

**О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, А. Г. НИКУЛЕНКОВ, Т. В. НИКУЛЕНКОВА,
Л. С. БУТОВСКИЙ, И. С. БЕДНАРСКАЯ**

РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ АЭС К-1000-60/3000

При продлении срока эксплуатации турбины АЭС проводится комплекс работ по оценке технического состояния турбины, в частности, работы направлены на выявление и анализ повреждений, дефектов, установление причин и механизмов их возникновения и возможного развития. При этом, оценивается остаточный ресурс и разрабатываются рекомендации по управлению старением с целью обеспечения надежной и безопасной эксплуатации турбины в сверхпроектный период. Одним из способов оценки остаточного ресурса является применение программных средств на базе конечно-элементного метода решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений. В данной статье представлены результаты расчета граничных условий для определения теплового состояния и дальнейшей оценки ресурса ротора высокого давления с применением программных средств на базе конечно-элементного метода. Ротор высокого давления был условно разбит на определенные участки для которых были определены коэффициенты теплоотдачи от паровой среды к телу ротора в зависимости от типового графика пуска турбины из холодного, неостывшего и горячего состояний.

Ключевые слова: атомная электростанция, паровая турбина, ротор высокого давления, граничные условия, тепловое состояние, геометрическая модель, энергоблок, холодное состояние, неостывшее состояние, горячее состояние.

**О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, А. Г. НИКУЛЕНКОВ, Т. В. НИКУЛЕНКОВА,
Л. С. БУТОВСКИЙ, И. С. БЕДНАРСКА**

РОЗРАХУНОК ГРАНИЧНИХ УМОВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ РОТОРА ВИСОКОГО ТИСКУ ТУРБИНИ АЕС К-1000-60/3000

При продовженні терміну експлуатації турбіни АЕС проводиться комплекс робіт з оцінки технічного стану турбіни, зокрема, роботи спрямовані на виявлення та аналіз пошкоджень, дефектів, встановлення причин і механізмів їх виникнення та можливого розвитку. При цьому, оцінюється залишковий ресурс і розробляються рекомендації з управління старінням з метою забезпечення надійної і безпечної експлуатації турбіни в понад проектний період. Одним із способів оцінки залишкового ресурсу є застосування програмних засобів на базі кінцево-елементного методу розв'язання диференціальних рівнянь, а також інтегральних рівнянь. У даній статті представлені результати розрахунку граничних умов для визначення теплового стану і подальшої оцінки ресурсу ротора високого тиску із застосуванням програмних засобів на базі кінцево-елементного методу. Ротор високого тиску був умовно розбитий на певні ділянки для яких були визначені коефіцієнти тепловіддачі від парового середовища до тіла ротора в залежності від типового графіка пуску турбіни з холодного, неостиглого і гарячого станів.

Ключові слова: атомна електростанція, парова турбіна, ротор високого тиску, граничні умови, тепловий стан, геометрична модель, енергоблок, холодний стан, неостиглий стан, гарячий стан.

O. CHERNOUSENKO, A. NIKULENKOV, T. NIKULENKOVA, L. BUTOVSKY, I. BEDNARSKA CALCULATING BOUNDARY CONDITIONS TO DETERMINE THE HEAT STATE OF HIGH PRESSURE ROTOR OF THE TURBINE NPP K-1000-60/3000

To extend the operation life of the turbine of nuclear power plant the range of work should be done to evaluate the technical state of turbine, in particular to detect and analyze the defects, carry out investigation into the causes of a failure and the mechanisms of their appearance and possible development. The residual life is also assessed and the recommendations on the control of ageing are given to provide reliable and safe turbine operation during the period exceeding the design service life. One of the methods of estimation of the residual life is the use of the software based on the finite-element method of the solution of differential equations with partial derivative and also integral equations. This scientific paper gives the computation data for boundary conditions obtained to define the heat state and estimate the operational life of high pressure rotor using the software based on finite-element method. The high-pressure rotor was conventionally split into specific sections for which the coefficients of heat transfer from the steam medium to the rotor body were defined depending on the standard schedule of the cold, warm and hot starts-up of the turbine.

