

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова



# МОЛОДЕЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС

Труды X Общероссийской молодежной  
научно-технической конференции

Том 1

18 – 20 апреля 2018 года, Санкт-Петербург, Россия

Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 49

Санкт-Петербург  
2018

УДК 623.46: 629.78

M75

M75

**Молодежь. Техника. Космос:** труды X Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. Т.1/ Балт. гос. техн. ун-т. – СПб.; 2018. – 467 с. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 49).

ISBN 978-5-907054-31-8

ISBN 978-5-907054-32-5

Представлены статьи и доклады участников X Общероссийской научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», которая прошла 18 – 20 апреля 2018 года в БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург).

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой объектов ракетно-космической техники и аэрокосмических технологий, созданием различных систем вооружения, исследованиями в области информационных технологий, а также с историей ракетно-космической техники и вооружения.

Отзывы направлять в БГТУ «Военмех» по адресу: Россия, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1. Редакция журнала «Военмех. Вестник БГТУ».

УДК 623.46: 629.78

Редакционный совет: д-р техн. наук, проф. *К. М. Иванов*, д-р техн. наук, проф. *В. А. Бородавкин*,  
канд. техн. наук, доц. *А. А. Левитин*, ст. преп. *К. А. Афанасьев*, доц. *М. Н. Охочинский*,  
ст. преп. *С. А. Чирков*, *А. В. Побелянский*

Ответственный редактор серии  
«Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»  
М.Н. Охочинский

Материалы опубликованы в авторской редакции

Подписано к печати 25.06.2018. Формат бумаги 60×84 1/8.  
Бумага офсетная. Усл.-печ. л. 58.375. Тираж 130 экз. Заказ № 28  
Балтийский государственный технический университет «Военмех»  
Типография ООО «Издательство ИНФО-ДА»  
С.-Петербург, Столярный пер., д. 10/12

ISBN 978-5-907054-31-8  
ISBN 978-5-907054-32-5

© БГТУ «Военмех», 2018  
© Авторы, 2018

ТАРЕЙ НАУЧНО-МЕЖДУНАРОДНОЙ	80	Ю. Д. Трушников, Н. А. Брыков МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ГАЗОДИНАМИКИ РДТТ С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ОСНОВНОГО КАНАЛА ЗАРЯДА	136
	83	А. Ю. Усс РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ВИХРЕВОГО ТИПА	139
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ	86	А. А. Черення, В. В. Бутко, М. Н. Охочинский МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОПЛА ПЕРЕМЕННОЙ СТЕПЕНИ РАСШИРЕНИЯ	146
Х СКОРОСТЯХ	92	П. С. Чернышов МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ	153
И	97	А. Г. Черняев БОРТОВАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛЬЮ РАКЕТЫ	155
СИХ АППАРАТОВ	100	Е. А. Шангина, Ю. В. Максимов, В. Е. Патраев УТОЧНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ, В КОТОРОЙ ПРИМЕНЯЮТСЯ ЛЕТНЫЕ ПАРТИИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ, ПРОШЕДШИЕ ВЫБОРОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ДОЗОВЫЕ ЭФФЕКТЫ	164
КЛАССА	104	А. А. Шибаева ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТИ СТАРТА БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ РАКЕТЫ С БОЛЬШОЙ ГЛУБИНЫ	167
МЕХАНИЧЕСКОГО	107	М. В. Шиврин ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХСЛОЙНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ С ПЕНОПЛАСТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ШПАНГΟΥТ	171
РИЕНТИРУЮЩИХ	111	О. Я. Яковлев, В. И. Ермолаев МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХРЕЖИМНОГО СПОСОБА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	176
	113	М. Я. Яковлев, В. И. Ермолаев ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ	180
	115	СЕКЦИЯ №2. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АВИА- И РАКЕТОСТРОЕНИИ	184
	119	В. Д. Аникина КОНСТРУКЦИЯ МНОГОХОДОВОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕАКТОРА	184
О АППАРАТА С	122	Е. М. Афанасьева, В. М. Романов, М. М. Соловейчик, Г. Е. Чернов ПЛАЗМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ VASIMR	186
УЛИСТИЧЕСКИХ	126	И. А. Бурдейный ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РУЛЕНИЯ ВС	188
О.	126	А. А. Бобров, А. Ю. Усачёва, А. В. Побелянский АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦА, ВЫПОЛНЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ	191
ГОПОДВОДОМ В	132	Н. М. Верецагин РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ПАРОГАЗОГЕНЕРАТОРА	197

