

# Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание  
МОО "Стратегия объединения"  
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,  
разработка и эксплуатация.

Электрон. журн. 2023. № 3. С. 1 – 15.

DOI:

Представлена в редакцию: 17.06.2023

Принята к публикации: 17.08.2023

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 629. 33

## Разработка ROPS из алюминиевых сплавов для фронтальных погрузчиков

Левенков Я.Ю., Вдовин Д.С.,  
Александров Д.А.\*

\* [aleksandrovdimas10@gmail.com](mailto:aleksandrovdimas10@gmail.com)

МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

**Актуальность.** В настоящее время для фронтальных погрузчиков широкое распространение получили кабины с интегрированными устройствами защиты при опрокидывании (roll over protective structure; ROPS) и защиты от падающих предметов (falling-object protective structure; FOPS). Если на конструкцию FOPS не влияют массовые параметры машины, то ROPS существенно от них зависит. Для погрузчика с ROPS сложной и дорогостоящей частью является кабина. Одним из путей снижения стоимости её производства является унификация узлов для типоразмерного ряда погрузчиков. Но тогда проектирование ROPS должно быть выполнено для модели погрузчика с наибольшей массой. Однако такой подход приводит к увеличению металлоемкости и стоимости погрузчиков, имеющих меньшую грузоподъемность. В итоге снижается энергоэффективность машины.

Перспективным направлением повышения энергоэффективности является снижение массы кабин за счет применения алюминиевых сплавов, т.к. они обладают высокой удельной прочностью по отношению к стали. Объектами исследования являются колесные фронтальные погрузчики полной массой 10, 15 и 30 тонн. Предметом исследования является применение расчетных методов, основанных на методе конечных элементов при проектировании кабин из алюминиевых сплавов.

**Цель исследования** – разработать методику проектирования каркаса кабины из алюминиевого сплава, которая позволит получить кабину меньшей массы и повышенной технологичности по сравнению с аналогами.

**Методология и методы.** В статье представлены разработанные конечно-элементные модели конструктивно-подобных образцов кабины в статической постановке с учетом геометрической и физической нелинейностей.

**Результаты и научная новизна.** В работе представлена методика выбора основных конструктивных параметров кабины из алюминиевого сплава.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при создании кабин фронтальных погрузчиков.

**Ключевые слова:** Расчет на прочность, ROPS, фронтальный погрузчик, метод конечных элементов, нагрузки, кабина, сварное соединение, алюминиевый сплав.

## Введение

Кабины современных колесных фронтальных погрузчиков имеют встроенные ROPS и FOPS. Кабина является одним из самых сложных и дорогостоящих изделий фронтального погрузчика. Помимо размещения в кабине большого количества оборудования, которое должно быть прокомпоновано таким образом, чтобы обеспечить требования эргономики, обзорности и безопасности. Сам же каркас кабины является элементом пассивной безопасности, обеспечивающий защиту оператора при опрокидывании машины.

Требования к пассивной безопасности кабин установлены ГОСТ ISO 3471-2015 [1].

Каркас кабины изготавливают из стальных профилей, характеристики материала которых удовлетворяют требованиям стандарта. Дополнительно для размещения уплотнителей дверей, размещения стекол необходимо создать буртики, которые обычно выполняют путем приваривания дополнительных профилей. Изготовление кабины из стандартных профилей каркаса имеет следующие недостатки:

- увеличение массы кабины;
- увеличение сборочных операций, усложнение технологии изготовления кабины;
- большое количество сварных швов.

Для предприятия, производящего несколько типоразмеров фронтальных погрузчиков различной грузоподъемности, целесообразно разработать унифицированную конструкцию кабины, что позволит снизить себестоимость машины. Но использование унифицированной кабины приведет к увеличению массы погрузчиков меньшей грузоподъемности, т.к. кабина будет спроектирована, исходя из массовых характеристик машины максимальной грузоподъемности, что приведет к снижению энергоэффективности.

С целью снижения массы кабин используют специальные «кабинные» профили. Преимущества специальных «кабинных» профилей:

- снижение количества сборочных единиц каркаса кабины;
- удобные пазы для размещения уплотнителя и кромки двери, стекла;
- высокая прочность, пластичность и ударная вязкость на морозе;

В целом, использование стальных профилей имеет следующие недостатки:

- большая масса каркаса кабины. Около 50% массы кабины составляет силовой каркас;
- даже при использовании кабинных профилей каркас кабины имеет большое количество сварных швов, имеющими сложную траекторию, поэтому к технологии сварки предъявляют строгие требования по механическим свойствам, в т.ч. морозостойкость;

- использование высокопрочных сталей с высокими механическими свойствами и хорошей свариваемостью приводит к значительному удорожанию каркаса кабины;

- ограниченное предложение по изготовлению профилей с необходимой формой поперечного сечения (в РФ отсутствует специальное гибочное прокатное оборудование для изготовления таких профилей);

- невозможно или сложно придать профильной трубе необходимую форму, поэтому гнутые трубы необходимо заказывать у изготовителя (например, дугообразный профиль в районе лобового стекла);

- при использовании стандартного профиля с наваренными буртиками для размещения уплотнителя двери, стекол существенно возрастает масса каркаса (в среднем на 20%), а также добавляется количество сварных швов, что нетехнологично и ухудшает внешний вид кабины, который является критичным агрегатом по дизайну.

В качестве перспективного направления в кабиностроении можно рассмотреть применение алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы имеют следующие преимущества: высокая удельная прочность; коррозионная стойкость; сохранение показателей ударной

вязкости при низких температурах. Так же преимуществом алюминиевых сплавов является возможность изготовления профилей при помощи экструзии, что позволяет изготавливать поперечные сечения довольно сложной формы при относительно простой технологии. Основным недостатком алюминиевых сплавов является трудная их свариваемость и низкая пластичность сварного шва [2-4].

В настоящее время, ведется активная работа по улучшению механических свойств алюминиевых сплавов и совершенствованию технологий изготовления из них изделий, что расширяет возможности их применения в машиностроении, в том числе, и для производства каркасов кабин дорожно-строительной техники.

Современные методы расчета, основанные на методе конечных элементов, позволяют подробно исследовать поведение конструкции под нагрузками с учетом геометрической и физической нелинейности на ранних стадиях проектирования изделия.

Целью данной работы является разработка методики проектирования каркаса кабины из алюминиевого сплава, которая позволит получить кабину меньшей массы и повышенной технологичности по сравнению с аналогами.

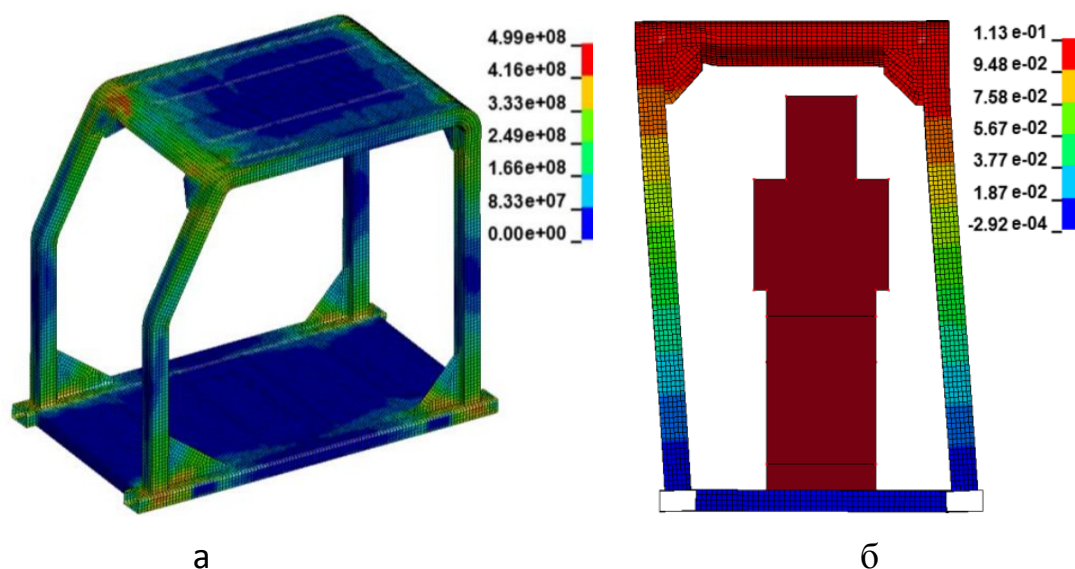
### **Общее описание конструкции каркаса кабины из алюминиевого сплава**

В процессе нагружения кабины нагрузками ROPS максимальные пластические деформации возникают в местах стыковки труб в зонах сварных швов [5, 6]. На рис. 1 показан пример бокового нагружения. Прочностные расчеты (рис. 2а и 2б) показывают, что максимальные напряжения возникают в местах стыковки труб, следовательно, работоспособность конструкции определяется работоспособностью сварных соединений.

Данное явление усложняет использование алюминиевых сплавов.



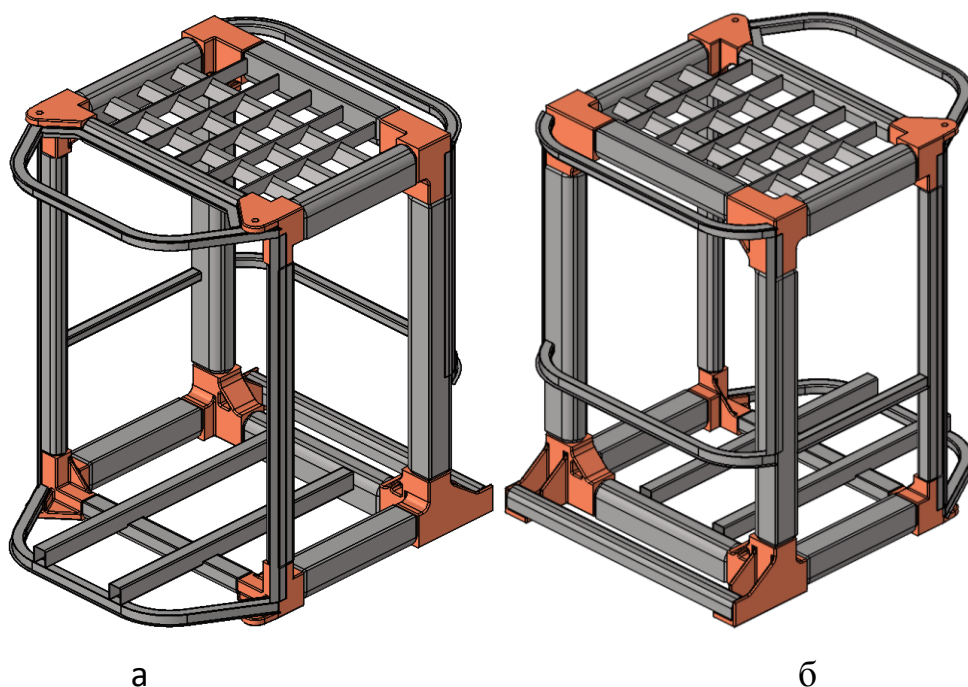
**Рис. 1.** Пример нагружения ROPS каркаса кабины боковой нагрузкой



**Рис. 2.** Пример НДС (напряженно-деформированного состояния) кабины (пластические деформации): а – изометрия; б – вид спереди

Использование алюминиевых сплавов в конструкции каркаса позволяет снизить его массу (ориентировочно на 30%) по сравнению со стальными аналогами.

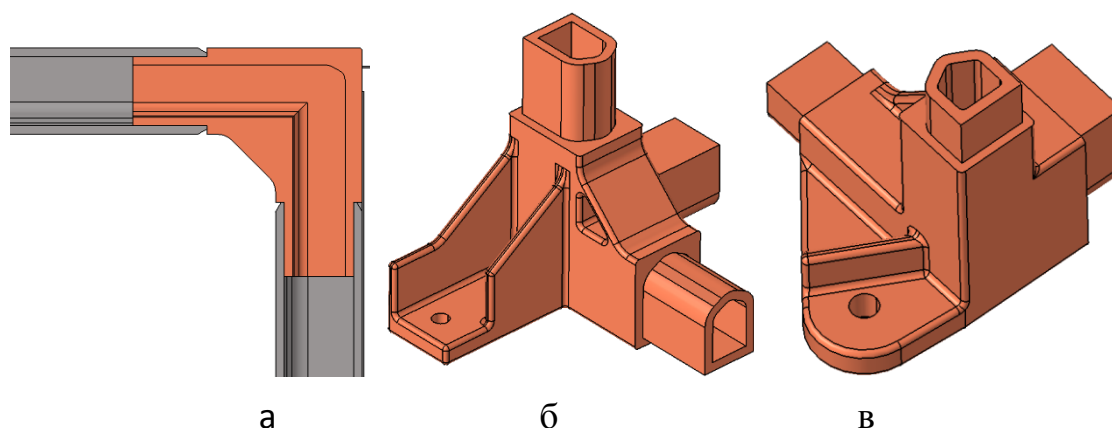
Каркас кабины из алюминиевого сплава показан на рис. 3а и 3б. Каркас представляет собой сварную конструкцию.



**Рис. 3.** Каркас кабины из алюминиевого сплава: а – вид спереди; б – вид сзади

В разработанной конструкции кабины предложено использовать кронштейны (рис. 4а, 4б и 4в), которые соединяют между собой трубы. При этом сварные швы удалены на некоторое расстояние от угла кронштейна. Основными элементами, обеспечивающими выполнение требований пассивной безопасности, являются алюминиевые профильные трубы. При этом сварной шов, соединяющий кронштейн и трубу имеет достаточно простую траекторию, что повышает технологичность. Для снижения нагруженности сварного

соединения, на концах кронштейнов выполнены пазы, обеспечивающие сборку по технологии «шип-паз», что позволяет уменьшить количество оснастки, необходимой при сборке кабины. Угловые кронштейны должны быть выполнены достаточно прочными, что позволяет изготовить их с помощью 3D печати [7] и не допустить в них больших пластических деформаций. Это позволяет обеспечить высокую надежность кронштейнов по условию прочности.



**Рис. 4.** Кронштейны каркаса кабины: а – в разрезе; б – вид спереди; в – вид сзади

Предложенная конструкция кабин из алюминиевого сплава обеспечивает следующие преимущества:

- существенно меньшая масса по сравнению со стальными аналогами;
- существенно меньшая трудоемкость изготовления;
- меньшее количество сварных швов, несущие сварные швы имеют относительно простую траекторию;
- коррозионная стойкость каркаса, не обязательно красить;
- вязкостные свойства алюминиевых сплавов не снижаются при отрицательных температурах окружающей среды.

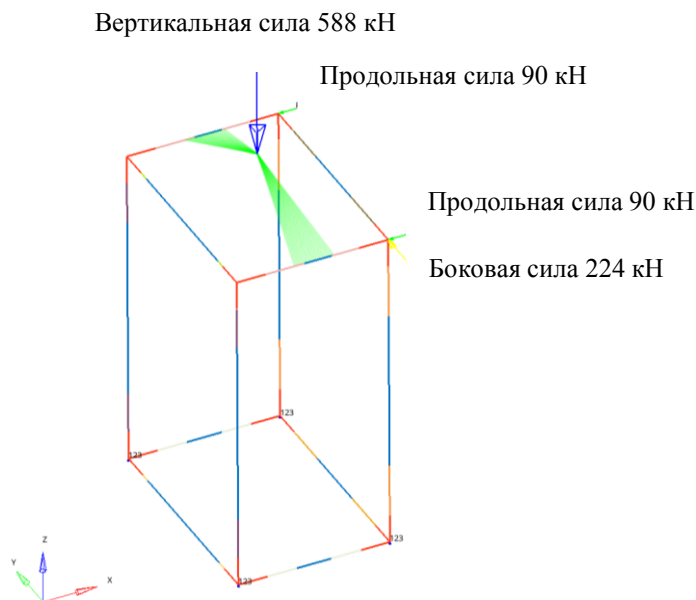
### **Методика выбора основных параметров каркаса**

Основные параметры каркаса определяются в следующей последовательности:

- 1) определение компоновочного пространства кабины, расположение стоек каркаса в соответствии с требованиями по обзорности [8], эргономике и дизайну, а также с учетом размещения агрегатов в кабине;
- 2) определение предварительного размера сечений профилей силового каркаса;
- 3) проведение поверочного расчета с выбранными параметрами сечений;
- 4) определение параметров сварного соединения кронштейна и профиля на конструктивно-подобном образце, определение параметров шипа и сварного шва;
- 5) поверочный расчет каркаса кабины с учетом соединений шип-паз.

Основные компоновочные параметры кабины приведены на рис. 3. Далее необходимо подобрать предварительные параметры сечений балок. Балочная модель показана на рис. 5. Боковая сила в расчетной модели приложена к кронштейну силового каркаса, который находится напротив головы оператора, т.к. в данной точке измеряются максимальные перемещения. Для определения параметров сечений проведена параметрическая оптимизация. Целевая функция: минимум объема материала; ограничения: максимальное перемещение при боковом нагружении 220 мм (в точке приложения нагрузки), максимальное напряжение 540 МПа для всех расчетных случаев для элементов, находящихся на удалении

углов каркаса (на рисунке показаны синим цветом), что соответствует энергии деформации 49000 Дж. Данные ограничения выбраны исходя из условия сохранения необходимого жизненного пространства внутри кабины и механических свойств алюминиевых сплавов. Варьируемые параметры – длина, ширина и толщина стенок сечения профиля. При расчете использовалась линейная модель материала. Свойства материалов приведены в табл. 1. Алюминий АЛ8 используется в кронштейнах, находящихся в угловых частях каркаса, а алюминий АМг5 в профилях, соединяющих кронштейны.



**Рис. 5.** Балочная КЭМ (конечно-элементная модель) каркаса кабины для предварительных расчетов

**Таблица 1.** Свойства материала

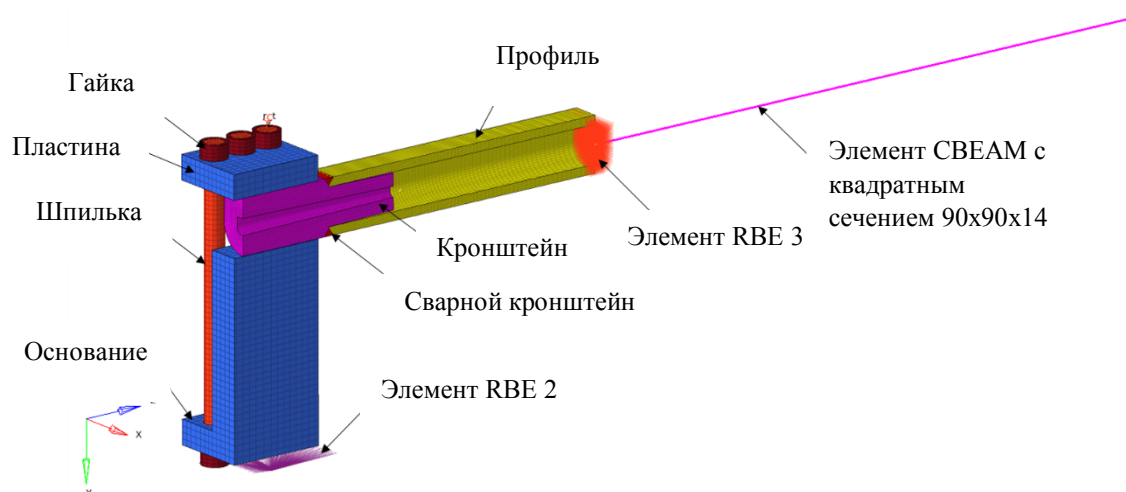
| Материал | Модуль упругости, E, МПа | Коэфф. Пуассона | Предел текучести, МПа | Предел прочности, МПа | Удлинение при разрыве, d5, % |
|----------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| АЛ8      | 70000                    | 0,33            | 170                   | 320                   | 11                           |
| АМг5     | 70000                    | 0,33            | 180                   | 290                   | 15                           |

Следующим шагом является проверочный расчет с учетом пластичности материалов для упрощенной оболочечной модели. По результатам расчета проводится уточнение параметров несущих элементов кабины по требованиям ROPS.

