", (приз предоставлен внучкой Заслуженного лётчика-испытателя, Героя Советского Союза Марка Лазаревича Галлая В.Ю. Галлай).

Призы победителям олимпиады предоставили: Союз авиастроителей; Компания "МСЗ-Салют"; Научно-производственное предприятие "Звезда"; Компания "Проинпро"; Часовая производственная компания "Romanoff".

Приз зрительских симпатий по итогам голосования читателей на сайте получил Егор Андреевич Попов.

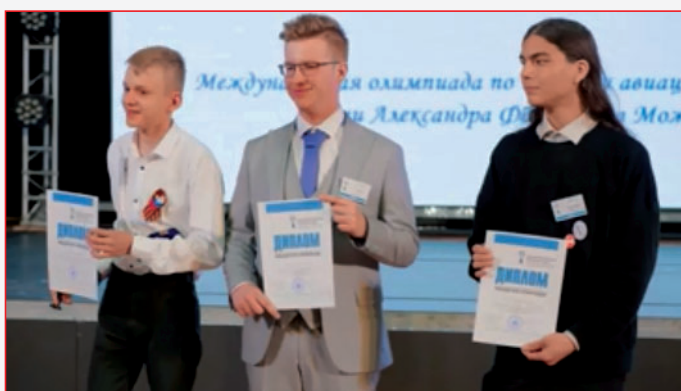
Методическое обеспечение олимпиады разработано с использованием Гранта Президента Российской Федерации.

Источник информации:

Союз авиастроителей (olymp.as-club.ru).



Харуки Омори



Победители XXII олимпиады: М. Фурсов, Е. Попов, Н. Файзуллин



С.В. Гвоздев вручает Е. Попову Приз зрительских симпатий



# МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

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 работе представлены результаты анализа различных решений уравнений математической физики с помощью методов специальных и обобщенных функций. Проиллюстрированы известные аналитические решения, полученные подобными методами и показана очевидная перспектива использования методов, основанных на использовании этих функций.**

**The paper presents the results of the analysis of various solutions of equations of mathematical physics using methods of special and generalized functions. The well-known analytical solutions obtained by such methods are illustrated and the obvious prospect of using methods based on the use of these functions is shown.**

**Ключевые слова:** автоколебания, высокочастотная неустойчивость, опыты Рийке, ЖРД, газогенератор.

**Keywords:** special functions, generalized functions, analytical solutions, differential equations.

При решении прикладных задач механики сплошных сред редко удается получить их в конечной аналитической форме. Аналитические решения предполагают также точные решения. Под точными решениями нелинейных уравнений математической физики понимаются следующие решения [1]:

1. Решения, выраженные через элементарные функции;
2. Решения, которые выражаются в виде квадратур;
3. Решения, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями (системами обыкновенных дифференциальных уравнений);
4. Решения, которые выражаются через решения линейных уравнений в частных производных (линейных интегральных уравнений).

Под точными методами решения нелинейных уравнений математической физики понимаются методы, позволяющие получать точные решения.

Могущественным аппаратом получения аналитических (точных) решений является использование методов теорий специальных и обобщенных функций, которые повышают наглядность и расширяют простор для анализа полученных решений.

Многие неэлементарные функции, имеющие теоретическое и практическое значения невозможно выразить в конечном виде. Эти функции заранее рассчитывают, а по результатам расчетов составляются точные таблицы, строятся графики, изучаются свойства. Такие функции называются специальными. Им часто придаются особые названия и обозначения. Например:

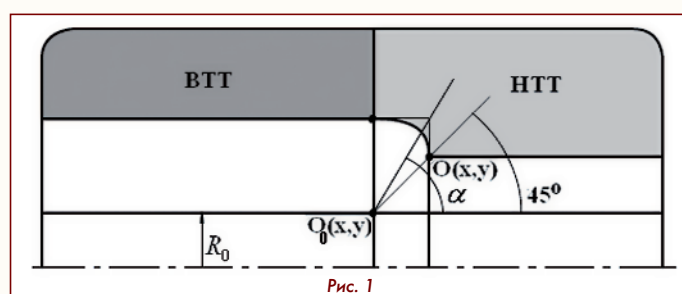
1. Знак аргумента "сигнум" -  $y = \operatorname{sgn} x$ ;
2.  $y = \operatorname{Si}(x)$  - интегральный синус;
3. Функции Бесселя, Лежандра, Якоби и другие.

Теория обобщенных функций определяется своими средними значениями в окрестностях каждой точки. Она возникла в связи с потребностями математической физики, в особенности теории дифференциальных уравнений и квантовой физики. Наиболее известными и широко применяемыми обобщенными функциями являются знаменитая функция Дирака и функция Хевисайда.

В статье представлены для иллюстрации несколько удачных примеров использования специальных и обобщенных функций при решении практических задач механики сплошных сред.

### Определение формы разделительной линии в двухсоставном заряде

Формирование разделительной линии высокотемпературного (ВТТ) и низкотемпературного (НТТ) топлив в двухсоставном заряде происходит в соответствии с соотношением скоростей их горения. Схема выгорания представлена на рис. 1. При этом после первого шага выгорания слоев ВТТ и НТТ на границе рассматриваемого заряда образуется ступенька, по торцу которой начинает дополнительно выгорать низкотемпературный заряд.



Поскольку низкотемпературный заряд располагается внизу по потоку, то вершину образующегося выступа можно считать началом разделительной линии. Определим форму выгорающей поверхности. Очевидно, что при равенстве скоростей горения одновременно по торцу и по цилиндрической поверхности, выгорание низкотемпературного заряда будет ограничено биссектрисой угла, проходящего из вершины выступа. Этой же линией будет ограничиваться и криволинейная торцевая поверхность, оголяемая после выгорания высокотемпературного заряда. Другим ограничением этой торцевой поверхности заряда из НТТ будет луч, выходящий из вершины выступа под углом  $\arctg(U_{ВТТ}/U_{НТТ})$ , который определяет цилиндрическую поверхность ВТТ. Торцевая часть выгорающей поверхности будет иметь форму эллипса с полуосями  $(U_{ВТТ} - U_{НТТ})\tau$  и  $U_{НТТ}\tau$ . Цилиндрическая часть заряда из высокотемпературного топлива будет всегда ограничена образующей разделительной поверхности двух зарядов. Таким образом, координаты начала разделительной линии можно будет рассчитывать как:

$$X_{рло} = X_{рлоо} + U_{НТТ}\tau \quad \text{и} \quad Y_{рло} = Y_{рлоо} + U_{НТТ}\tau.$$

Площадь горящей поверхности части заряда из НТТ рассчитывается как аналогичная площадь без учета торцевого эффекта с поправкой на этот эффект. При этом на часть поверхности горения заряда из ВТТ торцевой эффект не влияет:

$$S_{НТТ} = S_{НТТ} - S_{\tau} + S_{\tau} = S_{НТТ} + \Delta S,$$

где  $S_{НТТ}$  - площадь поверхности горения заряда из НТТ без учета торцевого эффекта;  $S_{\tau} = 2\pi(R_0 - U_{НТТ}\tau) U_{НТТ}\tau$  - часть выгоревшей цилиндрической поверхности канала;  $S_{\tau}$  - четверть поверхности эллиптического тора с полуосями  $a = U_{НТТ}\tau$  и  $b = (U_{ВТТ} - U_{НТТ})\tau$ .

Поверхность эллиптического тора рассчитывается как произведение осевой окружности  $L = 2\pi(R_0 - U_{НТТ}\tau)$  на периметр эллипса:

$$L = \pi(a+b) \left( 1 + \frac{\lambda^2}{4} + \frac{\lambda^4}{64} + \frac{\lambda^6}{256} + 25 \frac{\lambda^8}{16384} + \dots \right),$$

где

$$\lambda = \frac{a-b}{a+b} = \frac{2U_{НТТ}}{U_{ВТТ}} - 1.$$

Если принять, что  $U_{\text{ВТТ}} \sim 10$  мм/с, а  $U_{\text{НТТ}} \sim 6$  мм/с, то  $\lambda = 0,2$  и  $a(\lambda^2/4) = 0,01$ .

Пренебрежение этим членом приводит к упрощению формулы для периметра, а четверть поверхности эллиптического тора запишется как:

$$S_{\text{ЭТ}} = \pi^2 R \frac{a+b}{2} = \frac{\pi^2}{2} (R_0 + U_{\text{НТТ}} \cdot \tau) \cdot U_{\text{ВТТ}} \cdot \tau.$$

Тогда добавка к площади, вызванная торцевым эффектом, выразится как:

$$\Delta S = 2\pi U_{\text{НТТ}} \cdot \tau \cdot (R_0 + U_{\text{НТТ}} \cdot \tau) \left( \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{\text{ВТТ}}}{U_{\text{НТТ}}} - 1 \right).$$

В расчетах был использован полный эллиптический интеграл второго рода [4], являющейся функцией Якоби:

$$1 = \pi(a+b) \left( 1 + \frac{\lambda^2}{4} + \frac{\lambda^4}{64} + \frac{\lambda^6}{256} + 25 \frac{\lambda^8}{16384} + \dots \right),$$

представлен в виде ряда. На рис. 2 представлен рельеф этой функции.

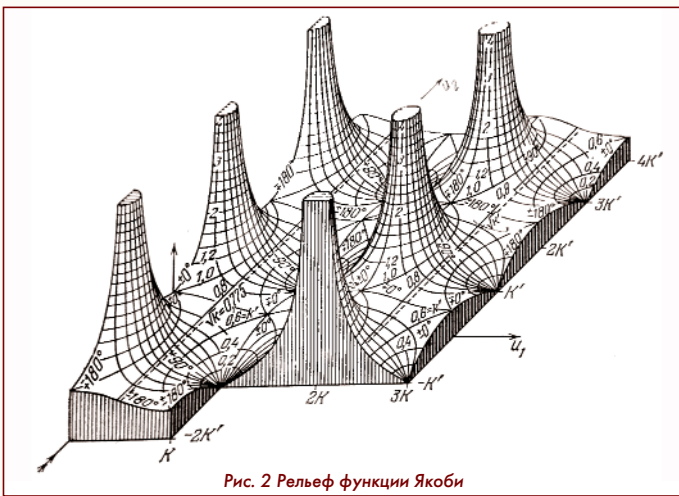


Рис. 2 Рельеф функции Якоби

#### Анализ функции распределения частиц по размерам после форсуночной головки ЖРД

После форсуночной головки в ЖРД сплошная пелена благодаря центробежным силам дробится, образуя дискретную субстанцию и из частиц конденсированной фазы. Функцию распределения находят прямым подсчетом под микроскопом. Но в случае жидких частиц обмеры производить очень трудно и трудоёмко. Часто на практике, задаваясь двухпараметрической аналитической функцией, саму экспериментальную функцию распределения восстанавливают по экспериментальным средним размерам. Зная два средних размера наиболее просто найти аналитическую функцию для Г-распределения. Если его записать в виде:

$$g(d) = \frac{c^{b+1}}{\Gamma(b+1)} \cdot d^b c^{cd}, \text{ где } b > 1 \text{ и } c > 1,$$

то после приравнивания первой производной нулю максимальная величина диаметра для функции распределения выразится в виде отношения коэффициентов  $d_0 = b/c$ .

Для нахождения медианного среднего размера необходимо функцию проинтегрировать до верхнего предела  $d = d_m$  и приравнять 0,5:

$$g(d) = \int_0^{d_m} \frac{c^{b+1}}{\Gamma(b+1)} \cdot d^b c^{cd} dd = \frac{1}{2}.$$

Подставляя вместо коэффициента  $c$  величину  $b/d_0$  и делая преобразования под интегралом, получим:

$$\frac{1}{2} = \int_0^{d_m} \frac{b \left( \frac{d}{d_0} \right)^b \exp \left( - \frac{b}{d_0} \frac{d}{d_0} \right)}{\Gamma(b+1)} \cdot d \left( \frac{d}{d_0} \right) dd.$$

Введя обозначения  $x = b(d/d_0)$  и  $x_m = b(d_m/d_0)$  преобразуем интеграл:

$$1 = 2 \int_0^{x_m} \frac{x^b}{\Gamma(b+1)} \cdot e^{-x} dx.$$

Записанный интеграл является неполной Г-функцией. Для нахождения зависимости  $b(d_m/d_0)$  построим итерационную формулу, умножив левую и правую части уравнения на  $b$ , тогда:

$$b_{i+1} = b_i \int_0^{x_m} \frac{x^{b_i}}{\Gamma(b_i+1)} \cdot e^{-x} dx.$$

Численное определение зависимости  $b(x_m)$  дает прямую линию (рис. 3):

$$b + 1 = x_m + 0,3.$$

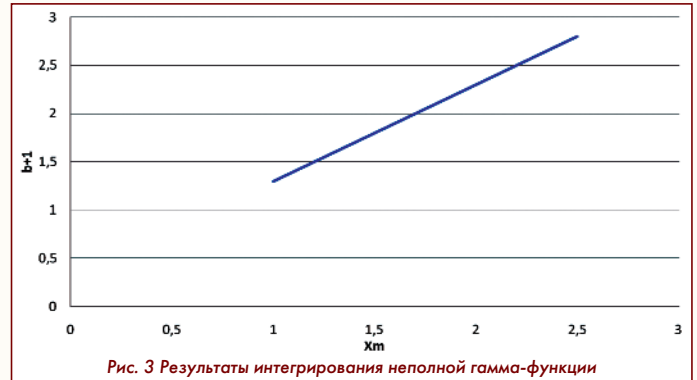


Рис. 3 Результаты интегрирования неполной гамма-функции

Откуда:

$$d_m = \frac{b+0,7}{c} = \frac{b}{c} \left( 1 + \frac{0,7}{b} \right).$$

Для сравнения объёмно-поверхностный размер Г-распределения выражается как:

$$d_{32} = \frac{b}{c} \left( 1 + \frac{0,75}{b} \right),$$

что говорит о примерном равенстве  $d_m \approx d_{32}$ .

Пересчёт коэффициентов  $b$  и  $c$  через известные из эксперимента средние значения даёт:

$$b = \frac{0,7}{\frac{d_m}{d_0} - 1} \text{ и } c = \frac{0,7}{d_0 \left( \frac{d_m}{d_0} - 1 \right)}.$$

С учетом найденных соотношений можно выбрать Г-распределение в зависимости от средних размеров  $d_m$  и  $d_0$ . Г-функция, используемая в данном решении, является классической специальной функцией и называется обобщённым факториалом Эйлера. Рельефное представление этой специальной функции показано на рис. 4.

