

DOI 10.5862/JEST.231.4

УДК 621.165–253.5:620.193.1

*А.И. Кириллов, В.А.Черников, Е.Ю. Семакина, В.Ю. Исупов*

## **К ВОПРОСУ О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ВЫХОДНОМ ДИФFUЗОРЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ**

*A.I. Kirillov, V.A. Chernikov, E.Yu. Semakina, V.Ju. Isupov*

### **SOME ISSUES OF NUMERICALLY SIMULATING THE 3D FLOW IN THE EXHAUST DIFFUSER OF A GAS TURBINE**

Приведены результаты расчетного анализа по обратному влиянию силовых стоек, размещенных в выходном диффузоре, на течение в отсеке «последняя ступень турбины – выходной диффузор». Показано, что на режиме с умеренной закруткой потока при входе в диффузор силовые стойки практически не влияют на трехмерную структуру потока за ступенью. Достоверность оценки подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных данных.

ГАЗОВАЯ ТУРБИНА; ВЫХОДНОЙ ДИФFUЗОР; СИЛОВЫЕ СТОЙКИ; ОБРАТНОЕ ВЛИЯНИЕ; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

The paper presents the Results of numerical analysis of the inverse effect that support struts, placed in thean exhaust diffuser, have on flow in of the "last turbine stage – exhaust diffuser" section. It has been shown that in the regime with moderate flow swirl at the diffuser inlet power struts have virtually no effect on the three-dimensional flow structure behind the stage. The Rreliability of this assessment is confirmed by a comparison between the computational and the experimental data. Therefore, if the input stream has a moderate swirl, it is possible to perform a 3D simulation of the flow in a diffuser with struts, by using the domain isolated from the last turbine stage and by setting the boundary conditions at the entrance to the diffuser according to the flow calculation in the last stage of the turbine without the diffuser.

GAS TURBINE; EXHAUST DIFFUSER; STRUTS; BACKWARD INFLUENCE; NUMERICAL SIMULATION.

Течение в выходных диффузорах паровых и газовых турбин существенно зависит от структуры входящего в него потока, который формируется предшествующей диффузору последней ступенью турбины [1–4]. Поэтому достоверные данные об эффективности диффузоров при численном моделировании трехмерного течения в них можно получить лишь при расчете потока в отсеке «последняя ступень турбины – выходной диффузор» [5]. Каждый из вариантов такого расчета, особенно при постановке задачи нестационарного течения, занимает весьма продолжительное время даже при использовании современных высокопроизводительных вычислительных технологий. Проведение же серии вариантных расчетов в приемлемые сроки ста-

новится реальным, если упростить задачу: сначала рассчитать течение в последней ступени турбины, а затем – в диффузоре, используя данные, полученные для выходного сечения ступени, в качестве входных условий для диффузора.

Такой подход не учитывает обратного влияния течения в диффузоре на поток в последней ступени. Его можно применить, если в проточной части диффузора нет источников сильных возмущений, способных оказать ощутимое воздействие на течение в последней ступени. В выходном диффузоре газовой турбины, имеющем плавные меридиональные обводы, таким источником возмущений могут быть силовые стойки, соединяющие задний подшипник ротора турбины с ее корпусом.

Таким образом, прежде чем приступить к расчету трехмерного течения в отсеке «последняя ступень турбины – выходной диффузор», целесообразно оценить степень обратного влияния размещенных в диффузоре силовых стоек на структуру потока в выходном сечении последней ступени. В статье приведены результаты такой оценки, выполненной по результатам расчета трехмерного течения для режима работы отсека, в котором силовые стойки обтекаются с умеренными углами атаки. Результаты расчета сравниваются с данными эксперимента.