Для уточнения параметров сечения и кронштейнов предложено использовать конструктивно-подобные образцы (КПО). Пример КПО представлен на рис. 6. Требования к разработке конструктивно-подобного образца:

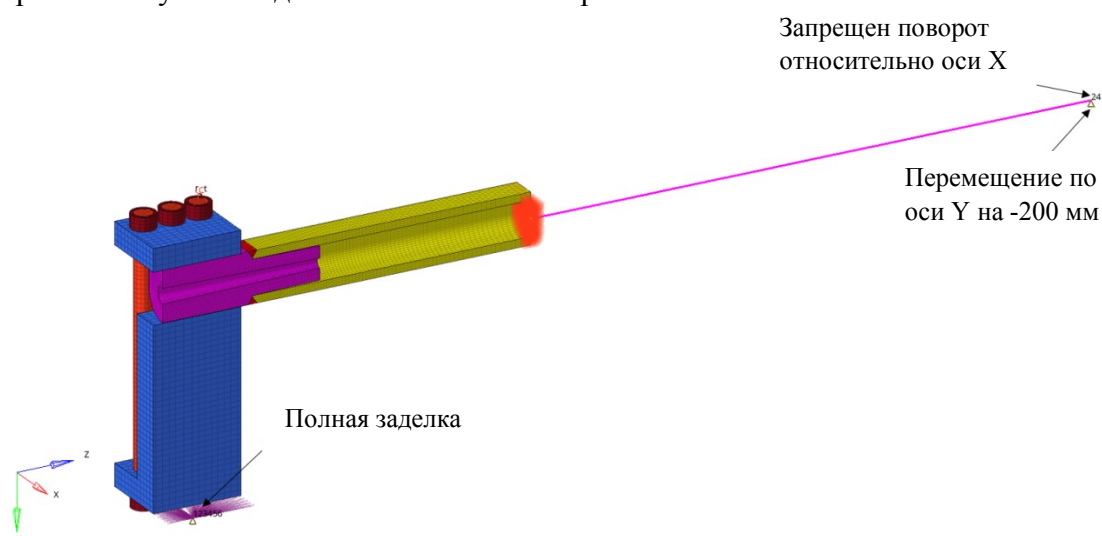
- схожие геометрические параметры (размеры и форма поперечного сечения, длина) с реальными элементами проектируемого каркаса кабины;
- технология изготовления и сборки КПО и элементов реального объекта;
- нагружение КПО, которое близко к условиям работы реальных несущих элементов каркаса кабины.

Конструктивно-подобный образец позволяет определить параметры кронштейна (такие как длина шипа), провести сравнительный анализ сварного соединения, сечений и т.д. Так же целесообразно провести экспериментальные исследования с использованием КПО для подтверждения работоспособности выбранных конструктивных решений.



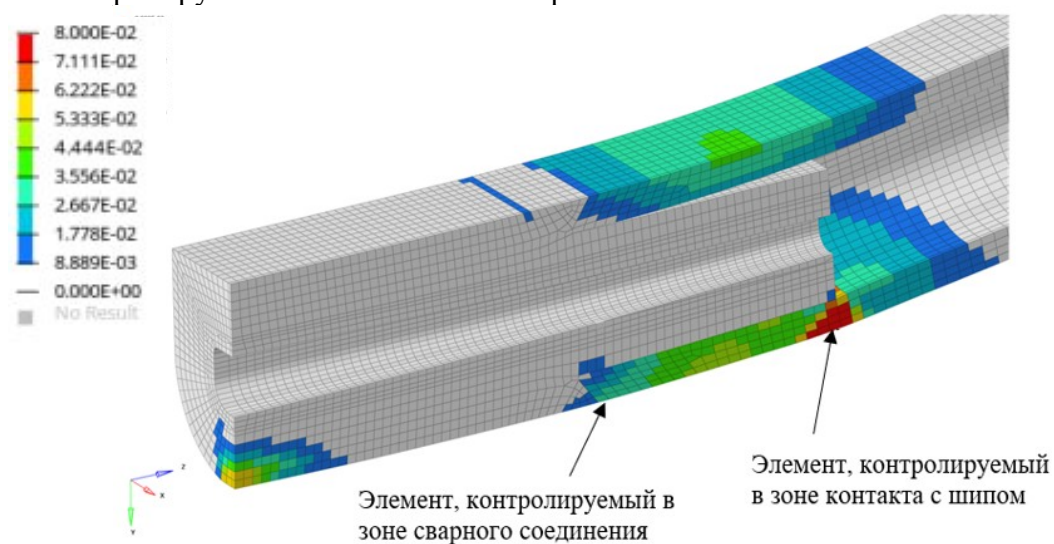
**Рис. 6.** Конструктивно-подобный образец

Граничные условия для КПО показаны на рис. 7.



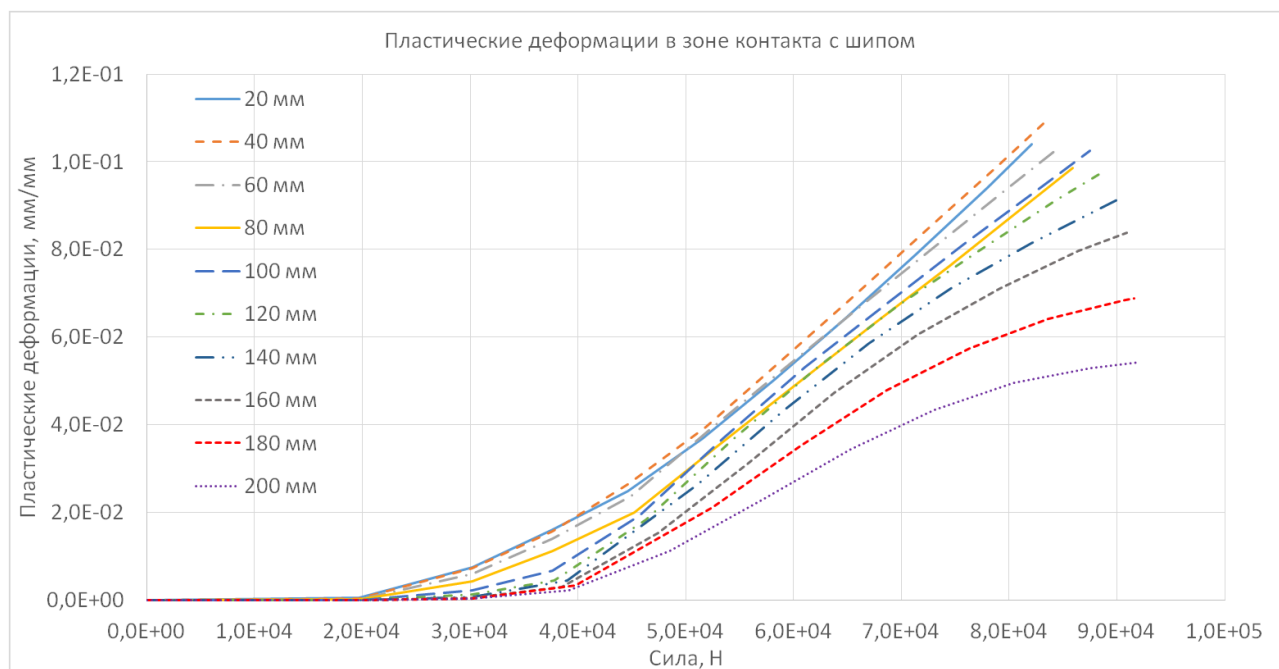
**Рис. 7.** Граничные условия

В результате исследования КПО с различными длинами шипа, который предназначен для разгрузки сварных швов получены следующие результаты, которые показаны в виде графиков. Контролируемые точки показаны на рис. 8.

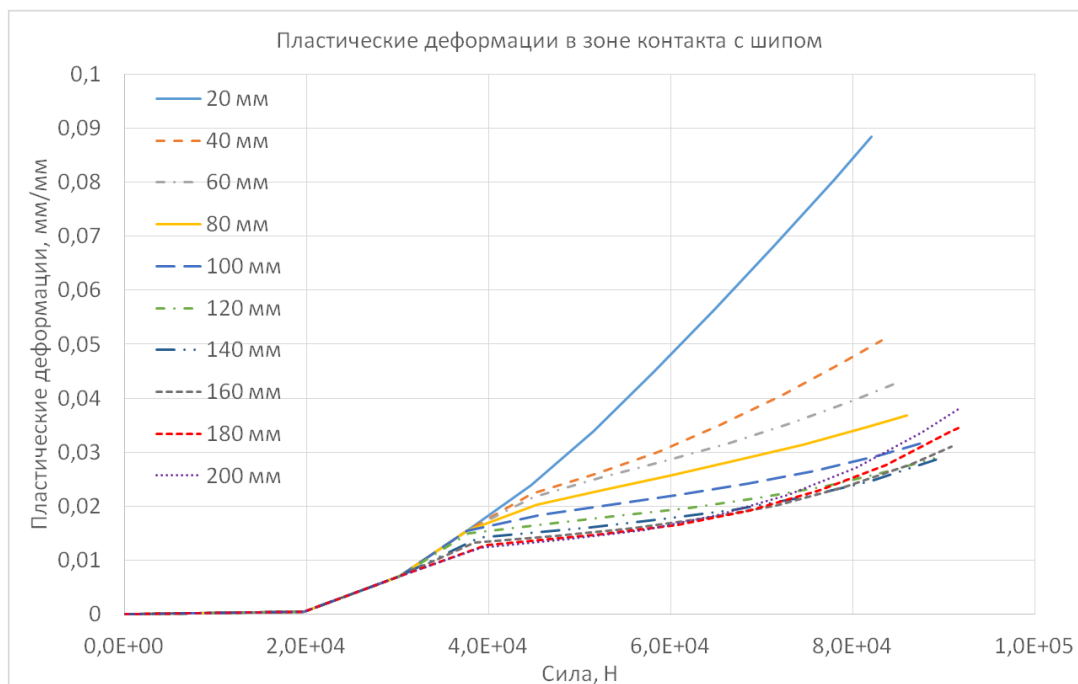


**Рис. 8.** Пример результатов расчета

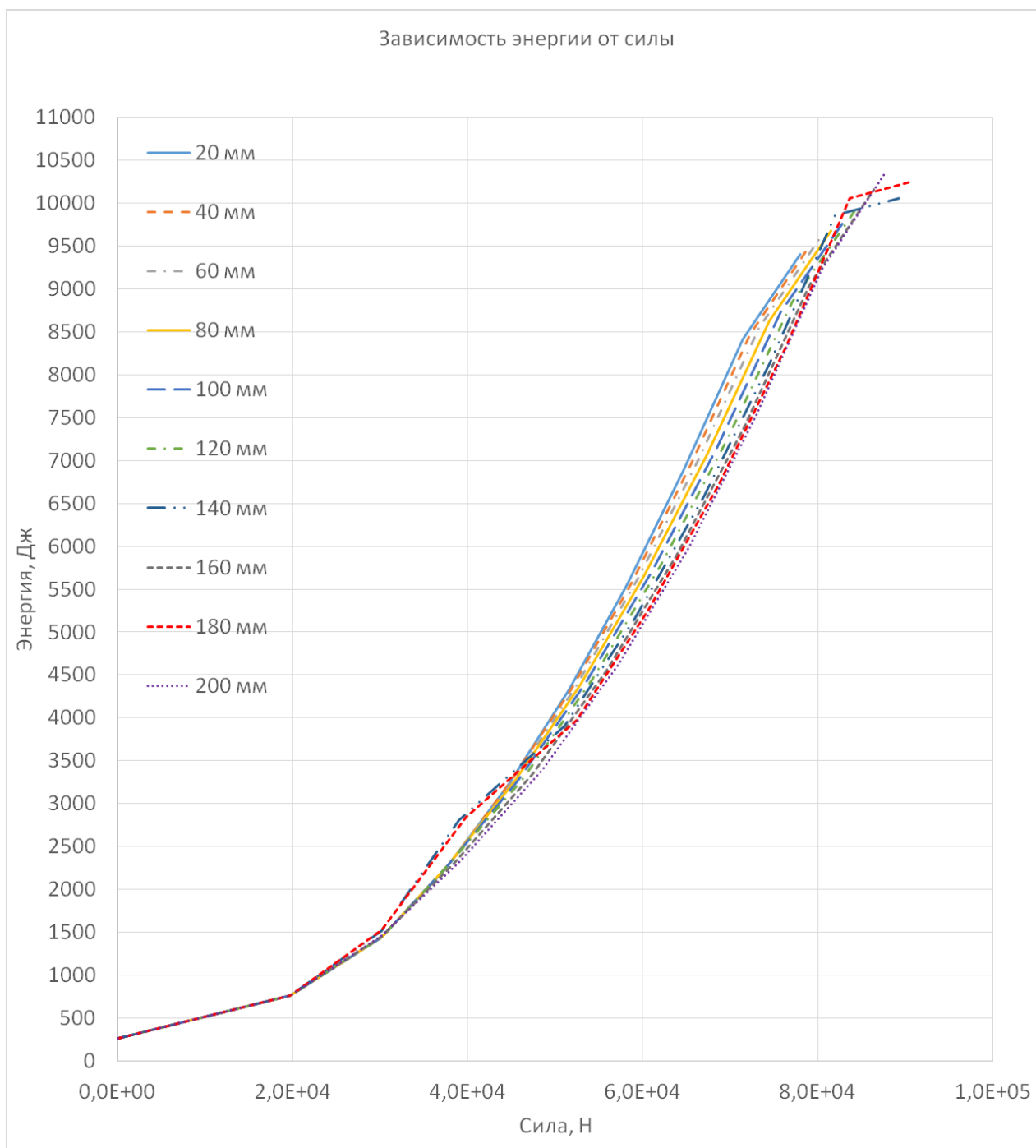
В результате расчета были получены зависимости пластических деформаций в зоне контакта шипа и основного материала (рис. 9), сварного соединения (рис. 10) и потенциальной энергии деформации образца (рис. 11).



**Рис. 9.** Пластические деформации в зоне контакта с шипом



**Рис. 10.** Пластические деформации в зоне сварного соединения



**Рис. 11.** Потенциальная энергия деформации

Основные требования к прочностным характеристикам КПО:

Максимальные пластические деформации основного металла не должны превышать предел текучести.

Минимальные пластические деформации в зоне сварного шва.

По возможности, минимум материала емкости изделия.

Наиболее опасным местом является сварное соединение, поэтому рациональная длина шипа, в первую очередь определяется допускаемыми пластическими деформациями в зоне сварки.

В результате анализа графиков, показанных на рис. 12, рациональной длиной шипа была выбрана длина 120мм (по пластическим деформациям в зоне сварки (рис. 12б), массе (рис. 12в) и энергии (рис. 12а)).

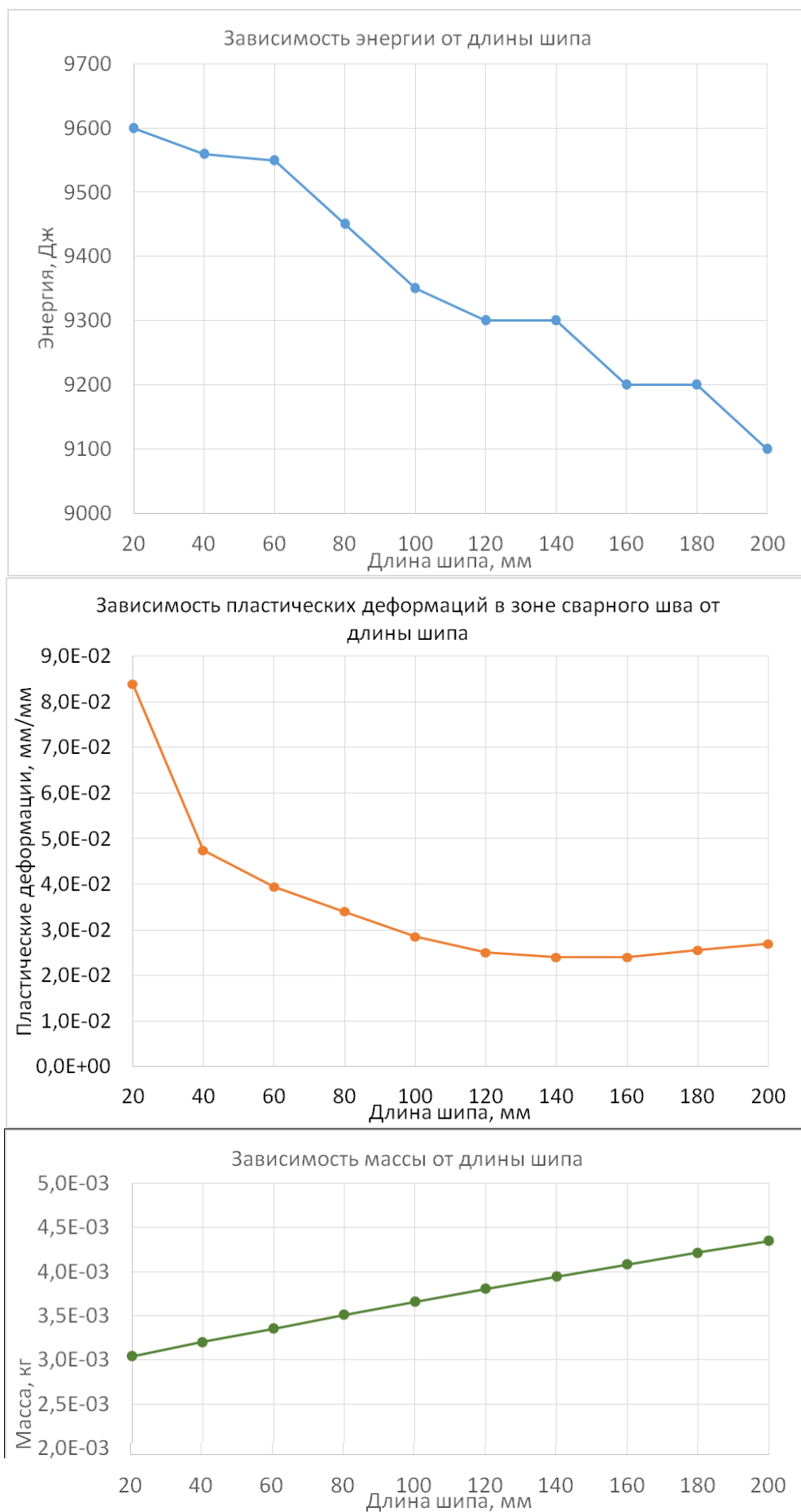


Рис. 12. Зависимость пластических деформаций, массы и энергии от длины шипа

На рис. 13 показаны результаты расчета с выбранной длиной шипа для бокового нагружения. На рис. 13а показано перемещение, мм, на рис. 13б – эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа, на рис.13в – пластические деформации, мм/мм.

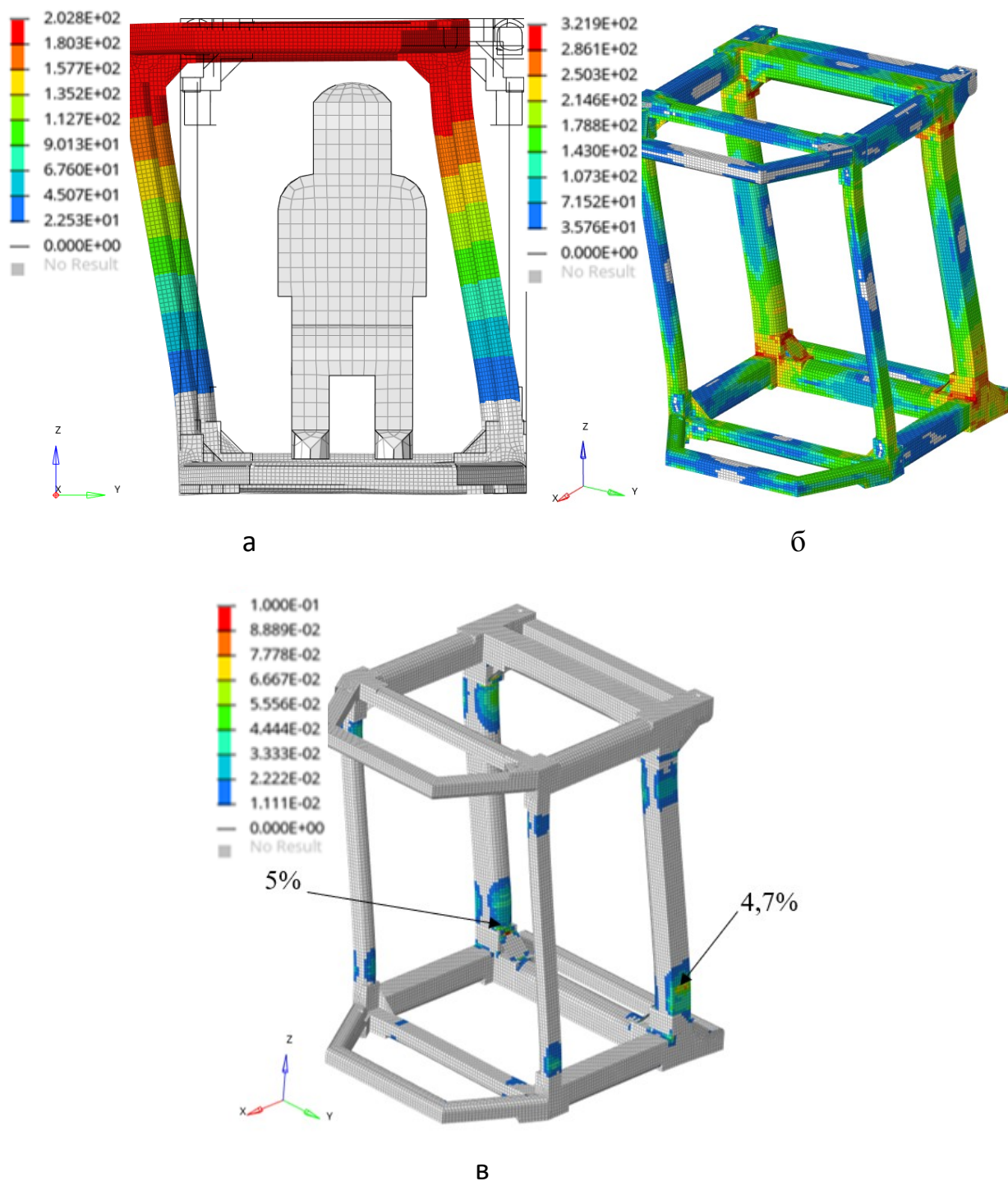
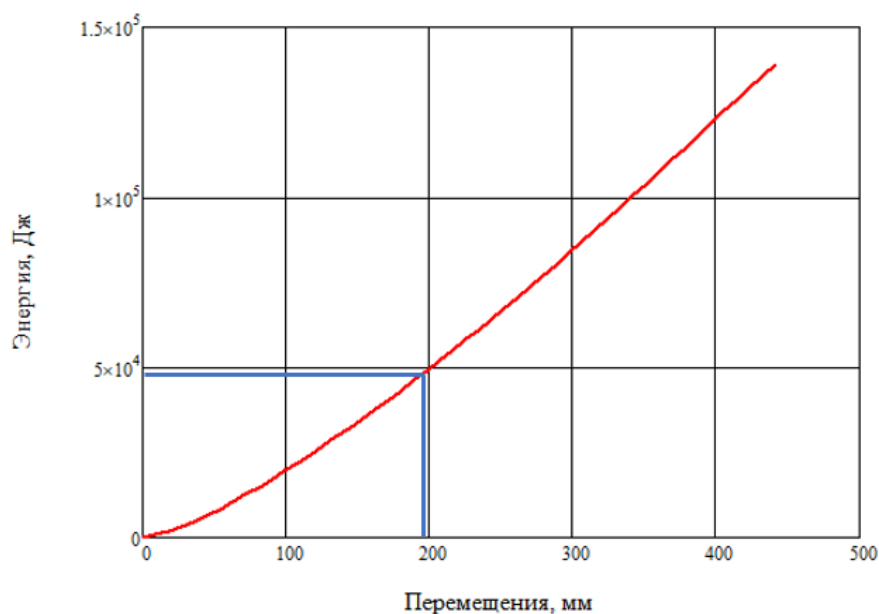


Рис. 13. Результаты расчета

На рис. 14 показана зависимость энергии от перемещений. Сравнение полученных результатов с требованиями ГОСТ ISO 3471-2015 приведены в табл. 2.