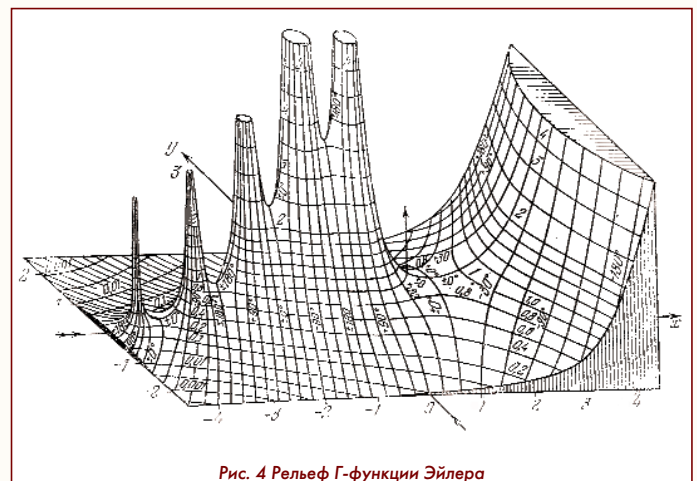


Рис. 4 Рельеф Г-функции Эйлера



### Оценка величины расходного комплекса в зоне смешения двухсоставного заряда

При расчете выгорания двухсоставного заряда необходимо знание распределения величины расходного комплекса по толщине зоны смешения высокотемпературного и низкотемпературного потоков в зоне стратификации. Термодинамический расчет проводится на границах зоны смешения высокотемпературного и низкотемпературного потоков, а между ними считается, что параметр  $\beta$  меняется по закону нормального насыщения пси от кси [5]:

$$\psi = \frac{1}{\xi} e^{1 - \frac{1}{\xi}};$$

$$\beta = \beta_{\text{НТТ}} - (\beta_{\text{ВТТ}} - \beta_{\text{НТТ}}) \psi(\xi),$$

где  $\xi$  (кси) - толщина зоны смешения.

Среднее значение величины  $\beta_{\text{см}}$  по толщине зоны смешения может быть представлено как интеграл величины  $\beta$  по толщине зоны смешения, деленный на единичный интервал:

$$\beta_{\text{см}} = \int_0^1 \beta d\xi = \int_0^1 [\beta_{\text{НТТ}} - (\beta_{\text{ВТТ}} - \beta_{\text{НТТ}}) \psi(\xi)] d\xi,$$

$$\beta_{\text{см}} = \beta_{\text{ВТТ}} - (\beta_{\text{ВТТ}} - \beta_{\text{НТТ}}) \int_0^1 \psi(\xi) d\xi.$$

Для определения этого соотношения необходимо знание интеграла от нормальной функции насыщения в диапазоне от 0 до 1:

$$I = \int_0^1 \psi(\xi) d\xi = \int_0^1 e^{-\frac{1}{\xi}} \cdot e^{\frac{1}{\xi}} d\xi.$$

Преобразуем интеграл, вводя обозначение  $z = 1/\xi$ , тогда:

$$I = -e \int_{\infty}^1 \frac{1}{z} \cdot e^{-z} dz = e \int_1^{\infty} \frac{1}{z} \cdot e^{-z} dz = e \text{Ei}(1),$$

где  $\text{Ei}(1) = 0,219383934...$  - интегральная показательная функция Эйлера при  $z = 1$ . Далее получим  $I = 0,596347361... (\sim 0,6)$ . После этого, значение  $\beta_{\text{см}}$  внутри зоны смешения примет вид:

$$\beta_{\text{см}} = \beta_{\text{ВТТ}} - (\beta_{\text{ВТТ}} - \beta_{\text{НТТ}}) 0,6 = 0,4\beta_{\text{ВТТ}} + 0,6\beta_{\text{НТТ}}.$$

Расчетным анализом было показано, что если величина подмеса низкотемпературного топлива не превышает величины  $\sim 20\%$ , то для практических расчетов полученное соотношение для  $\beta_{\text{см}}$  соответствует значению на разделительной линии.

В расчетах использовалась специальная [2] интегральная показательная функция:

$$\text{Ei} = -\Gamma(0, ze^{-\pi i}).$$

### Решение дифференциальных уравнений с помощью обобщенных функций

Известно [6], что обобщенная функция  $F$  называется фундаментальным решением линейного дифференциального оператора  $L$ , если  $LF = \delta$ , где  $\delta$  - функция Дирака.

В работе [6] доказывается ряд следующих положений:

1. Если функция  $F$  является произведением функций Хевисайда  $F(x, y) = H(x)H(y)$ , то в области определения выполняется равенство:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = H(x)H(y),$$

также в этой области выполняется равенство:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = \delta(x, y),$$

и функция  $F$  является решением дифференциального оператора:

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}.$$

2. Доказывается также, что выполняется равенство:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \delta(x, y).$$

Другими словами, доказывается, что функция  $F$  является фундаментальным решением волнового оператора:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}.$$

3. В работе [3] одновременно доказывается, что справедливо равенство:

$$\frac{\partial F}{\partial t} - a^2 F = \delta(x, y),$$

и функция  $F$  локально интегрируема в области определения и является фундаментальным решением уравнения теплопроводности (оператора теплопроводности).

Аналитическое решение в работе [3] приводится в виде экспоненты в зависимости от координаты и времени:

$$F(x, t) = \frac{H(t)}{(2a\sqrt{\pi t})^n \exp\left(-\frac{|x|^2}{4a^2 t}\right)}.$$

Приведенные примеры являются иллюстрацией плодотворного использования специальных и обобщенных функций при получении аналитических решений уравнений математической физики. **□**

### Список источников

1. А.Д. Полянин, В.Ф. Зайцев, А.И. Журов. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. М.: Физматлит, 2005.
2. Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. Специальные функции. М.: Изд. Наука, 1977.
3. В.С. Владимиров. Уравнения математической физики. М.: Изд. Наука, 1971.
4. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. Справочник по математике. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.
5. Ю.М. Кочетков, Н.Ю. Кочетков. Турбулентность. Математический анализ релаксационных процессов // Двигатель. 2020. № 3.
6. Р.К. Бельхеева. Обобщенные функции в примерах и задачах. Новосибирск: изд. Новосибирского Государственного университета, 2014.
7. 5. Ю.М. Кочетков, Н.Ю. Кочетков. Турбулентность в соплах с предварительной закруткой потока и более строгое доказательство второй и пятой теорем турбулентности // Двигатель. 2025. № 1-3.

Связь с авторами: kolabuy@gmail.com

## ИНФОРМАЦИЯ. Новый магнитоплазменный ускоритель

**В** журнале "Двигатель" № 2 за 2008 г. были описаны эксперименты, проведенные детьми из школы "Интеллектуал" с различными типами электростатических двигателей. Хотя первые попытки были предприняты очень давно, инженерного решения, приведшего бы к практическому применению таких двигателей, пока не было найдено.

К решению этой задачи подключилась компания C-Motive Technologies из Висконсина, которая вместо традиционных обмоток и редкоземельных магнитов в своих дви-

гателях использует печатные платы, высокое напряжение и диэлектрическую жидкость.

Ротор и статор состоят из многослойных печатных плат. На каждой плате расположены сотни радиальных медных дорожек, выполненных в форме тонких треугольников, расходящихся от центра. Платы уложены в чередующемся порядке: статор - ротор - статор - ротор и т.д., образуя пакет дисков с микронными зазорами между ними.

Статор питается от трехфазного высоковольтного источника (тысячи вольт, часто-

той в несколько килогерц). Каждая третья радиальная дорожка на статоре подключена к одной и той же фазе, создавая вращающееся электрическое поле. На роторе дорожки предварительно заряжены поочередно: положительно и отрицательно.

Электрическое поле от статора взаимодействует с зарядами на роторе, вызывая притяжение и отталкивание - и, как следствие, вращение.

Эти двигатели найдут свою область применения, о чём ещё будут публикации. **□**

# КОПИЛКА ДЛЯ ЭНЕРГИИ

Александр Идин

(Продолжение. Начало в 4-6-2022, 5-6-2024)

Есть одна страна в мире - Израиль, у которой в настоящее время есть всего одна ГЭС мощностью целых 7 МВт. Основные источники электроэнергии там - тепловые станции, работающие на угле и газе. Есть, конечно, солнечные (в 2021 г. ими было выработано 2,6 ГВт) и ветрогенерирующие станции (их общая мощность всего лишь несколько десятков мегаватт).

Хотя их вклад в энергетику не столь уж и велик, но для сглаживания неравномерности работы энергосистемы в течение суток на восточном склоне горы Гильбоа была построена гидроаккумулирующая электростанция "Маале Гильбоа" мощностью чуть более 300 МВт. Перепад высот между верхним водохранилищем, расположенном на высоте 750 метров над уровнем моря, и нижним составляет 500 метров, а расстояние между водоёмами - 2,5 км. Вода между водоёмами перемещается по 16-дюймовым стальным трубам, уложенным в бетонном тоннеле, пробитом под утесом Рамим. Вынутый при строительстве туннелей грунт - глина и камни - пошли на строительство стен водохранилищ. Объёма воды в верхнем водоёме (около миллиона кубических метров) достаточно для выработки двумя турбинами 300 МВт электроэнергии в течение 10 часов, а вот для его заполнения водой из нижнего требуется в течение почти 13 часов потратить 380 МВт.



Верхнее водохранилище ГАЭС "Маале Гильбоа"

Эффективность этой ГАЭС, стоимость которой составила порядка \$600 млн, меньше 76 % не опускалась, хотя достаточно много воды терялось на испарение (для первоначального заполнения водоёмов и компенсации потерь вода берётся из родников и реки Иордан).

Смысл этой ГАЭС не только в выравнивании суточного энергопотребления, но и в непрерывном обеспечении потребителей электроэнергией при возникновении аварийных ситуаций. Время переключения из насосного режима в генерирующий составляет полторы минуты.

В настоящий момент заканчивается строительство второй ГАЭС "Кохав-Хайарден" мощностью 344 МВт, которая также расположена в горах Гильбоа в 20 км от первой ГАЭС.

Эта станция станет самой низкой ГАЭС в мире: две турбины Фрэнсиса производства компании General Electric мощностью по 172 МВт будут расположены на уровне 275 метров ниже уровня моря в подземном помещении электростанции. Верхний водоём образован земляной дамбой высотой 25 м и длиной по периметру 1,8 км, а нижний - каменно-набросной бетонной дамбой длиной 1,7 км и высотой 18 м. Верхний резервуар находится на высоте 236 м, что обеспечивает напор порядка 450 м. Подземный бетонный туннель длиной 755 м и диаметром 5,5 м обеспечивает перекачку воды в обе стороны. Стоимость этого проекта сопоставима со стоимостью первой ГАЭС Гилбоа.

Есть ещё ряд проектов строительства в Израиле ГАЭС, в том числе порядка 10-12 станций вдоль берега Средиземного моря мощностью от 100 до 500 МВт с верхними бассейнами на высотах от 50 до 250 м. Нижний бассейн для всех этих ГАЭС будет один - Средиземное море с солёной морской водой.

Но пока в Израиле идут разговоры, в Японии уже успели не только построить, но и вывести из эксплуатации морскую ГАЭС. Построенная в 1999 г. за 3,2 миллиарда йен ГАЭС "Янбару" стала первой в мире такой станцией.

В качестве нижнего резервуара использовался Тихий океан, а искусственное верхнее водохранилище находилось в 600 метрах от береговой линии на высоте 150 метров. Его внутренняя поверхность была покрыта водонепроницаемым слоем для предотвращения попадания морской воды в окружающую среду. Эффективный перепад (напор) на станции составлял 136 м и максимальный расход воды - 26 м³/с. Трубопроводы и насосная турбина станции находились под землей.



Морская ГАЭС "Янбару"

ГАЭС "Янбару" была экспериментальной установкой, на которой для предохранения от воздействия солёной воды использовались трубы из армированного стекловолокном пластика вместо стальных труб, а турбина насоса была частично изготовлена из нержавеющей стали.

Максимальная мощность этой ГАЭС составляла 30 МВт. Из-за падения потребления электроэнергии на Окинаве, станция так и не смогла стать рентабельной и приносить прибыль, из-за чего в 2016 году была демонтирована.

Одной из последних построенных в Европе ГАЭС стала португальская станция "Говайнш" установленной мощностью 880 МВт. Эта станция стоимостью 1,5 млрд евро увеличила общую установленную мощность всех ГАЭС Португалии на 30 %.

Нормальный подпорный уровень верхнего водохранилища находится на высоте 885 м над морем, при работе ГАЭС в режиме генерации этот уровень может снизиться на 13 м. Перепад высот между верхним и нижним водохранилищами в среднем составляет 660 м, что обеспечивает соответствующий напор. Общая протяжённость водовода достигает 7 км и состоит из подводящего напорного деривационного туннеля длиной 4694 м и диаметром 7,3 м, наклонного среднего участка водовода длиной 2200 м диаметром 6 м в верхней части, затем уменьшенного до 5,4 м в средней, а затем до 3,8 м в нижней части, за которой он разделяется на четыре трубы для питания четырех агрегатов, установленных в машинном зале.





Машинный зал расположен на высоте 151 м над уровнем моря в пещере размером  $120 \times 20 \times 44 \text{ м}^3$ , вырубленной в скале. В зале установлены четыре обратимые гидромашин (турбины Френсиса) мощностью в турбинном режиме 220 МВт. Через каждый агрегат в турбинном режиме проходит  $40 \text{ м}^3/\text{с}$  воды, в насосном -  $32 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Нижним водохранилищем ГАЭС "Говайнш" является водохранилище ГЭС "Даиоинш", нормальный подпорный уровень которого находится на высоте 228 м над уровнем моря и на 77 метров выше турбин.

Общая выработка электроэнергии в турбинном режиме составляет примерно 75 % от электроэнергии, израсходованной в насосном режиме. В декабре 2021 года ГАЭС Говайнш была введена в эксплуатацию. Она стала одним из наиболее масштабных европейских проектов ГАЭС за последние 25 лет. Кроме этой ГАЭС будет построено ещё две мощностью 160 и 118 МВт.

Не обошла стороной строительство гидроаккумулирующих станций и Испания. С 1989 года начала работу ГАЭС "Кортес Ла-Муэла", в которой вода из реки Хукар закачивается в верхний резервуар на высоту 500 метров. В 2006 году было принято решение о строительстве второй очереди этой ГАЭС. При этом был сооружен шлюзовой затвор с 840-метровым напорным трубопроводом, расположенным под углом 45 градусов, вода из которого поступает на роторы четырех новых генераторов мощностью по 240 МВт каждый.



ГАЭС "Кортес Ла-Муэла": на переднем плане слева - нижнее водохранилище, образованное плотиной на реке Хукар, справа - верхнее водохранилище

Модернизация обошлась в немалые 1,2 млрд евро, но после пуска в 2013 году общая мощность всех генераторов ГАЭС "Кортес Ла-Муэла" достигла 1,7 ГВт, и эта станция стала крупнейшей в Европе. Её работа призвана обеспечивать стабильную работу в том числе и испанских атомных электростанций, доля которых в энергетике страны составляет 20 %. Дополнительным демпфером для АЭС стала построенная на северо-востоке Испании 400-мегаваттная ГАЭС "Моралес II" на реке Ногера Рибаторжана, а на северо-западной части страны будет сооружена ещё одна ГАЭС мощностью 728 МВт.

