

УДК 621.311.238

А.Х. Фам, В.А. Рассохин, К.Д. Андреев

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

A.H. Fam, V.A. Rassokhin, K.D. Andreev

CALCULATIVE INVESTIGATION A THERMAL SCHEME OF THE COMBINED TURBINE FOR ENERGY PLANT OF VIETNAM

Представлено краткое описание трех компьютерных программ расчета тепловых схем газотурбинных и комбинированных энергоустановок: PIGPU, КГПТУ и GateCycle. Для оценки разброса результатов проведены сравнительные расчеты двух комбинированных установок и сделаны выводы о применимости программ. Приведены некоторые результаты расчетного анализа комбинированной установки, предназначенной для энергетической системы Вьетнама. ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА; КОМБИНИРОВАННАЯ УСТАНОВКА; КОТЕЛ-УТИЛИЗАТОР; ПАРАМЕТР; ПОКАЗАТЕЛЬ.

A brief description of three calculation programs for thermal schemes of gas-turbine and combined engines: PIGPU, KGPTU and GateCycle is presented. For estimation of the scatter of results the comparative calculations of two combined plants are carried out and conclusions about the applicability of the programs are made. Some results of computational analysis of combined plant for Vietnam energy system are presented.

GAS TURBINE; COMBINED INSTALLATION; HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR; PARAMETER; INDEX.

Комбинированные газопаротурбинные установки (КГПТУ) широко применяются в различных отраслях промышленности, особенно в электроэнергетике (в том числе — в мировой) и в судовой энергетике. Вследствие того, что доля газа в топливном балансе мира высока (более 60 %), внедрение высокоэффективных газопаровых технологий — общепризнанная стратегия развития тепловой энергетики. Многие страны применяют КГПТУ с утилизационными котлами (КУ) для новых электростанций, работающих на природном газе. Сейчас их КПД уже достиг 52–54 %, а в ближайшей перспективе возрастет до 58–60 % [1].

Разработаны газотурбинные двигатели нового поколения, на базе которых будут создаваться КГПТУ. Это требует и новых программных продуктов на основе математических моделей оборудования с большим числом уровней по давлению котлов-утилизаторов, впрыском пара в газотурбинную часть, паровым охлаждением лопаток газовой турбины. Во Вьетнаме работает

ряд различных тепловых электростанций, построенных по комбинированному парогазовому циклу [1]. Среди них — установки Siemens, Alstom, General Electric. Повышение их КПД — актуальная задача.

Программы расчета тепловых схем комбинированных турбоустановок. Для сравнения были выбраны три программных продукта: программа PIGPU, написанная авторами; программа КГПТУ, разработанная Морским техническим университетом (г. Санкт-Петербург); программа GateCycle компании General Electric. Выбор именно этих программ диктовался прежде всего их доступностью.

Собственная программа PIGPU. Программа PIGPU предназначена для расчета параметров газотурбинных установок (ГТУ) и комбинированных газопаротурбинных установок [2]. Она позволяет выполнить расчеты параметров тепловой схемы и основных показателей ГТУ, включая установки с охлаждением. Программа PIGPU позволяет также выполнить расчеты

КГПТУ с котлом-утилизатором одного уровня давления и двух уровней давлений, с комбинаций различных сочетаний газовых, паровых контуров и котлов-утилизаторов (например, 2 ГТУ+ + 2 КУ+1ПТУ с двумя уровнями давлений в котле-утилизаторе). Программа имеет ограничения по диапазону параметров цикла: температура газа перед турбинной $t_3^* \leq 2000$ °С, степень повышения давления $\pi_k \leq 50$, диапазон изменения высокого давления 3,5–8 МПа, диапазон изменения низкого давления 0,5–0,7 МПа [2].

Программа КГПТУ Морского технического университета. Программа КГПТУ (рис. 1) предназначена для расчета параметров электроэнергетических и судовых комбинированных газопаротурбинных установок [3]. Она предоставлена авторами для использования в СПбГПУ.