**Рис. 14.** Зависимость энергии от перемещений

**Таблица 2.** Результаты расчета

|             | Требования по ГОСТ ISO 3471-2015 | Полученные результаты |
|-------------|----------------------------------|-----------------------|
| Сила, Н     | 224321                           | 321040                |
| Энергия, Дж | 49350                            | 48973                 |

Проведенные расчеты показали работоспособность предложенной конструкции кабины из алюминиевого сплава.

### Результаты и выводы

1. Представлена методика проектирования каркаса кабины со встроенным ROPS с использованием алюминиевых сплавов. В процессе проектирования использованы КЭМ конструктивно-подобного образца, позволяющего утонить параметры конструкции ROPS. Так же, КПО можно использовать для проведения экспериментальных исследований прочности при выборе конструктивных решений.

2. Трубы кабины требуется изготавливать из деформируемых алюминиевых сплавов. Применение 3D печати кронштейнов кабины позволит изготавливать кронштейны из близких групп алюминиевых сплавов из которых изготовлены трубы, что позволит повысить прочностные характеристики сварного шва.

3. Проверочные расчеты показали, что каркас кабины, изготовленный из алюминиевого сплава, соответствует требованиям, предъявляемым к ROPS.

## Список литературы

1. ГОСТ ISO 3471-2015. Машины землеройные. Устройства защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания. - М.: Российский институт стандартизации, 2021. - 34 с.
2. Развитие литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ (к 120-летию со дня рождения И.Ф. Колобнева) / Д. В. Огородов, А. В. Трапезников, Д. А. Попов, С. И. Пентюхин // Труды ВИАМ. – 2017. – № 2(50). – С. 107-114.
3. Абрамов, А. А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Часть II. Технологические процессы / А. А. Абрамов // Литейное производство. – 2021. – № 3. – С. 2-8.
4. Саранин, Л. Г. Исследование получения изделий из наноструктурированных алюминиевых сплавов с улучшенными механическими свойствами / Л. Г. Саранин // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2022. – № 35. – С. 49-53.
5. G. Kokot, W. Ogierman. The Numerical Simulation of FOPS and ROPS Tests using LS-DYNA. *Mechanika*. – 2019. - Volume 25(5) pp. 383-390. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.25.5.4314>
6. Четвериков М.В., Гончаров Р.Б., Бутарович Д.О. Исследование остаточного напряжённо-деформированного состояния несущей системы минипогрузчика при многократном нагружении по требованиям стандарта безопасности ROPS. *Труды НАМИ*. 2023;(1):46-55. <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-1-46-55>
7. O. Panchenko, D. Kurushkin, I. Mushnikov, A. Khismatullin, A. Popovich. A high-performance WAAM process for Al–Mg–Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed. *Materials and Design* 195 (2020) 109040. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109040>
8. ГОСТ Р ИСО 5006-2010. Машины землеройные. Поле обзора оператора. Метод испытания и критерии функционирования. - М.: Стандартиформ, 2012. - 24 с.

---

## АВТОРЫ

**Левенков Ярослав Юрьевич**, к.т.н., [lique87@mail.ru](mailto:lique87@mail.ru), доцент кафедры "Колесные машины" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Вдовин Денис Сергеевич**, к.т.н., [vdovin@bmstu.ru](mailto:vdovin@bmstu.ru), доцент кафедры "Колесные машины" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Александров Дмитрий Алексеевич**, [aleksandrovdimas10@gmail.com](mailto:aleksandrovdimas10@gmail.com), аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

# Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal  
International Public Organization  
“Integration strategy”  
<http://maplants-journal.ru>*

*//Machines and Plants:Design and Exploiting.  
2023. № 3. pp. 1 – 15.*

DOI:

Received: 17.06.2023

Accepted for publication: 17.08.2023

© International Public Organization “Integration strategy”

## Development of aluminum alloy ROPS for front loaders

Yaroslav Y. Levenkov, Denis S. Vdovin,  
Dmitry A. Aleksandrov \*

\* [aleksandrovdimas10@gmail.com](mailto:aleksandrovdimas10@gmail.com)

Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, Russian Federation

---

**Relevance.** Currently, cabs with integrated rollover protection devices (roll over protective structure; ROPS) and protection against falling objects (falling-object protective structure; FOPS) are widely used for front-end loaders. If the design of FOPS is not affected by the mass parameters of the machine, then ROPS significantly depends on them. For a loader with ROPS, the cab is a difficult and expensive part. One of the ways to reduce the cost of its production is the unification of units for a standard-sized range of loaders. But then the ROPS design should be done for the loader model with the largest mass. However, this approach leads to an increase in the metal consumption and cost of loaders with a lower load capacity. As a result, the energy efficiency of the machine decreases.

A promising direction for improving energy efficiency is to reduce the weight of cabins through the use of aluminum alloys, because they have a high specific strength relative to steel.

The objects of the study are wheeled front loaders with a gross weight of 10, 15 and 30 tons. The subject of the study is the application of computational methods based on the finite element method in the design of cabins made of aluminum alloys.

**The purpose of the study** is to develop a methodology for designing an aluminum alloy cabin frame, which will allow obtaining a cabin of lower weight and increased manufacturability compared to analogues.

**Methodology and methods.** The article presents the developed finite element models of structurally similar cabin samples in a static formulation, taking into account geometric and physical nonlinearities.

**Results and scientific novelty.** The paper presents a method for selecting the main design parameters of an aluminum alloy cabin.

**Practical significance.** The results obtained can be used to create cabs of front-end loaders.

---

**Keywords:** strength calculation, ROPS, front loader, finite element method, loads, cab, welded joint, aluminum alloy.

## References

1. GOST ISO 3471-2015. Earth-moving machinery. Roll-over protective structures. Technical requirements and laboratory tests. - M.: Russian Institute of Standardization, 2021. - 34 s.
  2. Razvitie litejnyh aljuminievyh splavov v VIAM (k 120-letiju so dnja rozhdenija I.F. Kolobneva) / D. V. Ogorodov, A. V. Trapeznikov, D. A. Popov, S. I. Pentjuhin // Trudy VIAM. – 2017. – № 2(50). – S. 107-114.
  3. Abramov, A. A. Vysokoprochnye litejnye aljuminievyje splavy. Dostizhenija i perspektivy. Chast' II. Tehnologicheskie processy / A. A. Abramov // Litejnoe proizvodstvo. – 2021. – № 3. – S. 2-8.
  4. Saranin, L. G. Research on the receipt of products made of nanostructured aluminum alloys with improved mechanical properties / L. G. Saranin // Novye materialy i tehnologii v mashinostroenii. – 2022. – № 35. – S. 49-53. (In Russ.)
  5. G. Kokot, W. Ogierman. The Numerical Simulation of FOPS and ROPS Tests using LS-DYNA. Mechanika. – 2019. - Volume 25(5) pp. 383-390. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.25.5.4314>
  6. Chetverikov M.V., Goncharov R.B., Butarovich D.O. Study of residual stress-strain behavior of a load-bearing system of a skid-steer loader under multiple loads according to the ROPS safety standard. Trudy NAMI. 2023;(1):46-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-1-46-55>
  7. O. Panchenko, D. Kurushkin, I. Mushnikov, A. Khismatullin, A. Popovich. A high-performance WAAM process for Al–Mg–Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed. Materials and Design 195 (2020) 109040. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109040>
  8. GOST R ISO 5006-2010. Earth-moving machinery. Operator's field of view. Test method and performance criteria. –M: Standartinform, 2012 – 24 s.
- 

## AUTHORS

**Yaroslav Y. Levenkov**, Ph.D., [lique87@mail.ru](mailto:lique87@mail.ru), Associate Professor, Wheeled Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University.

**Denis S. Vdovin** Ph.D., [vdovin@bmstu.ru](mailto:vdovin@bmstu.ru), Associate Professor, Wheeled Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University.

**Dmitry A. Aleksandrov**, [aleksandrovdimas10@gmail.com](mailto:aleksandrovdimas10@gmail.com), Graduate student, Wheeled Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University.

# Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание  
МОО "Стратегия объединения"  
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,  
разработка и эксплуатация.

Электрон. журн. 2023. № 3. С. 16 – 33.

DOI:

Представлена в редакцию: 23.07.2023

Принята к публикации: 08.08.2023

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 621. 437.3

## Обзор и анализ мировых разработок роторно-лопастных двигателей

Зайцев А.А.

[a.zaitsev@list.ru](mailto:a.zaitsev@list.ru)

ООО «АЗАРТ» (ОПН Сколково 1123493) ,  
Российская Федерация

---

Статья посвящена обзору известных конструкций роторно-лопастных двигателей (РЛД). К преимуществам РЛД относится высокая литровая мощность, отсутствие газораспределительного механизма, простота реализации управления рабочим процессом и потенциально высокий КПД.

По результатам анализа известных конструкций выявлены их непреодолимые недостатки, которые не позволили использовать РЛД на практике.

Предложена систематизация конструктивных схем РЛД по принципу преобразования неравномерного движения роторов в равномерное вращение выходного вала. По этому принципу выявлены три группы: группа гармонично-синусоидальных схем; группа экстремально-синусоидальных схем и группа схем синхронизации с останавливаемыми роторами.

Установлено, что перспективным направлением совершенствования конструктивных схем РЛД является схема с останавливаемыми роторами. Эта схема теоретически обеспечивает наиболее эффективное преобразование сил давления на лопасти ротора в крутящий момент на выходном валу двигателя.

---

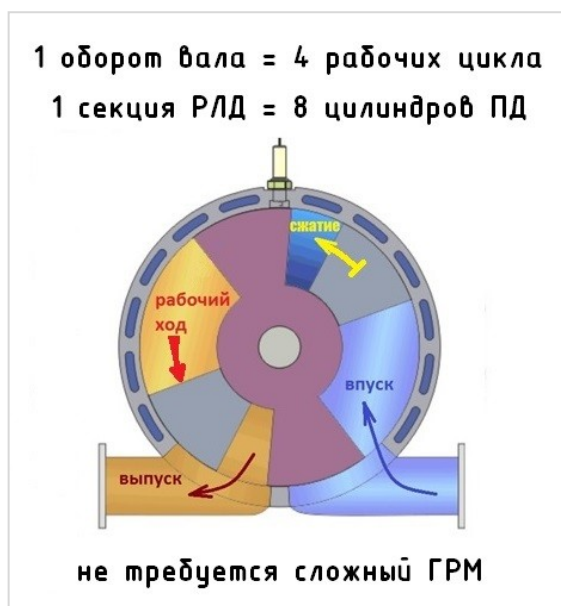
**Ключевые слова:** роторно-лопастной двигатель, механизм преобразования неравномерного движения роторов в равномерное вращение выходного вала, синхронизация роторов.

---

## Введение

Роторно-лопастной двигатель (РЛД) - это тороидальный двигатель внутреннего сгорания. Принципиальная схема РЛД показана на рис. 1. РЛД состоит из тороида, в котором размещены две пары поршней-лопастей. Каждая пара механически связана с одним из двух роторов, вращающихся соосно. Лопасти делят тороид на четыре рабочие камеры. В каждой камере за один оборот попеременно совершаются все четыре рабочих такта: впуск рабочей смеси, сжатие, рабочий ход и выпуск отработавших газов. Таким образом, по количеству

циклов на один оборот выходного вала одна секция РЛД функционально соответствует 8-цилиндровому поршневому двигателю внутреннего сгорания (ДВС).



**Рис. 1.** Принципиальная схема роторно-лопастного двигателя (ПД – поршневой двигатель; ГРМ – газораспределительный механизм)

Именно эта особенность создает принципиальные преимущества РЛД, такие как компактность (в 4-5 раз компактнее поршневого двигателя), относительная простота конструкции (из-за отсутствия сложного механизма газораспределения), высокая литровая мощность, простота передачи энергии между отдельными рабочими камерами, простота реализации современных и перспективных технологий управления рабочим процессом (управляемые фазы газораспределения, изменяемые степень сжатия и рабочий объем, циклы Миллера и Аткинсона).

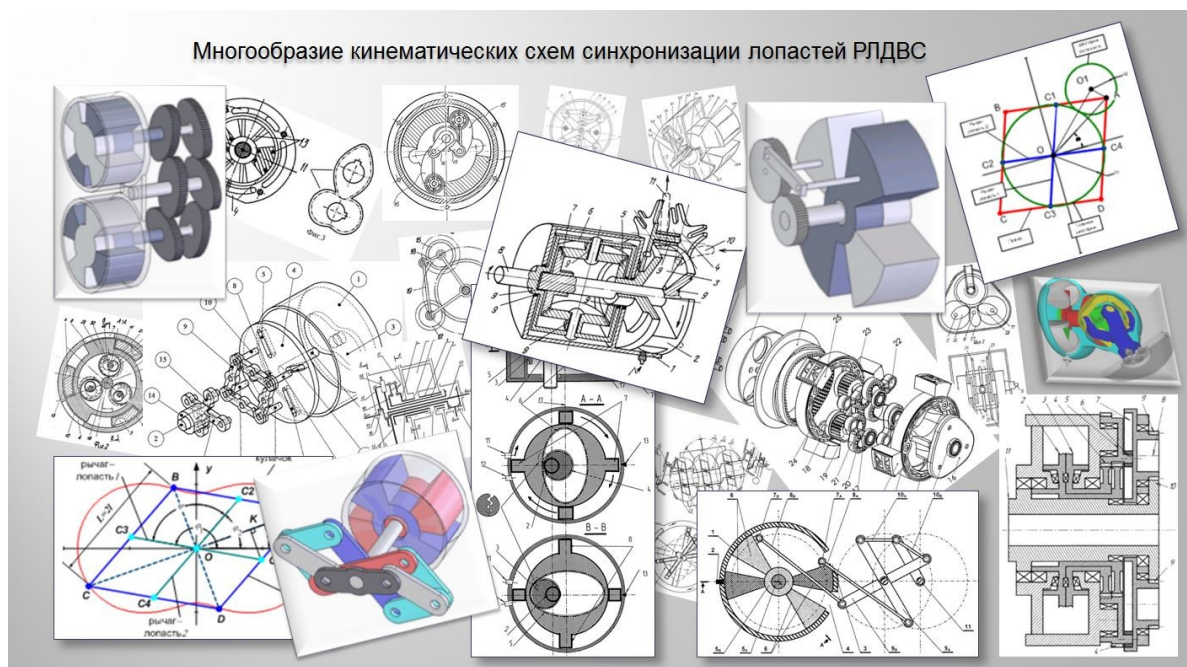
Реализовать эти преимущества пытались с начала прошлого века. Однако создание такого рода двигателей сопряжено с решением сложной технической задачи по эффективной синхронизации вращения роторов, которые должны двигаться неравномерно («пульсировать» друг относительно друга), и передачи с них крутящего момента на равномерно вращающийся общий вал.

Вплоть до настоящего времени решение этой задачи осуществлялось преимущественно с использованием следующих механизмов синхронизации роторов[1-4]:

- зубчатый механизм с некруглыми шестернями,
- планетарный или эпициклоидальный механизм,
- планетарно-кривошипный механизм,
- кривошипно-рычажный механизм,
- рычажный механизм с вращающимися рычагами,
- рычажно-кулачковый механизм.

Коллаж, иллюстрирующий множество упомянутых и других известных конструкций, представлен на рис.2.

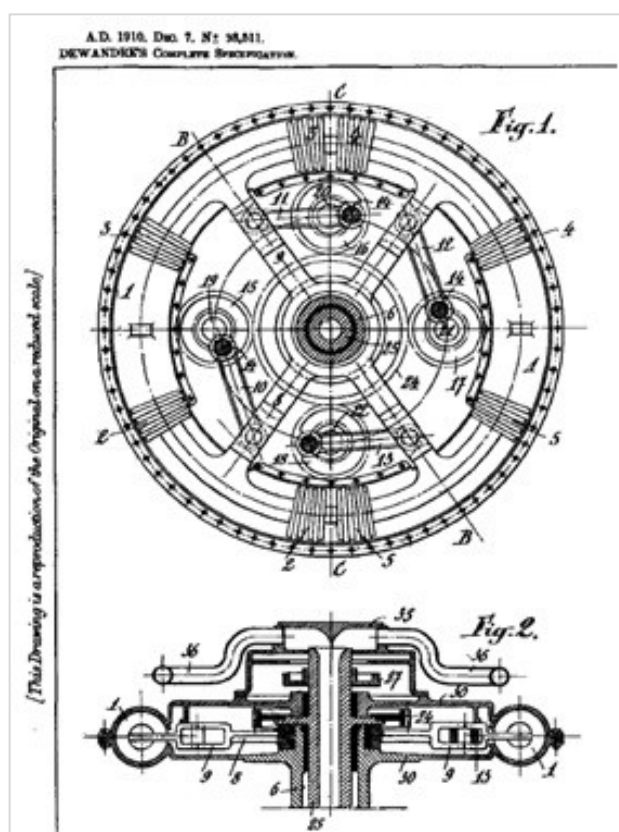
Конструкции механизмов синхронизации лопастей, с помощью которых предпринимались практические попытки реализации идеи создания РЛД, рассмотрены далее.



**Рис. 2.** Многообразие конструкций с разными схемами синхронизации роторов

## Основная часть

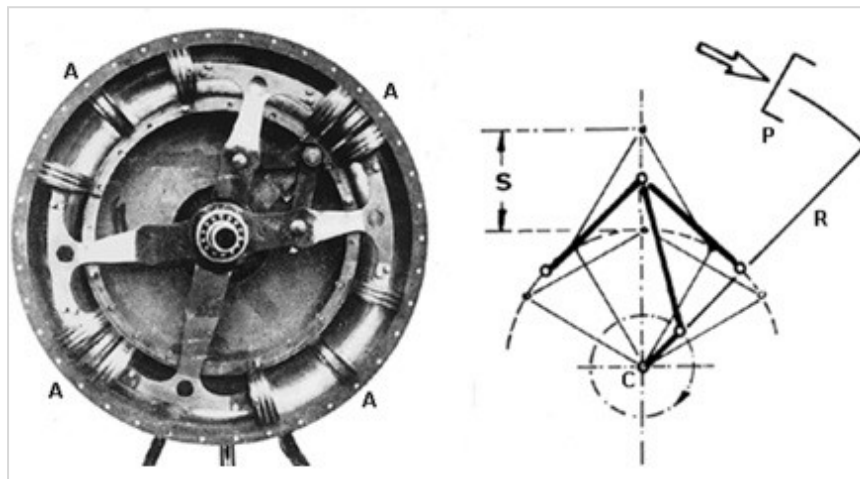
Одним из первых в 1905 году построил свой тороидальный двигатель Девандр (Dewandre) (патент GB 28511) [5]. Этот двигатель вращался вокруг неподвижного центрального вала. Восемь поршней закреплены попарно. Четыре эпициклических шестерни входили в зацепление с солнечной шестерней на центральном валу и сообщали возвратно-поступательное движение поршневым узлам через короткие шатуны (рис. 3).