Планируется, что и юг Испании не останется без гидроаккумулирующей станции. Здесь тоже начнётся строительство ГАЭС для выравнивания потребления и генерации электроэнергии от нестабильных источников - местных солнечных и ветровых станций. Станционное здание и водоводы будут располагаться под землей. В ка-

честве верхнего бассейна будет использоваться водохранилище, построенное на существующей плотине "Алкантара", а в качестве нижнего - плотина "Седильо". Перепад высот между верхним и нижним бассейнами будет 108 м, а длина водоводов составит 900 м. Перепада высот достаточно для работы двух обратимых гидроагрегатов мощностью по 220 МВт.

Помимо материковой части Испании строятся ГАЭС и на островах. Так на острове Гран-Канария сооружается ГАЭС "Сальто-де-Чира" установленной мощностью 200 МВт. Проектом предусмотрено, что 91 % конструктивных элементов станции будет расположено под землей, что минимизирует воздействие ГАЭС на окружающую среду. Островная ГАЭС в основном предназначена для аккумулирования излишков выработки ветровой генерации, доля которой в островной энергосистеме составляет 37 %.

В этой статье уже были упоминания о тех или иных рекордах в энергетике гидроаккумулирования. Вот ещё один пример. Как правило, на крупных гидроэлектростанциях используется вертикальная компоновка гидроагрегатов, поскольку при этом уменьшаются размеры машинного зала, а гидроагрегаты с горизонтальным положением вала применяют на маломощных ГАЭС. Но в 1976 году в Германии в Альпах построена высоконапорная (625 метров) ГАЭС Wehr. В подземном здании длиной 219 м, шириной 19 м и высотой 35 м установлены четыре гидроагрегата; на горизонтальном валу каждого расположены радиально-осевая гидротурбина, двухступенчатый насос и двигатель-генератор (уже достаточно редко применяемая трехмашинная схема).



Машинный зал ГАЭС Wehr

Мощность гидроагрегата в турбинном режиме составляет 227,5 МВт, а в насосном - 245 МВт, что позволило назвать их крупнейшими в мире горизонтальными машинами. Обеспечивают работу этой ГАЭС два бассейна: верхний ёмкостью  $4,3 \text{ млн м}^3$  и нижний на  $4,4 \text{ млн м}^3$ . Каждый год ГАЭС Wehr вырабатывает 1 миллиард кВт·ч электроэнергии, забирая из энергосистемы немного больше, но обеспечивая при этом её стабильность, эффективность и надёжность.

И теперь немного о Китае. Эта страна в последнее время ставит рекорды один за другим. Совсем недавно, по историческим меркам, в Китае не было ни одной ГЭС, а вся энергетика строилась на тепловых станциях, работающих на угле. Первая гидроэлектростанция Шилонгба была построена в провинции Юньнань в 1912 году и имела мощность всего 240 кВт. Только с 60-х годов прошлого века началось интенсивное строительство ГЭС, достигнув в 1980 году в общей сложности выработку 20 ГВт. Прошло 40 лет и в 2021 году в Китае находятся четыре из шести крупнейших в мире плотин, в том числе и самая большая в мире ГЭС "Три ущелья" мощностью 22,5 ГВт.



ГЭС "Три ущелья"



Вместе с гидроэнергетикой стремительно развивается в Китае солнечная и ветровая энергетика. Отметим, что в 2019 году в Китае установленная мощность солнечных электростанций достигла 205 ГВт, в то время как в Европейском союзе она составляла 132 ГВт, а в США - 76 ГВт. И стремление к более широкому использованию энергии Солнца поддерживается в этой стране на самом высоком уровне. Как результат - в июне этого года Китай запустил крупнейшую в мире солнечную электростанцию мощностью 3,5 ГВт.

И с ветровой энергетикой у Китая также всё хорошо - по этому показателю он мировой лидер. В 2020 году установленная мощность всех ветроустановок в Китае достигла 281 ГВт, тогда как у второго по величине производителя электроэнергии из ветра - США - она была "всего" 118 ГВт.

Правительство Китая запланировало, что к 2030 году общая установленная мощность ветряных и солнечных электростанций составит 1200 ГВт.

Как уже не раз отмечалось, что к этим нестабильным источникам электроэнергии, впрочем, как и к стабильным - атомным электростанциям (а в Китае их суммарная мощность чуть более 50 ГВт), требуется аккумулятор для гарантированного обеспечения потребителей.

Исходя из современного состояния с солнечной, ветровой и атомной энергетикой, а также перспектив их развития в Китае большое внимание уделяется строительству ГАЭС.

Первой такой станцией в Китае можно считать Пекинскую гидроаккумулирующую электростанцию "Шисаньлин", проектирование которой началось ещё в 1974 г., но к строительству приступили только в 1988 г. Верхнее водохранилище, объём которого составляет 4 500 000 м<sup>3</sup>, построено на горе Мангшам с помощью плотины высотой 75 м и длиной 550 м. В качестве нижнего водохранилища было решено использовать, укрепив основание плотины, ранее образованный с её помощью у подножия горы водоём (максимальная ёмкость 80 млн м<sup>3</sup>).



Вода из верхнего водоёма поступала к турбинам по двум трубам, при этом максимальный напор соответствовал 430 метрам.

Реверсивные насосно-турбинные агрегаты расположены в подземном зале ГАЭС (длина 145 м, ширина 23 м, высота 46,6 м). Первый агрегат мощностью 200 МВт был введен в эксплуатацию в 1995 г., а в 1997 г. - четвёртый, что довело общую установленную мощность до 800 МВт.

Практически в то же время в Китае появилась ГАЭС "Тяньхуанпин" мощностью 1,836 ГВт. Её строительство началось в 1993 г., а завершено в 2004 г. Нижнее водохранилище объёмом 6 770 000 м<sup>3</sup> образовано плотиной на небольшой реке Дакси. Воды в нём чуть больше, чем в верхнем (6 760 000 м<sup>3</sup>), поэтому лишняя вода может сбрасываться из него с максимальной скоростью 536 м<sup>3</sup>/с.

Верхний резервуар образован с помощью четырех седловых плотин, из него вода сначала по двум водоводам диаметром 7 м и длиной 882 м, а затем по шести патрубкам поступает, соответственно, на шесть реверсивных турбин Фрэнсиса мощностью по 306 МВт (максимальная мощность 336 МВт). Турбинный зал находится внутри горы под верхним водоёмом и его турбины работают под 887-метровым гидравлическим напором.



Нижнее и верхнее водохранилища ГАЭС "Тяньхуанпин"

Эти и многие другие ГАЭС, построенные в Китае, вывели эту страну в мировые лидеры по данному способу аккумулирования электроэнергии. Завершить освещение китайских ГАЭС следует рассказом о самой мощной (на сегодня) в мире станции - ГАЭС "Фэннин".

Строительство этой ГАЭС задумали еще в 1996 году. Следующие годы ушли на поиск подходящего места, подготовку технико-экономического обоснования, его проверку, проектирование, согласование и т.д. Строительство началось только в 2013 г. Причина простая - ГАЭС должна была работать в связке с ветряными и солнечными электростанциями соседнего уезда, которые надо было тоже спроектировать и построить. Основное предназначение ГАЭС "Фэннин" - сглаживать неравномерность выработки электроэнергии, поставляя её в ночное время и в периоды безветрия. Естественно, что при наличии солнца и ветра избыток энергии использовался для подъёма воды в верхнее водохранилище, максимальная ёмкость которого составляет 48 830 000 м<sup>3</sup> воды, из которых чуть более 40 млн м<sup>3</sup> воды может быть использовано для выработки в течение почти 11 часов порядка 40 ГВт·ч электроэнергии.

Вода из верхнего резервуара направляется на подземную электростанцию, расположенную рядом с нижним резервуаром. Машинный зал электростанции находится под землёй - его длина составляет 414 м, высота - 54,5 м, ширина - 25 м. Там установлено 12 реверсивных турбин Фрэнсиса.

Для подачи воды и обеспечения работы станции проложены 190 тоннелей общей протяжённостью 50 км. 300-мегаваттные турбины работают под напором порядка 425 м. После турбин вода



Ложе верхнего водохранилища ГАЭС "Фэннин" до и после заполнения водой







Машинный зал ГАЭС "Фэннин"

попадает в нижнее водохранилище, объём которого немногим более 70 млн м<sup>3</sup>.

Согласно расчётам, ГАЭС "Фэннин" способна в течение года выработать 6,61 ТВт·ч электроэнергии, затратив при этом 8,71 ТВт·ч для подъёма воды в верхнее водохранилище, что говорит о КПД станции порядка 76 %. Самое интересное, что с этой станции электроэнергия в сеть поступает в виде постоянного тока. Видимо, это связано с тем, что основная часть энергии поступает в сеть от солнечных станций, а только потом она преобразуется в переменный ток для подачи потребителям.

Создание этой ГАЭС обошлось в \$2,7 млрд, но она обошла американскую ГАЭС (3 ГВт), построенную в 1977-1985 гг. в штате Вирджиния. В этом списке на третьем месте другая китайская станция: ГАЭС "Хуэйчжоу" мощностью 2,4 ГВт (8 насосов-генераторов по 300 МВт), введённая в эксплуатацию в 2011 году. И теперь 22 из 70 крупнейших ГАЭС мира мощностью выше 1 ГВт расположены в Китае.

Коль скоро были упомянуты США, то отметим, что первая ГАЭС там была построена в 1930 г. в штате Коннектикут на реке Хаусатоник. Верхнее водохранилище соорудили рядом, обеспечив перепад высоты и, естественно, напор порядка 70 м.

Через полвека в США в штате Вирджиния построили крупнейшую (на то время) в мире ГАЭС с перепадом воды в резервуарах порядка 380 м. Начав в 1977 г. и затратив \$1,6 млрд строительство завершили в 1985 г. На тот момент станция имела первоначальную мощность 2,1 ГВт, которую обеспечивали 6 турбин. В 2009 г. была завершена 5-летняя модернизация турбин, благодаря которой мощность каждой подняли до 500 МВт, а всей станции до 3 ГВт.

Верхнее водохранилище может запастись до 44 млн м<sup>3</sup> воды, которая по трём трубопроводам длиной от 940 до 1100 м вода попадает в 300-метровую шахту и далее, разделившись на шесть патрубков, поступает к турбинам, которые находятся на 385 м ниже уровня воды в верхнем водоёме. Далее вода попадает в нижнее водохранилище. При работе в насосном режиме вода опять перекачивается в верхнее водохранилище. При этом электроэнергия поступает от угольной и атомной электростанций, обеспечивая их равномерную нагрузку. Во время работы уровень воды колеблется в пределах 30 м в верхнем водоёме и около 20 м в нижнем.

Запасённой воды в верхнем водохранилище достаточно для выработки 24 ГВт·ч электроэнергии. КПД этой ГАЭС достигает 79 %.

Вроде бы всё достаточно просто: включил кнопку, выключил кнопку и заработал на разнице стоимости электроэнергии в "пик" и не "пик". Конечно, ГАЭС надо построить, а стоит это не дёшево, так что быстро заработать не получится. Да и обслуживать надо, что тоже стоит денег. И на этом экономить нельзя, ибо в противном случае может произойти авария, как это произошло на американской ГАЭС Taum Sauk, построенной в штате Миссури в 1962 г.

Не вдаваясь в технические характеристики этой станции, отметим, что в США она была самой передовой на момент ввода в строй: насосы-турбины были самыми мощными - по 175 МВт (позже заменённые на 225-мегаваттные); имела самый высокий напор - 260 м; самую большую ёмкость верхнего хранилища - 5,7 млн м<sup>3</sup>; и возможность управления операторами на расстоянии до 200 км (с

электростанции "Осейдж") и могла работать полностью без вмешательства человека в автоматическом режиме.

Вода с верхнего водохранилища, расположенного на вершине горы Проффит, по облицованному бетоном и сталью туннелю длиной более 2,1 км поступала на турбины, а в реверсивном режиме процесс шёл в обратном порядке. Но 14 декабря 2005 г. из-за отказа всех датчиков, контролирующих уровень воды в верхнем водохранилище, произошло его переполнение. Вода хлынула через парашютную стену и обрушилась на внешнюю стену, что привело к разрушению насыпи и прорыву дамбы. Через 25 минут всё водохранилище опустело.



Разрушение дамбы ГАЭС "Таум Саук"

И хотя человеческих жертв избежать удалось, ущерб, нанесённый имуществу в результате прорыва и последовавшего за ним наводнения, составил в \$1 млрд.

В период с 2007 по 2010 год были проведены восстановительные работы с реконструкцией дамбы верхнего водохранилища и установкой вспомогательного оборудования и современных средств безопасности. В 2010 году производство электроэнергии возобновилось. Помимо затрат, связанных со строительством ГАЭС "Таум Саук" (\$45,9 млн) и реконструкцией (\$490 млн), компания-эксплуатант выплатила ещё около \$200 млн в счёт погашений и штрафов, связанных с аварией 2005 г.

И коль скоро есть опасность разрушения водохранилищ, появилась идея использовать подземные - естественные или искусственные - пустоты, которые можно использовать в качестве ёмкостей под нижний резервуар и машинный зал.

Пока эта идея только прорабатывается в проектах. Например, в тех же США готовятся проекты строительства ГАЭС с использованием выработок подземных рудников в Огайо, Кентукки и Нью-Джерси. Там же появилась идея создания двухступенчатой подземной ГАЭС с первыми (промежуточными) машинным залом и "нижним" бассейном на глубине 1500 м и вторыми - залом и "совсем нижним" бассейном - на глубине 3000 м.

Использовать рудник недргоценных металлов под нижнее водохранилище в Европе задумали в Финляндии, причём турбины здесь будут работать под немалым напором - 1450 метров.

Не отстаёт от мировой тенденции в использовании ГАЭС и Австралия. Здесь уже работают три станции: "Тумут-3" мощностью 1800 МВт, "Шолхейвен" (240 МВт) и "Уивенхо" (500 МВт).

ГАЭС "Тумут-3", введённая в строй в 1973 году, оснащена шестью турбинами с генераторами мощностью по 300 МВт, но только три из них работают в насосном режиме. Турбины работают под номинальным напором 150 метров. Вода из водохранилища Талбинго подаётся на турбины по шести трубопроводам длиной 488 м и диаметром 5,6 м.



Водоводы ГАЭС "Тумут-3"

И в Австралии также намечено использовать старые рудники для строительства на их базе ГАЭС, как с подземными резервуарами (среди которых есть рудник с шахтой глубиной чуть более 1400 м), так и с наземными. Например, в проекте ГАЭС "Кидстон" старый золотой одноимённый рудник будет основой для строительства станции мощностью 330 МВт. При этом то, что осталось от добычи руды - карьер - станет нижним водоёмом, а верхний водоём будет сооружён из вскрышных грунтов.



Проект гидроаккумулирующей станции "Кидстон"

Вернёмся обратно в Европу, в Италию. Здесь в 1962 году, через почти 70 лет после строительства первой ГАЭС, приступили к постройке уникальной и самой мощной в стране станции "Энтраке". Её уникальность заключается в том, что у неё два верхних бассейна и один нижний, да и строили её 20 лет - в эксплуатацию она была введена только в 1982 г.