плотности  
и скорость  
ую энергии  
тимальные

3а) можно  
е травления  
ты.  
у спеканию  
и прочности  
и является  
гезируемыми

нием.

ция. На снимке  
ю от дефектов,

й твердостью: она  
химический состав  
-11,2% (по массе),  
массе), содержание  
ма 0,3% (по массе),  
ержание серы 0,01%

структура исходных  
кристаллов. В ходе  
и, микроструктурная

неоднородность, расслоения. На процесс изготовления деталей методом СЛС влияет множество факторов. Некоторые из них определяются основными свойствами порошковых композиций. К управляющим факторам можно отнести технологические режимы процесса СЛС, скорость сканирования, мощность лазерного излучения, шаг сканирования, тип штриховки лазерным лучом, которые и подбираются для получения качественных деталей.

#### Библиографический список

1. Рудской А.И. Аддитивные технологии: учебное пособие / А.И. Рудской, А.А. Попович, А.В. Григорьев, Д.Е. Каледина. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016.
2. Сотов А.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления жаровых труб ГТД методом селективного лазерного сплавления». – 2018. С. 111-125.
3. Huang, Q. Microstructure and inclusion of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting / Q. Huang, N. Hu, X. Yang, R. Zhang, Q. Feng // Frontiers Mater. Sci. – 2016. – V. 10 (4). – P. 428 – 431.
4. Popovich, V.A. Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties / V.A. Popovich, E.V. Borisov, A.A. Popovich, V.Sh. Sufliarov, D.V. Masaylo, L. Alzina // Materials & Design. – 2017. – V. 114. – P. 441 – 449.
5. Arisoy, Y.M. Influence of scan strategy and process parameters on microstructure and its optimization in additively manufactured nickel alloy 625 via laser powder bed fusion / Y.M. Arisoy, L.E. Criales, T. Özel, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez // Int. J. Adv. Manuf. Technology. – 2017. – V. 90. – P. 1393 – 14.
6. Rolls-Royce breaks additive record with printed Trent-XWB bearing [Электронный ресурс]. - <https://www.theengineer.co.uk/issues/june-2015-digiissue/rolls-royce-breaks-additive-record-with-printed-trent-xwb-bearing>.

УДК 62-978

### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ПАРОГАЗОГЕНЕРАТОРА

*Н. М. Верещагин*

*Научный руководитель: старший преподаватель Г.Б. Савченко*

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова*

Целью работы было провести обзор существующих способов повышения эффективности ГТУ, разработать новую схему на основе трехкомпонентного газогенератора и провести анализ ее эффективности.

Газотурбинные установки (двигатели) нашли широкое применение в авиации, в гражданской энергетике, а так же в качестве силовых узлов двигателей кораблей, как альтернатива дизель-электрическим и атомным. Они достаточно простые в устройстве (возможен модульный принцип компоновки) и эксплуатации, быстро вводятся в работу. В мире и в России, в том числе, инженеры и ученые тратят много сил и времени на разработку методов повышения эффективности газотурбинных установок.

Известны следующие способы повышения эффективности ГТУ [1]:

- форсирование параметров цикла;
- усложнение термодинамического цикла;
- впрыск воды, водяного пара в проточную часть ГТУ.