Key words: nuclear power plant, steam turbine, high pressure rotor, boundary conditions, heat state, geometric model, energy-generating block, cold state, warm state and hot state.

Введение

Атомная генерация на территории Украины представлена четырьмя площадками (Запорожская, Ривненская, Южно-Украинская и Хмельницкая атомные станции) с пятнадцатью действующими энергоблоками и общей установленной мощностью 13 835 МВт.

Приближение срока выработки установленного ресурса оборудования энергоблоков АЭС с

одной стороны и необходимость в увлечении электрогенерации, в связи с постоянно растущими запросами потребителей, с другой – ставит перед атомной отраслью две глобальные задачи:

1) провести комплекс работ и модернизаций с целью эксплуатации энергоблоков в сверхпроектный срок с обеспечением требуемого уровня безопасности;

2) используя заложенные инженерные резервы действующих энергоблоков в сочетании с

нарастающий темпами развития науки и техники, а также с учетом международного опыта, при наличии достаточного аналитического обоснования повысить установленную мощность с обеспечением требуемого уровня безопасности для действующих энергоблоков.

Одним из критических элементов, в разрезе решения поставленных задач, является турбоустановка.

На энергоблоках, установленной мощностью 1000 МВт, эксплуатируются два вида турбоустановок, работающих на сухом насыщенном паре: быстроходная К-1000-60/3000 и тихоходная К-1000-60-1500, представленная в трех модификациях.

В рамках представленной работы исследуется типовая быстроходная турбина К-1000-60/3000, которая установлена и эксплуатируется на энергоблоках № 1, 2 Хмельницкой АЭС, № 3 Южно-Украинской АЭС, № 3, 4 Ривненской АЭС.

Цель работы

Расчет граничных условий для определения теплового состояния ротора высокого давления типовой быстроходной турбины К-1000-60/3000 и дальнейшей оценки ресурса с применением программных средств на базе конечно-элементного метода.

Краткая характеристика типовой турбины К-1000-60/3000

Турбина К-1000-60/3000 – паровая, конденсационная, с нерегулируемыми отборами пара, промежуточной сепарацией и одноступенчатым паровым промежуточным перегревом, рассчитана для работы в блоке с реактором ВВЭР-1000.

Парораспределение турбины – дроссельного типа, осуществляется четырьмя регулирующими клапанами в части высокого давления и четырьмя регулирующими клапанами в части низкого давления. При неисправности регулирующего клапана предусмотрена возможность пароснабжения коллектора уплотняющего пара по байпасу, на котором установлена задвижка.

Цилиндр высокого давления расположен в средней части турбины, а цилиндры низкого давления – симметрично по обе стороны ЦВД. Цилиндр высокого давления – двухпоточный, состоит из наружного и внутреннего корпусов. Подвод пара в ЦВД выполнен боковым, по двум патрубкам, расположенным в нижней половине корпуса. Ротор ЦВД – цельнокованный, с постоянным корневым диаметром всех ступеней.

Цилиндры низкого давления – двухпоточные, по пять ступеней давления в каждом потоке. ЦНД

состоит из наружного и внутреннего корпусов сварной конструкции. В местах выхода роторов из наружных корпусов ЦНД расположены концевые уплотнения, предназначенные для предотвращения подсоса воздуха в вакуумную систему турбины на всех режимах работы.

Режимы работы типовой турбины К-1000-60/3000

Изучены инструкции по эксплуатации паровой турбины К-1000-60/3000, которые определяют порядок и условия эксплуатации турбоустановки.

Расчетные исследования высокотемпературных элементов турбоустановки К-1000-60/3000 проведены для наиболее характерных в практике эксплуатации АЭС режимов работы (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристика пусковых режимов турбины К-1000-60/3000

Наименование режима пуска	Температура фланцев ЦВД перед пуском, °С	Продолжительность нагружения, мин.
Пуск из ХС	60	379 мин
Пуск из НС	100	320 мин
Пуск из ГС	150	260 мин

При температуре металла наружной поверхности фланца ЦВД в зоне паровпуска, отличающейся от температуры, приведенной в графике-задании, пуск турбины производился по ближайшему графику, соответствующему более холодному состоянию. Температуры свежего пара и пара после СПП не имели резких колебаний.