Компьютерная программа КГПТУ может быть использована для расчета 12 вариантов схем энергетических КГПТУ — трехконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (две или три паровые турбины), двухконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (одна или две паровые турбины), одноконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (одна или две паровые турбины), а также 4 вариантов схем судовых КГПТУ. Программа имеет отдельное окно для расчета энтальпии

продуктов сгорания при использовании в качестве топлива природного газа или жидкого топлива и окно для расчета свойств воды и водяного пара [4].

Программа GateCycle фирмы General Electric. Программное обеспечение GateCycle компании GE представляет собой одно из наиболее мощных из существующих, гибких и многофункциональных приложений для расчета теплового баланса. GateCycle позволяет определить характеристики работы ПГУ, паросиловых установок на традиционных видах топлива, систем когенерации, усовершенствованных газотурбинных циклов и других энергосистем [5].

Коммерческий пакет GateCycle, разработанный компанией General Electric и предоставленный кафедре ТГиАД СПбГПУ для использования в учебных целях [6], позволяет выполнить расчет и оптимизацию параметров оборудования на стадии проектирования, расчет характеристик газопаровых, газотурбинных и паротурбинных установок разнообразных схем для работы на различных видах топлива. Программа дает возможность рассчитывать практически любые схемы турбинных (и не только) установок любой сложности. Схемы ограничены лишь набором стандартных агрегатов.

Программа GateCycle предназначена для расчета термодинамических параметров оборудования и применяется, в частности, при проектировании тепловых и парогазовых

Электроэнергетические КГПТУ

| | Трехконтурная | Двухконтурная | Одноконтурная |
|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| С промперегревом | Две паровые турбины | Две паровые турбины | Две паровые турбины |
| | Три паровые турбины | Три паровые турбины | Три паровые турбины |
| Без промперегревом | Две паровые турбины | Одна паровая турбины | Одна паровая турбины |
| | Три паровые турбины | Две паровые турбины | Две паровые турбины |

Судовые КГПТУ

| | | | |
|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант 3 | Открытая схема ТУК |
|-----------|-----------|-----------|--------------------|

Выход

Рис. 1. Программное окно для выбора схем КГПТУ

электростанций. Она позволяет анализировать и обрабатывать различные схемы на предмет их эффективности и рассчитывать термодинамические показатели оборудования при переменных режимах работы [7]. Пользователи имеют возможность моделировать турбинные и транспортные наземные энергоустановки практически любого типа с помощью одного пакета программ, позволяющего вводить характеристики узлов в виде уравнений или таблиц, моделировать контуры управления и изменять неограниченное количество параметров модели в процессе оптимизации. Программа GateCycle успешно применяется как инструмент оптими-

зации проекта или моделирования работы существующей энергоустановки и станции в целом [6].

Сравнение результатов расчетов. Ниже приведены результаты расчетов показателей двух КГПТУ с одноконтурным КУ и с двухконтурным КУ. Схема КГПТУ с одноконтурным КУ [8], в которой в качестве ГТУ использована известная установка V.64.2 фирмы Siemens [9], приведена на рис. 2, а полученные в расчете данные сведены в табл. 1. В схеме КГПТУ с двухконтурным КУ в качестве ГТУ использована та же ГТУ V.64.2 фирмы Siemens. Результаты расчета этой схемы сведены в табл. 2.