Главный способ форсирования параметров – повышение значений степени сжатия компрессора и степени подогрева.

Рост температуры газа при фиксированном значении степени сжатия осуществляется с малым увеличением мощности и КПД, в то время как значительное повышение температуры газа перед турбиной должно сопровождаться увеличением степени сжатия. Но реализация такого метода имеет ограничение по свойствам материала лопаток турбины, и как следствие, невозможность освоения в нынешних условиях.

Усложнение термодинамического цикла осуществимо с уменьшением температуры газов, покидающих ГТУ (при условии существования пороговой температуры в КС, ограниченной прочностью материалов двигателя). Один из способов – повышение степени сжатия в компрессоре и

степени расширения в турбине с введением изменений в конструкцию базового ГТД, что потребует дополнительных материальных затрат. Рассмотрим основные методы:

1. Повышение температуры воздуха перед камерой сгорания за счет использования тепла выхлопных газов реализуется в теплообменнике за компрессором. Некоторая часть теплоты, ранее сбрасываемая с отработавшим рабочим телом в атмосферу, полезно используется для подогрева воздуха перед КС. Это позволяет экономить топливо на подогрев топливо-воздушной смеси. Такой способ можно использовать в случае, когда температура продуктов сгорания за турбиной больше температуры воздуха после компрессора. Введение такой регенерации не изменяет внутренний КПД цикла, а внутренний КПД установки возрастает [2]. Однако такой метод может привести к значительному усложнению конструкции, увеличению громоздкости, уменьшению ресурса, ухудшению эксплуатационных характеристик.

2. Промежуточное охлаждение при сжатии используется в ГТУ с регенератором. В реальной регенеративной ГТУ охлаждение в процессе сжатия в компрессоре повышает КПД установки. Введение регенерации в ГТУ снижает отрицательный эффект охлаждения воздуха в процессе сжатия. Для простейшей ГТУ получено, что, несмотря на неэкономичность охлаждения при сжатии для идеального цикла, для действительного охлаждения экономически целесообразно при низких КПД узлов [3]. Недостатками этого метода являются сложность конструкции, невысокая надежность, малый ресурс. Не подойдет для больших энергоустановок.

3. Промежуточный подогрев рабочего тела при расширении реализуется в ГТУ с регенератором. Подвод теплоты в процессе расширения повышает среднюю температуру рабочего тела и за счет этого увеличивает работу процесса расширения и цикла в целом. При объединении процессов подвода тепла и расширения получается получить общий политропный процесс, при котором происходит наибольшее увеличение работы. Данный процесс можно осуществить при сжигании топлива в проточной части турбины. Топливо при этом может поступать, например, через форсунки, которые будут находиться в сопловом аппарате, или же через выходные кромки сопловых лопаток. Попадание топлива на рабочие лопатки способствует их охлаждению. И это может обеспечить неизменную или даже пониженную температуру материала лопаток, в то время как температура газа в турбине увеличится. Недостатками станут: усложнение конструкции, эффективное применение при степени повышения давления выше (5...6), необходимость в увеличении расхода воздуха, что повлечет за собой увеличение потерь на собственные нужды установки (компрессор).

Повышение КПД одноконтурных ГТУ, созданных на базе авиационных ГТД возможно за счет:

- уменьшения радиальных зазоров;
- уменьшения расхода охлаждающего воздуха в газогенераторе за счет применения топливо-воздушных теплообменников.