### Постановка расчета трехмерного течения

Объект исследования – отсек «последняя ступень турбины – выходной диффузор», подробно изученный на крупномасштабном экс-

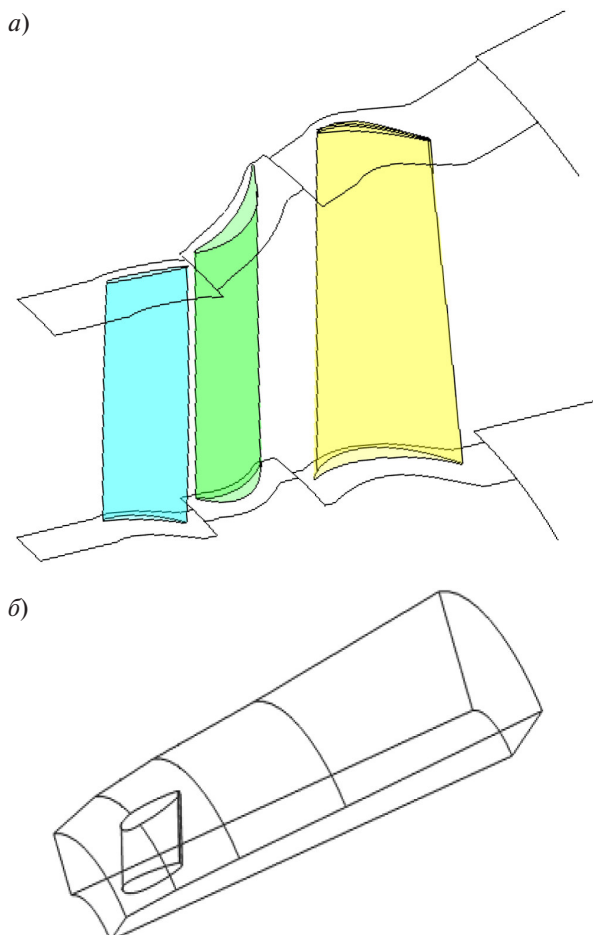


Рис. 1. Элементы геометрии расчетной области: а) лопатки решеток ПНА, НА и РК; б) сектор диффузора с силовой стойкой

периментальном стенде СПбПУ [6–10]. Проточная часть отсека состоит из трех решеток: предварительного направляющего аппарата (ПНА), направляющего аппарата последней ступени (НА) и ее рабочего колеса (РК). Лопатки этих решеток изображены на рис. 1, а. Предварительный направляющий аппарат обеспечивает натекание потока на направляющие лопатки последней ступени под углом выхода потока из предпоследней ступени турбины.

Для сокращения объема вычислений расчетная область выбрана в виде сектора с углом  $72^\circ$ , включающего одну из пяти равноотстоящих друг от друга силовых стоек (рис. 1, б). Правомерность замены кольцевой области течения сектором оценивалась сравнением результатов расчета в секторах с углами  $24^\circ$ ,  $72^\circ$  и  $120^\circ$  для варианта проточной части диффузора без силовых стоек. На рис. 2 в качестве примера представлено распределение по высоте проточной части полного и статического давления за ступенью. Небольшое влияние искусственно наложенной периодичности течения при замене полной кольцевой области сектором ощущается. Однако при сопоставлении данных, полученных для одного и того же сектора без стоек и со стойками, этим влиянием можно пренебречь.

Численное моделирование выполнено с помощью пакета ANSYS CFX методом RANS при использовании высокорейнольдсовской версии SST-модели турбулентности. Расчетная сетка в области межлопаточных каналов и проточной части выходного диффузора – квазиструктурированная со сгущением ячеек к стенкам. Величина  $y^+$  находилась в пределах от 30 до 200, что соответствует требованиям по применению выбранной модели турбулентности.

В периферийной области было выполнено дополнительное сгущение сетки для лучшего разрешения струи, вытекающей из радиального зазора над лопатками РК. Число узлов расчетной сетки в одном межлопаточном канале ПНА – 269 тыс., НА – 268 тыс., решетки РК – 439 тыс. Общее число узлов в секторе с углом  $72^\circ$  – 11209 тыс., из них в области выходного диффузора – 1179 тыс.