Из самого верхнего бассейна (Чиотас), расположенного выше турбин более чем на километр (максимальный гидравлический напор 1049 м), вода поступает по туннелю длиной 7,4 км, затем она разделяется системой запорных устройств (труб) протяженностью 1,7 км для её подачи на восемь турбин мощностью по 148 МВт.

Вода из второго бассейна (Ровины), обеспечивающего максимальный гидравлический напор 598 м, поступает на один генератор мощностью 134 МВт. Пройдя турбины вода по 500-метровому туннелю поступает в озеро Делла Пиастра, из которого она вновь за "дешёвые" деньги закачивается в верхние водоёмы.

На этой станции применено 8 четырехступенчатых радиально-осевых насос-турбин мощностью по 148 МВт, а в одном применена трехмашинная схема - на одном валу расположены двигатель-генератор, радиально-осевая гидротурбина и двухступенчатый насос. Все девять агрегатов за год способны выработать более одного миллиарда киловатт-часов электроэнергии.

Есть ещё один способ создания гидроаккумулирующей станции, причём не вкладывая значительных вложений. В настоящий момент на Земле эксплуатируются несколько приливных электростанций (ПЭС), работа которых зависит, естественно, от приливов и отливов, а временной интервал между ними составляет приблизительно 6 ч 12 мин. и относительно суточного времени происходит постоянный сдвиг. Кроме того, мощность приливов зависит от взаимного положения Солнца и Луны. И вот, когда приливная волна меньше максимально возможной (например, на французской ПЭС "Ля-Ранс" высота наибольшей волны составляет 13,5 м при 8 м в среднем) и минимальна стоимость электроэнергии в сети, возможно подкачивание морской воды в водоём за плотиной до максимального уровня.



Макет французской ПЭС "Ля-Ранс"

Пока одни энергетики проектируют подземные ГАЭС, другие не только проектируют, но и проводят эксперименты по созданию подводных ГАЭС. В 2017 году были проведены испытания такой станции в водах Боденского озера, на границе трёх государств: Германии, Швейцарии, Австрии.

Для проведения эксперимента была изготовлена полая сфера 3-метрового диаметра, в верхней части которой была установлена реверсивная турбина. Сферу закрепили на 100-метровой глубине, и после открытия входного клапана вода привела турбину и электрогенератор в действие. Электроэнергия по подводным кабелям поступила к потребителям. Когда в сети "появлялась дешёвая" электроэнергия, реверсивная турбина откачивала воду из сферы.

Чем глубже разместить сферу, тем больший напор будет действовать на турбину, тем больше можно получить электроэнергии, но при этом потребуются и больше затрат энергии для откачки воды из сферы.

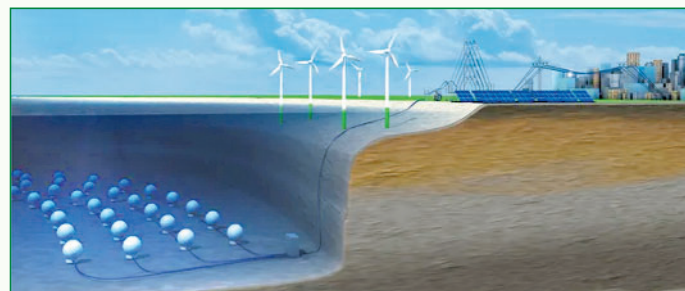


Экспериментальная сфера

Для решения проблемы преодоления статического давления столба воды над сферой при откачке из неё достаточно соединить внутреннюю область сферы с атмосферой с помощью трубы. Либо вытеснить воду с помощью сжатого воздуха, как это делается на подводных лодках при всплытии, а во время впуска воды и выработки электроэнергии просто выпускать воздух из сферы. Воздух для выдавливания воды из сферы можно получить и с помощью электролиза воды, находящейся в сфере (есть много вариантов, что делать с полученными водородом и кислородом). Можно и просто поднять сферу и вылить воду через технологические отверстия, а затем опустить её на своё место на дне.

Для минимизации энергопотерь желательно скомбинировать подводные ГАЭС с рядом находящимися ветрогенерирующими установками.

В настоящее время существуют прочностные ограничения на создание больших сфер, поэтому пока возможна конструкция, имеющая внутренний диаметр порядка 30 м, которая, тем не менее, погруженная на глубину 700 м, может выработать 20 МВт·ч (4-часовая работа турбины мощностью 5 МВт) электроэнергии. Для получения большего количества энергии и более длительного времени её выработки нужно на дне установить необходимое количество таких сфер - создать своеобразный энергетический парк, в котором сферы будут включаться в работу по мере необходимости. Расчёты показывают, что экономически выгодны будут энергетические парки, в которых их будет более 80.



Возможное устройство подводной ГАЭС

К основным достоинствам подводных ГАЭС можно отнести то, что не требуется никакой площади на поверхности земли для размещения водоёмов, тоннелей и машинных зданий, не требуется и их строительства, отсутствует опасность техногенной катастрофы, нет потерь от испарения воды с поверхности водохранилищ и т.д.

Подсчитано, что с помощью подводных ГАЭС можно будет организовать во всем мире в прибрежной зоне аккумуляцию примерно на 900 ГВт·ч электроэнергии.

(Продолжение следует.)



# НА СТАНЦИИ ТАЛИЦЫ В МУЗЕЕ ПАРОВОЗОВ "КУКУШКА"

Иван Сергеевич Трохин, инженер

*В Переславском районе Ярославской области находится поселок Талицы, где с начала 1990-х гг. уютно расположился Музей паровозов "Кукушка". В этом заповедном уголке России, за сельско-лесной "изгородью", можно увидеть действующие узкоколейные паровые локомотивы, давшие название музею. "Кукушками" называли не только сами паровозы узкой колеи (например, шириной 750 мм), но и ведомые ими поезда.*

В наш век на железных дорогах России можно встретить немало ретропоездов с паровозной тягой. Однако сравнительно меньшие по габаритам и мощностям узкоколейные паровозы (рис. 1 и 2), совершающие маневры на деревенском фоне, воспринимаются со стороны как масштабные модели.



Рис. 1 Действующий паровоз Гр-269 узкой колеи 750 мм, которому в 2025 г. исполнилось 75 лет

Кажется, что с ювелирной точностью все их механизмы и устройства изготовили моделисты-конструкторы высочайшего класса. Кстати, в железнодорожном моделизме паровозы считались и остаются непростыми объектами для воспроизведения в масштабных миниатюрах, если говорить о создании действующих образцов. Одно дело повторить внешний облик паровоза и совсем другое - заставить модель работать по принципу прототипа.

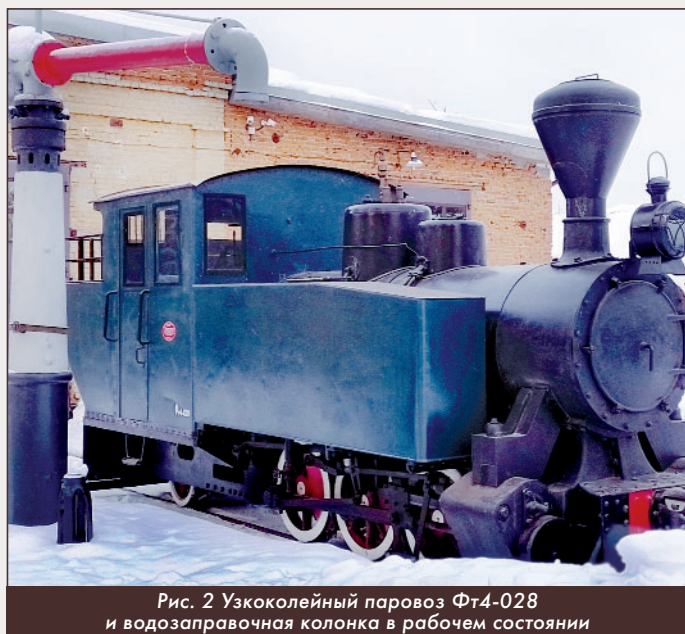


Рис. 2 Узкоколейный паровоз Фт4-028 и водозаправочная колонка в рабочем состоянии

В наш век компьютерных технологий и развития искусственного интеллекта паропоршневая техника по-прежнему привлекает профессионалов и любителей своей самобытностью и чисто

тепломеханической стариной. При этом сила пара и поршня притягивает не только конструкциями прошлого (рис. 3 и 4), но и возможностью практического применения их принципов работы в настоящем и даже будущем.

Во-первых, паропоршневая техника (паровозы, паровые насосы и локомобили, которые можно увидеть в Переславском железнодорожном музее) по своему принципу работы подходит для использования в котельных и насосных установках. Например, при умелом повторении конструкции и грамотной эксплуатации жаротрубного котла паровозного типа от него через пароводя-



Рис. 3 Французский паровой локомобиль "Ардант" завода Жана Брелю, построенный в 1925 г. (паровая машина утрачена)

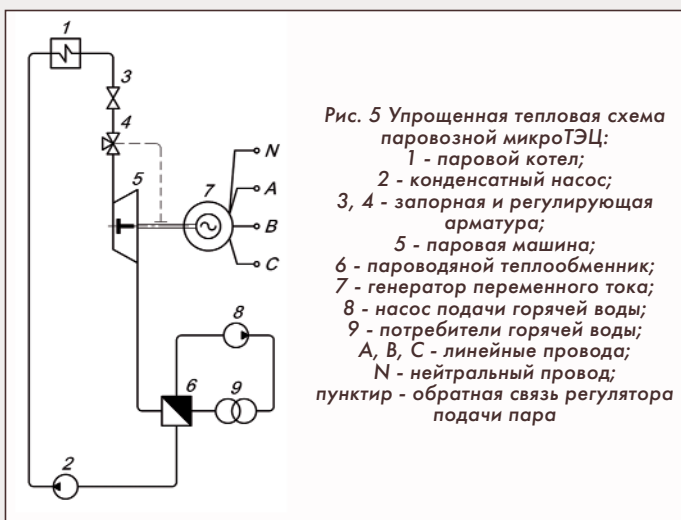


Рис. 4 Паровой поршневой насос Товарищества Добровых и Наболец - возможный элемент системы водоснабжения узкоколейной инфраструктуры паровозных времен

ной теплообменник можно отапливать и снабжать горячей водой загородные дома и подсобные хозяйства. Работать такой котел может практически на любом топливе.

Во-вторых, при нередких перебоях в централизованном электроснабжении сельских местностей, паропоршневая техника с электромашинными генераторами потенциально может снабжать потребителей электроэнергией. Надежность и неприхотливость в эксплуатации техники пара и поршня доказана, в частности, узкоколейными паровозами, активно эксплуатировавшимися много лет в промышленности, на торфо- и лесоразработках.

В-третьих, на базе какого-либо действующего узкоколейного паровоза практически возможно создать микроТЭЦ (рис. 5) электрической мощностью до 100 кВт для отопления, горячего водоснабжения и электропитания музейного комплекса "Кукушка" в Талицах. К слову, в истории техники были случаи, когда паровоз приподнимали на домкраты, соединяли механическим мультипликатором с генератором и использовали в качестве электростанции. В варианте паровозной микроТЭЦ котел по-прежнему производит пар, на котором работает паровая машина, но отработавший в ней пар идет не на выхлоп, а поступает в пароводяной теплообменник для нагрева воды. Паровая же машина приводит в действие генератор.



Не стоит забывать, что поршневые ТЭЦ при электрических мощностях, в частности, до 1 МВт конкурентоспособны с турбинными ТЭЦ: поршневые двигатели меньше расходуют рабочего тела, чем турбины при одинаковых мощностях; они проще и надежнее в эксплуатации. Все сказанное, разумеется, относится и к паропоршневым ТЭЦ.

В современном представлении на паропоршневых ТЭЦ электрической мощностью до 10 МВт (мини-ТЭЦ) вместо паровозной техники лучше, конечно, использовать стационарные водотрубные паровые котлы промышленного производства с топками кипящего слоя для экологичного и энергоэффективного сжигания твердого топлива (угля, торфа, древесных отходов и пеллет). Такие котлы обеспечивают выработку перегретого пара абсолютным давлением 4 МПа (около 40 атм) и температурой 440 °С. Для прямого же привода генератора выгодно применить компактные паропоршневые двигатели (ППД) картерного типа с частотой вращения вала 1000 об/мин и более. Их возможно создавать на базе серийных поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Такой опыт был в СССР и за границей. Имеется он и в современной России (разработки Московско-Королевской общественно-научной группы "Промтеплоэнергетика" под руководством Ветерана труда, авторитетного ученого в области малой энергетики, авиамоделиста Владимира Дубинина). Целесообразно обратить внимание на судовые паромоторы прошлого, советские легкие сельскохозяйственные паросиловые установки ЛПУ-1 и СПУ-100 ВИМ, звездообразные авиационные ДВС, в том числе сконструированные по бесшатунной схеме Баландина.

В-четвертых, можно пойти в творческом поиске еще дальше и построить ретрофутуристическую микроТЭЦ (рис. 6) на базе узкоколейного паровоза прошлого, с генератором настоящего времени и использованием эффекта самостабилизации (!) электрической частоты по методу "поршневой автоматики" будущего для демонстрации перспектив широкого распространения малой энергетики. Здесь проблема такая: при работе ТЭЦ автономно от централизованной электроэнергетической системы России возникает необходимость самостоятельно поддерживать электрическую частоту на уровне  $50 \pm (0,2...0,4)$  Гц. Ни у одного теплового двигателя нельзя стабилизировать частоту вращения вала так точно, чтобы приводить генератор для выработки электроэнергии с такими показателями качества по отклонению частоты. Можно генерировать напряжение с грубой стабилизацией частоты, затем его выпрямлять и инвертировать в переменное напряжение высокостабильной частоты. Однако это снижает КПД и надежность автономных ТЭЦ, увеличивает их стоимость.



Классическая автоматическая система стабилизации частоты вращения вала теплового двигателя имеет датчик частоты вращения и исполнительный орган, управляющий потоком рабочего тела или топлива. Если электрическая нагрузка генератора, приводимого паровой машиной, увеличивается, то нужно увеличивать подачу пара в машину и наоборот.

Многочисленными исследованиями Владимира Дубинина и инженера, авиамоделиста Сергея Шкарупы теоретически и экспериментально подтверждена возможность самостабилизации частоты вращения вала тепловых двигателей дискретного действия, к которым относятся только поршневые двигатели. Самостабилизация частоты вращения вала таких двигателей осуществляется без датчиков при импульсной подаче или выработке рабочего тела (например, пара) через равные промежутки времени. Процесс, в сущности, аналогичен работе анкерного механизма и маятника в механических часах. В нашем случае - это паровая машина с источником пара (котлом) и задающий генератор импульсов подачи пара. Конструкции такого генератора являются полем для инженерно-творческого поиска.

Чтобы ввести ППД в режим самостабилизации нужно разогнать его с точностью приблизительно  $\pm 5\%$  до частоты вращения, совпадающей с частотой подачи импульсов пара, используя внешний источник механической энергии (например, электродвигатель). Затем в ППД необходимо подать импульсный поток пара и после переходного процесса частота вращения вала ППД будет совпадать с частотой следования импульсов (наступит режим её высокоточной самостабилизации при отсутствии статизма в установившихся режимах работы ППД, как при максимальной нагрузке, так и холостом ходе).