В данной работе рассматривается третий способ и предлагается конкретная схема реализации. Компоненты топливной смеси, т.е. воздух и горючее (керосин) подаются в камеру сгорания в соотношении, близком к стехиометрическому. Соотношение между компонентами характеризуется специальным коэффициентом  $\alpha$  (коэффициент избытка окислителя:  $\alpha = \frac{K_m}{K_m^0}$ , где  $K_m$  — массовое соотношение компонентов,  $K_m^0$  — стехиометрическое соотношение компонентов). При стехиометрическом соотношении ( $\alpha = 1$ ) уменьшаются затраты на собственные нужды, вроде компрессора, поскольку расход воздуха будет значительно меньше и увеличиваются энергетические параметры газа (температура). Камера сгорания представляет собой охлаждаемую конструкцию. Чем ближе соотношение к стехиометрическому, тем выше температура в КС, в результате чего при  $\alpha$  близком к 1 воздух уже не может эффективно охлаждать ее стенки. Поэтому такие камеры сгорания охлаждаются проточной водой по межстеночному пространству. Организация охлаждения, в целом, аналогична регенеративному охлаждению КС и ГГ ЖРД, т.к. вода охлаждения за камерой сгорания впрыскивается в полость ВТР. В результате температура получаемого парогаса соответствует допустимой температуре, определяемой жаростойкостью турбинных лопаток. Использование такой схемы позволяет отказаться от котла, что повышает безопасность и мобильность установки. За счет добавления воды, которая впоследствии преобразуется в пар, в испарительной камере в газовый поток удастся повысить энергетический потенциал смеси и снизить температуру перед лопатками турбины.

Технически это можно реализовать следующим образом: компрессор оставляем без изменений. Меняем параметры работы и конструкцию узла камеры сгорания. В стенках такой камеры по принципу «труба в трубе» делаем полость для воды, которая затем будет подаваться в испарительную камеру, а дальше смесь пара и газа проходит через смесительную камеру для получения максимального уровня однородности рабочего тела. Поскольку рабочее тело будет иметь параметры.

отличные от обычного газа, получаемого в ГТД, конструкция турбины так же изменяется (диск и лопатки первой ступени, а так же лопатки последующих ступеней).

Таким образом, удается совместить такие положительные моменты двух установок, как мобильность и высокая энергетика. Устраняются большие потери на собственные нужды, и повышается безопасность в виду отсутствия котла. Недостатками такой установки станут: необходимость водоподготовки.

Для оценки эффективности той или иной схемы можно использовать различные методики. Оценка экономической эффективности может быть проведена по различным признакам. Конкретно в данной работе оценивается изменение удельной мощности установки в расчете на 1 кг горючего. Эффективность выраженная в денежном эквиваленте будет естественно ниже, т.к. для её оценки необходимо учитывать ряд других параметров, например стоимость воды, эксплуатации дополнительных элементов установки и др.

Для проведения оценки вводится ряд допущений:

- КПД всех узлов принимается равным 1, в целях упрощения оценки;
- Процессы сжатия в компрессоре и расширения на турбине считаем адиабатными;
- Теплообменом через стенку между потоком газа и водой пренебрегаем;
- Конденсированная фаза отсутствует;
- Считаем, что теплообмен между водой/паром и газом на участке смешения происходит до достижения температурного равновесия.

В системе уравнений оценивать будем балансовые характеристики, т.е. расход компонентов и мощность.

Ниже приведена система уравнений, по которой проводилась оценка:

1. Удельная мощность на валу турбины, Вт/кг:

$$N_{уд} = N_{т}^{уд} - N_{к}^{уд} - N_{нв}^{уд} - N_{нг}^{уд}$$

$N_{т}^{уд}$  – удельная мощность турбины, Вт/кг;  $N_{к}^{уд}$  – удельная мощность компрессора воздуха, Вт/кг;  $N_{нв}^{уд}$  – удельная мощность насоса воды, Вт/кг;  $N_{нг}^{уд}$  – удельная мощность насоса горючего, Вт/кг.