Рабочее тело – воздух, поскольку результаты расчета сравнивались с данными эксперимента, выполненного на воздушном стенде. В качестве граничных условий задавались температура и

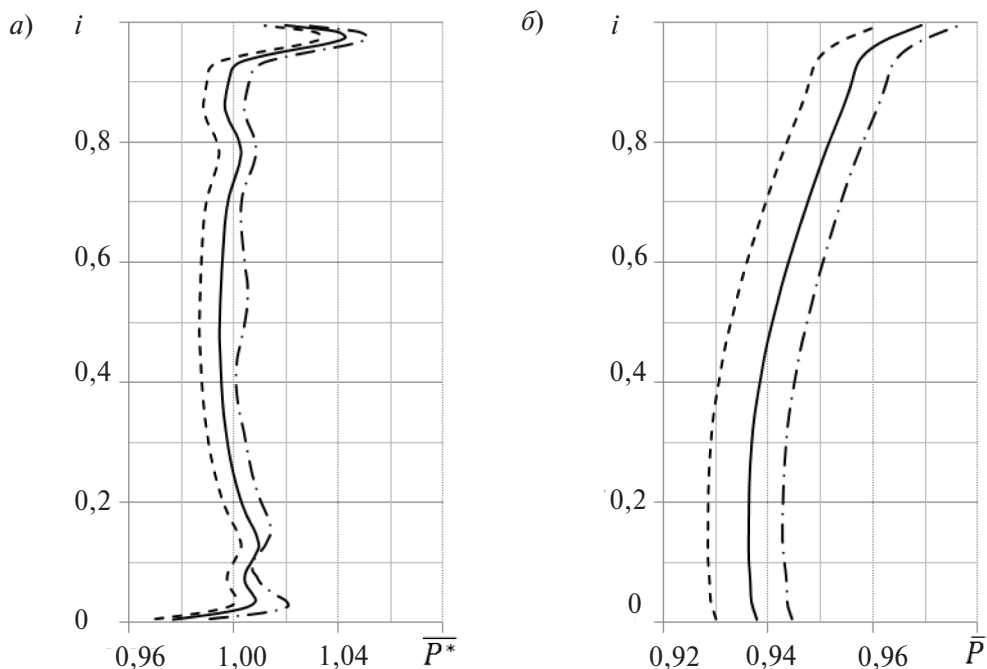


Рис. 2. Распределение полного (а) и статического (б) давления по высоте проточной части за ступенью при расчете в секторах с углами 24° (----), 72° (-·-·-), 120° (—)

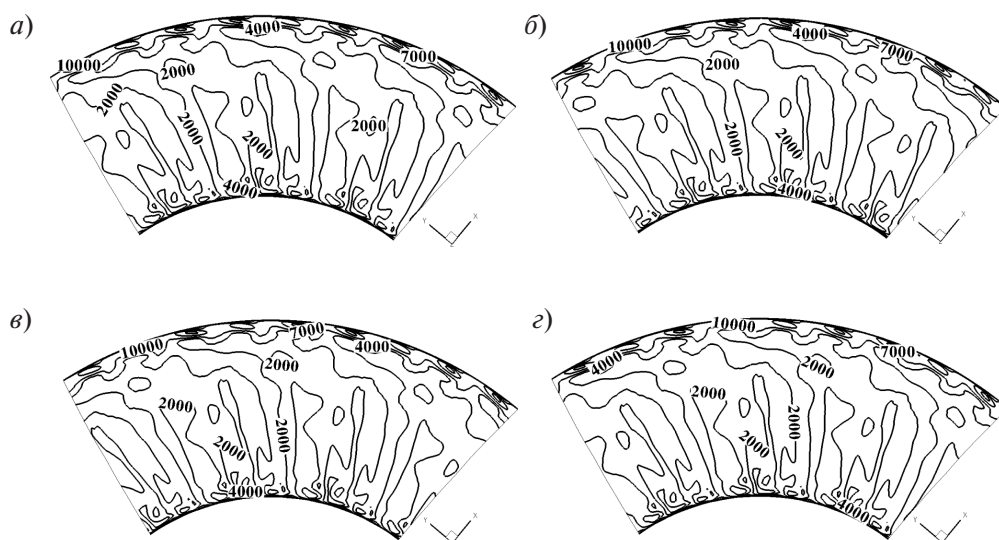


Рис. 3. Изобары избыточного давления торможения (Па) за ступенью при различном взаимном положении лопаток РК и НА: а) начальное положение; б) сдвиг на 2°; в) сдвиг на 4°; г) сдвиг на 6°

давление торможения при входе в отсек, а также массовый расход воздуха.