Музей паровозов в Талицах существует благодаря заботам и неустанному труду подлинных народных мастеров, энтузиастов Вадима Миронова (основатель музея) и Сергея Дорожкова (директор Центра истории промышленности и транспорта) с коллегами-единомышленниками по узкой колее связи времен. Они сохраняют технику прошлого, у которой, как было рассказано выше, есть чему поучиться и в наше высокотехнологичное время. Особенно, если посмотреть на исторические конструкции через призму современных технологий проектирования и производства с учетом достижений в материаловедении.



# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТОМА. НЕЙТРИНО КАК ЭЛЕМЕНТ ПЕРВОРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ МАТЕРИИ

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

После создания модели атома [1], в которой нет необходимости в фантазиях о сильном и слабом взаимодействии, стандартная модель утратила свою актуальность.

## 1 Электродинамическая модель атома

Согласно [2] "Электростатика - раздел учения об электричестве, в котором изучается взаимодействие неподвижных электрических зарядов". Это взаимодействие осуществляется посредством электростатического поля". Однако мир нашей галактики имеет абсолютную скорость  $V_a = 630$  км/с, поэтому необходимо учитывать, что все заряды материальных объектов (МО) галактики "Млечный путь" имеют эту или близкую к ней скорости движения, так как у МО есть ещё и относительные скорости  $V_{от}$  существенно меньшие  $V_a$ .

Если при анализе физических явлений для "неподвижных зарядов" (электростатики) учитывать  $V_a$ , то тогда необходимо от зарядов, имеющих изотропную диаграмму направленности, перейти к рассмотрению токов (упорядоченного движения зарядов) т.е. к электродинамике.

При этом надо учитывать, что материя многоуровневая. Так, рассуждая о предметах, состоящих из большого количества молекул, которые в свою очередь состоят из атомов, которые образованы из МО, имеющих заряды, необходимо прийти к выводу, что тело (МО), рассматриваемое как результат интегрирования его зарядов по всем уровням, при преобладании какого-то заряда может быть условно приведено к модели "точечного заряда" с изотропной диаграммой направленности (ДН)  $\Psi_{тело/е}(r) = 1$ .

Примечание - в соответствии с [2] "Модель точечного заряда применяется в ситуациях, когда собственными размерами заряженного объекта можно пренебречь, по сравнению с расстоянием, на котором рассматривается электростатическое взаимодействие. Однако если рассматривать взаимодействие зарядов (нуклонов) внутри ядра атома, то это взаимодействие не может быть рассмотрено как взаимодействие точечных зарядов. В дальнейшем мы уходим от понятия "точечный заряд".

При переходе к рассмотрению физики на уровне атома (т.н. ядерной физики) мы должны рассматривать взаимодействия зарядов с учетом их  $V_a$ , т.е. как микротоков (линейного или вращательного), а их ДН в виде тороидов, присущих элементарному вибратору Герца (при учете  $V_a$ ) или элементарной магнитной рамке (при учете  $V_{от}$ ).

Так, в статье "Гравитация" [3] рассматривались явления с учетом более низкого уровня чем тело - к молекулярному и атомарному, введя  $\Psi_{МО/е}(r)$ , а в статье [1] предложена модель атома с учетом абсолютной скорости движения материи, создающей ДН  $\Psi_{МО/е}(r)$ .

В статье [1] предложена электродинамическая модель атома, где заряды в атоме рассматриваются как неточечные, имеющие ДН, что позволяет более пристально взглянуть как на строение атома, так и на окружающий нас мир.

Для того, чтобы читатель не искал ранее опубликованный материал по предложенной модели в [1] будет целесообразно привести его заново с некоторым её уточнением и сделать выводы.

## Модель атома (с учетом абсолютной скорости движения материи)

В статье [4] показано влияние абсолютной скорости МО  $V_a$  на характер контактного взаимодействия МО.

Но абсолютная скорость  $V_a$  заряженных МО влияет и на их полевое взаимодействие.

Такая модель предложена в статье [5]. Вся материя на Земле

движется с абсолютной скоростью  $V_a$ , а упорядоченное движение зарядов есть ток, тогда необходимо учитывать и закон Ампера, по которому два параллельных тока должны притягиваться друг к другу, а два параллельных, но противоположно направленных тока отталкиваются. Есть факты [6], свидетельствующие о притяжении одинаковых зарядов микрочастиц, которое пытаются объяснить средой (бульоном). Эти явления можно объяснить тем, что в процессе эксперимента рассматриваемые заряды находились на линии, перпендикулярной вектору  $V_a$ , и в соответствии с законом Ампера их движение с абсолютной скоростью  $V_a$  позволяет рассматривать взаимодействие этих микрочастиц как взаимодействие параллельных микротоков.

Тогда планетарная модель Резерфорда может быть представлена по-иному. На рис. 1 представлено сечение атома плоскостью, перпендикулярной вектору  $V_a$  - красный крест - это конец вектора абсолютной скорости  $V_a$ . Красная цветная заливка у нуклонов, салатная у электронов.

В этой модели структура атома поддерживается двумя физическими, полевыми силами - силой Ампера  $F_a$  для микротоков, параллельно идущих в одну сторону при одноименных зарядах, или идущих в противоположные стороны при разноименных зарядах. (Примечание - движущиеся в одну и ту же сторону положительные и отрицательные заряды привычно рассматривать как противоположные токи) и силой Кулона  $F_k$ .

Атом - это МО в виде сфероида, как наша планета. Сфероид атома приплюснут вдоль вектора  $V_a$ . В силу преобладания в этом направлении притяжения электронов к положительно заряженному ядру.

На рис. 2 показан сфероид модели атома. Силы  $F_a$  и  $F_k$  формируют силы между электронами и ядром:  $F_1 = F_k - F_a$  в области где  $F_k > F_a$  и  $F_2 = F_k - F_a$  в области, где  $F_k < F_a$ . Между одноименными зарядами, электронами и нуклонами, сила Ампера сближает их,

но при приближении сила Кулона не дает возможности их объединения, именно поэтому положительно заряженное ядро атома, без т.н. "сильного взаимодействия" и "слабого взаимодействия" сохраняют свое единство и в тоже время дискретную структуру.

Области электронов сфероида с более интенсивной зеленой окраской означают более плотную концентрацию зарядов, благодаря действию сил Ампера.

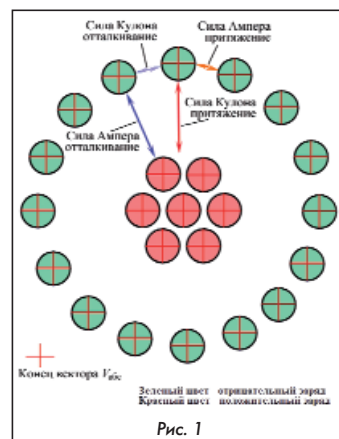


Рис. 1



Рис. 2

В соответствии с предложенной моделью атома:

1. Все взаимодействия в МО, и, в частности, атоме и молекуле, следует рассматривать как воздействие на составные заряды МО двух сил - Кулона и Ампера. Причем сила Кулона обратно пропорциональна **квадрату расстояния** между зарядами, и сила Ампера обратно пропорциональна **расстоянию** между заряженными МО. Это приводит к тому, что для **одинаковых** по величине заряда МО, на относительно "больших" расстояниях между взаимодействующими зарядами, преобладает сила Ампера, а на относительно "малых" расстояниях работает сила Кулона. Вектор силы Ампера перпендикулярен вектору абсолютной скорости  $V_a$ , и имеет минимальное значение для зарядов, расположенных по линии, параллельной  $V_a$ . Поэтому сфероид атома сжат по этой линии из-за преобладания сил Кулона.

2. Для расчета всех сил, действующих на конкретный заряд, например электрон, необходимо учитывать полный заряд ядра. Так как заряд ядра выше заряда единичного электрона, то преобладать будут силы Кулона, которые притягивают отдельный электрон к ядру, уплотняя электронную оболочку, но в то же самое время сила Ампера, противодействуя силе Кулона, не даёт электронам попасть на ядро. Таким образом сохраняется **стабильность атома**.

3. Особо следует указать на особенность строения **ядра атома** в соответствии с предложенной моделью. Оно вытянуто в направлении  $V_a$ , т.к. по линии, параллельной  $V_a$ , преобладает сила Кулона (отталкивания), а в плоскости, перпендикулярной вектору  $V_a$ , благодаря силе Ампера положительно заряженные нуклоны ядра будут притягиваться. Данная модель получила подтверждение при исследовании пространственной анизотропии естественной радиации Плутония 239 (Pu 239) [7]: при исследовании  $\beta$ -активности (в опытах с коллиматорами) обнаружены её суточные колебания. Исследователи "объяснили" это явление некими неопределенными "космофизическими факторами": в [7, стр. 388] "Пришлось сделать труднейший вывод: **"на самом деле" изучаемые явления не зависят от природы процессов**". Но "на самом деле", единственным природным "космофизическим" фактором является наличие абсолютной скорости  $V_a$ , направление которой относительно изучаемого МО (Плутония 239) и регистрирующих приборов меняется в течение суток (из-за вращения Земли вокруг своей оси), а также имеет годовую зависимость (из-за движения Земли вокруг Солнца (рис. 3) - но на это никто внимания не обратил, т.к. и не обращал), что и обуславливает изменение значения максимального выхода материи из ядра.

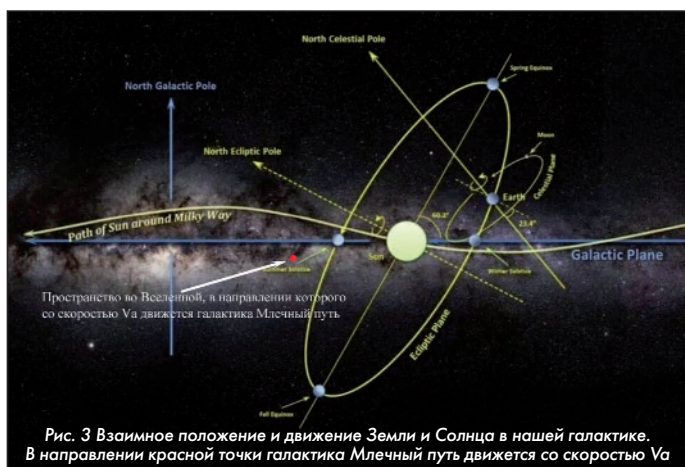


Рис. 3 Взаимное положение и движение Земли и Солнца в нашей галактике. В направлении красной точки галактика Млечный путь движется со скоростью  $V_a$

Исходя из сказанного, можно дать пояснения к рис. 1 и рис. 2.

**Пояснения к рис. 1:** в перпендикулярной вектору  $V_a$  плоскости, проходящей через центр ядра атома, тороидальные ДН  $\Psi(r)$  всех зарядов имеют максимальные значения (благодаря току, образованного движением зарядов в направлении  $V_a$ ), а по оси вектора  $V_a$  ДН  $\Psi(r)$  всех зарядов имеют минимум  $\sim 0$ . Благодаря этому формируются максимальные значения сил взаимодействия (Кулона и Ампера), что приводит к стягиванию электронов в эту плоскость.

**Пояснения к рис. 2:** для модели атома  $F_1 > F_2$ , и это было бы так, если заряды имели бы изотропную ДН. Но так как заряды имеют тороидальную ДН  $\Psi(r)$ , нулевая (минимальное значение ДН) ось которой совпадает с вектором  $V_a$ , то, учитывая ДН зарядов, сила  $F_1 \approx 0$  и тогда  $F_2 \gg F_1$ , и все электроны (облако электронов) будут располагаться в плоскости, перпендикулярной вектору  $V_a$  (аналог "плоскости эклиптики" в солнечной системе).

В [8] утверждается: "Уникальна ли плоская структура нашей солнечной системы? Ответ - нет. Подобные упорядоченные системы являются **нормой** во Вселенной, и мы видим такое же расположение звезд и планет в многих других звездных системах. Это свидетельствует о том, что процессы формирования звезд и планетарных систем во вселенной происходят по схожему сценарию". И этот сценарий написан в соответствии с электромагнитным взаимодействием звезд (заряженных положительно) и планет (заряженных отрицательно). Тогда, в силу универсальности законов Кулона и Ампера и концепции электрической вселенной, можно распространить модель атома т.е. микромира на модель вселенной - макромира. Исходя из этого предлагаемую модель атома следует называть "планетарной". И - в отличие от модели Резерфорда - в ней показаны силы, её формирующие.

С учетом данного пояснения структура атома, изображенная на рис. 2, должна быть уточнена (см. рис. 4).

Особенность этой модели в том, что ядро атома имеет вид эллипсоида вращения, большая ось которого параллельна  $V_a$ , а все электроны атома расположены в плоскости, перпендикулярной вектору  $V_a$ .

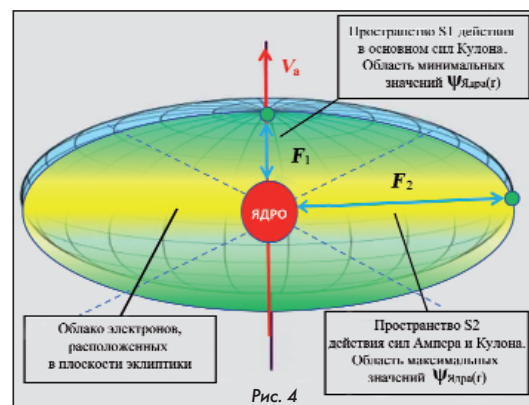


Рис. 4

Уравнение Кулона должно быть модифицировано с учетом  $V_a$  и оно принимает вид:

$$F_{K1\_2}(r) = \frac{k[g_2 \Psi_{E1}(r) + g_1 \Psi_{E2}(r)]}{r^2}, \quad (1)$$

где  $F_{K1\_2}(r)$  - сила, с которой первый заряд, имеющий электрическую ДН  $\Psi_{E1}(r)$  из-за  $V_a$ , действует на второй заряд, находящийся от него на расстоянии  $r$ , и плюс сила, с которой второй заряд, имеющий электрическую ДН  $\Psi_{E2}(r)$  благодаря  $V_a$ , действует на первый заряд, находящийся от него на расстоянии  $r$ .

И уравнение Ампера также должно быть модифицировано с учетом  $V_a$ , тогда и оно принимает вид:

$$F_{A1\_2}(r) = \frac{\mu \mu_0 [I_2 \Psi_{M1}(r) + I_1 \Psi_{M2}(r)]}{2\pi r}, \quad (2)$$

где  $F_{A1\_2}(r)$  - сила, с которой первый заряд, имеющий магнитную ДН  $\Psi_{M1}(r)$  из-за  $V_a$ , действует на второй заряд, находящийся от него на расстоянии  $r$ , и плюс сила, с которой второй заряд, имеющий магнитную ДН  $\Psi_{M2}(r)$  благодаря  $V_a$ , действует на первый заряд, находящийся от него на расстоянии  $r$ :

$$I_1 = \frac{dq}{dt} = q_e n V_a d_s d_q = \frac{\pi q n V_a d_s d_q^3}{4},$$

где  $q_e$  - величина одного заряда,  $n$  - концентрация зарядов в единице объема ( $N/V$ ),  $d_s$  - сечение МО  $[\pi d_q^2/4]$ ,  $d_q$  - диаметр МО, несущего заряд,  $V_a$  - абсолютная скорость движения материи равная  $6,3 \times 10^5$  м/с.