2. Удельная мощность турбины:

$$N_{т}^{уд} = f(m_{пг}; R_{пг}; n_{пг}; T_{т}; \pi_{т}) = N_{т}/m_{г} = \frac{m_{пг}}{m_{г}} \frac{n_{пг}}{n_{пг} - 1} R_{пг} T_{т} \left[ 1 - (\pi_{т})^{\frac{n_{пг}-1}{n_{пг}}} \right]$$

$N_{т}$  – мощность турбины, Вт;  $m_{пг}$  – масса парогаса, кг;  $m_{г}$  – масса горючего, кг;  $R_{пг}$  – газовая постоянная парогаса, Дж/кг\*К;  $n_{пг}$  – показатель адиабаты;  $T_{т}$  – температура рабочего тела на турбине, К;  $\pi_{т}$  – перепад давления на турбине.

3. Удельная мощность компрессора воздуха:

$$N_{к}^{уд} = f(m_{ок}; R_{ок}; n_{ок}; \pi_{к}) = N_{к}/m_{г} = \frac{m_{ок}}{m_{г}} \frac{n_{ок}}{n_{ок} - 1} R_{ок} T_{0} \left[ (\pi_{к})^{\frac{n_{ок}-1}{n_{ок}}} - 1 \right]$$

$N_{к}$  – мощность компрессора, Вт;  $m_{ок}$  – масса воздуха, кг;  $K_m$  – массовое соотношение компонентов топлива;  $R_{ок}$  – газовая постоянная воздуха, Дж/кг\*К;  $n_{ок}$  – показатель адиабаты;  $T_{0}$  – температура окислителя перед компрессором, К;  $\pi_{к}$  – перепад давления на компрессоре.

4. Температура воздуха за компрессором:

$$T_1 = T_0 \left( \frac{p_{вых}}{p_{вх}} \right)^{\frac{n_{ок}}{n_{ок}-1}}$$

$T_1$  – температура окислителя на входе в камеру сгорания, К;  $p_{вых}$  – давление на выходе из компрессора, Па;  $p_{вх}$  – давление на входе в компрессор, Па.

5. Удельная мощность насоса воды:

$$N_{нв}^{уд} = f(m_{в}; \rho_{в}; \Delta p_{нв}) = N_{нв}/m_{г} = \frac{m_{в}}{m_{г}} \frac{\Delta p_{нв}}{\rho_{в}}$$

$N_{нв}$  – мощность насоса воды, Вт;  $m_{в}$  – масса воды, кг;  $\rho_{в}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta p_{нв}$  – разность давлений на насосе воды, Па.

6. Удельная мощность насоса горючего:

$$N_{нг}^{уд} = f(\rho_{г}; \Delta p_{нг}) = N_{нг}/m_{г} = \frac{\Delta p_{нг}}{\rho_{г}}$$

$N_{нг}$  – мощность насоса горючего, Вт;  $\Delta p_{нг}$  – разность давлений на насосе горючего, Па;  $\rho_{г}$  – плотность горючего, кг/м<sup>3</sup>.

7. Масса газа в камере сгорания:



$$m_{\text{кс}} = m_{\text{г}} + m_{\text{ок}} = m_{\text{г}}(1 + K_m)$$

8. Масса парогаса:

$$m_{\text{пг}} = m_{\text{кс}} + m_{\text{в}} = m_{\text{г}} + m_{\text{ок}} + m_{\text{в}}$$

9. Уравнение теплового баланса для камеры сгорания на участке смешения:

$$m_{\text{кс}} C_p^{\text{кс}} (T_{\text{кс}} - T_{\text{г}}) = m_{\text{в}} C_p^{\text{в}} (T_{\text{кип}} - T_0) + m_{\text{г}} r + m_{\text{в}} C_p^{\text{пар}} (T_{\text{г}} - T_{\text{кип}})$$

$C_p^{\text{кс}}$  – удельная теплоемкость газа в камере сгорания, Дж/кг\*К;  $T_{\text{кс}}$  – температура газа в камере сгорания, К;  $C_p^{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды при нормальных условиях, Дж/г\*К;  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения воды, К;  $T_0$  – начальная температура воды, К;  $r$  – теплота фазового перехода, Дж/кг;  $C_p^{\text{пар}}$  – удельная теплоемкость водяного пара, Дж/кг\*К.