Для перехода от абсолютного движения в решетке НА к относительному в решетке РК

применен интерфейс «Frozen rotor». При таком подходе результат расчета может зависеть от взаимного расположения лопаток НА и РК. Чтобы оценить возможный разброс результатов расчета,

вызванный этим эффектом, были проведены расчеты при четырех положениях лопатки РК в пределах шага решетки НА. В выходном сечении ступени, структура потока в котором определяет входные условия при расчете диффузора, заметной зависимости как осредненных по окружности, так и локальных значений параметров течения от взаимного расположения лопаток НА и РК обнаружено не было (рис. 3).

### Результаты расчета и экспериментальные данные

Для анализа, как уже было отмечено, выбран режим работы отсека с умеренной закруткой потока при входе в диффузор. В корневом сечении ступени поток имел практически осевое направление. У периферии ступени закрутка потока достигала  $30\text{--}35^\circ$  в направлении вращения ротора.

Отметим, что при экспериментальном исследовании [6–10] поток в сечении за последней ступенью траверсировался пятиканальным аэродинамическим зондом. В пределах шага направляющего аппарата были выполнены несколько радиальных траверс. Измеренные параметры осреднялись в окружном направлении и представлены в зависимости от радиуса. Результаты расчета также приведены в осредненном по окружной координате виде. Опыты выполнены для диффузора с силовыми стойками. Расчет

проведен для двух вариантов проточной части диффузора — с силовыми стойками и без них.

Рис. 4 позволяет сравнить расчетные значения основных параметров течения с экспериментальными данными. Для вариантов диффузора со стойками и без них результаты вычислений и экспериментальные практически совпали. Отклонение опытных точек от расчетной кривой невелико. Близким к экспериментальному оказалось и расчетное значение КПД ступени (расхождение — в пределах  $0,5\%$ ). Это подтверждает, что выбранный способ численного моделирования трехмерного турбулентного течения в отсеке применим для анализа, подобного выполненному.

Таким образом, показано, что применительно к отсеку «последняя ступень турбины — выходной диффузор» на режиме с умеренными углами атаки при обтекании силовых стоек они практически не влияют на пространственную структуру потока за ступенью. Поэтому, оценивая степень повышения давления в диффузоре с силовыми стойками, задачу расчета трехмерного течения в нем на режиме с умеренной закруткой потока можно ставить в изолированной области. Условия на входе в диффузор при этом можно задавать по результатам расчета трехмерного течения в последней ступени турбины без диффузора.