#### Выводы по разделу 1:

1. Все существующие модели (гипотезы) атома, а также современная ядерная физика, рассматривают материю без учета её абсолютной скорости движения. Потому заряд в этих моделях стати-



ческий. Статические заряды имеют изотропную (сферическую) диаграмму направленности (ДН), в то время как заряды, находящиеся в движении (электрические токи), могут быть рассмотрены как элементарные токи с тороидальными ДН. Вследствие этого взаимодействие каждого элемента атома должно рассматриваться с учетом их ДН в виде тора, ось которого совпадает с направлением вектора  $V_a$ , и такой вид атома представлен на рис. 4. Максимальная сила Кулона, удерживающая электроны на орбите атома, будет располагаться в плоскости, перпендикулярной вектору  $V_a$ .

Аналогично, планета Земля, имеющая отрицательный заряд, имеет электрическую тороидальную ДН, максимум которой располагается в плоскости экватора, а минимумы в полярных областях, и это явление требует дополнительного осмысления и изложения в одной из будущих статей.

2. С учетом абсолютной скорости движения материи выражение силы Кулона имеет вид (1), а выражение силы Ампера - вид (2).

3. Следующим выводом, вытекающим из этой модели, является отсутствие в ядре атома **нейтронов**. Действительно, если в материальном объекте (МО) ядра атома нет зарядов, то и нет функциональных связей с протонами (нуклонами), и не возможны ни сила Кулона, ни сила Ампера. Тогда что же предлагается вместо протонно-нейтронной модели ядра, предложенной советским физиком Д.Д. Иваненко и немецким учёным В. Гейзенбергом в 1932 году? В своих рассуждениях о модели атома, мы ушли от понятий "зарядов" и перешли к их ДН  $\Psi(r)$ , а заряд ядра (равный заряду всех электронов атома) определили как интеграл по поверхности ядра где **поверхность ядра - это внешние нуклоны, которые экранируют внутренние нуклоны**. В таком случае интеграл берётся по диаграммам направленности внешних нуклонов ядра). По официальной гипотезе нуклоны ядра существуют в двух состояниях - протона или нейтрона. Размер нуклона - около  $10^{-15}$  м, при этом нуклоны **плотно сжаты** в пространстве размером не более  $10^{-14}$  м. В соответствии с предлагаемой гипотезой внутреннюю часть ядра составляют нуклоны, ДН которых замыкается на зарядах оболочки ядра, а на внешней части ядра (её оболочке) расположены внешние нуклоны, которые образуют материальный электромагнитный экран для внутренних нуклонов. Расстояние между внутренней и внешней частями ядра (между нуклонами) определяется равенством сил Кулона и Ампера. Именно внутренние (экранированные) нуклоны и принимают за нейтроны.

4. Разработанная модель атома позволит приблизиться к пониманию физической модели периодической системы Менделеева.

5. "Эйнштейном было выдвинуто предположение, что все физические законы должны быть одинаковыми для наблюдателей, движущихся с **разной скоростью**, то есть физические законы должны быть инвариантны относительно преобразований Лоренца". **Наблюдатели** могут двигаться с любой **скоростью**, но вопрос то не в наблюдателях, а в материи, которую они наблюдают, точнее, в скорости, с которой движется наблюдаемая материя. Абсолютная скорость  $V_a$  материи, наблюдаемой в нашей галактике, одна и та же для всех наблюдателей, и тут Эйнштейн прав. Однако сами законы физики должны учитывать эту скорость при рассмотрении физических явлений. Тогда физические законы, например, закон Кулона и Ампера, должны быть преобразованы, соответственно, в вид (1) и (2). Тогда, в соответствии с "новыми" законами, представление о сущности **формы материи** должно кардинально измениться, т.к. сила Ампера, формирующая вместе с силой Кулона материю, зависит от абсолютной скорости движения материи  $V_a$ . Так, при уменьшении  $V_a$  (а значит  $F_a$ ), размеры облака электронов (отталкиваясь друг от друга) в атоме увеличатся в силу усиления действия силы Кулона (материя станет более рыхлой), а при  $V_a = 0$  электроны разлетятся друг от друга; то же самое произойдет с ядрами атомов (материя станет абсолютно рыхлой). Электроны начнут непосредственно взаимодействовать с нуклонами, и материя перейдет в состояние первородной космической материи (ПКМ), не имеющей электрических зарядов. Простейшим её представителем является нейтрино.

## Нейтрино как элемент первородной космической материи

В соответствии с [10] стандартная модель (СМ) включает четыре вида взаимодействия электромагнитное, сильное, слабое и гравитационное.

Рассмотрим эти взаимодействия.

1. "Электромагнитное взаимодействие" удерживает электроны внутри атома и атомы внутри молекул. Переносчиком электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) является фотон".

Мы считаем, что фотон не частица, а электромагнитное поле; в таком случае нет необходимости поиска переносчика взаимодействия, так как так называемый перенос взаимодействия давно раскрыт в теории распространения радиоволн (РРВ).

2. "Гравитационное взаимодействие" (ГВ) - **взаимодействие между материальными телами, обладающими массой**". Мы же считаем его одним из видов электромагнитного взаимодействия, изложенного в [3].

3. "Сильное взаимодействие" (СВ) удерживает протоны и нейтроны внутри атомного ядра, а кварки внутри протонов, нейтронов и других адронов".

Мы рассматриваем протоны и нейтроны как нуклоны - материальные частицы с внутренним движением зарядов и создающих ДН тороидального вида, в силу чего с внешних сторон эта частица проявляет себя как протон с положительным зарядом, а области внутренней части тора ДН ("дырки") как нейтрон с нулевым зарядом. А единство ядра атома определяется не мифическими бозонами, которыми обмениваются фермионы, а силами Кулона и силами Ампера, возникающими благодаря абсолютной скорости движения материи [1].

4. "Слабое взаимодействие" (СлВ) вызывает  $\beta$ -распады, отвечает за все процессы **взаимодействия нейтрино с веществом, за реакции происходящие на звездах**".

Приведенное объяснение введения т.н. СлВ обусловлено невозможностью объяснения экспериментов ни ЭМВ, ни ГВ, ни СВ и носит формально описательный характер.

Рассмотрим известные проявления  $\beta$ -распада и построим модель этого явления вместо "слабого взаимодействия". Дадим определение нейтрино.

В [10] "Естественный бета-распад ( $\beta$ -распад) наблюдается в ядрах **радиоактивных изотопов**. Этот тип радиоактивного распада обусловлен слабым взаимодействием и изменяет заряд ядра на единицу без изменения массового числа. При бета-распаде ядро излучает электрон или позитрон (бета-частицу), а также нейтральную частицу с полужелым спином (электронное антинейтрино или электронное нейтрино)".

Изотопы отличаются от элементов таблицы Менделеева с большими массами атомных ядер. Все изотопы таблицы Менделеева, идущие после свинца радиоактивны. Радиоактивный распад сопровождается эмиссией излучения трёх различных типов, которым дали названия альфа, **бета** и гамма.

Так как в ядре атома нет ничего, кроме нуклонов, то считаем, что причина  $\beta$ -распада во взаимодействии между нуклонами. Само взаимодействие может быть только контактное и полевое. Полевое взаимодействие обеспечивают силы Кулона и Ампера, обеспечивающие стабильность ядра, но когда количество нуклонов большое, то они начинают взаимодействовать и контактно. При контактном взаимодействии двух нуклонов, причем упругом, в силу больших значений абсолютной скорости, они отталкиваются друг от друга и с большой вероятностью разворачиваются их ДН, так как в результате контактного взаимодействия появляется составляющая  $V_a$  изменяющая направление оси тора ДН. При этом их вклад в общий заряд ядра, который равен интегралу по сфере вокруг ядра может уменьшиться или увеличиться из-за разворота ДН, а кроме этого, контактное взаимодействие может оторвать часть материи у этих нуклонов. Оторванная материя с **не фиксированной** массой, имея некую кинетическую энергию приобретает заряд отрицательный (электрон), положительный (позитрон) или электрического заряда не приобретает, тогда образуются нейтрино.

## Проблема солнечных нейтрино

В [11] "Проблема солнечных нейтрино, или **проблема дефицита солнечных нейтрино**, - проблема астрофизики, которая состояла в различии между теоретически предсказанным и наблюдаемым количеством нейтрино, излучаемых Солнцем. Проблема считается решённой: обнаружены нейтринные осцилляции, из-за которых часть электронных нейтрино превращается в нейтрино других типов, не наблюдаемые в нейтринных детекторах некоторых видов. С учётом осцилляций, поток нейтрино всех типов согласуется со значениями, которые предсказываются теорией". Есть объяснение ещё и по-другому: в соответствии с [12] "Согласно полевой теории элементарных частиц электронное нейтрино (как и любая другая элементарная частица с ненулевой величиной массы покоя) обладает **переменным электромагнитным полем** с постоянной составляющей, т.е. нейтрино обладает: постоянным **дипольным электрическим полем**; постоянным **дипольным магнитным полем**; постоянным **магнитным полем** магнитного момента; переменным **электромагнитным полем**".

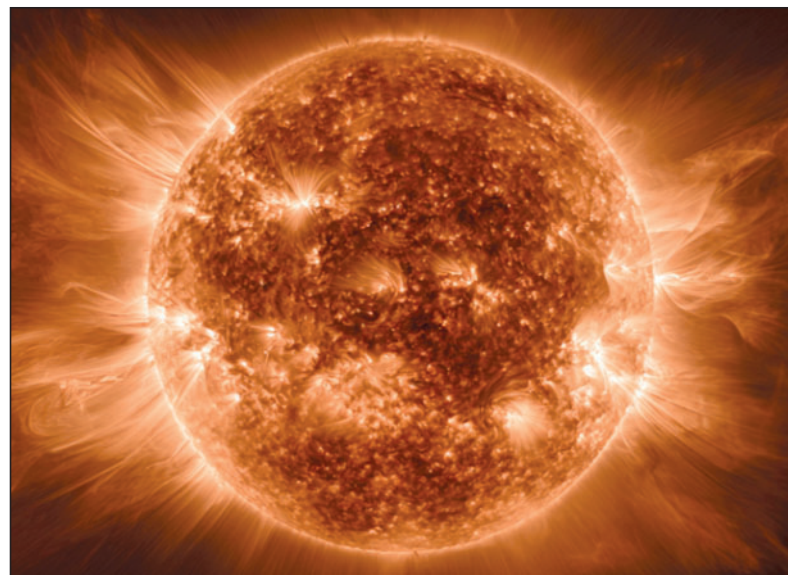
Мы считаем иначе. Нейтрино не может создавать ЭМП, так как не имеет электрических зарядов, а тем более иметь дипольные моменты. Нейтрино имеет массу, а значит импульс и кинетическую энергию, которые при взаимодействии с материей вызывают в ней изменения, которые и регистрируют исследователи.

Излучения Солнца это на 95 % альфа-лучи, а бета-лучи занимают **единицы процентов** излучения, исходя из этого можно утверждать, что:

1. В реакции на Солнце "работают" не радиоактивные вещества, с большим количеством нуклонов в ядрах, а с малым количеством нуклонов в ядрах, поэтому  $\beta$ -лучей там мало, а значит и мало нейтрино.

2. Высокие температура и давление на Солнце при распаде ядер водорода, дейтерия и трития минимизирует вероятность появления нейтральных МО (нейтрино) на любых уровнях материи. Причём, чем выше температура и давление, тем больше количество уровней, а процесс термояда - это процесс разрыва функциональных связей МО на уровнях ниже нуклона (внутри самих нуклонов) [1, параграф "Термоядерная реакция"]. Поэтому нуклон водорода распадается, благодаря "работе" закона Кулона т.е. ЭМП, а контактное взаимодействие зарядов на уровнях ниже нуклона при высоких температурах имеет малую вероятность образования нейтральных МО - т.е. нейтрино.

П



## Перечень источников

1. Воронков Д.Н. Дно материи // Двигатель. 2024. № 5-6. С. 43-49.
2. Wikipedia. Электростатика.
3. Воронков Д.Н. Гравитация // Двигатель. 2022. № 4-6. С. 48-53.
4. Воронков Д.Н. Физика бесконечного существования материальной Вселенной // Двигатель. 2023. № 4-6. С. 12-15.
5. Воронков Д.Н. Квантовая физика мертва. Да здравствует Физика // Двигатель. 2024. № 3-4. С. 34-40.
6. [https://element.ru/nauchnopolupulyarnayabiblioteka/433397/Zagadka\\_galakticheskikh\\_masstabov?ysclid=m4s2wvf64n705998364](https://element.ru/nauchnopolupulyarnayabiblioteka/433397/Zagadka_galakticheskikh_masstabov?ysclid=m4s2wvf64n705998364).
7. Шноль С.Э. Космофизические факторы в случайных процессах. Пущино: Физический факультет МГУ, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, 2009.
8. <https://m.ok.ru/group/52826113638591/topic/155767638193599?ysclid=mfdubcpwgz73500155>.
9. Wikipedia. Стандартная модель.
10. Wikipedia. Бета распад.
11. Wikipedia. Проблема солнечных нейтрино.
12. В.А. Горуневич. "Загадка" солнечных нейтрино с точки зрения полевой теории элементарных частиц. Zagadka\_solnechnykh\_nejtrino.pdf.

## ИНФОРМАЦИЯ. Осевой электродвигатель

В настоящее время практически все электромобили приводятся в движение электродвигателями с радиальным потоком. Хотя первые электрические машины были с осевым потоком. Но история совершает виток, и Электромашин с таким принципом работы появились и на авто. Правда, двигатели с осевым потоком пока применяются на дорожных спортивных автомобилях. Например, в гибридных моделях SF90 и 296 GTB Ferrari стоят двигатели британской компании Yasa, а на Mercedes-Benz Vision One-Eleven стоят два электромотора от Yasa. Двигатели этой компании стоят и на гибридных спорткарах Revuelto и Temerario. Но, несмотря на такое преимущество, как повышенная удельная мощность, распространению этих двигателей препятствует их высокая стоимость.