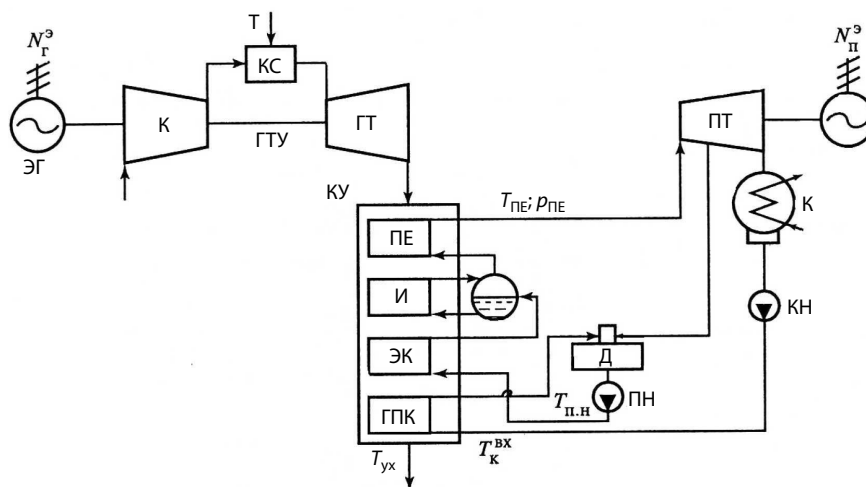


Рис. 2. Схема КГПТУ с одноконтурным КУ:

ЭГ — электрогенератор; К — компрессор; КС — камера сгорания; ГТ — газовая турбина; ГТУ — газотурбинная установка; КУ — котел-утилизатор; ПТ — паровая турбина; Д — деаэрактор; ПН — питательный насос; КН — конденсационный насос; ЭК — экономайзер; ПЕ — пароперегреватель; И — испаритель; ГПК — газовый подогреватель конденсата

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета тепловой схемы КГПТУ с одноконтурным КУ

| Параметры, ед. измерения | Результаты расчета КГПТУ по программам | | |
|-----------------------------------|--|---------|------------|
| | PIGPU | КГПТУ | Gate Cycle |
| Мощность ГТД, МВт | 110 | 110 | 110 |
| Расход газов, кг/с | 356 | 356 | 356 |
| Температура газа за турбиной, °С | 550 | 550 | 550 |
| КПД ГТД, % | 35,0864 | 35,0864 | 35,0864 |
| Температура наружного воздуха, °С | 15 | 15 | 15 |
| Давление наружного воздуха, МПа | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Давление в конденсаторе, МПа | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| Давление в контурах КУ, МПа | 5 | 5 | 5 |

Окончание табл. 1

| Параметры, ед. измерения | Результаты расчета КГПТУ по программам | | |
|--------------------------------|--|--------|------------|
| | P1GPU | КГПТУ | Gate Cycle |
| Давление в деаэраторе, МПа | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| КПД парового контура | 89 | 89 | 89 |
| Параметры пара за контурами: | | | |
| давление, МПа | 5 | 5 | 5 |
| температура, °С | 520 | 520 | 520 |
| расход, кг/с | 43,76 | 43,76 | 43,76 |
| Температура уходящих газов, °С | 194 | 195,4 | 195,4 |
| Мощность КГПТУ, МВт | 157,1 | 157,38 | 157,37 |
| КПД КГПТУ, % | 50,17 | 50,2 | 50,2 |

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета тепловой схемы КГПТУ с двухконтурным КУ

| Параметры, ед. измерения | Результаты расчета КГПТУ по программам | | |
|---------------------------------------|--|-------|------------|
| | P1GPU | КГПТУ | Gate Cycle |
| Мощность ГТД, МВт | 110 | 110 | 110 |
| Расход газов, кг/с | 356 | 356 | 356 |
| Температура газа за турбиной, С | 550 | 550 | 550 |
| КПД ГТД, % | 35 | 35 | 35 |
| Температура наружного воздуха, С | 15 | 15 | 35 |
| Давление наружного воздуха, МПа | 0,1 | 0,1 | 15 |
| Давление в конденсаторе, МПа | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| Высокое давление в контурах КУ, МПа | 5 | 5 | 5 |
| Низкое давление в контурах КУ, МПа | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Давление в деаэраторе, МПа | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| КПД части высокого давления, % | 89 | 89 | 89 |
| КПД части низкого давления, % | 84 | 84 | 84 |
| Параметры пара за высокими контурами: | | | |
| давление, МПа | 5 | 5 | 5 |
| температура, °С | 520 | 520 | 520 |
| расход, кг/с | 87,4 | 87,5 | 87,4 |
| Параметры пара за низкими контурами: | | | |
| давление, МПа | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| температура, °С | 204,7 | 205 | 205 |
| расход, кг/с | 21,4 | 21,4 | 21,4 |
| Температура уходящих газов, °С | 121 | 120 | 120 |
| Мощность КГПТУ, МВт | 326,4 | 326,3 | 326 |
| КПД КГПТУ, % | 51,9 | 51,9 | 51,9 |