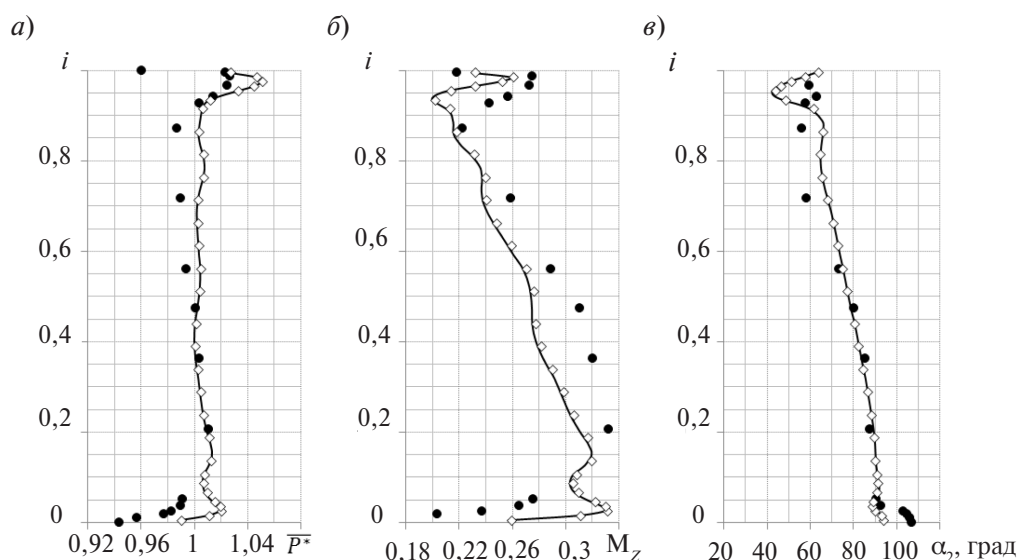


Рис. 4. Радиальное распределение полного давления (а), осевой компоненты числа Маха (б) и угла выхода потока (в) из последней ступени: — — расчет со стойками; о — расчет без стоек; • — эксперимент (со стойками)

Авторы выражают благодарность профессору Е.М.Смирнову за ценные консультации при постановке задачи расчета трехмерного течения и обсуждении результатов ее решения, а также

доценту С.А. Галаеву за помощь в организации вычислительного процесса.

Работа является составной частью проекта, поддержанного РФФИ (грант № 14-08-00553).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ishizaka K., Wakazono S., Yuri M., Takahashi R.** CED Studies of Gas Turbine Exhaust Diffusers // *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*. Tokyo. 2003. P. 1–8.
2. **Sieker O., Seume J.R.** Influence of Rotating Wakes on Separation in Turbine Exhaust Diffusers // *Journal of Thermal Science*. 2008. № 17(1). P. 42–47.
3. **Kuschel M., Seume J.R.** Influence of Unsteady Turbine Flow on the Performance of an Exhaust Diffuser. // *Proc. ASME Turbo Expo 2011, June 6–10 Vancouver, Canada (GT2011–45673)*. P. 1–13.
4. **Song Zh., Xu J., Sun L., Lui M.** Study of Coupling Numerical Flow Field Simulation of Low-pressure Last Stage Exhaust Passage in Steam Turbine // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 672–674. P. 1626–1632.
5. **Кириллов А.И., Галаев С.А., Исупов В.Ю., Смирнов Е.М.** Применение вихреразрешающих методов к расчету трехмерного течения в выходном диффузоре газовой турбины // *Научно-технические ведомости СПбПУ*. 2014. №4 (207). С. 16–25.
6. **Зандер М.С., Черников В.А.** Аэродинамические характеристики блока «ступень – выходной диффузор» стационарной газовой турбины при различных режимах работы // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Наука и образование*. 2011. № 2 (123). С. 61–68.
7. **Зандер М.С., Черников В.А., Семакина Е.Ю.** Экспериментальные и численные исследования структуры 3D-потока в отсеке «турбинная ступень – осевой диффузор» // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Наука и образование*. 2013. № 1 (166). С. 197–203.
8. **Rassochin V.A., Chernikov V.A., Zander M.S., Semakina E.U.** Joint re-search in experimental aerodynamics of exit diffusers of turbines and stage-diffusers unit performed by the department of turbine engines and plants, St.-Petersburg State Polytechnic University and the Institute of Turbomachinery and Fluid Dynamics, Leibniz University of Hannover // *Polytechnic University Publishing House*. 2010. P. 141–156.
9. **Черников В.А., Семакина Е.Ю.** Информационно-измерительная система аэродинамического стенда для исследований потока в проточной части отсека «ступень–диффузор» и некоторые результаты испытаний на модели мощной газовой турбины // *Энергетические машины и установки*. 2008. №1. С. 24–34.
10. **Петросов К.В.** Совершенствование выходных диффузоров стационарных газовых турбин на основе физического эксперимента и численного моделирования : Дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.12. Санкт-Петербург. 2005. 183 с.