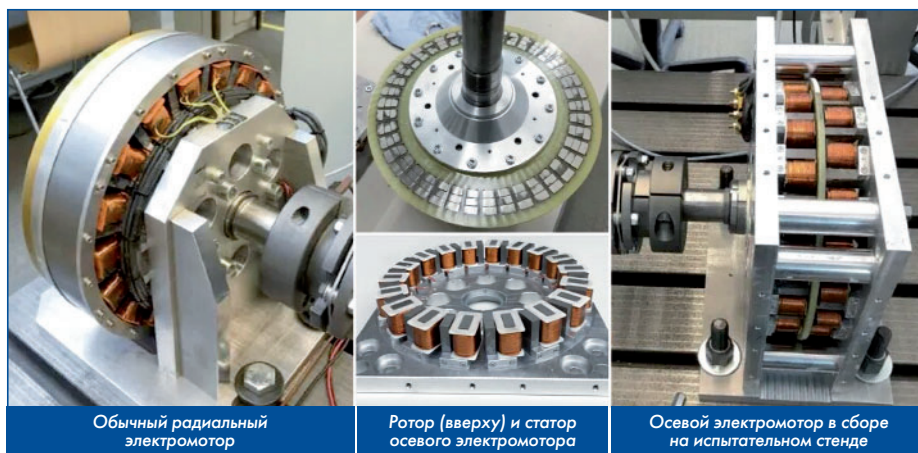
Но, кажется, появилось решение этой проблемы. На выставке Auto Shanghai 2025 французская компания Valeo и китайская технологическая компания PanGood продемонстрировали совместную разработку нового мотор-генератора с осевым магнитным

потоком. Ими найдено решение в объединении двигателя и инвертора в компактную электромашину "2-в-1". Такая конструкция должна способствовать созданию электромобилей с повышенной дальностью пробега.

К решению задачи широкого применения мотор-генератора с осевым магнитным потоком подключились одиннадцать иссле-

довательских групп и компаний из шести европейских стран. Целью их исследовательского проекта Maxima является снижение стоимости путём меньшего использования дорогих редкоземельных металлов при обеспечении высоких характеристик электромашин. Проект, финансируемый ЕС, должен быть успешно завершён к 2027 году.

П



Обычный радиальный электромотор

Ротор (вверху) и статор осевого электромотора

Осевой электромотор в сборе на испытательном стенде





# 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 - 6-2024)

Получив неоценимый опыт преобразования американского танка M3 Stuart в бразильский X1A2 конструкторы компании Bernardini взялись за создание лёгкого танка. Но всё началось с банальной модернизации уже стоящего на вооружении армии американского танка M41 Walker Bulldog, получившего после проведённых работ новое название - M41C Sahias.



M41 Walker Bulldog

И вот уже этот вариант предстояло усовершенствовать самостоятельно в более современный вариант, причём из лёгкого танка в средний. Военные, оценив финансовые возможности, предложили компании Bernardini разработку проекта серьёзной переделки танка, чтобы он соответствовал не только насущным требованиям, но и ближайшей перспективы. Причём, в своём техническом задании 1978 года они потребовали, что бы все новые агрегаты производились в Бразилии, в том числе и по лицензии.

Проект модернизации танков M41C получил название MB-3 (исходное рабочее обозначение X-30), и его реализация началась в том же году. Впоследствии к названию MB-3 добавили слово Татоуо - название одного из южноамериканских индейских племен.

В ходе модернизации решалась триединая задача повышения огневой мощи, защищённости и подвижности. Улучшение защиты и повышение боевых качеств привели к соответствующему росту боевой массы. Это заставило, в свою очередь, переработать ходовую часть (вместо пяти катков на борт пришлось применить шесть катков), силовую установку и трансмиссию. Разработка затянулась, и машина первого варианта модернизации появилась только в 1982 году.

Назвать получившуюся машину модернизированным вариантом американского M-41 довольно сложно. Сначала был основательно переработан корпус для повышения защищённости. Появилась новая гранёная форма корпуса с увеличенным наклоном лобовых и скуловых листов, а надгусеничные полки стали прямоугольными. Сам корпус пришлось удлинить для установки нового оборудования путём врезки дополнительной секции.

В конечном счёте компоновка корпуса осталась прежней, классической, хотя среди инженеров-конструкторов Bernardini была группа, которая предлагала создать совершенно новую машину, аналогичную аргентинскому танку TAM и израильскому танку Меркава, созданных в 70-е гг., (см. журнал "Двигатель" 2021-4). Эти танки отличались двигателем, расположенным в передней части корпуса и дополнительно служили защитой экипажа.

Итак, модернизация пошла по традиционному пути. Причина и в деньгах, и в расчёте на то, что такой вариант танка будет



Проект Татоуо  
с передним расположением двигателя



легче предложить иностранным покупателям, на вооружении армий которых были американские M41. И, как это нередко бывает, пока шла работа над проектом финансовый ручеёк постепенно пересыхал, и Bernardini стала вкладывать свои кровные, а потому на первом экземпляре танка осталась 90-мм пушка. Компания сэкономила и на изготовлении корпуса применив конструкционную сталь.

Основной задачей этой машины была проверка основных идей и решений нового проекта. В связи с этим компания Bernardini решила сэкономить и использовала при переделке корпуса M41C конструкционную сталь.

Итак, в передней части корпуса находилось отделение управления, в центре - боевое отделение, а в корме - моторно-трансмиссионное, в котором установили двигатель Saab-Scania DSI-14 мощностью 500 л.с. (выпускался в Бразилии по лицензии). С двигателем соединялась автоматическая коробка передач. Привод задних ведущих колёс осуществлялся механической трансмиссией General Dynamics HMPT-500.

Из-за установки нового двигателя пришлось удлинить корпус (длина танка стала 8,76 м, ширина - 3,22 м, высота - 2,48 м) и добавить шестой каток (у всех шести катков каждого борта был уменьшен диаметр). Как и у исходной модели все катки имели индивидуальную торсионную подвеску, а на первом, втором и шестом катках использовались дополнительные гидравлические амортизаторы. Ведущее (заднее) и направляющее колёса, три поддерживающих ролика остались без изменений. Траки также остались прежними, только их стало больше из-за увеличенной длины гусеницы.

Башня вместе с 76-мм нарезной танковой пушкой M32 со стволом длиной 60 калибров и дульным тормозом остались прежними, только сверху из конструкционной стали приварили дополнительную конструкцию из 25-мм листов, в результате немного изменилась форма башни и, как следствие, получилась комбинированная защита, как и у корпуса. Забегая вперёд, отметим, что



Первый прототип танка Татоуо. По сути - макет

впоследствии на оригинальный корпус был добавлен слой дополнительной бронезащиты из композитного материала.

Внутри боевого отделения были размещены 68 унитарных снарядов.

В результате доработок боевая масса танка увеличилась почти до 30 т, но мощности нового двигателя было достаточно для движения по шоссе с максимальной скоростью 60 км/ч. Топлива хватало на 550 км.



МВ-3 Татоуо. Прототип с 76-мм пушкой на испытании

Через год после создания первой опытной машины компания Bernardini представила новый вариант, в котором были учтены как результаты испытаний первого прототипа, так и новые требования военных. Естественно, что военных не могла удовлетворить старая 76-мм пушка, и ещё их не устроила силовая установка.

В итоге на второй прототип установили дизельный двигатель Detroit Diesel 8V-92TA мощностью 730 л.с. и автоматическую трансмиссию Allison CD-500-3. Вместо 76-мм пушки смонтировали 90-мм, разработанную компанией Bernardini. У этой пушки ствол имел длину 40 калибров и дульный тормоз. Установка этой пушки не потребовала значительных изменений в башне.



МВ-3 второй серии

К 1985 году в испытаниях участвовали помимо первого танка с 76-мм пушкой уже девять образцов с 90-мм пушками. Помимо участия в испытаниях по своим программам некоторые машины передавались для изучения потенциальным покупателям, в том числе военным Парагвая и Перу.



МВ-3 из второй серии на испытаниях

Однако, в это же самое время на рынке вооружений появились отслужившее американские танки M60 и немецкие Leopard 1. Бразильские военные решили, что эффективнее будет прекратить финансирование собственных разработок и закупить списанные импортные машины.

Такое решение вынудило руководство компании Bernardini искать покупателей для своей разработки за рубежом своей страны. Во-первых, было желание всё же заработать и вернуть затраченные на разработку собственные средства и, во-вторых, это решение опиралось на предположении, что страны, у которых на вооружении ещё стояли американские M41, предпочтут их модернизацию вместо закупки "новых".

Понимая, что продать МВ-3 Татоуо с 90-мм пушкой нереально, перед конструкторами поставили задачу разработать третий вариант танка со 105-мм английской нарезной пушкой L7A3. В 1987 году её установили в новую башню изменённой конструкции: в ней вместо исходной лобовой части установили конструкцию с трапецевидной передней частью и расходящимися скуловыми листами, которые являлись лбом башни и маски орудия. Пушка имела двухплоскостную стабилизацию, а для повышения точности на танк установили новейшую систему управления огнём типа Ferranti Falcon, в составе которой имелись дневные и ночные прицелы на рабочих местах командира и наводчика, лазерный дальномер и цифровой баллистический вычислитель. Боекомплект размещался в боевом отделении и корпусе танка и включал 50 выстрелов со снарядами различных типов.



МВ-3 Татоуо со 105-мм пушкой

Стоимость этого варианта танка (в зависимости от выбранной заказчиком конфигурации) могла достигать \$2,8 млн, но, несмотря на активную рекламно-выставочную компанию, продолжавшуюся до 1993 года, никто не обратил внимание на бразильскую разработку. Эта неудача привела Bernardini к банкротству в 1995 году.

В 1978 году, когда министерство обороны выдало компании Bernardini техзадание на создание лёгкого танка, это же техзадание попало к руководству компании Engesa. И пока Bernardini работала над своим вариантом модернизированного M41, бразильская компания Engesa, нарушив взятые обязательства заниматься только колёсной бронированной техникой, решила создать собственный танк. Видимо, они надеялись на своих инженеров, создавших плавающий БТР EE-11 Urutu, бронированную разведывательную машину EE-9 Cascavel, истребитель танков EE-17 и EE-18, бронеавтомобиль EE-3 Jararaca Scout и др. Причём настолько успешно, что некоторые из этих машин стоят на вооружении не только бразильской армии, но и армий других стран.



Истребитель танков EE-18 на испытаниях



На кону стояли возможные доходы от производства 300 новых танков - на такое число рассчитывало министерство обороны получить денег из казны. Военным требовался танк с характеристиками, соответствующими существующим зарубежным основным танкам. К этим требованиям добавилось ещё одно: танк надо перевозить по железной дороге, а в стране в основном узкая с шириной колеи 1000 мм. Из-за этого было ограничение по ширине танка и, как следствие, по максимальной боевой массе, которая не должна превышать 43 тонны.

Ознакомившись с ТЗ, конструкторы компании Engesa начали с того, что внимательно изучили передовой зарубежный опыт создания бронетехники и возможности промышленности своей собственной страны и пришли к выводу о необходимости как закупок зарубежных комплектующих, так и их лицензионного производства. Дополнительно перед ними была поставлена задача создания двух вариантов танки на одном и том же шасси с максимальной их унификацией, но с разным оборудованием. И, самое главное, они должны иметь разные комплексы основного вооружения. Для собственной армии проектировался танк с английской 105-мм нарезной пушкой L7A3, которая должна иметь стабилизацию в двух плоскостях и возможность использования боезапаса из 45 бронебойных и осколочно-фугасных снарядов, размещаемых в боевом отделении. Автоматическая подача боеприпасов не предусматривалась, поэтому экипаж состоял из четырёх человек.

Дополнительное вооружение должно состоять из двух 7,62-мм пулемётов: один устанавливался слева от ствола пушки, а второй - на крыше башни. На оба пулемёта предусматривалось 5000 патронов.

А вот для экспортного варианта танка башню надо было слегка видоизменить для установки 120-мм пушки L/44 Rheinmetall. Помощником в проектировании обеих конструкций башен стала британская компания Vickers. В ходе проектирования выяснилось, что приобрести немецкую 120-мм пушку для испытаний не получится из-за запрета немецкого правительства на продажу оружия. Попытка применить британскую 120-мм нарезную пушку L11A провалилась, т.к. в ходе испытаний выяснилось, что она имеет большую силу отдачи, слишком большую для 42-тонного танка. Поэтому в окончательном варианте остановились на французской гладкоствольной 120-мм пушке GIAT G1.



Испытания пушки танка EE-T2

Несмотря на разные пушки и некоторое отличие башен в обоих проектах предполагалось использовать одно и то же шасси, которое, в зависимости от типа башни и её вооружения, претерпевало некоторые изменения, но сохранялась максимальная унификация для снижения затрат при производстве.

В компании проект танка, предназначенного для перевооружения бразильской армии, получил название EE-T1, а тот, который проектировался для иностранных покупателей, назвали EE-T2. И тот, и другой назвали ещё в честь генерала Мануэля Луиса Озорио (героя войны в Уругвае) - Osorio.

Бронирование танка было достаточно сложным: оно сочетало слои стали, алюминия, углеродного волокна и керамики - некое подобие английской брони "чобхэм". Надо отметить, что эта броня была самостоятельно разработана компанией Engesa. К

тому же верхний лобовой лист располагался под большим углом, поэтому танк мог выдержать попадание любых снарядов, существовавших на тот момент.

Вертикальные борта изготавливались из гомогенной брони. Ходовая часть от бокового обстрела дополнительно прикрывалась металлическими экранами. Компоновка корпуса классическая: в переднем отделении располагалось рабочее место механика-водителя и стеллаж для боеприпасов. Центральная часть была отведена под боевое отделение, кормовая - под силовой агрегат. Длина танка EE-T1 по корпусу составляла 7,13 м, ширина - 3,26 м, высота (по крыше башни) - 2,37 м. Боевая масса была определена на уровне 41 т.

Боезапас для 105-мм пушки составлял 45 снарядов, а для 120-мм пушки - 40 снарядов. Вспомогательное вооружение состояло из спаренного 7,62-мм пулемета (боезапас 3000 патронов) и зенитного 12,7-мм пулемёта (900 патронов). Для 120-мм гладкоствольной пушки имелись два типа боеприпасов: бронебойный оперенный подкалиберный с отделяющимся поддоном и многоцелевой (кумулятивного и осколочно-фугасного действия). 12 выстрелов размещалось в кормовой части башни, а 26 - в передней части корпуса. Начальная скорость бронебойного снаряда массой 6,2 кг составляла 1650 м/с, а многоцелевого (массой 13,9 кг) - 1100 м/с. Эти боеприпасы производились в Бразилии компанией Engesa по французской лицензии.

Полностью компьютеризованную систему управления огнём заказали бельгийской компании Cockerill. СУО танка EE-T1 включала перископический прицел наводчика с оптическим и тепловизионным каналами, а также лазерный дальномер. При выходе из строя основного канала в качестве запасного средства наведения использовался телескопический прицел. На командирской башенке размещалась такая же прицельная головка, как и у наводчика, но без лазерного дальномера. Командирский прицел мог осуществлять автоматическое наведение орудия в сторону обнаруженной цели. В СУО также использовался пассивный тепловизор для ведения огня ночью. В целом СУО разрабатываемого танка обеспечивала высокую вероятность попадания с первого выстрела.