**Рис. 3.** Конструкция двигателя Девандра

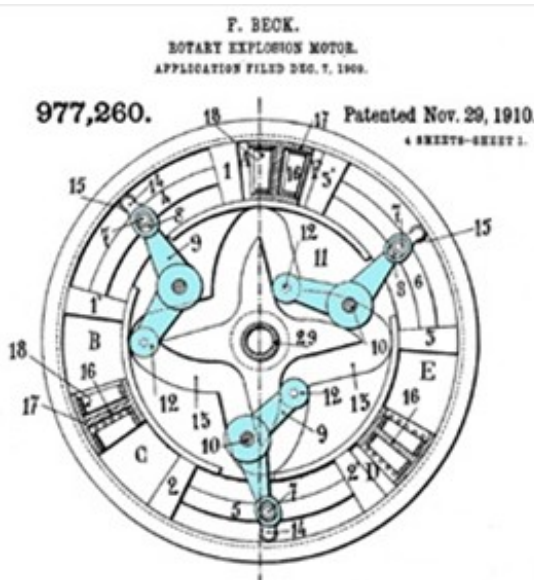
В 1909-1913 гг. три варианта своих роторно-поршневых двигателей построил Фредерик Бек (Beck) [5].

Конструкция первого варианта (рис. 4) с восемью поршнями, движущимися в тороиде, как и у Девандра, предполагала, что двигатель вращается вокруг неподвижного вала и несет на себе пропеллер. Рабочие полости были разделены четырьмя неподвижными перегородками в точках А. Когда кривошип С вращался, соответствующие рычаги вызывали колебание радиальных рычагов R, увлекая за собой поршни Р. Этот двигатель был выставлен на авиасалоне в Париже в 1909 году.



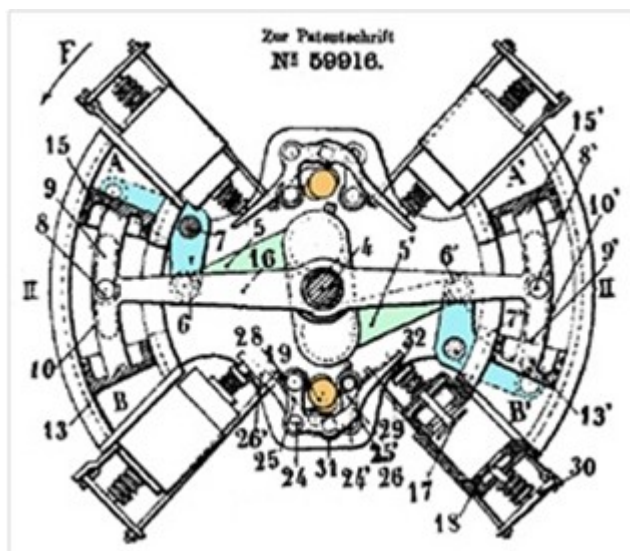
**Рис. 4.** Конструкция первого варианта двигателя Бека

Во втором варианте двигателя Бека (рис. 5) [5] использовались коленчатые кривошипы и лицевой кулачок для привода поршней. Однако форма направляющей кулачка указывает на то, что коленчатые рычаги и поршни должны испытывать высокие инерционные нагрузки. Между поршнями все еще есть перегородки, поэтому каждый из них имеет свою собственную камеру сгорания. На иллюстрации видно наличие клапанного механизма. Клапаны состоят из скользящих колец, установленных в перегородках между поршнями.



**Рис. 5.** Конструкция второго варианта двигателя Бека

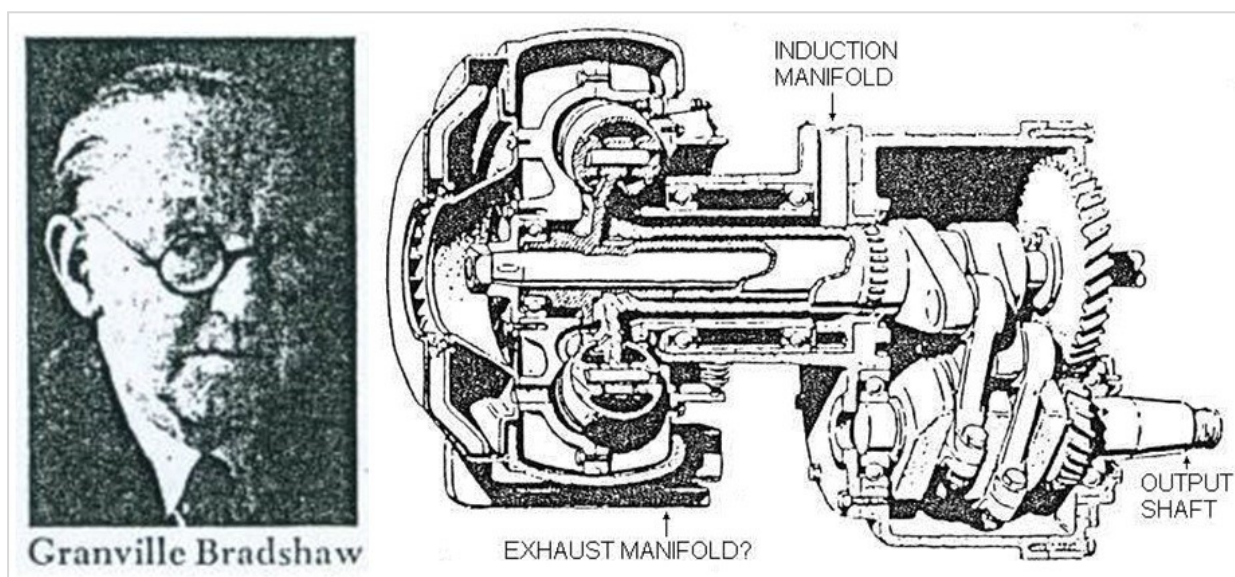
Неизвестно, был ли когда-либо построен второй вариант двигателя, но к 1913 году Бек снова переосмыслил конструкцию РЛД, на которую был выдан австрийский патент 59916. Третий вариант, показанный на рис. 6, имеет другой приводной механизм, использующий коленчатые рычаги, звенья и два четвертьториода [5].



**Рис. 6.** Конструкция третьего варианта двигателя Бека

Несмотря на неполный тороид, это по-прежнему двигатель с неподвижным центральным валом, вокруг которого вращается корпус с поршнями. Стрелка F в левом верхнем углу рисунка указывает направление вращения.

После второй мировой войны были предприняты еще несколько попыток по разработке тороидальных двигателей. Одна из них была предпринята инженером Гранвиллом Иствудом Брэдшоу (Granville Eastwood Bradshaw). В его двигателе (рис. 7) вращающийся тороид был жестко связан с центральным валом, а шатуны, задающие возвратно-поступательное движение поршней, приводили в движение выходной вал [5].



**Рис. 7.** Конструкция двигателя Брэдшоу

Брэдшоу построил версии своего двигателя объемом 1100 и 1250 кубических сантиметров, которые широко рекламировались в 1950-х годах. Но в итоге и его проект, как проекты и его предшественников оказались провальными.

Упомянутые конструкции Девандра, Бека и Брэдшоу были обречены на забвение, так как в их конструкциях был использован возвратно-поступательный принцип движения поршней (лопастей), который не позволяет реализовать главное преимущество роторно-лопастного двигателя, при котором за один оборот вала происходят четыре полноценных четырехтактных цикла, а сам двигатель мог бы получиться очень компактным. Кроме того, чрезмерное усложнение, нетехнологичность и ненадежность рассмотренных выше конструкций закономерно привели к их проигрышу классическим поршневым двигателям с кривошипно-шатунными механизмами.

В шестидесятых годах немецкая фирма Клёкнер-Хумбольд-Дойц (нем. Klöckner-Humboldt-Deutz) экспериментировала с механизмом Кауэрца (рис. 8) [1, 5].

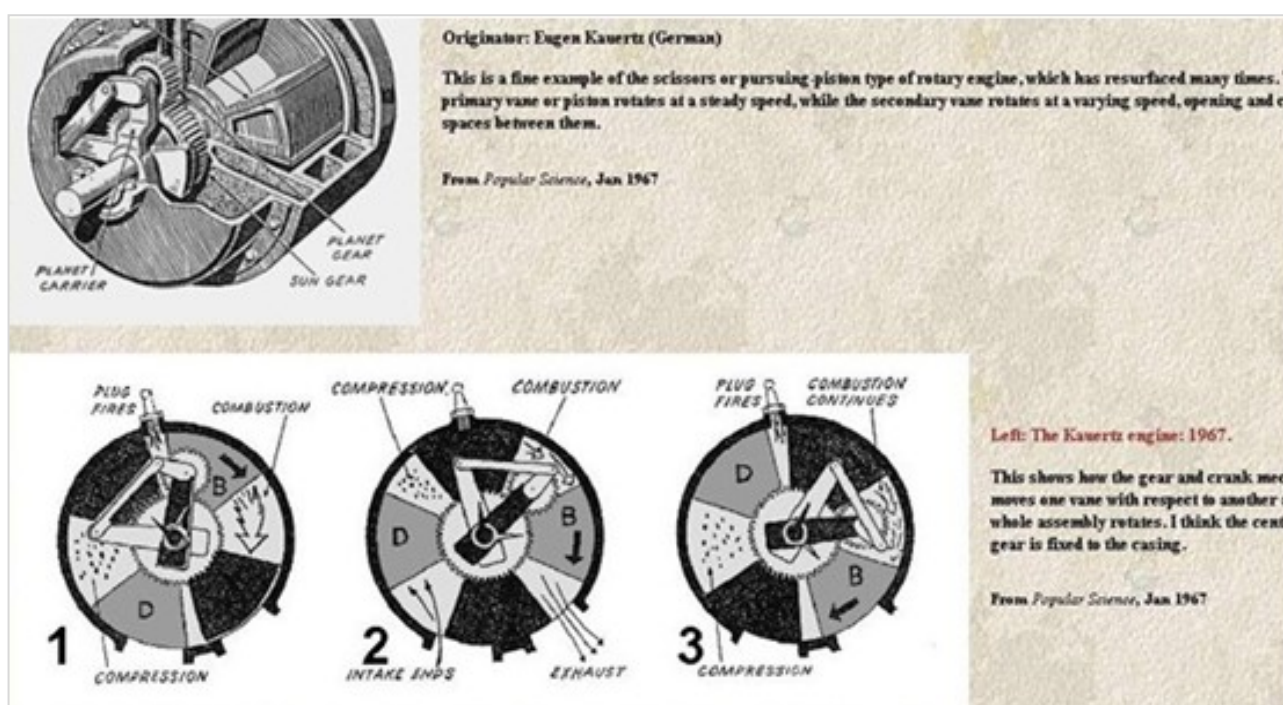


Рис. 8. Конструкция двигателя Кауэрца

Это типичный пример двигателя с планетарно-кривошипным механизмом, который безуспешно много раз пытались использовать и ранее, и позже. Одна пара лопастей здесь вращается с постоянной скоростью, тогда как вторая - с переменной, увеличивая и уменьшая расстояния между ними. При этом удастся реализовать принцип "1 оборот = 4 цикла", однако именно планетарно-кривошипный механизм неизбежно создает губительные вибрации из-за хлыстового движения останавливаемой лопасти.

Еще одной попыткой в конце 1960-х годов был проект Трауготта Чуди (Traugott Tschudi) [5]. Поршни приводились в движение посредством оригинального кулачкового механизма. На рис. 9 показаны два ролика с двумя лопастями в черном цвете, а другой набор в белом цвете. Выходной вал эксцентричен к роторам и тороиду.

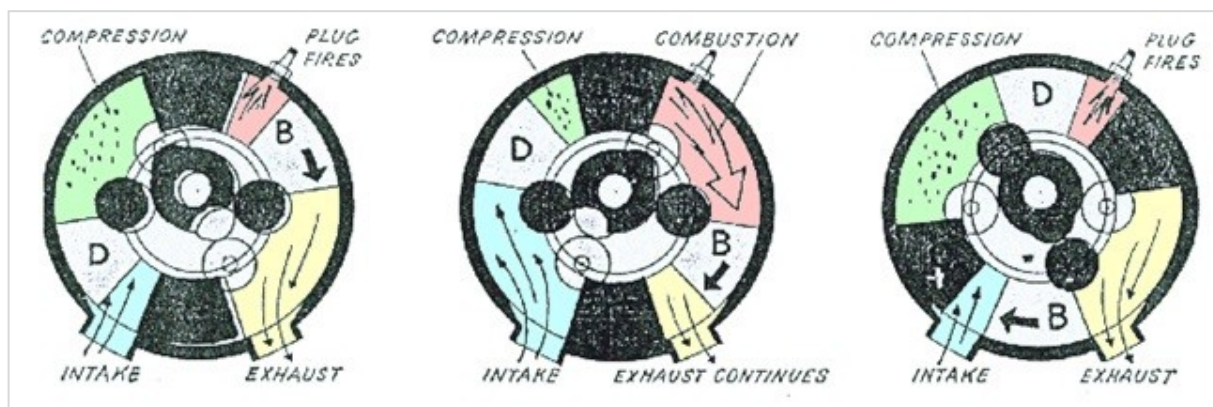


Рис. 9. Конструкция двигателя Чуди

Чуди, хотя и надеялся извлечь выгоду из бума интереса к роторным двигателям после успеха Ванкеля, но так и не смог добиться успеха. Механизм оказался ненадежным из-за больших нагрузок на ролики при их защемлении ротором при остановке лопастей.

Результатом одной из последних попыток создания РЛД стал двигатель, запатентованный Рафалем Моргадо (Raphial Morgado) (pat. US6739307B2) [5, 8]. Изобретатель называл его МҮТ («Могучий, но крошечный») на основании «соотношения мощности и веса в 40 раз выше, чем у обычных двигателей». Моргадо заявлял, что такой двигатель (рис. 10) в дизельном варианте при диаметре поршня 76 мм и степени сжатия 25/1 должен выдавать 850 л.с. и при этом весить 68 кг.

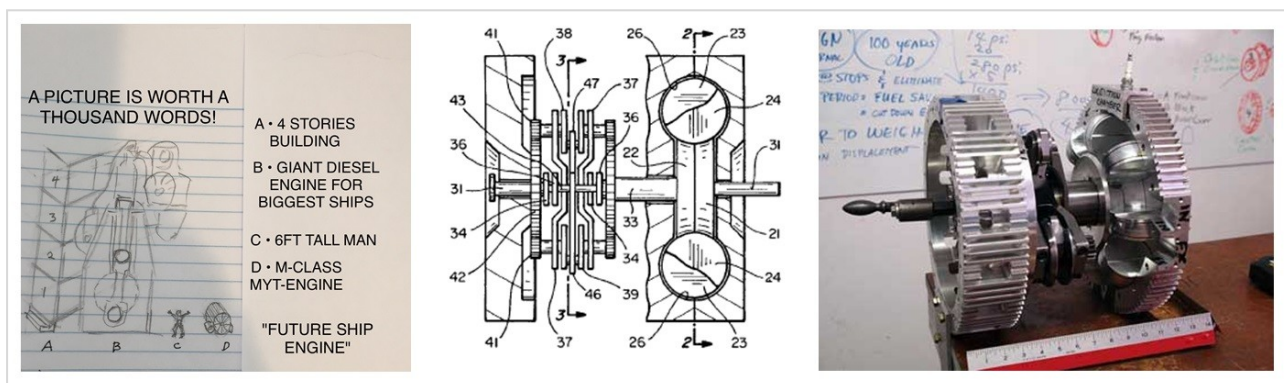
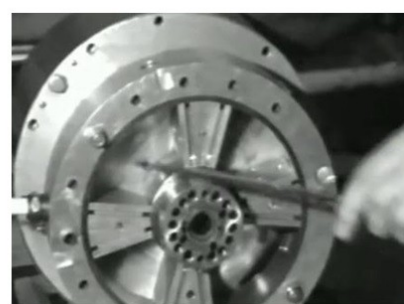
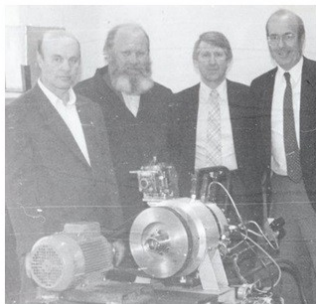


Рис. 10. Схема и макет двигателя Моргадо

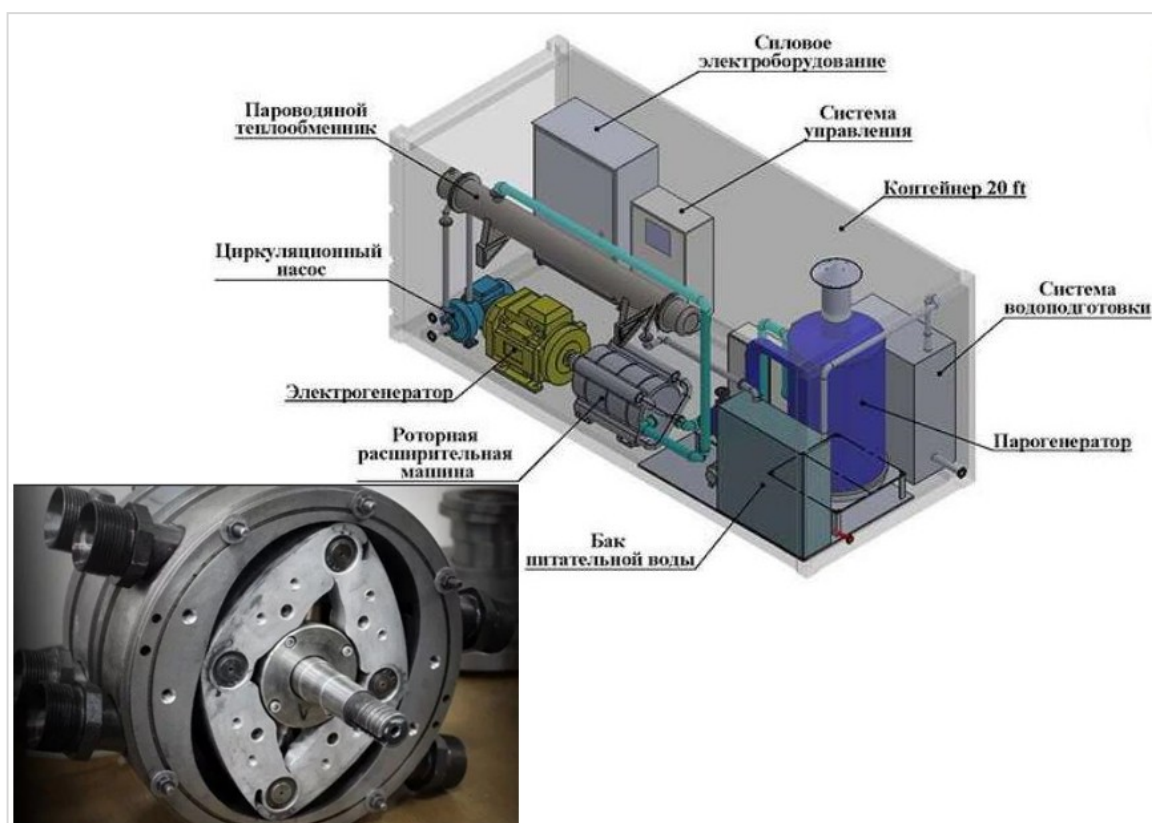
Однако это был все тот же пример двигателя с планетарно-кривошипным механизмом, а его слабость – губительные вибрации.

У нас в стране известен двигатель Вигриянова и Иванова (рис. 11), созданный в 1973 году с многократными вносившимися в дальнейшем изменениями конструкции (патенты 1788305, 1629608, 1752991, 1618949, 2022183) [8]. Этот РЛД заводился, работал и даже привлек внимание инвесторов из США, но, в конце концов, проект не был доведен до коммерческой реализации, так как двигатель оказался ненадежным.



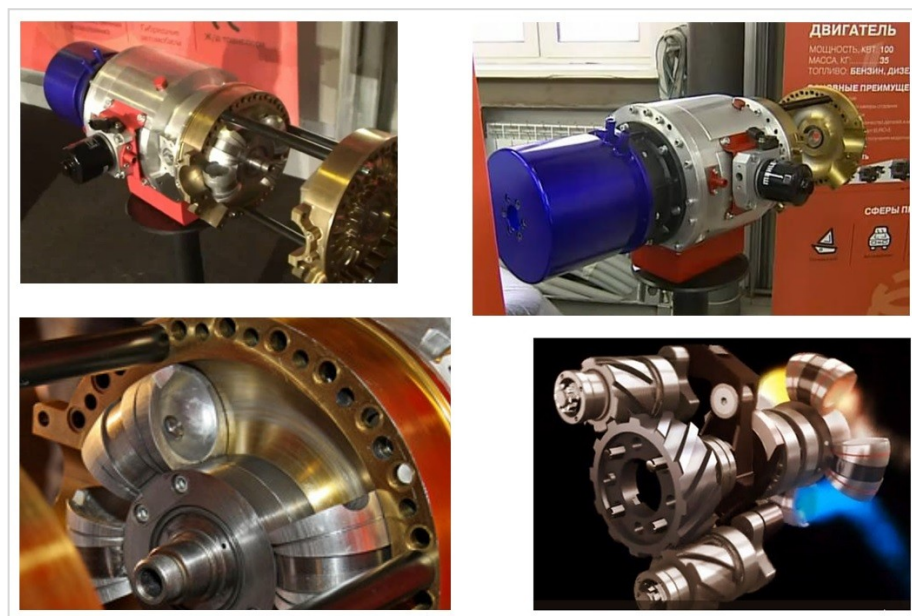
**Рис. 11.** Двигатель Вигриянова и Иванова

Создать РЛД пытались и в Псковском политехническом институте (патенты 2374526, 2387844, 2619391, 2651106) [8]. В основе его конструкции лежит четырехзвенный механизм преобразования движения роторов. В итоге получилось реализовать проект лишь в виде двигателя внешнего сгорания (рис. 12). В составе проекта представлена роторно-лопастная машина, преобразующая энергию пара в механическую энергию и функционирующая в составе агрегата, в котором рабочее тело формируется в отдельном парогенераторе.