Как следует из сравнения полученных данных, все три программы дают весьма близкие и хорошо совпадающие с опубликованными данными результаты [9, 10] для обеих схем КГПТУ. Поскольку программа RIGPU не позволяет проектировать КГПТУ с тремя уровнями давления в котле-утилизаторе, для дальнейших расчетов была выбрана простая и удобная при использовании программа Морского технического университета.

Расчет КГПТУ, предназначенной для энергетической систем Вьетнама. Расчеты выполнены

с целью установить влияние температуры газа перед газовой турбиной на КПД комбинированной парогазовой установки мощностью 450 МВт. В качестве объекта исследования была выбрана работающая в составе энергетической системы Вьетнама ГТУ GE13E2 фирмы Alstom. Для парового контура выбрана паровая турбина Т-150–7,7 производства АО «ЛМЗ». Диапазон изменения начальной температуры газа 1050–1250 °С. Результаты расчетов сведены в табл. 3 и представлены на рис. 3.

Таблица 3

Влияние начальных температур газов T_3 на КПД ПГУ мощностью 450 МВт

| Параметры, ед. измерения | Значения параметров при разных начальных температурах газов, °С | | | | |
|---|---|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 1050 | 1100 | 1150 | 1200 | 1250 |
| <i>Газовая часть</i> | | | | | |
| Мощность ГТД, МВт | 154,9/154,9* | 154,9/154,9* | 154,9/154,9* | 154,9/154,9* | 154,9/154,9* |
| Расход газов, кг/с | 532 | 532 | 532 | 532 | 532 |
| Температура газа за турбиной, °С | 495 | 524/524* | 553 | 582 | 611 |
| КПД ГТД, % | 35,7 | 35,7 | 35,7 | 35,7 | 35,7 |
| Степень повышения давления воздуха в компрессоре | 14,6 | 14,6 | 14,6 | 14,6 | 14,6 |
| Коэффициент избытка воздуха | 2,58 | 2,55 | 2,52 | 2,41 | 2,26 |
| <i>Паровая часть</i> | | | | | |
| КПД части высокого давления, % | 83 | 83 | 83 | 83 | 83 |
| КПД части низкого давления, % | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 |
| Давление в конденсаторе, МПа | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Давление в деаэраторе, МПа | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Параметры пара за высокими контурами: давление, МПа температура, °С расход, кг/с | 7,6/7,6* 481 109,7 | 7,6/7,6* 510/510 122,4 | 7,6/7,6* 539 134,5 | 7,6/7,6* 568 146,2 | 7,6/7,6* 597 157,6 |
| Параметры пара за низкими контурами: давление, МПа температура, °С расход, кг/с | 0,62/0,62* 201,6 36,6 | 0,62/0,62* 194,6/195* 33,3 | 0,62/0,62* 188 30,1 | 0,62/0,62* 181,7 27,1 | 0,62/0,62* 175,7 24,1 |
| Температура на выходе из нагревателя, °С | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| Расход охлаждающей воды, т/ч Расход пара на деаэратор, кг/с | 55765 19,9 | 60063 20,9 | 64316 21,8 | 68635 22,7 | 73003 23,5 |
| Мощность вспомогательных механизмов, кВт Температура уходящих газов, °С | 3536 136,8 | 3857 134,7 | 4168 132,7 | 4478 130,8 | 4785,6 129 |