В качестве силовой установки предполагалось использовать двигатель компании MTU, аналогичный применённому на Leopard 1 и 2. Но выбор остановился на 1000-сильном дизельном двигателе с турбонаддувом MWM TBD 234 немецкой фирмы Deutz. Он в ходе испытаний пробегом более 3000 км по Саудовской Аравии подтвердил свою эффективность и надёжность. Да и в обслуживании он не предъявлял особых требований. С двигателем соединена автоматическая коробка передач ZF LSG300 производства Германии. Двигатель и трансмиссия размещались в едином силовом агрегате, что позволяло заменить его при выходе из строя за 30 минут.



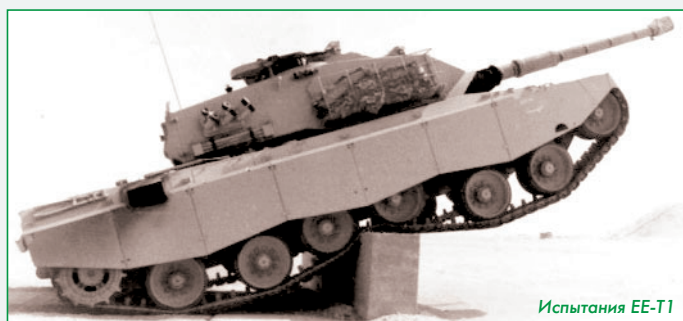
Кормовая часть танка EE-T1

Для разработки подвески была привлечена британская компания Dunlop, которой было поручено создать гидропневматические узлы, аналогичные тем, что использовались на основных танках семейства Challenger. С каждой стороны танка Osorio бы-

ло по шесть опорных катков с индивидуальной подвеской, ведущие колеса располагались в кормовой части корпуса, а направляющие - в передней. Из-за того, что использовались опорные катки малого диаметра, установили поддерживающие катки. Для упрощения проекта было решено использовать готовые гусеницы. Конструкция гусениц была позаимствована у немецкого танка Leopard 2.

Башня была сконструирована по тому же принципу, что и корпус. Она имела лобовую часть клиновидного профиля с "утропленным" размещением широкой орудийной маски. Боковые части башни были вертикальными, за ними располагалась развитая кормовая ниша. На крыше башни кроме люков размещались оптические приборы, датчики СУО и пулемёт. В ней размещались командир, наводчик и заряжающий.

Постройка первого прототипа танка EE-T1 Osorio была завершена в 1985 году, после чего начались его испытания, подтвердившие заявленные характеристики.

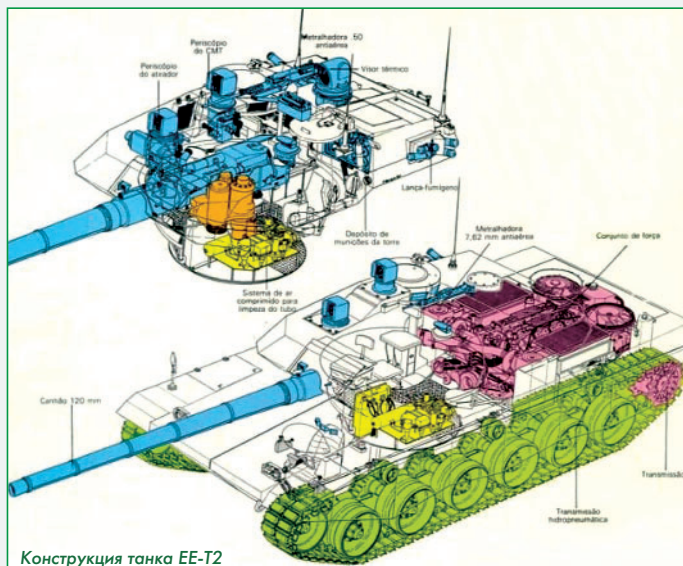


Испытания EE-T1

На следующий год на испытания отправилась вторая машина. Испытания подтвердили соответствие техническому заданию и появился шанс на серийное производство, к тому же в армии появилось желание закупить не 300, а 500 машин.

Почувствовав интерес армии к новому танку Ozorio, в компании Engesa приступили к проектированию на базе EE-T1 самоходной артиллерийской установки GHN-155 (калибр 155 мм), самоходной зенитной установки, ремонтно-эвакуационной машины и танкового мостоукладчика. Кроме того, рассматривалась возможность создания версии танка с советской 125-мм гладкоствольной пушкой 2А46. Однако ни одна из машин на базе танков Osorio на испытания так и не вышла.

Да и с EE-T1 не всё хорошо получилось. В стране в середине восьмидесятых экономическое положение ухудшилось, и все амбициозные проекты государства сворачивались. Бразильским военным урезали финансирование, и они были вынуждены закупить более дешёвую, хотя и бывшую в употреблении технику: американские M60 и немецкие Leopard 1. Правда, импортные танки были поставлены в Бразилию только в середине девяностых.



Конструкция танка EE-T2

Таким образом, компания Engesa, которая уже вложила в проект значительные средства (из затраченных на разработку \$100 млн государство компенсировало компании лишь минимальную сумму), решила поправить своё материальное положение переориентацией на зарубежных покупателей. Поэтому всё было брошено на дальнейшее совершенствование экспортного варианта - EE-T2 Ozorio - и продвижении этой модификации.

В EE-T2 была изменена система управления огнём: прицелы для командира и для наводчика поставила французская компания SFIM. В обоих прицелах имелись оптический и тепловизионный каналы, лазерные дальномеры и собственные баллистические компьютеры. Кроме того, была установлена система обнаружения облучения танка лазерным лучом, что повысило живучесть на поле боя.

В итоге боевая масса танка возросла до 43 тонн, но боевые характеристики EE-T2 Ozorio были значительно улучшены.

Как раз в это время армия Саудовской Аравии искала новый танк для оснащения своих войск. Был организован тендер, по результатам которого планировалось закупить 340 новых танков. Вместе с EE-T2 в конкурсе участвовали американский танк M1A1 Abrams, британский Challenger I и французский AMX-40.

Саудовцам EE-T2 Ozorio понравился, в ходе проведенных испытаний в 1987 - 1989 гг. он победил своих конкурентов.



Испытания EE-T2

В 1989 году заказчик подписал договор о намерении приобрести более 300 танков за \$7,2 млрд (танку даже дали новое название "Аль-Фахд" - лев пустыни). Однако впоследствии, изучая контракт на покупку, саудовцы поняли, что двигатель, трансмиссия, бортовое оборудование, пушка - импортные, и должны заказываться в странах Европы. Из-за чего, кстати, и сама Engesa не могла точно определить стоимость танка. Да и конкуренты, расстроенные своим поражением, могли саботировать поставки и обрушить ценовую политику Engesa, подняв стоимость комплектующих. На это Эр-Рияду намекнули, и сделка была аннулирована.

Чуть позже Иран по дешёвке купил некоторые технологии Osorio, используя их, наряду с пиратскими копиями американских и российских узлов и агрегатов, для производства своего танка "Зульфикар".

Закрытие проектов MB-3 Tamoyo и EE-T1/T2 Osorio и банкротство компаний Bernardini и Engesa положили конец недолгой истории собственного танкостроения в Бразилии.



Leopard 1A1 (слева) обогнал EE-T2 Ozorio на финише

(Продолжение следует.)



# Особо прочная керамика Sodick:

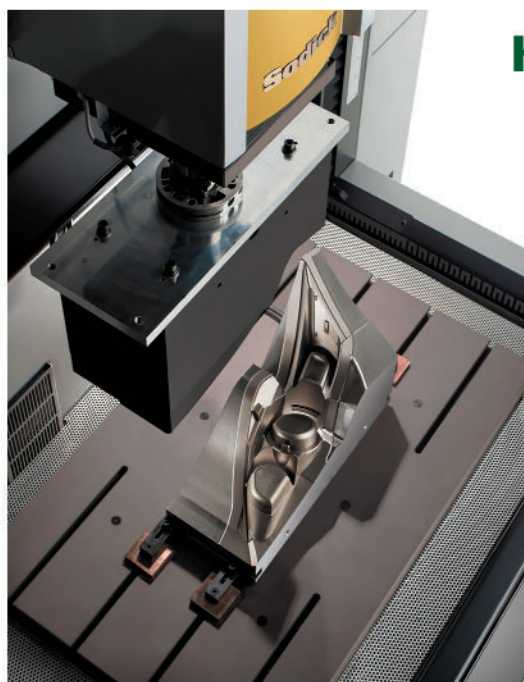
**сверхмалое тепловое расширение** - в 3-4 меньше, чем у стали

**идеальные электроизоляторы** -  $> 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

**малый удельный вес** - в 2,5 раза легче стали

**высочайшая химическая и коррозионная стойкость**

	Керамика SA610 (основа - $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	ГРАНИТ	Чугун-механит FC25	Сталь нержавеющая
Коеф. теплового расширения ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	<b>4,5</b>	8	11	15 ~ 18
Прочность на изгиб ( $\text{кг}/\text{см}^2$ )	3000	300 - 500	4000	зависит от марки
Модуль Юнга ( $\times 10^6 \text{ кгс}/\text{см}^2$ )	2,7	0,3 ~ 0,9	1,1	2,0 ~ 2,2
Твердость по Виккерсу (500 г)	1300	590 ~ 1000	620	---
Удельный вес ( $\text{г}/\text{см}^3$ )	3,5	3,0	7,8	7,7 ~ 7,9
Удельное электрич. сопротивление	<b><math>&gt; 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}</math></b>	---	проводник	проводник



## Керамика не роскошь, а гарантия точности ЭИ обработки!

Из керамики SN610 изготавливаются несущие части, от которых зависит геометрическая точность электро-искровой рабочей зоны:

плита стола, опоры стола, верхний и нижний кронштейны (*вырезные станки*);

плита стола и надэлектродная плита, каретка оси Z (*прошивные станки*);

Из керамики из оксида циркония:

неизнашиваемые части механизма подачи проволоки (*вырезные станки*)

*Деталь на керамической плите стола AG60L.  
Выше - керамическая надэлектродная плита.*



керамический  
верхний  
кронштейн  
ALC800GH

### Из каких материалов строится рабочая зона обычных ЭИ станков не-Содик?

Сталь, материал жесткий и прочный, но с большим коэффициентом теплового расширения и малой коррозионной и химической стойкостью, к тому же электропроводник — вот 4 изъяна, делающих сталь в чистом виде непригодной для рабочей зоны ЭИ станков.

Электроизолирующий пластик — материал недостаточно жесткий. Из пластика нельзя сделать опоры и кронштейны ЭИ вырезного станка. Пластик используется лишь как изолятор, чтобы изолировать стальные опоры и кронштейны.

Конструкции ЭИ станков не-Содик — это "бутерброды" из негодных для ЭИ рабочей зоны материалов!

*Наихудшее, но недорогое инженерное решение,  
которое вынужденно приспособлено  
и подложено под законы физики!*

При одном и том же нагреве керамические несущие конструкции в ЭИ рабочей зоне станков Sodick "гуляют" в 3-4 раза меньше, чем стальные конструкции с пластиковыми изоляторами в обычных ЭИ станках. Соответственно, в 3-4 раза меньше теряется геометрия относительного положения электрода и детали.

Какой бы точной ни была конструкция самого ЭИ станка, если части электроискровой рабочей зоны "гуляют" от нагрева, точную обработку — точность на детали — получить крайне затруднительно.

Известно, что несущие части (столы, колонны) лучших измерительных машин делают из гранита. Однако у гранита тепловое расширение в 2 раза больше, чем у керамики "Содик". Следовательно покупатели "Содик" получают станки с качеством рабочей зоны выше, чем у лучших измерительных машин.

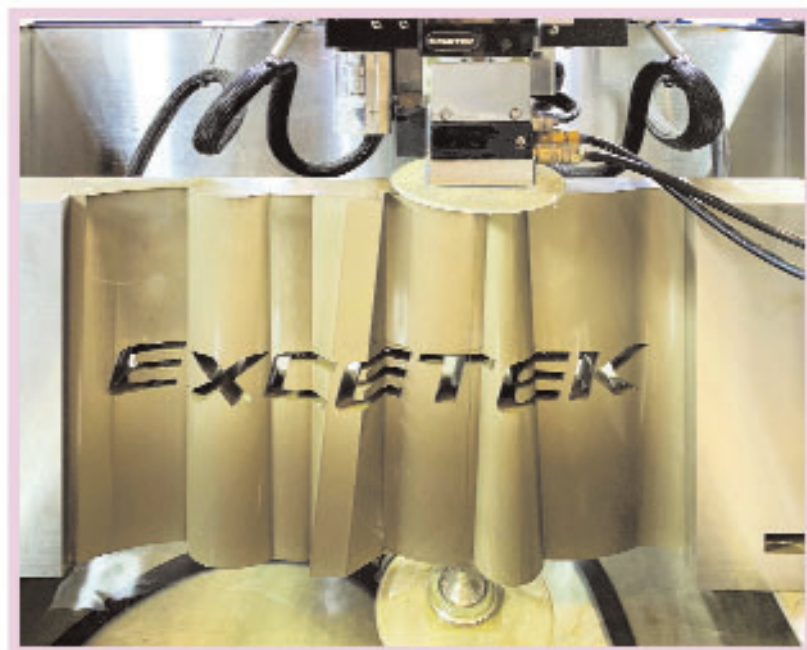
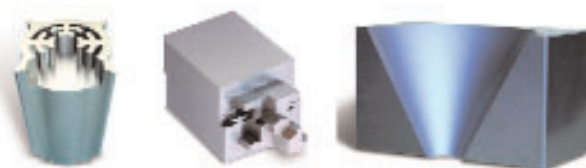
Подробнее см. на нашем сайте:  
<https://sodick.sodicom.biz/ru/ceramic-work-zone/>



# ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ (электроэрозионные) СТАНКИ

+ проволочно-вырезные  
+ прошивные  
+ супердрели

 **EXCETEK**

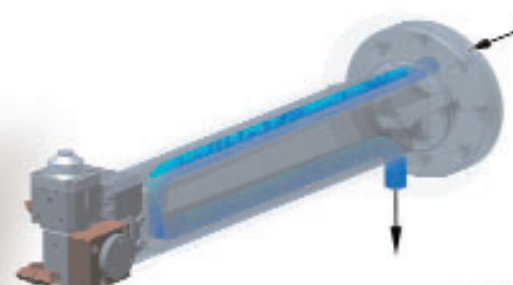


**ПЕРЕДОВЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
ЭЛЕКТРОЭРОЗИИ ОТ  
ВЕДУЩЕГО ТАЙВАНЬСКОГО  
СТАНКОСТРОИТЕЛЯ  
МИРОВОГО УРОВНЯ**

**ЭКСПОРТ В  
ДЕСЯТКИ СТРАН,  
ВКЛЮЧАЯ ЯПОНИЮ,  
США И ЗАПАДНУЮ  
ЕВРОПУ**



**ВО ВСЕХ ВЫРЕЗНЫХ СТАНКАХ:**  
термостатирование нижнего  
кронштейна водой из гидроагрегата  
предотвращает тепловое расширение  
и повышает конечную точность.





# ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНДОСКОПИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ



ВНЕСЕН В ГОСРЕЕСТР СИ № 89037-23