Если в процессе эксплуатации турбоустановки происходило повышение давления пара в конденсаторе сверх допустимых значений, выполнялись мероприятия по восстановлению давления в конденсаторе, согласно требований действующих инструкций на АЭС.

В работе исследовались графики пусков из холодного состояния (ХС), неостывшего состояния НС и горячего состояния ГС. График пуска из холодного состояния представлен на рис. 1.

Подходы к определению температурного поля ротора высокого давления типовой турбины К-1000-60/3000

В общем виде, определение температурного поля твердого тела описывается дифференциальным уравнением теплопроводности вида:

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(-\lambda \operatorname{grad} t) + q_v. \quad (1)$$

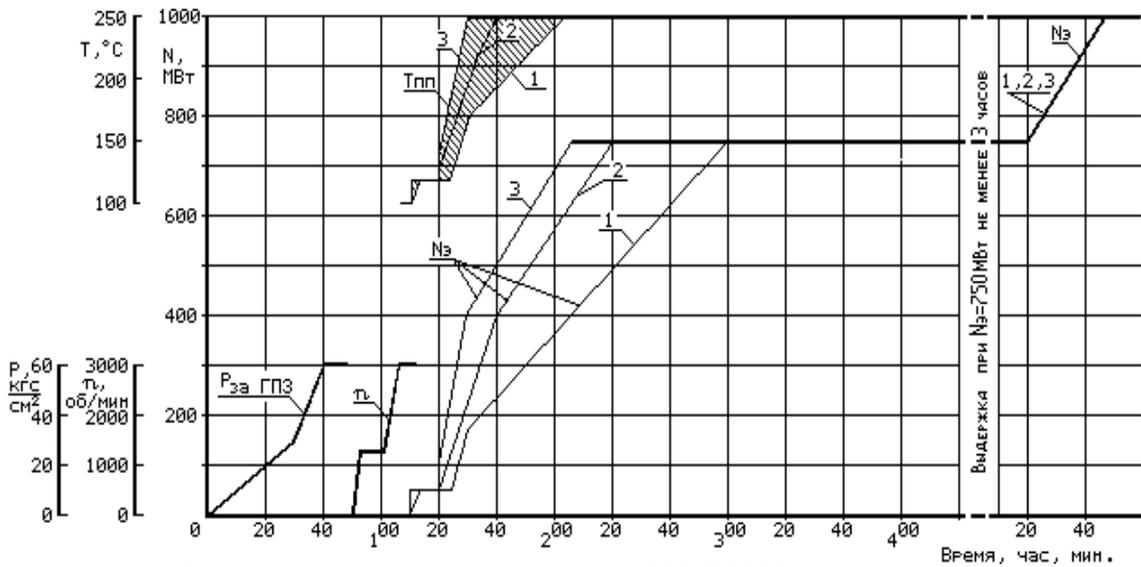


Рис. 1 – График-задание пуска типовой турбины К-1000-60/3000 из холодного состояния [1]:
 1 – при начальной температуре фланцев ЦВД = 100 °С; 2 – при начальной температуре фланцев ЦВД = 120 °С; 3 – при начальной температуре фланцев ЦВД = 150 °С