Из этого уравнения следует отношение массы воды к массе газа в камере сгорания:

$$\frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{кс}}} = \frac{C_p^{\text{кс}} (T_{\text{кс}} - T_{\text{г}})}{C_p^{\text{в}} (T_{\text{кип}} - T_0) + r + C_p^{\text{пар}} (T_{\text{г}} - T_{\text{кип}})}$$

Преобразуя, получаем отношение массы воды к массе горючего:

$$\frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{г}}} = (1 + K_m) \frac{C_p^{\text{кс}} (T_{\text{кс}} - T_{\text{г}})}{C_p^{\text{в}} (T_{\text{кип}} - T_0) + r + C_p^{\text{пар}} (T_{\text{г}} - T_{\text{кип}})}$$

10. Массовые доли компонентов в составе рабочего тела:

$$g_{\text{в}} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{пг}}}$$

$$g_{\text{кс}} = \frac{m_{\text{кс}}}{m_{\text{пг}}}$$

$$g_{\text{г}} = \frac{m_{\text{г}}}{m_{\text{пг}}}$$

$g_{\text{в}}$  – массовая доля воды в составе парогаса;  $g_{\text{кс}}$  – массовая доля газа в составе парогаса;  $g_{\text{г}}$  – массовая доля горючего в составе парогаса.

11. Характеристики рабочего тела:

$$R_{\text{пг}} = R_{\text{кс}} g_{\text{кс}} + R_{\text{в}} g_{\text{в}}$$

$$n_{\text{пг}} = n_{\text{кс}} g_{\text{кс}} + n_{\text{в}} g_{\text{в}}$$

$$C_p^{\text{пг}} = C_p^{\text{кс}} g_{\text{кс}} + C_p^{\text{в}} g_{\text{в}}$$

$C_p^{\text{пг}}$  – удельная теплоемкость парогаса, Дж/кг\*К;

Расчет производился на режиме  $\alpha = 1,3$ . Для традиционных ГТД значение  $\alpha$  находится в диапазоне (2...2,5). Идеальный режим для ПГТУ –  $\alpha = 1$ , т.е. стехиометрическое соотношение компонентов. Выбор значения несколько больше стехиометрического объясняется стремлением компенсировать расход рабочего тела, который уменьшается следом за уменьшением расхода воздуха. Диапазон давлений в камере сгорания принимается от 0,5 МПа до 2 МПа. Параллельно для сравнения принципиально рассчитывалась ГТУ в том же диапазоне давлений. Масса горючего была принята равной 1 кг.

По результатам расчета получилось, что во всем диапазоне давлений новая схема превосходит традиционную. Результаты приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1. Величина удельной мощности для ПГТУ и ГТУ для разных давлений на входе в камеру сгорания.

$P_{\text{кс}}, \text{МПа}$	$N_{\text{пг}}^{\text{мех}}, \text{МВт/кг}$	$N_{\text{гтд}}^{\text{мех}}, \text{МВт/кг}$
0.5	14.342	11.046
0.6	15.094	11.565
0.7	15.675	11.880
0.8	16.064	12.085
0.9	16.307	12.216
1	16.502	12.314
1.1	16.640	12.340
1.2	16.722	12.342
1.3	16.790	12.326
$P_{\text{кс}}, \text{МПа}$	$N_{\text{пг}}^{\text{мех}}, \text{МВт/кг}$	$N_{\text{гтд}}^{\text{мех}}, \text{МВт/кг}$
1.4	16.825	12.297
1.5	16.829	12.277
1.6	16.857	12.199
1.7	16.809	12.154
1.8	16.815	12.067
1.9	16.755	12.037
2	16.728	11.944

тура газа в камере  
;  $T_{\text{кип}}$  – температура  
сгорания, Дж/кг;  $C_p^{\text{пар}}$  –

ражения:

парогаза;  $g_r$  – массовая

значение  $\alpha$  находится в  
трическое соотношение  
ьяняется стремлением  
шением расхода воздуха,  
раллельно для сравнения  
горючего была принята

новая схема превосходит

и на входе в камеру сгорания.