Окончание табл. 3

| Параметры, ед. измерения | Значения параметров при разных начальных температурах газов, °С | | | | |
|--------------------------|---|--------------|-------|--------|-------|
| | 1050 | 1100 | 1150 | 1200 | 1250 |
| Мощность ПТ, МВт | 140,9 | 157,6/160* | 174,7 | 192,6 | 211,3 |
| Мощность ПГТ, МВт | 447,1 | 463,6/462,8* | 480,4 | 497,97 | 516,3 |
| КПД ПГУ, % | 51,5 | 53,4/53* | 55,35 | 57,3 | 59,49 |

*Параметры реальной установки

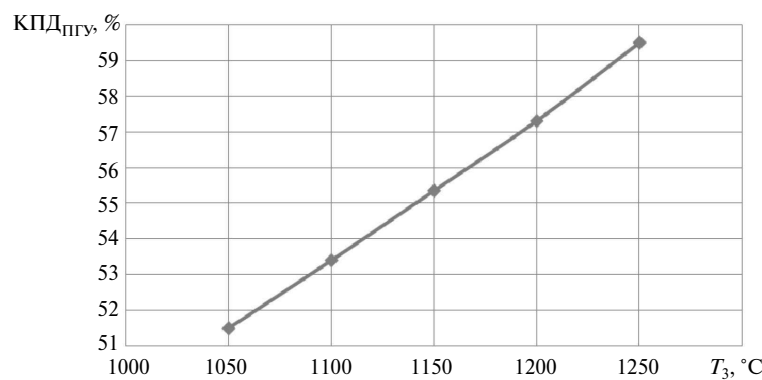


Рис. 3. Влияние начальной температуры на КПД ПГУ

На рис. 3 видно, что с повышением начальной температуры показатели установки резко возрастают. Уже при $t_3=1100^\circ\text{C}$ КПД установки превышает 53 %. Повышение температуры приводит к значительному росту КПД, который при $t_3=1250^\circ\text{C}$ достигает 59,5 %.

Проведены расчеты типовых схем комбинированных парогазовых установок, на основании

которых выбрана программа для анализа комбинированной установки, предназначенной для энергетической системы Вьетнама, в составе газовой турбины GE13E2 фирмы Alstom и паровой турбины T-150–7,7 производства АО «ЛМЗ». Выполненные расчеты показали значительный рост КПД установки при увеличении начальной температуры рабочего тела в газовом контуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фам Х.А., Рассохин А.В., Андреев К.Д. Состояние и перспективы развития энергетики Вьетнама // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1 (166). С. 32–35.
2. Фам Х.А., Андреев К.Д. Методика и программа расчета параметров комбинированной турбоустановки // XXXIX неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции, 6–11 дек. 2010 г. Ч. 3: Энергомашиностроительный факультет. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 35
3. Тихомиров Б.А., Льюнг Л.К. Сравнение эффективности охлаждения газовой турбины воздухом и паром в комбинированных газопаротурбинных установках // Энергетические машины и установки. 2008. № 1–2. С. 10–19.
4. Льюнг Л.К. Разработка математической модели и компьютерной программы для определения эффективности судовых и энергетических комбинированных газопаротурбинных установок: Дисс. ... кандидата технических наук. 2005. 155 с.
5. Определение теплового баланса при моделировании электростанции (GateCycle) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.spektr-ksk.ru/prigor.php?id=2504>.
6. Тисленко В.А., Оленников С.Ю. Расчет и выбор параметров газотурбинной установки в программном комплексе Gatecycle // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции, 5–10 дек. 2011 г. Ч. 3. Энергомашиностроительный факультет. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 58–59.