**Рис. 12.** Разработка сотрудников Псковского политехнического института

Наиболее известным у нас в стране стал двигатель, разрабатывавшийся для Ё-мобиля (рис. 13) [6]. У Ё-двигателя за основу конструкции была взята схема РЛД, запатентованная в США (Virmel Engine, pat.USA #3356079, 1967 год). И хотя в разработку двигателя было вложено очень много средств, тот факт, что в основу проекта была положена хоть и усиленная, но все же неудачная схема синхронизации роторов с планетарно-кривошипным механизмом, поставил крест на Ё-двигателе. К тому же в конструкции этого РЛД были и другие недостатки.



**Рис. 13.** Двигатель Ё-мобиля

## Обсуждение

С целью систематизации разнообразных конструкций механизмов преобразования неравномерного движения роторов в равномерное вращение вала РЛД был проведен анализ доступных по данному вопросу источников [1-8].

Из множества классифицируемых конструкций, исключались те, которые не соответствовали возможности реализации всего комплекса преимуществ РЛД. Например, не рассматривались конструкции с возвратно-поступательным движением лопастей, которые не позволяют реализовать принцип передачи энергии между отдельными рабочими камерами и компактность конструкции.

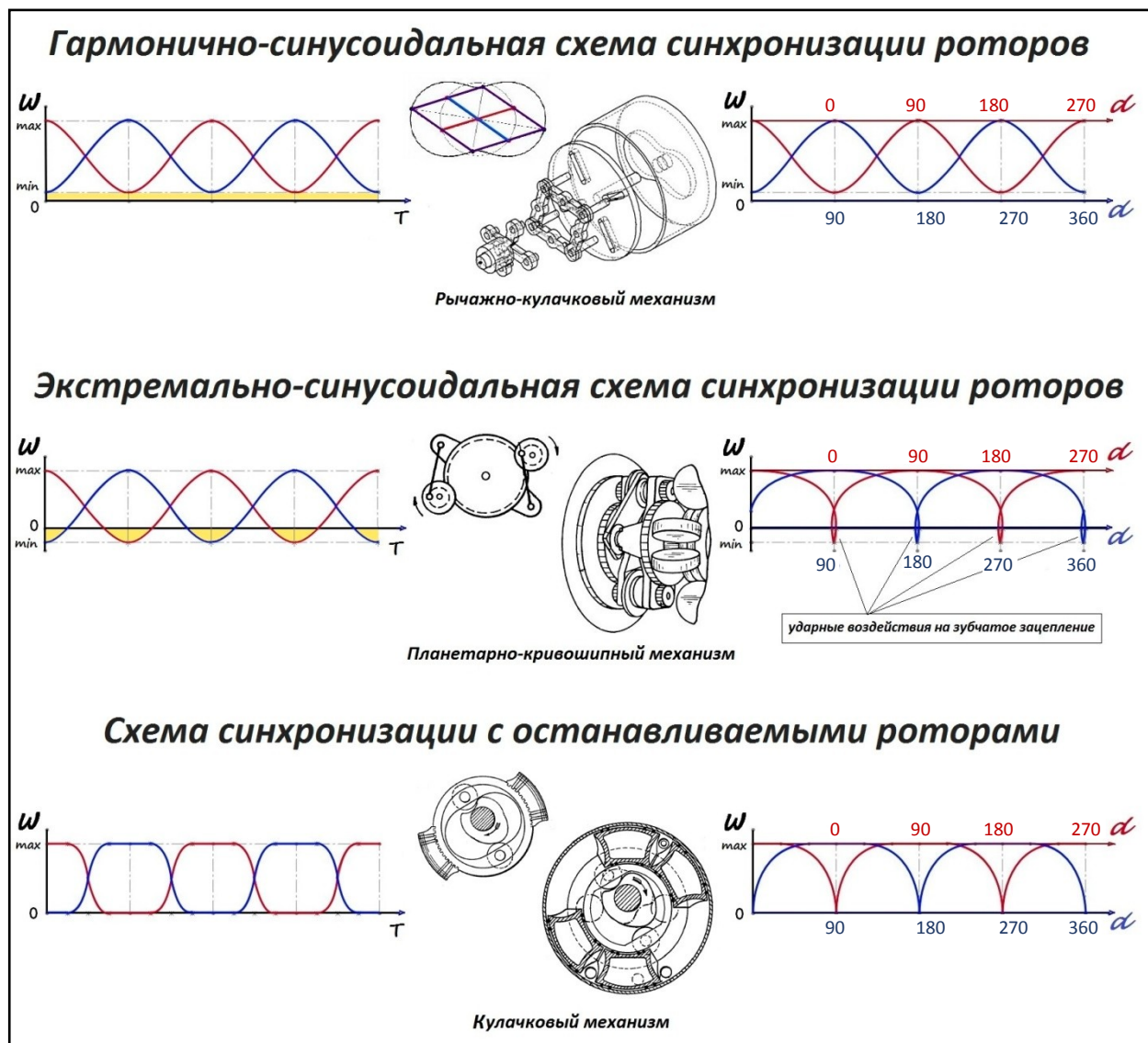
Дальнейший анализ показал, что соответствующие концепции РЛД конструкции, за редким исключением, можно разделить на три группы.

1. Группа гармонично-синусоидальных схем, включающая в себя разнообразные типы передач, функционально отличающиеся плавным и равномерным изменением скоростей роторов в течение цикла (к ним относятся рычажные механизмы с вращающимися рычагами, рычажно-кулачковые механизмы, механизмы с эллиптическими шестернями, с шестернями сложных профилей и многие другие).

2. Группа экстремально-синусоидальных схем, включающая в себя разнообразные типы передач, функционально отличающихся относительно равномерным изменением скоростей роторов, но с явно выраженными экстремумами (к этой группе относится всё разнообразие синхронизаторов с планетарно-кривошипными механизмами, которые применяли в своих конструкциях такие изобретатели, как Кауэрц, Рольфсмейер, Моргадо и др. Такой же тип конструкции применялся в двигателе Ё-мобиля).

3. Группа схем синхронизации с останавливаемыми роторами (к этой группе относится синхронизатор со сдвоенным мальтийским механизмом и дифференциалом конструкции Аракеловых, а также конструкция Трауготта Чуди с роликово-кулачковым механизмом синхронизации).

На рис.14 показаны графики зависимостей угловых скоростей роторов  $\omega$  от времени  $T$  (слева) и от углов  $\alpha$  поворота роторов за цикл (справа). Графики демонстрируют принципиальные различия трех классифицированных схем синхронизации (на примере конструкций с рычажно-кулачковым, планетарно-кривошипным и кулачковым механизмами).



**Рис. 14.** Сравнение классифицированных схем синхронизации

Конструкции первой, гармонично-синусоидальной группы синхронизации имеют наибольшее количество разнообразных проектных решений, хотя и с мизерным процентом реализации.

В верхнем ряду на рис. 14 отображены два графика, относящиеся к этой группе схем синхронизации, типичным представителем которых является рычажно-кулачковый механизм. В конструкциях этой группы изменения скоростей роторов, как в зависимости от времени течения цикла, так и в зависимости от угла поворота роторов, происходят по гармоничному синусоидальному закону. Причем в таких механизмах скорость замедляющегося ротора никогда не достигает нулевого значения.

При такой схеме синхронизации обеспечивается высокая плавность преобразования неравномерного движения лопастей в равномерное вращение выходного вала. Однако

длительные периоды воздействия повышенных нагрузок на механизм через не останавливаемую в рабочем такте лопасть, препятствуют возможности достижения КПД на уровне современных турбопоршневых ДВС. Возможно, именно поэтому конструкция Псковского политехнического института реализована только в виде двигателя внешнего сгорания.

Вторая, наиболее распространенная в реализациях экстремально-синусоидальная схема, которая многократно применялась конструкторами в разных исполнениях в течение всей истории попыток создания РЛД, имеет более существенный и принципиальный недостаток. Несмотря на кажущуюся эффективность такой схемы, многие попытки ее применения претерпели неудачу. Конструкторы двигателя Ё-мобиля не зря обращали особое внимание на необходимость усиления планетарно-кривошипного механизма.

Лежащий в основе этой схемы принцип циклического взаимозависимого изменения скоростей роторов за счет использования кривошипа невозможен в условиях его применения в радиусных конструкциях. При работе такого механизма замедляющийся ротор в точке экстремума не просто останавливается, но и делает кратковременное движение в обратную сторону, придавая лопастям «хлыстовой» эффект.

Таким образом, основным недостатком конструкций, относящихся ко второй группе схем синхронизации, является неизбежность возникновения в этих механизмах больших вибрационных нагрузок, что принципиально не позволяет обеспечить высокие безотказность и ресурс.

Проект РЛД Моргадо, повторивший судьбу Ё-двигателя, также был основан на применении экстремально-синусоидальной схемы с планетарно-кривошипным механизмом.

Ввиду бесперспективности вторая группа схем синхронизации в дальнейшем исключена из сравнительного анализа.

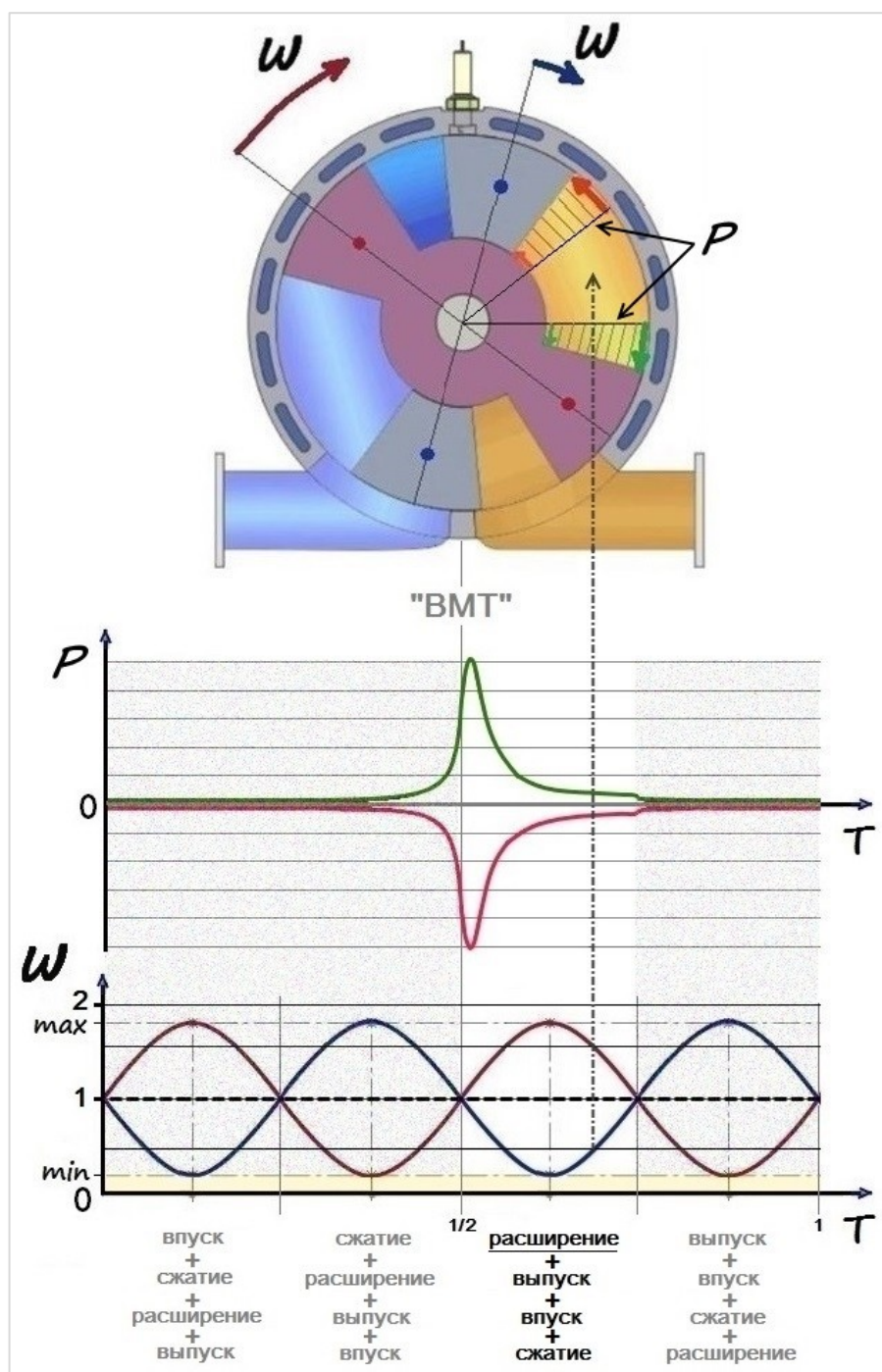
Конструкции РЛД, включенные в третью группу, также имеют ряд недостатков. Так, у механизма со сдвоенными мальтийскими крестами недостатком является отсутствие плавности преобразования движения и большие ударные нагрузки в момент остановки мальтийского креста. У механизма Чуди с роликово-кулачковым механизмом синхронизации при остановке роторов ролики испытывают огромные нагрузки от воздействия расклинивающего их кулачка.

Успешных реализаций РЛД, построенных по схеме синхронизации с останавливаемыми роторами не было, но именно агрегаты такого типа, при доработке конструкции, могут оказаться наиболее эффективным воплощением идеи РЛД.

Такой тип синхронизации позволит силам инерции роторов наиболее гармонично участвовать в процессе преобразования энергии рабочего тела, а при остановленном одном из роторов с другого будет сниматься полезная нагрузка без лишних потерь и с максимальным коэффициентом преобразования.

С целью дальнейшего сравнительного анализа первой и третьей групп синхронизации на рис. 15 показаны графики процессов в рабочем такте РЛД на примере гармонично-синусоидальной схемы синхронизации.

На графике внизу рисунка показано изменение угловых скоростей вращения роторов за время одного цикла. За один цикл в каждой из четырех межлопастных рабочих камер происходит по четыре рабочих такта. Третий сектор соответствует текущему такту, показанному вверх рисунка. График зависимости условного давления в камере сгорания от времени (расположен в центральной части рисунка), иллюстрирует динамику изменения давления на поверхности двух лопастей в этой камере в данном такте.



**Рис. 15.** Рабочий такт РЛД с гармонично-синусоидальной схемой синхронизации

Фрагмент, соответствующий третьему сектору на рис. 14, использован для сопоставлений, которые иллюстрирует рис. 16. На этом рисунке представлены графики зависимости угловых скоростей вращения роторов от времени на такте расширения для гармонично-синусоидальной схемы и схемы синхронизации с останавливаемыми роторами.

Эти же графики служат для отображения соответствующих значений коэффициентов, характеризующих передаточные отношения от роторов на суммирующий вал через механизм преобразования.

В верхней части рис. 16 помещен график изменения давления на поверхности лопастей. Воздействующая на лопасти сила давления рабочего тела создает суммирующий крутящий момент на валу двигателя посредством механизма преобразования.

Коэффициент трансформации  $K_{тр}$  определяется по следующей формуле.

$$K_{тр} = (K_{п1} - K_{п2})/2 ,$$

где  $K_{тр}$  - коэффициент трансформации;

$K_{п1}$  - передаточное отношения от 1-го ротора на суммирующий вал;

$K_{п2}$  - передаточное отношения от 2-го ротора на суммирующий вал.

На рис. 16 справа представлены соответствующие графики изменения коэффициента трансформации энергии рабочего тела в крутящий момент.

Из графиков видно, что при схеме синхронизации с останавливаемыми роторами у РЛД большее количество энергии рабочего тела будет трансформироваться в механическую энергию. Соответственно, стоит предположить, что у РЛД с гармонично-синусоидальной схемой синхронизации роторов несколько больше энергии рабочего тела будет теряться в виде тепла, рассеиваемого через элементы конструкции.

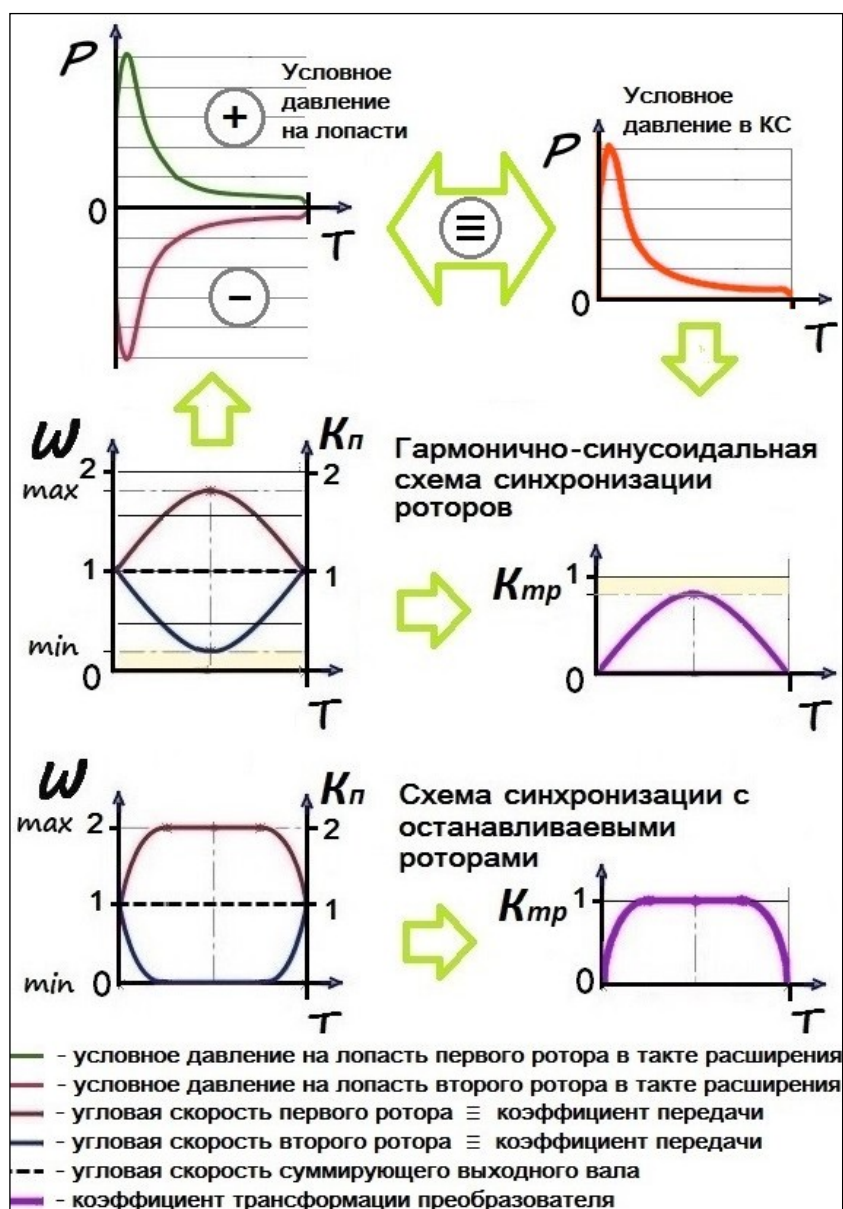


Рис. 16. Сравнение параметров трансформации

У схемы синхронизации с останавливаемыми роторами есть еще одно преимущество.