## REFERENCES

1. **Ishizaka K., Wakazono S., Yuri M., Takahashi R.** CED Studies of Gas Turbine Exhaust Diffusers. *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*. Tokyo. 2003. P. 1–8.
2. **Sieker O., Seume J.R.** Influence of Rotating Wakes on Separation in Turbine Exhaust Diffusers. *Journal of Thermal Science*. 2008. № 17(1). P. 42–47.
3. **Kuschel M., Seume J.R.** Influence of Unsteady Turbine Flow on the Performance of an Exhaust Diffuser. *Proc. ASME Turbo Expo*. 2011, June 6–10 Vancouver, Canada (GT2011–45673). P. 1–13.
4. **Song Zh., Xu J., Sun L., Lui M.** Study of Coupling Numerical Flow Field Simulation of Low-pressure Last Stage Exhaust Passage in Steam Turbine. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 672–674. P. 1626–1632.
5. **Kirilov A.I., Galayev S.A., Isupov V.Yu., Smirnov E.M.** Primneniye vikhherazreshayushchikh metodov k raschetu trekhmernogo techeniya v vykhodnom diffuzore gazovoy turbiny [Application of eddy-resolving methods for the calculation of three-dimensional flow in the output of the gas turbine diffuser]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU*. 2014. №4 (207). S. 16–25.
6. **Zander M.S., Chernikov V.A.** Aerodinamicheskiye kharakteristiki bloka «stupen – vykhodnoy diffuzor» statsionarnoy gazovoy turbiny pri razlichnykh rezhimakh raboty [The aerodynamic characteristics of the unit «level – the output diffuser» stationary gas turbine under different operating conditions]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*. 2011. № 2 (123). S. 61–68.
7. **Zander M.S., Chernikov V.A., Semakina E.Yu.** Eksperimentalnyye i chislennyye issledovaniya struktury 3D-potoka v otseke «turbinnaya stupen – osevoy diffuzor» [Experimental and numerical studies of the structure of



3D-flow in the bay, «turbine stage – axial diffuser»]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Nauka i obrazovaniye*. 2013. № 1 (166). S. 197–203. (rus.)

8. **Rassochin V.A., Chernikov V.A., Zander M.S., Semakina E.Yu.** Joint re-search in experimental aerodynamics of exit diffusers of turbines and stage-diffusers unit performed by the department of turbine engines and plants, St.-Petersburg State Poly-technic University and the Institute of Turbomachinery and Fluid Dynamics, Leibniz University of Hannover. *Polytechnic University Publishing House*. 2010. P. 141–156.

9. **Chernikov V.A., Semakina E.Yu.** Informatsionno-izmeritelnaya sistema aerodinamicheskogo stenda dlya

issledovaniy potoka v protochnoy chasti otseka «stupen–diffuzor» i nekotoryye rezultaty ispytaniy na modeli moshchnoy gazovoy turbiny. [Information-measuring system stand for aerodynamic studies of flow in the flow of the compartment «stage–diffuser» and some of the results of tests on a model of a powerful gas turbine]. *Energeticheskiye mashiny i ustanovki*. 2008. №1. S. 24–34.

10. **Petrosov K.V.** Sovershenstvovaniye vykhodnykh diffuzorov statsionar-nykh gazovykh turbin na osnove fizicheskogo eksperimenta i chislennogo modelirovaniya [Improving output diffusers hospitalation of gas turbines based on physical experiments and numerical simulations]. Diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.04.12.– Sankt-Peterburg. 2005. 183 s.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**КИРИЛЛОВ Александр Иванович** – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: ai\_kirillov@mail.ru

**KIRILLOV Aleksandr I.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: ai\_kirillov@mail.ru

**ЧЕРНИКОВ Виктор Александрович** – доктор технических наук профессор кафедры Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: viktor.chernikov@gmail.com

**CHERNIKOV Viktor A.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: viktor.chernikov@gmail.com

**СЕМАКИНА Елена Юрьевна** – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: g.semakinalena@gmail.com

**SEMAKINA Elena Yu.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: g.semakinalena@gmail.com

**ИСУПОВ Василий Юрьевич** – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: vasiliy.isupov@gmail.com

**ISUPOV Vasilii Ju.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: vasiliy.isupov@gmail.com