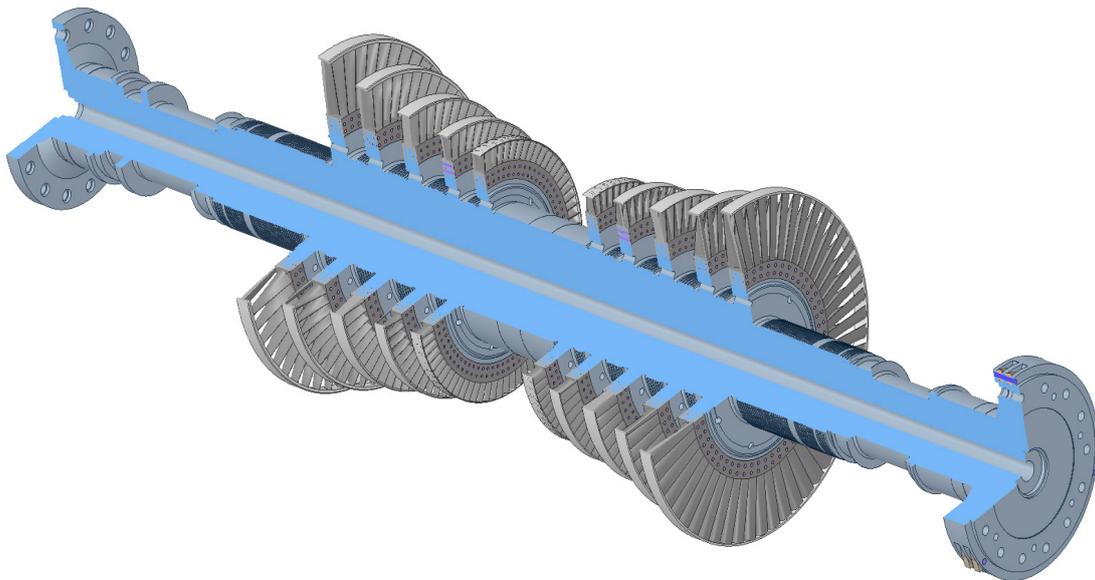


Рис. 2 – Пространственная 3-D модель ротора высокого давления типовой турбины К-1000-60/3000

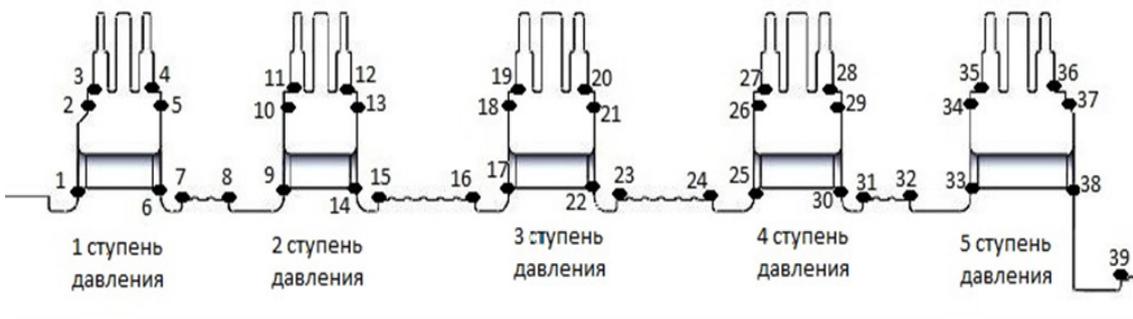


Рис. 3 – Схема расположения участков расчета коэффициентов теплоотдачи по поверхности ротора высокого давления турбины К-1000-60/3000:
 1–39 – характерные участки для которых выполнялся расчет

В уравнение (1) искомой является температура $t(x, y, z, \tau)$. Коэффициенты указанного уравнения: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; q_v – мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³, могут зависеть от температуры, а также быть явными функциями координат и времени.

Отсутствие внутренних источников теплоты, а также с учетом закона Фурье, уравнение (1) перепишется следующим образом:

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + \operatorname{div}(q) = 0. \quad (2)$$

Для стационарного случая уравнение (2) примет вид:

$$\operatorname{div}(q) = 0. \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) q – плотность теплового потока, вычисляемая по закону Фурье.

Для определения температурного поля ротора высокого давления типовой турбины К-1000-60/3000, при задании тепловых граничных условий I–IV, весомый вклад вносят технологические особенности рассматриваемых режимов работы турбоустановки. Для задания граничных условий III рода расчет коэффициентов теплоотдачи α выполнялся по критериальным зависимостям. На поверхности осевой проточки задавались условия отсутствия теплообмена. Для режима простоя турбоагрегата, в соответствии с РТМ [2], задавались также условия теплоизоляции по всей проточной части.

Пространственная 3-D модель ротора высокого давления типовой турбины К-1000-60/3000 представлена на рис. 2.