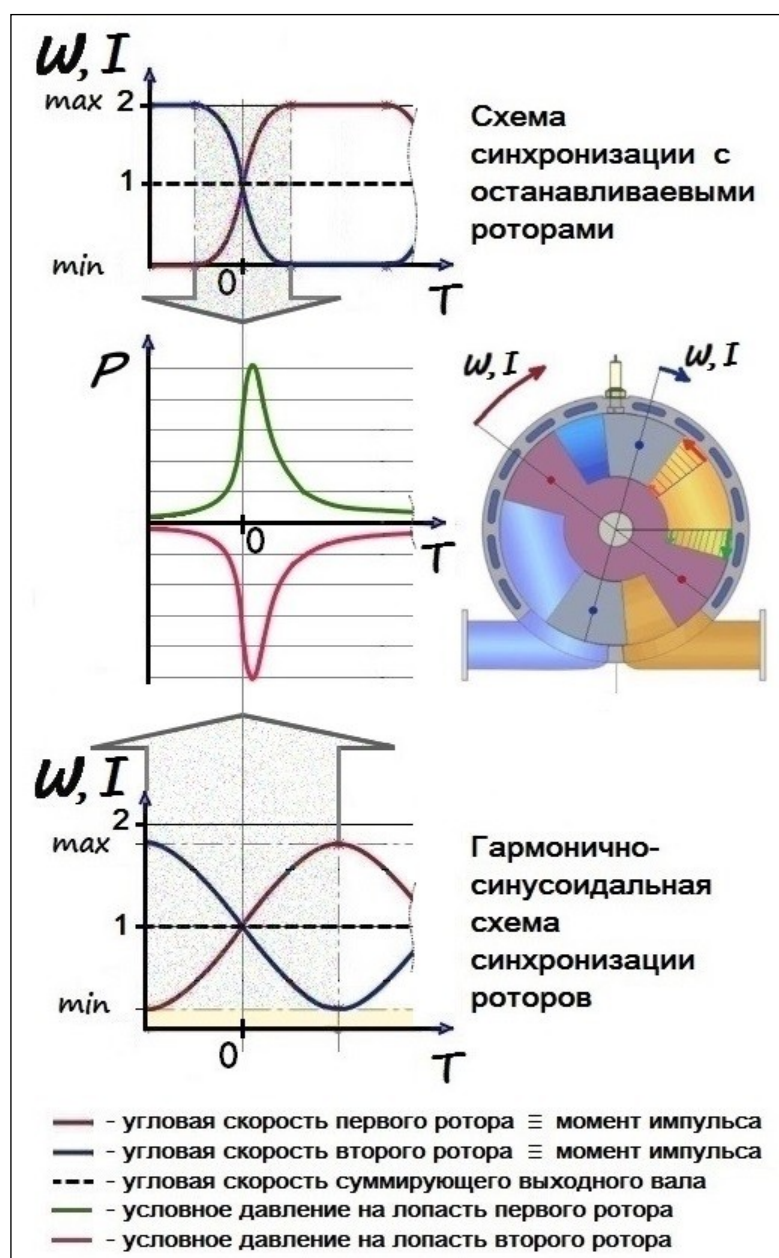
Изменение скорости вращения роторов во время рабочего цикла соответствует изменению их моментов импульса.

На рис. 17 графики угловых скоростей вращения роторов служат также для отображения соответствующих значений (в условных единицах) моментов импульса соответствующих роторов.

Перераспределение сил инерции роторов через механизм преобразования будет тем эффективнее, чем в большей степени этому будет способствовать соответствующее воздействие сил давления рабочего тела на лопасти роторов.

Чем эффективнее давление на лопасти будет способствовать остановке замедляющегося и разгону ускоряющегося роторов, тем меньше нагрузки на механизм преобразования.

Из рис. 17 видно, что процесс конвертации моментов импульса роторов более сконцентрирован в периоде воздействия максимальных значений давления рабочего тела при схеме синхронизации с останавливаемыми роторами.



**Рис. 17.** Сравнение соотношения интенсивности изменения инерционных и барических нагрузок

## Заключение

Ключевой проблемой реализации потенциально высокого технического уровня РЛД является эффективное преобразование неравномерного движения роторов в равномерное вращение выходного вала.

На основе анализа многочисленных мировых разработок РЛД выявлены три типа движения роторов в течение цикла (одного оборота):

- 1) плавное изменение угловых скоростей по синусоиде;
- 2) график изменения угловых скоростей похож на удлиненную циклоиду;
- 3) график изменения угловых скоростей напоминает обыкновенную циклоиду, что соответствует периодической попеременной остановке роторов.

Эти типы движения роторов положены в основу классификации РЛД и конструктивных схем механизмов синхронизации, многообразие которых распределено по трем группам:

- 1) группа гармонично-синусоидальных схем;
- 2) группа экстремально-синусоидальных схем;
- 3) группа схем синхронизации с останавливаемыми роторами.

В первую группу входят рычажные механизмы с вращающимися рычагами, рычажно-кулачковые механизмы, механизмы с эллиптическими шестернями, с шестернями сложных профилей и др.

Ко второй группе относятся синхронизаторы с планетарно-кривошипными механизмами. Усиленная конструкция синхронизатора такого же типа применялась в двигателе Ё-мобиля.

Третья группа включает синхронизаторы со сдвоенным мальтийским механизмом и роликово-кулачковые механизмы синхронизации.

Последующий анализ выявленных групп конструктивных схем привел к следующим выводам:

1. В механизмах, относящихся к группе экстремально-синусоидальных схем синхронизации, неизбежны большие вибрационные нагрузки из-за кратковременного движения роторов в обратную сторону («хлыстовой» эффект), что принципиально не позволяет обеспечить высокие безотказность и ресурс. Поэтому данную группу схем следует признать бесперспективной.

2. Гармонично-синусоидальные схемы синхронизации обеспечивают высокую плавность преобразования неравномерного движения роторов в равномерное вращение выходного вала. Однако потери энергии, обусловленные движением замедляемого ротора во время рабочего такта, не позволяют достигнуть КПД на уровне современных турбопоршневых ДВС.

3. Схемы синхронизации с останавливаемыми роторами теоретически обеспечивают наиболее эффективное преобразование сил давления на лопасти ротора в крутящий момент на выходном валу двигателя. Однако попытки создать надежные механизмы, реализующие данную схему, пока не привели к успеху. Так, механизм со сдвоенными мальтийскими крестами создавал в моменты их остановки большие ударные нагрузки на детали и не обеспечивал плавность преобразования движения роторов во вращение выходного вала. В роликово-кулачковом механизме синхронизации при остановке роторов ролики испытывали огромные нагрузки от воздействия расклинивающего их кулачка, что быстро вызывало их разрушение.

4. Конструктивная схема механизма синхронизации с останавливаемыми роторами является предпочтительной для создания эффективного РЛД. Поэтому поиск технического решения, обеспечивающего плавную и надежную работу механизма синхронизации, представляется целесообразным сосредоточить на схеме с останавливаемыми роторами.

## Список литературы

1. Гуськов Г.Г. Необычные двигатели. – М.: Знание, 1974. – 64 с.
2. Гринёв Д.В. Конструктивные схемы и принципы работы роторно-лопастных машин. Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономика. Право. Управление. – 2014. – № 5. – С. 142-150.
3. Донченко М.А., Перминов А.Л., Гринев Д.В., Иванов А.Н. Обзор и анализ рычажных механизмов преобразования движения для роторно-лопастных машин. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2009. – № 1-1. – С. 28-35.
4. Донченко М.А., Перминов А.Л., Гринев Д.В., Иванов А.Н.. Обзор и анализ зубчатых механизмов преобразования движения для роторно-лопастных машин. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2009. – № 1-1. – С. 61-68.
5. Интернет ресурс <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/museum.htm> Toroidal internal-combustion engines.
6. Интернет ресурс <https://yandex.ru/video/preview/17613743249451030621/> Роторно-лопастной двигатель ё-мобиля.
7. Интернет ресурс поисковой системы ФИПС <https://www1.fips.ru/iiss/search.xhtml> – патенты №№ 1788305, 1629608, 1752991, 1618949, 2022183, 2063526, 2100653, 2101520, 2135777, 2135795, 2159342, 2168032, 2168033, 2176321, 2225513, 2257476, 2292463, 2292470, 2302539, 2345225, 2374526, 2387844, 2474705, 2496998, 2531107, 2565940, 2605863, 2619391, 2630717, 2651106, 160378.
8. Интернет ресурс поисковой системы USPTO <https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/ppubsbasic.html> – патенты №№ US3356079A, US3381669A, US6739307B2.

---

## АВТОР

**Зайцев Андрей Алексеевич**, [a.zaitsev@list.ru](mailto:a.zaitsev@list.ru), руководитель проекта РЛД ООО «АЗАРТ» (ОПН Сколково 1123493).

# Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal  
International Public Organization  
“Integration strategy”  
<http://maplants-journal.ru>*

*//Machines and Plants:Design and Exploiting.  
2023. № 3. pp. 16 – 33.*

DOI:

Received: 23.07.2023

Accepted for publication: 08.08.2023

© International Public Organization “Integration strategy”

## Overview and analysis of world developments of rotary-vane engine

Andrey A. Zaytsev

[a.zaitsev@list.ru](mailto:a.zaitsev@list.ru) AZART LLC (ID Skolkovo  
1123493), Russian Federation

The article is devoted to the review of the known designs of rotary-vane engines (RVE). The advantages of the RVE include high liter capacity, the absence of a gas distribution mechanism, ease of implementation of workflow management and potentially high efficiency.

Based on the results of the analysis of the structures, insurmountable shortcomings were identified that did not allow the use of RVE in practice.

The systematization of RVE design schemes based on the principle of converting the uneven motion of the rotors into a uniform rotation of the output shaft is proposed. According to this principle, three groups have been identified: a group of harmonic-sinusoidal circuits; a group of extreme-sinusoidal circuits and a group of synchronization circuits with stopped rotors.

It is established that a promising direction for improving the design schemes of RVE is a scheme with stopable rotors. This scheme theoretically provides the most efficient conversion of the pressure forces on the rotor blades into the torque on the output shaft of the engine.

**Keywords:** rotary-vane engine, the mechanism for converting the uneven movement of the rotors into a uniform rotation of the output shaft, rotor synchronization.

### References

1. Guskov G.G. Unusual engines. - M.: Knowledge, 1974. - 64 p.
2. Grinev D.V. Structural schemes and principles of operation of rotary-vane machines. Bulletin of the Pskov State University. Series: Economy. Right. Control. - 2014. - No. 5. - P. 142-150.
3. Donchenko M.A., Perminov A.L., Grinev D.V., Ivanov A.N. Review and analysis of lever mechanisms for transforming motion for rotary-vane machines. News of the Tula State University. Technical science. - 2009. - No. 1-1. - S. 28-35.
4. Donchenko M.A., Perminov A.L., Grinev D.V., Ivanov A.N. Review and analysis of gear mechanisms of motion transformation for rotary-vane machines. News of the Tula State University. Technical science. - 2009. - No. 1-1. - S. 61-68.
5. Internet resource <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/museum.htm> Toroidal internal-combustion engines.
6. Internet resource <https://yandex.ru/video/preview/17613743249451030621/> Yo-mobile

rotary-vane engine.

7. Internet resource of the FIPS search engine <https://www1.fips.ru/iiss/search.xhtml> - patents No. 1788305, 1629608, 1752991, 1618949, 2022183, 2063526, 2100653, 2101520, 2135777, 2135 795 2159342 2168032 2168033 2176321 2225513 2257476 2292463 2292470 2302539 2345225 2374526 2387844 496998, 2531107, 2565940, 2605863, 2619391, 2630717, 2651106, 160378.

8. Internet resource of the USPTO search engine <https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/ppubsbasic.html> - patents No. US3356079A, US3381669A, US6739307B2.

---

#### AUTHOR

**Andrey A. Zaytsev**, [a.zaitsev@list.ru](mailto:a.zaitsev@list.ru), project manager of the RVE of “AZART” LLC (ID Skolkovo 1123493).

УДК 62-84

## «Карнотизация» рабочих циклов тепловых двигателей<sup>1</sup>

Степанов Г.Ю.

Москва, Россия

В статье изложены результаты теоретического анализа возможностей приближения реальных термодинамических циклов к обратимому циклу Карно. Рассмотрены характерные примеры: регенеративный цикл, цикл Уварова и парогазовый цикл. Показаны области применения «карнотизации» циклов. Статья предназначена для преподавателей и студентов технических ВУЗов.

**Ключевые слова:** термодинамический цикл, цикл Карно, коэффициент полезного действия (КПД), карнотизация.

Как известно, наивысший термический КПД ( $\eta_c$ ), зависящий только от температур нагревателя  $T_{\max}$  и охладителя  $T_{\min}$ , имеет цикл Карно (1824 г.), который состоит из двух изотерм ( $ac_1$ ,  $c_2$ ) и двух адиабат ( $c_1c$ ,  $ca$ ), рис.1:

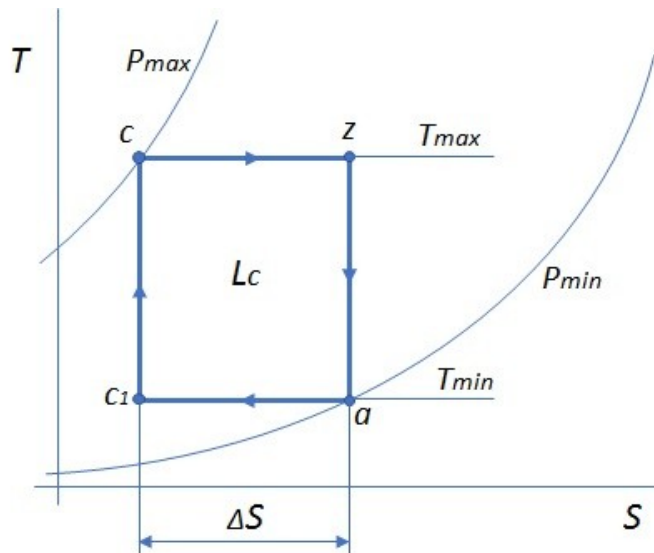
$$\eta_c = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}.$$

При  $T_{\min}=288\text{K}$  и  $T_{\max}=1000$  и  $3000\text{K}$ , КПД цикла Карно будет соответственно 0,710 и 0,905 (удельный расход топлива  $g_e = 89$  и  $70$  г/л.с./ч).

В реальных двигателях цикл Карно неосуществим ввиду трудностей выполнения изотермических сжатия и расширения, а также необходимости очень больших изменений давлений  $P = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$  и объемов  $\varepsilon = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$  рабочего тела для получения приемлемой работы (площади цикла)  $L_c = (T_{\max} - T_{\min}) \cdot G \cdot \Delta S$ :

$$P = \left( \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \exp \left( \frac{L_c/G}{R(T_{\max} - T_{\min})} \right), \quad \varepsilon = P \frac{T_{\min}}{T_{\max}}.$$

<sup>1</sup> Согласие на публикацию рукописи статьи дано ее правообладателем и автором книги «Об ученом «танкисте-астронавте» из династии Степановых. Сборник очерков и Воспоминаний» / Авторы-составители: М.М. Буренков, В.В. Соломай, Н.И. Троицкий. – М.: МЕГАЛИОН, 2017. – 320 с.



**Рис. 1.** Цикл Карно.

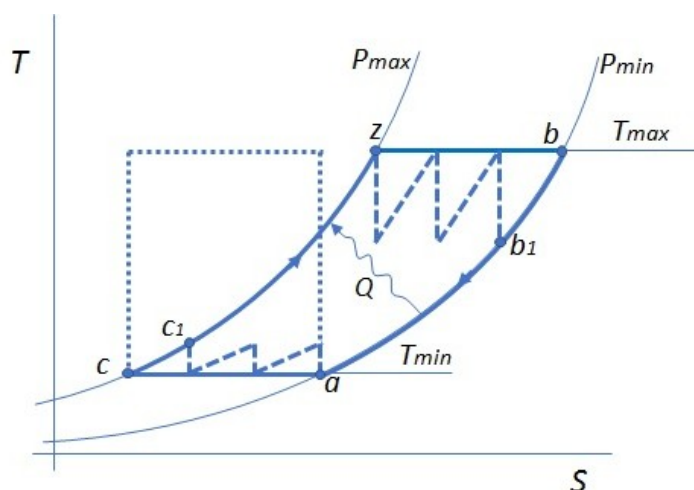
При указанных выше значениях  $T_{min}$  и  $T_{max}$ , показателе адиабаты  $\kappa = 1,4$  и умеренном значении удельной работы  $L_c/G = 100$  кДж/кг (характерном для низкотемпературных автомобильных ГТД простого цикла) получаем  $\Pi = 130$  и  $4200$ ,  $\varepsilon = 40$  и  $400$ .

Совершенствование рабочих циклов реальных тепловых двигателей производят приближением их к циклу Карно, что и называют «карнотизацией».

КПД и работа цикла, состоящего из двух изотерм и двух изобар, изображенного сплошными линиями на рис. 2, будут в точности равны КПД и работе цикла Карно с теми же температурами  $T_{min}$  и  $T_{max}$  (пунктир), если применить идеальную регенерацию тепла между изобарами:

$$Q_{ba} = C_p \cdot G \cdot (T_a - T_b) = -Q_{cz} = C_p \cdot G \cdot (T_z - T_c).$$

То есть степень регенерации  $\sigma = (T_r - T_c) / (T_a - T_b) = 1$ ,  $T_r = T_z = T_b = T_{max}$ ,  $T_a = T_c = T_{min}$ .

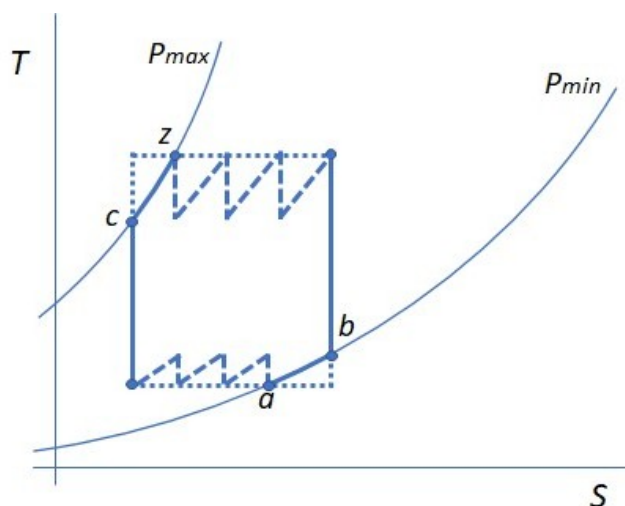


**Рис. 2.** Регенеративный цикл. Пунктиром обозначены ступенчатые процессы сжатия воздуха и расширения горячих газов.

Приблизиться к такому циклу можно в ГТД со ступенчатыми процессами сжатия  $ac1$  и расширения  $zb1$ , то есть с промежуточными охлаждениями воздуха между несколькими

компрессорами и его нагревом между несколькими турбинами (штриховые линии). По такому циклу с большой степенью регенерации в 50-х годах прошлого века были выполнены открытые и замкнутые стационарные газотурбинные установки швейцарских фирм Браун-Бовери (Brown Boveri) и Эшер-Висс (Escher Wyss). Для транспортных ГТД многоступенчатые процессы сжатия и расширения практически не осуществимы. Однако уже двухступенчатые процессы дают значительный эффект, что было подтверждено на автомобильном ГТД фирмы «Форд».

В цикле Уварова<sup>2</sup> (рис. 3) многоступенчатое сжатие заканчивается высоким адиабатическим сжатием, и также многоступенчатое расширение – высоким адиабатическим. Этот цикл непосредственно приближен к циклу Карно (пунктир), «обрезанному» по двум изобарам наибольшего и наименьшего давлений. Регенерация тепла невозможна, так как  $T_c > T_b$ . При одинаковом с предшествующим циклом с предшествующим циклом изотермическим сжатием цикл Уварова дает несколько большую удельную работу и соответственно позволяет получить большую мощность единичного агрегата.



**Рис. 3.** Цикл Уварова. Пунктиром выделены многоступенчатые процессы сжатия и расширения.

Еще один способ карнотизации – использование парогазового цикла (рис. 4). В нем отработавшие газы нагревают жидкость в котле и затем ее пар в пароперегревателе. Пар адиабатически расширяется в турбине ( $z1b1$ ) до состояния насыщения, после чего при постоянных температуре и давлении конденсируется в жидкость. Парогазовый цикл по сути дела осуществляет утилизации в работу части тепла, отводимого в охладителе ( $ba$ ) газового цикла. Последний может быть, как с лопаточными, так и с поршневыми машинами.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания какой-либо другой карнотизации не поддаются. Однако теоретические циклы поршневых газовых двигателей внешнего сгорания – двигателей Стирлинга с регенерацией – имеют вид циклов, показанных на рис. 2 и 3, с заменой изобар  $cz$  и  $ba$  на изохоры. В этих двигателях реализована карнотизация цикла и

<sup>2</sup> Владимир Васильевич Уваров (4 августа 1899 - 1977) - выдающийся советский учёный-теплотехник, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Организовал в МВТУ имени Н.Э. Баумана кафедру газовых турбин, которой руководил до конца жизни. Создал школу российских инженеров и учёных-газотурбинистов.

благодаря этому, несмотря на низкую максимальную температуру, достигнуты довольно высокие КПД.

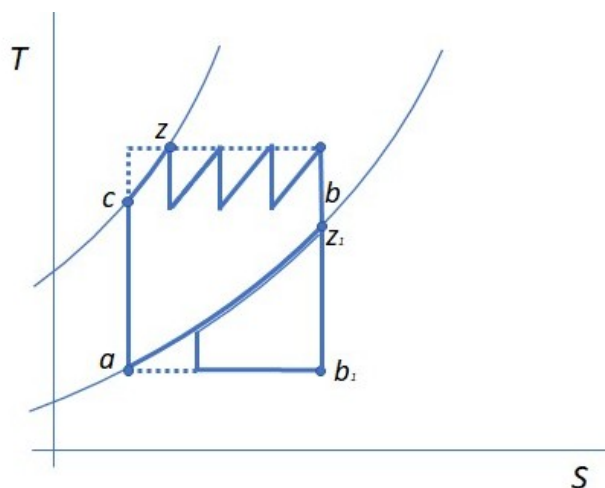


Рис.4. Парогазовый цикл.

---

#### АВТОР

**Степанов Георгий Юрьевич** (01.08.1922 – 15.10.2005), доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, почетный член Российской академии естественных наук (РАЕН), действительный член Международной Астронавтической академии, главный научный сотрудник НИИ механики МГУ.

# Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal*  
*International Public Organization*  
*"Integration strategy"*  
<http://maplants-journal.ru>

//Machines and Plants:Design and Exploiting.  
2023. № 3. pp. 34 – 38.

DOI:

Received: 09.08.2023

Accepted for publication: 18.08.2023

© International Public Organization "Integration strategy"

## "Carnotization" of working cycles of heat engines<sup>3</sup>

Georgy U. Stepanov

Moscow, Russian Federation

The article presents the results of a theoretical analysis of the possibilities of approximation of real thermodynamic cycles to the reversible Carnot cycle. Typical examples are considered: regenerative cycle, Uvarov cycle and steam-gas cycle. The areas of application of "carnotization" of cycles are shown. The article is intended for teachers and students of technical universities.

**Keywords:** thermodynamic cycle, Carnot cycle, efficiency (efficiency), carnotization.

### AUTHOR

**Stepanov Georgy Yuryevich** (01.08.1922 – 15.10.2005), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of the RSFSR, honorary member of the Russian Academy of Natural Sciences (RAS), full member of the International Astronautical Academy, chief Researcher of the Institute of Mechanics of Moscow State University.

<sup>3</sup> Consent to the publication of the manuscript of the article was given by the copyright holder and the author of the book "About the scientist "tank-cosmonaut" from the Stepanov dynasty. Collection of essays and memoirs" / Authors-compilers: [M.M. Burenkov], V.V. Solomai, [N.I. Troitsky]. – M.: MEGALION, 2017. – 320 p.

УДК 62-84

## Двигатели Стирлинга<sup>1</sup>

Степанов Г.Ю.

Москва, Россия

В статье в кратком изложении даны основные сведения о принципе действия, конструктивных схемах и термодинамических циклах двигателя Стирлинга. Рассмотрены достоинства и недостатки. Показаны преимущественные сферы применения. Статья полезна преподавателям и студентам технических ВУЗов.

**Ключевые слова:** двигатель Стирлинга, нагреватель, охладитель, регенератор, вытеснитель, термодинамический цикл.

Двигатели Стирлинга – поршневые тепловые двигатели внешнего сгорания с замкнутым регенеративным циклом.

Принцип действия двигателей Стирлинга весьма прост, и неудивительно, что такой двигатель был изобретен еще в 1816 г., задолго до двигателей внутреннего сгорания.

Пусть в цилиндре поршневого двигателя при сжатии газ охлаждают, а при расширении нагревают, как показано на рис. 1.

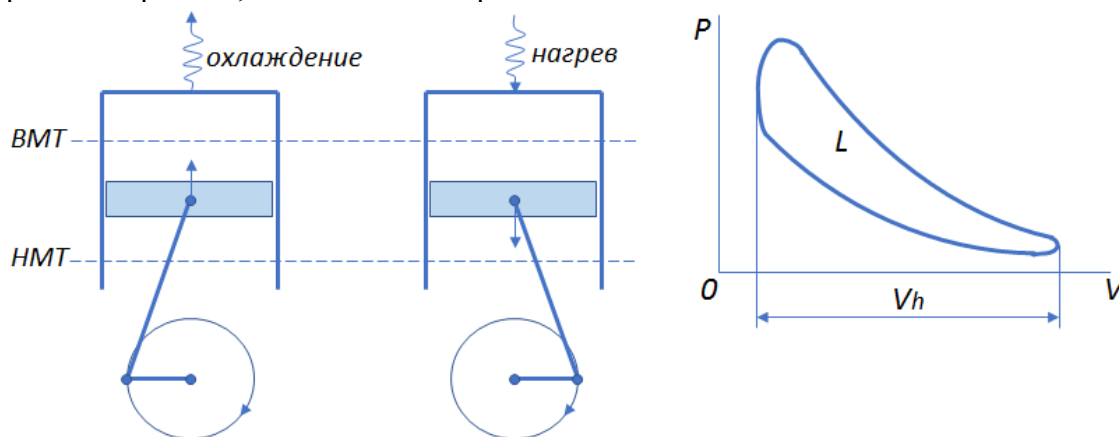
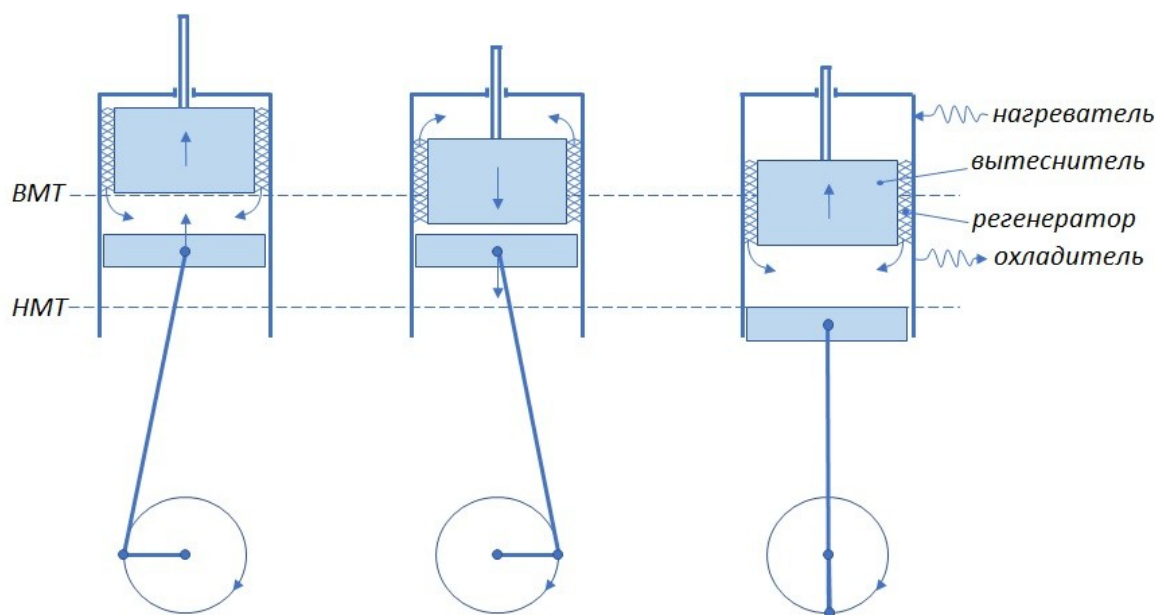


Рис. 1. Принцип действия и термодинамический цикл двигателя Стирлинга.

<sup>1</sup> Согласие на публикацию рукописи статьи дано ее правообладателем и автором книги «Об ученом «танкисте-астронавте» из династии Степановых. Сборник очерков и Воспоминаний» / Авторы-составители:

М.М. Буренков, В.В. Соломай, Н.И. Троицкий – М.: МЕГАЛИОН, 2017. – 320 с.

Согласно закону Шарля (1787 г.) при равном объеме нагреваемый газ имеет давление больше, чем охлаждаемый, поэтому газ в цикле производит полезную работу  $L$ . Эта работа тем больше, чем больше отношение указанных давлений и чем больше среднее давление в цилиндре. Двигатель по схеме рис. 1 очевидно не пригоден из-за значительных времен нагрева и охлаждения цилиндра. В реальных двигателях Стирлинга нагрев и охлаждение газа производят в определенных местах цилиндра или в специальных теплообменниках. Согласно патенту Стирлинга двигатель снабжают дополнительным поршнем-вытеснителем, установленным в цилиндре с зазором, так что давления с двух его сторон практически одинаковы и перемещение вытеснителя происходит свободно. В схеме двигателя, изображенной на рис. 2, нагревают верхнюю и охлаждают нижнюю части цилиндра, обрешенные снаружи и внутри (что на схеме не показано). При сжатии газа вытеснитель находится в верхней части цилиндра, и большая часть газа охлаждается. При расширении газа вытеснитель движется за поршнем, и оно происходит в верхней горячей части цилиндра. В конце расширения вытеснитель возвращается в верхнюю часть цилиндра. Движения поршня и вытеснителя осуществляются специальными механизмами так, чтобы получить возможно большую работу  $L$ .

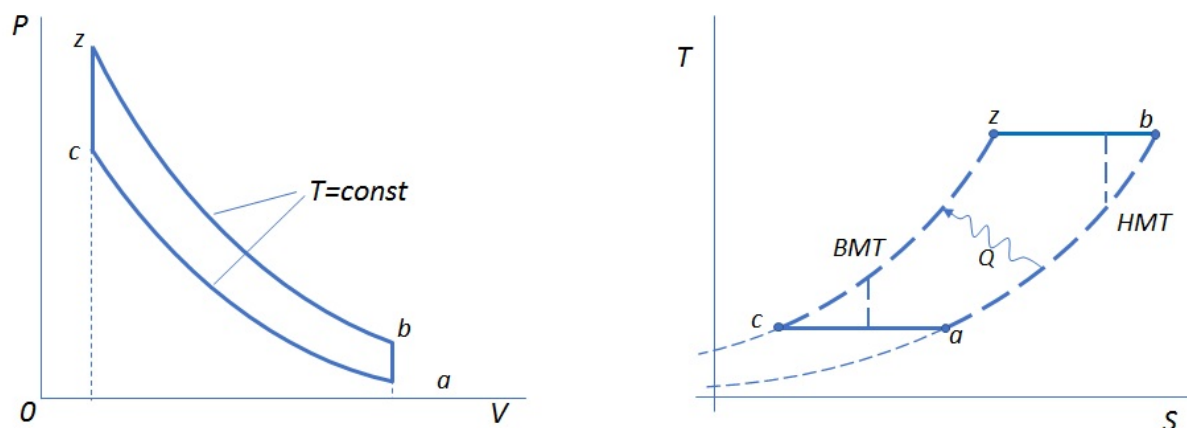


**Рис. 2.** Схема работы двигателя Стирлинга с вытеснителем и регенератором.

Расчетный цикл двигателя Стирлинга, изображенный на рис. 3, состоит из двух изотерм ( $ac$ ,  $zb$ ) и двух изохор ( $cz$ ,  $ba$ ). Изотермические сжатие и расширение предполагают достаточно медленное протекание этих процессов, а нагрев и охлаждение по изохорам — остановку поршня в ВМТ и НМТ.

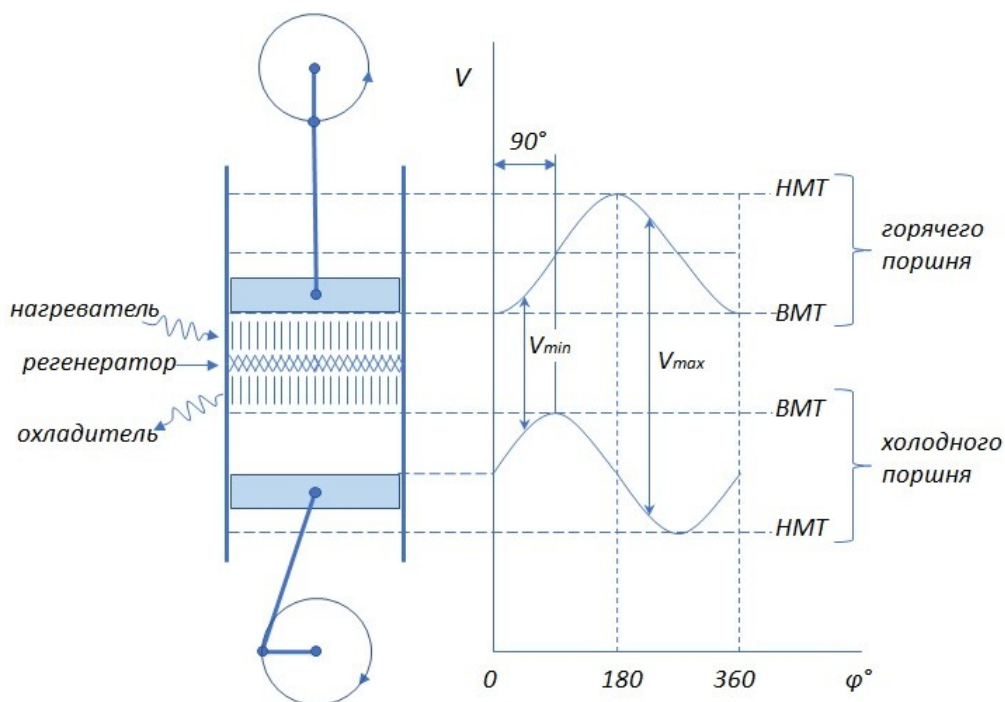
В целях повышения экономичности двигатели Стирлинга снабжают регенераторами — «экономайзерами». По схеме, показанной на рис. 2, регенератор, состоящий из нескольких слоев металлической сетки, установлен на вытеснителе. При его движении вверх регенератор нагревается газом, перетекающим сверху вниз; при движении вытеснителя вниз регенератор отдает запасенное тепло охлажденному газу, перетекающему в противоположном направлении. В диаграммах  $p$ - $V$  и  $T$ - $S$  (рис. 3) это соответствует передаче тепла от изохоры  $ba$  к изохоре  $cz$ ; при теоретически максимальной степени регенерации  $\sigma = 1$  КПД расчетного цикла будет равен КПД цикла Карно между  $T_z = T_b = T_{\max}$  и  $T_a = T_c = T_{\min}$ . Для быстроходных двигателей Стирлинга расчетные процессы сжатия и расширения принимают начинающимися по изотермам и заканчивающимися по адиабатам

(пунктирные прямые на T-S диаграмме рис. 3). Работа такого цикла меньше, чем исходного, но КПД без регенерации приближается к КПД цикла Карно.



**Рис. 3.** Термодинамические циклы двигателя Стирлинга с вытеснителем и регенератором.

Схемы двигателей Стирлинга весьма разнообразны. Отметим еще схему Шмидта (рис. 4) с двумя поршнями в одном цилиндре, кинематически напоминающую известную схему двухтактных дизелей фирмы «Юнкерс» и танкового двигателя 5ТД. Нагреватель, регенератор и охладитель расположены последовательно в цилиндре между ВМТ поршней. Они движутся со сдвигом фаз примерно на  $90^\circ$ , как показано на рис. 4. Благодаря этому сдвигу газ в цилиндре не только сжимается, но и переносится вдоль цилиндра. Сжатие газа происходит преимущественно в холодной части цилиндра, расширение – в горячей части, и поэтому работа расширения превосходит работу сжатия. Регенератор служит для уменьшения потерь тепла при перетекании газа от нагревателя к охладителю. Газ, проходящий через нагреватель в сторону охладителя, отдает часть тепла регенератору, который возвращает ее газу при обратном перетекании.



**Рис. 4.** Схема двигателя Стирлинга с двумя поршнями в одном цилиндре (схема Шмидта).

В отличие от обычных двигателей внутреннего сгорания для двигателей Стирлинга характерны:

- инертные рабочие тела (преимущественно водород или гелий, обладающие большими, чем у воздуха, теплоемкостью, соответственно в 14 и 5 раз, и теплопроводностью в 7 и 6 раз; гелий предпочтительнее водорода, который при высоких температурах активно диффундирует сквозь металлы);
- высокие средние и максимальные давления газа в цилиндре (до 100-200 бар), необходимые для получения достаточной удельной работы  $L/G$ , кДж/кг;
- низкие максимальные температуры газа в цилиндре (до 800-900<sup>0</sup>С), ограниченные жаростойкостью нагревателя и условиями теплопередачи;
- практически герметичные цилиндры за счет специальных уплотнений типа пластмассовых сальников или «чулка», и соответственно отсутствие в цилиндрах посторонних примесей;
- малые отношения хода  $S$  поршня к диаметру  $D$  цилиндра ( $S/D \approx 0,5$ );
- «всеядность», возможность работы на любом топливе и от любых источников тепла;
- отсутствие в подавляющем большинстве схем клапанов и других органов газораспределения;
- малошумность;
- высокая надежность, малые износы поршней и цилиндров;
- возможность быстрого перевода двигателя в режим торможения с его превращением в эффективный тепловой насос (нагреватель или холодильник).

Двигатели Стирлинга имеют многочисленные области применения.

Первые маломощные двигатели использовали в начале 20-го века для привода насоса церковного органа и генератора питания радиоприемников голландской фирмы «Филлипс». В настоящее время миниатюрные двигатели Стирлинга с нагревателем от радиоизотопов применяют для медицинских стимуляторов.

Двигатели Стирлинга использовали в качестве судовых с охлаждением забортной водой и предлагают для подводных лодок и торпед. Под водой (и под землей) можно обеспечить отсутствие выпуска газообразных продуктов сгорания в кислороде углеводородных топлив путем конденсации паров воды и химического абсорбирования углекислого газа; при использовании тепла сгорания металлов непосредственно образуются твердые окислы.

Двигатели Стирлинга считают перспективными и разрабатывают для космических аппаратов и станций; нагрев происходит от солнечного рефлектора, охлаждение радиационное в его тени. По сравнению с паровыми и замкнутыми газотурбинными двигателями, космические двигатели Стирлинга оказываются несколько более легкими и надежными.

В применении к наземному транспорту экономические и массогабаритные показатели двигателей Стирлинга близки к показателям дизелей, имея некоторые преимущества в надежности, всеядности, малошумности и экологичности. Интересно предложение использовать для нагрева тепловой аккумулятор с легкоплавкими металлами или солями (например LiF с температурой и теплотой плавления 850<sup>0</sup>С и 900 кДж/кг). В режиме торможения тепло не рассеивается, а возвращается в аккумулятор.

Однако основные автомобильные фирмы в результате многолетних опытно-конструкторских исследований все же отдают предпочтение электрическим двигателям.

Недостатками двигателей Стирлинга считают сложность устройства и расчета, большое время изменения нагрузки, отсутствие решающих преимуществ в показателях и, главное, ясных перспектив их повышения. С другой стороны, множество возможных

кинематических и конструктивных вариантов этих двигателей рассматривают как еще неисчерпанный источник их совершенствования и оптимизации. Известны, например, двигатели с жидким поршнем в сочетании с гидравлическим мотором или компрессором; свободнопоршневые двигатели; комбинированные двигатели с газотурбинным циклом нагрева и охлаждения. Использование новых материалов и технологий, новых элементов конструкции, в частности, тепловых трубок для нагрева и охлаждения, продолжают привлекать изобретателей и исследователей к двигателям Стирлинга.

---

### Список литературы

1. Г.Уокер. Двигатели Стирлинга. Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с. Сокр. Пер. с англ. Б.В. Сутугина и Н.В. Сутугина (Walker G. Stirling Engines / Clarendon Press, Oxford, 1980.).
  2. Г.Ридер, Ч.Хупер. Двигатели Стирлинга. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 464 с.
- 

### АВТОР

**Степанов Георгий Юрьевич** (01.08.1922 – 15.10.2005), доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, почетный член Российской академии естественных наук (РАЕН), действительный член Международной Астронавтической академии, главный научный сотрудник НИИ механики МГУ.

# Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal*  
*International Public Organization*  
*"Integration strategy"*  
<http://maplants-journal.ru>

*//Machines and Plants:Design and Exploiting.*  
2023. № 3. pp. 39 – 44.

DOI:

Received: 09.08.2023

Accepted for publication: 18.08.2023

© International Public Organization "Integration strategy"

## Stirling Engines <sup>2</sup>

**Georgy U. Stepanov**

Moscow, Russian Federation

---

The article briefly provides basic information about the principle of operation, design schemes and thermodynamic cycles of the Stirling engine. Advantages and disadvantages are considered. The predominant areas of application are shown. The article is useful for teachers and students of technical universities.

---

**Keywords:** Stirling engine, heater, cooler, regenerator, displacer, thermodynamic cycle.

---

## References

1. Walker G. Stirling Engines. Translated from English. – M.: Mechanical engineering, 1985. – 408 p.
  2. Reader G., Hooper C. Stirling engines. Translated from English. – M.: Mir, 1986. – 464 p.
- 

## AUTHOR

**Stepanov Georgy Yuryevich** (01.08.1922 – 15.10.2005), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of the RSFSR, honorary member of the Russian Academy of Natural Sciences (RAS), full member of the International Astronautical Academy, chief Researcher of the Institute of Mechanics of Moscow State University.

---

<sup>2</sup> Consent to the publication of the manuscript of the article was given by the copyright holder and the author of the book "About the scientist "tank-cosmonaut" from the Stepanov dynasty. Collection of essays and memoirs" / Authors-compilers: [M.M. Burenkov], V.V. Solomai, [N.I. Troitsky]. – M.: MEGALION, 2017. – 320 p.

# Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание  
МОО «Стратегия объединения»  
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,  
разработка и эксплуатация.

МОО «Стратегия объединения»

Электрон. журн. 2023. № 3. С. 45 – 53.

DOI:

Представлена в редакцию: 09.08.2023

Принята к публикации: 18.08.2023

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 929

## Единственный в мире «танкист-астронавт»<sup>1</sup>

Шашуков В.Н.

[shashvasn@yandex.ru](mailto:shashvasn@yandex.ru)

Москва, Российская Федерация

Статья посвящена жизнеописанию выдающегося ученого, военного инженера и педагога Степанова Георгия Юрьевича - полковника в отставке, доктора физико-математических наук, Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, почетного профессора Военной академии бронетанковых войск имени маршала Советского Союза Р.Я. Малиновского, действительного члена Международной астронавтической академии, почетного члена Российской академии естественных наук, члена президиума Национального комитета по теоретической и прикладной механике Российской академии наук.