7. Забота о состоянии промышленного оборудования Россия и страны СНГ [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/oc/ru/downloads/M_C_RUS_2012_LO.pdf

8. **Лыков А.В.** Расчет тепловой схемы парогазовой установки на базе ГТУ Taurus 60S в программе GateCycle [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3393.pdf>.

9. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростаций: учебное пособие для вузов / Под ред. С.В. Цанева. 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.

10. **Трухний А.Д., Петрунин С.В.** Расчет тепловых схем парогазовых установок утилизационного типа: Методическое пособие по курсу «Энергетические установки». М.: Изд-во МЭИ, 2001. 24 с.

REFERENCES

1. **Fam Kh.A., Rassokhin A.V., Andreev K.D.** Sos-toianie i perspektivy razvitiia energetiki V'etnama. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013. № 1 (166). S. 32–35. (rus.)

2. **Fam. Kh.A., Andreev K.D.** Metodika i programma rascheta parametrov kombinirovannoi turboustanovki. *XXXIX nedelya nauki SPbGPU: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 6–11 dek. 2010 g. — Ch. 3: Energomashinostroitel'nyi fakul'tet. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. S. 35. (rus.)

3. **Tikhomirov B.A., Lyong L.K.** Sravnenie effektivnosti okhlazhdeniya gazovoi turbiny vozdukhom i parom v kombinirovannykh gazoparoturbinykh ustanovkakh. *Energeticheskie mashiny i ustanovki*. 2008. № 1–2. S. 10–19. (rus.)

4. **Lyong L.K.** Razrabotka matematicheskoi modeli i komp'yuternoi programmy dlia opredeleniia effektivnosti sudovykh i energeticheskikh kombinirovannykh gazoparoturbinykh ustanovok: Diss. ... kand. tekhn. nauk, 2005 g. 155 s. (rus.)

5. Opredelenie teplovogo balansa pri modelirovanii elektrostantsii (GateCycle) [Elektronnyi resurs] // Rezhim dostupa: <http://www.spektr-ksk.ru/pribor.php?id=2504>.

6. **Tislenko V.A., Olennikov S.Iu.** Raschet i vybor parametrov gazoturbinnoi ustanovki v programmnom komplekse Gatecycle: *XL Nedelya nauki SPbGPU: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 5–10 dek. 2011 g. Ch. 3: Energomashinostroitel'nyi fakul'tet. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. S. 58–59. (rus.)

7. Zabota o sostoianii promyshlennogo oborudovaniia Rossiia i strany SNG [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/oc/ru/downloads/M_C_RUS_2012_LO.pdf (rus.)

8. **Lykov A.V.** Raschet teplovoi skhemy parogazovoi ustanovki na baze GTU Taurus 60S v programme GateCycle [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3393.pdf>. (rus.)

9. **Tsanev S.V., Burov V.D., Remezov A.N.** Gazoturbinye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostatsii: uchebnoe posobie dlia vuzov / Pod red. S.V. Tsaneva. 3-e izd., stereot. M.: Izdatel'skii dom MEI, 2009. 584 s. (rus.)

10. **Trukhnii A.D., Petrunin S.V.** Raschet teplovykh skhem porogazovykh ustanovok utilizatsionnogo tipa: Metodicheskoe posobie po kursu «Energeticheskie ustanovki». M.: Izdatel'stvo MEI, 2001. 24 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФАМ Ан Хоан — аспирант кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: sdd85@mail.ru

РАССОХИН Виктор Александрович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: v-rassokhin@yandex.ru

АНДРЕЕВ Константин Дмитриевич — кандидат технических наук доцент кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: visantiya@freemail.ru

AUTHORS

PHAM An H. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: sdd85@mail.ru

RASSOKHIN Viktor A. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: v-rassokhin@yandex.ru

ANDREEV Konstantin D. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: visantiya@freemail.ru