$N_{\text{ГТУ}}^{\text{мех}}$ , МВт/кг
11.046
11.565
11.880
12.085
12.216
12.314
12.340
12.342
12.326
$N_{\text{ПГТУ}}^{\text{мех}}$ , МВт/кг
12.297
12.277
12.199
12.154
12.067
12.037
11.944

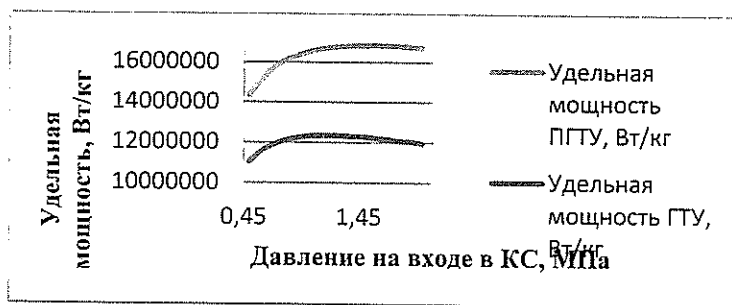


Рис. 1. График изменения удельной мощности ПГТУ и ГТУ

Как видим из данных, у той и другой установки есть свои максимальные значения удельной мощности при определенном давлении: для ГТУ это 12,342 МВт/кг при  $P_{\text{вх}}^{\text{КС}} = 1,2$  МПа, для ПГТУ – 16,857 МВт/кг при  $P_{\text{вх}}^{\text{КС}} = 1,6$  МПа.

Исходя из того, что при одинаковом расходе горючего новая ПГТУ показала выше удельную мощность на выходе, чем традиционная ГТУ, делаем вывод, что новая схема действительно эффективнее.

#### Библиографический список

1. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В., Резник В.Е., Цыбизов Ю.И. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. Самара: СНЦ РАН, 2004. – 266
2. Сениошкин Н. С., Лоскутников А. А. Способы повышения эффективности энергоустановок на базе ГТД // Молодой ученый. 2011. — №7. Т.1. — С. 53-55. URL <https://moluch.ru/archive/30/3496/> (дата обращения: 02.04.2018)
3. Теория и проектирование газотурбинных двигателей и комбинированных установок: Учебник для вузов / Ю.С. Елисеев, Э.А. Манушин, В.Е. Михальцев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 640 с.

УДК 669.713

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛООБМЕННИКА

И. А. Вихрова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова

Теплообменники широко используются в химической, нефтяной, пищевой, фармакологической промышленности в основном для нагрева или охлаждения рабочей среды (жидкость или газ). Кроме непосредственно съема тепла в рабочей среде могут происходить различные физико-химические процессы, определяемые конкретным технологическим процессом.

В настоящей работе рассматривается применение теплообменных аппаратов в технических процессах повышения октанового числа бензина или конверсии метана. Так как прямое моделирование сложной конструкции с множеством элементов (рисунок 1) и учетом всех химических процессов является очень ресурсоемкой задачей, то в работе рассматривается упрощенная модель. В качестве основы берется модель течения в пористой среде.

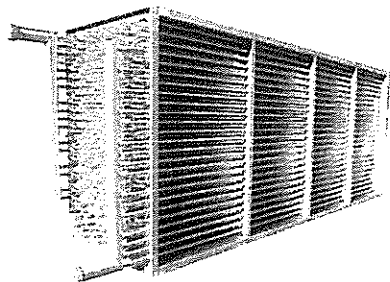


Рис. 1. Пример теплообменника, рассматриваемого в данной работе (Рисунок взят из [1])