Жизненный путь Степанова Г.Ю. – это ориентир бескорыстного служения Отечеству, пример истинного патриотизма, преданности делу. Такими людьми как он должна гордиться страна, и о них должны знать люди.

**Ключевые слова:** турбомашин, газотурбинные двигатели, гидродинамика, отрывные течения.

*Благородное сердце твое -  
словно герб отошедших времен  
(Н. Гумилев «О тебе»)*



Так в шутку называл себя Степанов Георгий Юрьевич – известный ученый в области гидродинамики турбомашин, отрывных и кавитационных течений, родоначальник отечественного танкового газотурбинного двигателя.

На самом деле в этой шутке нет доли шутки. Доктор физико-математических наук, профессор Степанов Г.Ю. по совокупности работ в области газодинамики и теории сверхзвукового сопла, а также по результатам участия в международном астронавтическом конгрессе в Баку в 1988 году был избран действительным членом Международной Астронавтической академии (Париж).

По этому поводу Георгий Юрьевич и замечал в шутку, что «приятно ощущать себя единственным в мире танкистом-астронавтом».

<sup>1</sup> В статье использованы материалы книги «Об ученом «танкисте-астронавте» из династии Степановых. Сборник очерков и Воспоминаний» / Авторы-составители: М.М. Буренков, В.В. Соломай, Н.И. Троицкий. – М.: МЕГАЛИОН, 2017. – 320 с.

Читатель вправе улыбнуться и задать вопрос: что же ещё особенного в этом человеке, и почему о нем надо продолжить рассказ?

Чтобы ответить на этот вопрос надо проследить жизненный путь Георгия Юрьевича.

Корни питают крону. Поэтому следует начать с родословной, которая отсчитывается с начала XVIII века.

Родоначальником фамилии считается Семен Степанов, который был крепостным крестьянином у тверского помещика. По рекрутскому набору он был зачислен в Фанагорийский гренадерский полк. В составе полка солдат Степанов участвовал в сражениях при Фокшанах и Рымнике, штурмовал Измаил. За храбрость и смекалку неоднократно поощрялся лично А.В. Суворовым. В одном из боев получил тяжелое ранение, потерял ногу и вернулся в село.

Во все сражения Семен Степанов брал с собой незатейливую церковную ладанку. Эта ладанка как оберег передавалась от отца к сыну. Сейчас она хранится в семье Степановых, олицетворяя неразрывную связь поколений.

Сын Семена Степанова, Петр, получил эту ладанку, когда был зачислен в гренадеры под суворовские знамена. Он участвовал в Итальянском и Швейцарском походах. Особенно отличился в Отечественной войне 1812 года. Сражался при Бородино, в битве под Лейпцигом и вошел в Париж с армией во главе с Александром I.

За свое геройство солдат Петр Степанов удостоился множества наград, получил обер-офицерское звание и был жалован потомственным дворянством. Став офицером он дослужился до бригадира. Его имя высечено на мраморной доске в Храме Христа Спасителя.

Как гласит семейное предание, за связи с декабристами Петр Семенович подвергся опале и был уволен в отставку.

У него удачно сложилась семейная жизнь, было четыре сына. Каждый пошел своим путем, но Отечеству верой и правдой служили все. Один из них, Василий Петрович, стал прадедом, а его сын – Александр Васильевич, дедом Георгия Юрьевича.

Прадед и дед были людьми уже мирными, как относительно мирным был для России и весь XIX век после изгнания Наполеона.

Но вот наступил 1914 год и теперь уже отцу Георгия Юрьевича, Юрию Александровичу Степанову, пришлось взяться за оружие. Он воевал в районе Западной Двины в минном отряде 12 армии. Будучи на фронте и анализируя боевой опыт, он опубликовал статью, посвященную постановке минных заграждений.

После Февральской революции Юрий Александрович был избран членом, затем председателем Полкового комитета. В ноябре 1917 г. по вызову был откомандирован в Военно-инженерную академию (бывшее Николаевское инженерное училище в Петербурге) для завершения высшего военно-технического образования. После окончания Академии в 1920 году постановлением ученого совета Ю.А. Степанов был оставлен ассистентом механической кафедры для научной работы.



В 1932 году Ю.А. Степанов был переведен в Москву в Военную академию механизации и моторизации РККА. Там он основал первую в стране учебную лабораторию танковых двигателей. На базе лаборатории была образована кафедра, которую Ю.А. Степанов и возглавил, оставаясь ее начальником вплоть до выхода в отставку. Благодаря Юрию Александровичу, еще до войны успели устранить многие дефекты и развернуть серийное производство дизельного двигателя В-2, сыгравшего не последнюю роль в нашей Победе. Кстати, в 1940 году никто не предполагал, что двигатель, установленный на опытном танке Т-34, станет прототипом современных моторов для боевых машин 2000-х годов.

Георгий Юрьевич продолжил дело своего отца. Но по его собственным словам «в общем-то случайно», так как мечтал учиться в МГУ на физфаке.

Однако, как утверждает философия, через случайность реализуется необходимость.



Окончив среднюю школу в предвоенный 1940 год, Георгий Степанов был призван в армию и стал курсантом полковой школы сержантов. Затем в учебном полку освоил специальность радиста-заряжающего танков Т-35 и БТ-7.

В военную годину сержант Степанов, как и его предки, стал на защиту Родины. Осенью 41-го он защищал Москву в районе Яхромы в составе легендарной Панфиловской дивизии. Потом был назначен начальником радиостанции противотанкового истребительного батальона.

В период с октября 1941 по декабрь 1942 года вышел ряд приказов Наркома обороны Сталина о том, чтобы танкистов без техники на фронт не посылать и комплектовать танковые экипажи исключительно средним и младшим командным составом. Во исполнение этих приказов танкист Степанов получил назначение на краткосрочные офицерские курсы.



Там были замечены его исключительные математические способности, и Георгий Степанов был откомандирован для поступления в Военную академию бронетанковых и механизированных войск Красной Армии (бывшую Военную академию механизации и моторизации РККА и будущую Военную академию бронетанковых войск), слушателем инженерного факультета которой он стал в 1943 году.



В декабре 1946 года инженер-лейтенант Георгий Степанов с золотой медалью окончил полный курс Военной Академии и был зачислен в адъютантуру.

С этого момента, как и в 41-м, Георгий Юрьевич снова на передовой, только теперь – это передний край науки и техники.

Его первая научная статья, опубликованная в 1946 году в журнале «Вестник танковой промышленности», была посвящена применению газотурбинного двигателя для танка и стала первой в стране научной публикацией на эту тему. Есть все основания полагать, что именно эта статья пробудила интерес к газотурбинным двигателям у главного конструктора Кировского завода Жозефа Яковлевича Котина.



Научным руководителем адъютанта Степанова согласился стать выдающийся ученый профессор Владимир Васильевич Уваров. В то время он был начальником отдела газовых турбин в ЦИАМ и предложил Георгию Юрьевичу выполнять диссертационную работу там.

Это предложение не было случайным. Знакомство Уварова и Степанова состоялось, когда Георгий Юрьевич завершал обучение в Академии. По словам Георгия Юрьевича, проблему создания танкового газотурбинного двигателя, как тему дипломного проекта, ему подсказал начальник научно-

исследовательского отдела Академии Л.С. Давидович. А профессор кафедры двигателей М.А. Хайлов уговорил профессора МВТУ В.В. Уварова руководить работой дипломника. М.А. Хайлов и В.В. Уваров были хорошо знакомы по совместной работе в ученом совете Центрального института авиационных моторов (ЦИАМ). Эта деталь свидетельствует об очень высоком научном уровне профессорско-преподавательского состава Военной Академии и ее авторитете в промышленности.

Уваров согласился при условии, что Степанов прослушает его лекции по гидрогазодинамике и газовым турбинам. Эти лекции произвели на вольнослушателя

Степанова очень сильное впечатление, поскольку отличались неформальным изложением, теоретической глубиной, постановкой новых научных задач и даже острыми критическими замечаниями в адрес признанных авторитетов. Вероятно, именно тогда определилось главное направление будущей научной деятельности Георгия Юрьевича.

К установленному сроку дипломник представил своему наставнику для рассмотрения и утверждения расчетно-теоретические разработки и продольный разрез запроектированного двигателя.

Талант и высочайшая работоспособность дипломника Степанова не остались незамеченными. В качестве поощрения Уваров познакомил Степанова со своим учителем, основателем отечественной школы специалистов по теории и конструированию двигателей внутреннего сгорания Николаем Романовичем Брилингом. Брилинг положительно оценил работу Степанова и предложил опубликовать ее результаты. Так появилась выше упомянутая статья, давшая импульс новому направлению в танкостроении, а ее автора стали считать родоначальником отечественного газотурбинного танкового двигателя.

Развитие турбостроения в то время сдерживалось нерешенной проблемой профилирования турбинных решеток. От ее решения зависела технологическая независимость страны. Отдел Уварова в ЦИАМ активно работал по этому направлению, и адъюнкт Степанов был подключен к этим работам. Поэтому тема кандидатской диссертации Георгия Юрьевича так и называлась «Исследование турбинных решеток».

Под руководством Уварова была выполнена обширная программа экспериментальных исследований, результаты которых вошли в первый атлас турбинных решеток ЦИАМ.

В соавторстве с коллегой из ЦИАМ был разработан принципиально новый, как сказали бы сейчас, прорывной метод применения электрогидродинамической аналогии, использующий аналоговую ЭВМ в виде электролитической ванны. Этот относительно простой метод оказался на несколько порядков точнее других известных методов и был сразу же применен для построения решеток с рациональным профилем.

Все эти результаты вошли в диссертацию Г.Ю. Степанова, которая была успешно защищена в 1951 году.



В последующие годы Г.Ю. Степанов продолжил работу в ЦИАМ (по совместительству). Под его руководством по вышеуказанному методу было построено более ста профилей турбинных решеток для всех отечественных воздушно-реактивных двигателей 2-го и 3-го поколений. Построенные решетки после их экспериментальной проверки вошли в атласы турбинных профилей и в отраслевые рекомендации.

До появления общедоступных цифровых ЭВМ метод Степанова оказался первым и единственным методом, решающим достаточно быстро и точно задачу построения эффективных профилей реальных решеток турбин.

Здесь уместно привести слова Г.Ю. Степанова, которые особенно актуальны в настоящее время: *«мне грустно смотреть на наше промышленное отставание от Запада – ведь нет ничего такого, что мы не смогли бы сделать своими руками, причем не хуже, чем у них. Удивительно, с какой легкостью у нас покупают целые заводы за границей за валюту и не могут найти рублей для настоящей, а не символической оплаты труда отечественных инженеров.»*

В.В. Уваров с одобрением следил за деятельностью своего ученика и его публикациями по гидродинамике и механике. После выхода в свет одной из них Степанов с благодарностью написал Уварову: *«Направлением моей научной деятельности и успехом ее первого этапа я в большой степени обязан Вам, моему руководителю и учителю. У Вас я*

*учился уважению к точной науке, умению в инженерной и экспериментальной работе, равно ироническому отношению к успехам и неудачам, прямоте в отношениях с людьми.»*

В 1951 году Г.Ю. Степанов стал доцентом и штатным преподавателем Академии, где проявился его уникальный педагогический талант. Он настолько просто, доходчиво и увлекательно излагал сложный материал, что не усвоить его было не возможно. Слушатели Академии называли его между собой не иначе как «Г.Ю.» Это было высшим проявлением уважения и почитания преподавателя.

Успехи в учебно-воспитательной и научной работе стали основанием для назначения Г.Ю. начальником кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. А начиная с 1977 года вплоть до увольнения из Вооруженных сил в 1983 году, он возглавлял кафедру двигателей Академии, которая была основана его отцом – Юрием Александровичем Степановым.

В этот период под руководством Г.Ю. выросла целая плеяда талантливых ученых, которые в дальнейшем составили костяк кафедры двигателей и сохранили ее традиции.



На стенде с газотурбинным двигателем  
В центре: *Степанов Г.Ю.*; второй ряд (слева направо): *Иванов И.Е.*,  
*Журкин В.Б.*, *Богданов С.Н.*

Выйдя в отставку с военной службы, Георгий Юрьевич не оставил учебно-научную деятельность на кафедре Академии, совмещая ее, как и ранее, с научной работой в других организациях.

Еще в 50-е годы, работая в ЦИАМ, Георгий Юрьевич познакомился с выдающимся ученым, академиком Леонидом Ивановичем Седовым, который пригласил его участвовать в семинаре по актуальным вопросам механики жидкости и газа, проводимом в МГУ имени М.В. Ломоносова.

По рекомендации Л.И. Седова Г.Ю. прочитал на кафедре гидромеханики спецкурс по решеткам турбин, которыми в МГУ после Н.Е. Жуковского не занимались. Для иностранных студентов Г.Ю. читал лекции на немецком языке, которым свободно владел.

Так на новом витке философской спирали сбылась юношеская мечта Георгия Степанова. Однако теперь он был не студентом, а преподавателем.

В 1958 году в Институте механики АН СССР Георгий Юрьевич защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

В том же году была издана его монография «Основы теории лопаточных машин, комбинированных и газотурбинных двигателей», в 1962 году - монография «Гидродинамика решеток турбомашин». Эти две книги стали настоящими научными бестселлерами и по утверждению специалистов актуальны по сей день.

С 1963 года началась научная деятельность Г.Ю. Степанова в Институте механики МГУ, которая продолжалась до последних дней его жизни.

Особо важным для практики, стал цикл работ по методам теоретического описания и приближенного расчета турбулентных отрывных и кавитационных течений, возникающих при высокоскоростном обтекании тел. Результаты этих исследований позволили с единых позиций описать калейдоскоп наблюдаемых эффектов и определить возможность управления ими. Достигнутый в этой сложнейшей области гидродинамики прогресс описан в двух монографиях. В дальнейшем центр тяжести научных исследований, проводимых под руководством Г.Ю. Степанова, сместился в сторону способов организации отрывных течений для достижения заданного результата, что нашло отражение в журнальных публикациях.

В Институте механики МГУ Георгий Юрьевич сформировал научное направление по изучению распределения скоростей газа в каналах и диффузорах различной формы. Он считал, что данное направление имеет фундаментальное значение для профилирования плоских и осесимметричных диффузоров, крыловых профилей перспективных летательных аппаратов, высокоэффективных решеток турбомашин. Заложенные Степановым теоретические основы развиваются группой исследователей в НИИ механики МГУ.



В лаборатории гиперзвуковых скоростей НИИ механики МГУ (1984 год)

Слева направо: Чернышенко С.И., Степанов Г.Ю.

Георгий Юрьевич гармонично сочетал в себе таланты инженера и математика. Для него техника была нескончаемым источником задач, а математика – могучим инструментом их решения, которым он владел в совершенстве.

Благодаря этим качествам, он плодотворно сотрудничал с конструкторскими бюро и предприятиями промышленности. Длительное время осуществлял научную координацию разработок в области танкового двигателестроения. Лично был хорошо знаком с выдающимися главными конструкторами двигателей и бронетанковой техники: Чаромским Алексеем Дмитриевичем, Траштутиным Иваном Яковлевичем, Бутовым Владимиром Ивановичем, Астровым Николаем Александровичем, Котиным Жозефом Яковлевичем, Поповым Николаем Сергеевичем.

Продолжительный период времени Г.Ю. Степанов работал во Всероссийском научно-исследовательском институте транспортного машиностроения (ВНИИТМ) в рамках договора о творческом содружестве с Академией. Часто бывал на Кировском заводе по вопросам создания и эксплуатации танкового газотурбинного двигателя. Также он сотрудничал с Институтом проблем механики РАН, Институтом гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, МВТУ имени Н.Э. Баумана, ЦАГИ имени Н.Е. Жуковского, Казанским и Чебоксарским университетами.

Невозможно переоценить роль живого общения с Г.Ю. в становлении многих ученых, инженеров и военных специалистов. Он обладал уникальной способностью кратко излагать суть проблемы и задать именно тот единственный вопрос, который проясняет задачу. Эта способность не раз позволяла ученикам Г.Ю. отодвигать границы непознанного и расширять область знаний.

Под его научным руководством выполнено 9 докторских и 27 кандидатских диссертаций. Большое число кандидатских и докторских диссертаций в разных городах страны защищено при активном участии Г.Ю. в качестве оппонента. Общеизвестная требовательность и принципиальность Г.Ю. Степанова служили гарантией высокого научного уровня как диссертации, так и диссертанта.

В результате своей инженерно-научной деятельности и воспитания плеяды талантливых учеников Г.Ю. стал лидером официально признанной научной школы «Исследование проблем создания и совершенствования силовых установок вооружения и техники Сухопутных войск», основателем которой по праву является его отец – Юрий Александрович Степанов.

Не только выдающиеся научные результаты принесли широкую известность Г. Ю. Степанову. Его отличали энциклопедическая образованность, глубина и ясность мысли, умение отчетливо донести эту мысль до собеседника, готовность дать научную консультацию. Присущая Георгию Юрьевичу доброжелательность к людям замечательно сочеталась с объективной строгостью его оценок научных работ.

В силу этих качеств Г.Ю. Степанова постоянно привлекали для экспертиз, редактирования трудов и документов.

Поражает его неутомимость в общественно-научной работе. Вот только часть выполняемых им функций: член президиума Национального комитета по теоретической и прикладной механике РАН; член Бюро научного совета по механике жидкостей и газов (МЖГ) РАН; заместитель председателя экспертного совета ВАК по математике и механике; председатель комиссии по гидромеханике Комитета научно-технической терминологии РАН; член диссертационных советов Академии, механико-математического факультета МГУ, Института проблем механики РАН; член военно-научного общества при ЦДСА.

Георгий Юрьевич много сил отдавал редакционно-издательской деятельности. Он был членом редколлегий ряда ведущих журналов по механике: «Известия РАН», серия «Механика жидкости и газа»; «Успехи механики»; сборник «Механика» издательства «Мир»; «Прикладная математика и механика». Под его научной редакцией опубликовано 13 книг.

Заслуги Г.Ю. Степанова перед страной отмечены орденами Красной Звезды и Трудового Красного Знамени, 16 медалями СССР и России, нагрудным знаком Министерства обороны Российской Федерации «За создание бронетанкового вооружения и техники».

За свою научную деятельность Г.Ю. Степанов удостоен званий «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР» и «Почетный член Российской академии естественных наук (РАЕН). Ему присуждена медаль имени Петра Леонидовича Капицы и почетный знак

Президиума РАЕН «За заслуги в развитии науки и экономики России». Это очень редкий и почетный знак - практически орден в виде Святого Георгия. Степанов Г.Ю. очень дорожил им и не забывал его носить.

Георгий Юрьевич ушел из жизни 15 октября 2005 года в возрасте 83-х лет. Его прах покоится на Новодевичьем кладбище рядом с отцом – Юрием Александровичем Степановым.

Все, кому посчастливилось знать Георгия Юрьевича и общаться с ним, испытывали побуждение стать лучше, стремиться познать истину, следовать идеалам добра и справедливости.

В нем восхищали обширные познания в литературе, истории, философии, изобразительном искусстве, архитектуре.

Его отличали необычайная честность, скромность, порядочность высочайшее благородство и широта души.

Жизненный путь Георгия Юрьевича – это ориентир бескорыстного служения Отечеству, истинного патриотизма, преданности делу.

«Природа-мать! Когда б таких людей ты иногда не посылала миру, заглохла б нива жизни...» (добавлю к строкам Н.А. Некрасова) и науки.

---

#### АВТОР

**Шашуков Василий Николаевич**, кандидат технических наук, [shashvasn@yandex.ru](mailto:shashvasn@yandex.ru), Москва, Российская Федерация.

# Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal  
International Public Organization  
“Integration strategy”  
<http://maplants-journal.ru>*

*//Machines and Plants:Design and Exploiting.  
2023. № 3. pp. 45 – 53.*

DOI:

Received: 09.08.2023

Accepted for publication: 18.08.2023

© International Public Organization “Integration strategy”

## The world's only "tanker astronaut" <sup>2</sup>

Vasily N. Shashukov

[shashvasn@yandex.ru](mailto:shashvasn@yandex.ru)

Moscow, Russian Federation

---

The article is devoted to the biography of the outstanding scientist, military engineer and teacher Stepanov Georgy Yuryevich - retired colonel, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the RSFSR, honorary Professor of the Military Academy of Armored Forces named after Marshal of the Soviet Union R.Y. Malinovsky, full member of the International Astronautical Academy, honorary member of the Russian Academy of Natural Sciences, member of the Presidium The National Committee for Theoretical and Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences.

The life path of Stepanov G.Yu. is a landmark of selfless service to the Fatherland, an example of true patriotism, dedication to the cause. The country should be proud of people like him, and people should know about them.

---

**Keywords:** turbomachines, gas turbine engines, hydrodynamics, rip currents.

---

### AUTHOR

Vasily N. Shashukov, Ph.D., [shashvasn@yandex.ru](mailto:shashvasn@yandex.ru), Moscow, Russian Federation

---

<sup>2</sup> The article uses materials from the book "About the scientist "tank-astronaut" from the Stepanov dynasty. Collection of essays and Memoirs" / Authors-compilers: M.M. Burenkov, V.V. Solomai, N.I. Troitsky. – M.: MEGALION, 2017. – 320 p.