Схема разбиения ротора высокого давления типовой турбины К-1000-60/3000 на характерные участки, для которых производился расчет значений температуры, давления и коэффициентов теплоотдачи, представлена на рис. 3. Характерные участки выбирались с учетом симметрии, а также особенностей теплообмена.

Также следует отметить, что при задании граничных условий необходимо учесть схемы утечек пара в уплотнениях, реальные графики пуска из различных тепловых состояний.

При решении краевой задачи нестационарной теплопроводности задаются нестационарные ГУ I–IV рода с учетом эксплуатационных переменных режимов работы.

При граничных условиях I рода задаются значения температуры на границе расчетной области:

$$T|_w = f(x_{1,w}, \tau), \quad (4)$$

где $x_{1,w}$ – координаты границы заданной расчетной области.

В частном случае эта температура после мгновенного изменения до температуры T_w может

оставаться неизменной во времени и не изменяться вдоль границы:

$$T|_w = T_w = \text{const}, \quad (5)$$

При граничных условиях II рода задаются значения плотности теплового потока на границе расчетной области:

$$q|_w = q_w(x_{1,w}, \tau), \quad (6)$$

С учетом закона Фурье ГУ II рода можно записать следующим образом

$$\underbrace{-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}}_{\text{Закон Фурье}}|_w = q_w(x_{1,w}, \tau), \quad (7)$$

где n – координата, направленная по нормали к границе расчетной области.

В частном случае плотность теплового потока q_w может не меняться вдоль границы расчетной области и быть постоянным во времени:

$$q|_w = q_w = \text{const}, \quad (8)$$

При граничных условиях III рода задается температура внешней среды, окружающей тело, и закон теплообмена между средой и поверхностью тела. Граничные условия третьего рода являются наиболее общими и часто используемыми в практике расчетов граничными условиями. В качестве закона теплообмена между окружающим тело средой и поверхностью тела наиболее часто в инженерных расчетах используют закон теплоотдачи – закон Ньютона:

$$q|_w = \alpha(T_f - T_w), \quad (9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

T_f – температура жидкости;

T_w – температура поверхности тела.

С учетом закона Фурье ГУ III рода можно записать следующим образом

$$\underbrace{-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}}_{\text{Закон Фурье}}|_w = \alpha(T_f - T_w), \quad (10)$$

В расчетах теплопроводности в можно также использовать безразмерную форму записи граничных условий третьего рода

$$\pm \frac{\partial \Theta}{\partial X}|_w = \text{Bi} \Theta_w, \quad (11)$$

где $\Theta = \frac{T_f - T}{T_f - T_0}$ – безразмерная температура;

$X = x/R$ – безразмерная координата, перпендикулярной поверхности теплообмена;

R – характерный или определяющий размер тела;

$\text{Bi} = \alpha R / \lambda_w$ – критерий Био;

λ_w – коэффициент теплопроводности твердого тела.

Граничные условия IV рода задаются для условия теплообмена на границе идеального контакта двух тел, состоящих из разного вещества с различными физическими свойствами. В этом случае в зоне идеального контакта в обоих тел равные температуры и тепловые потоки:

$$\begin{cases} T_{w1} = T_{w2} \\ q_{w1} = q_{w2} \end{cases} \quad (12)$$

или, используя закон Фурье:

$$\begin{cases} T_{w1} = T_{w2} \\ \lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w \end{cases} \quad (13)$$

При наличии влажного пара греющего поверхности камер отбора и участки корпусов межцилиндровых пространств ЦВД коэффициенты теплоотдачи рассчитываются с помощью разрабо-

танного комплекса программ численного исследования газовой динамики и теплообмена пара в камерах отбора и межцилиндровых пространствах влажно паровых турбин.

Для возможности задания тепловых граничных условий III рода, с целью определения температурного поля ротора высокого давления типовой турбины К-1000-60/3000, коэффициенты теплоотдачи α определялись по критериальным зависимостям [2–4] вдоль поверхности ротора высокого давления для пусков из холодного, неостывшего и горячего состояний.

В качестве представительных результатов на рис. 4 показано распределение относительного коэффициента теплоотдачи вдоль поверхности ротора высокого давления паровой турбины К-1000-60/3000 для пуска из холодного состояния.

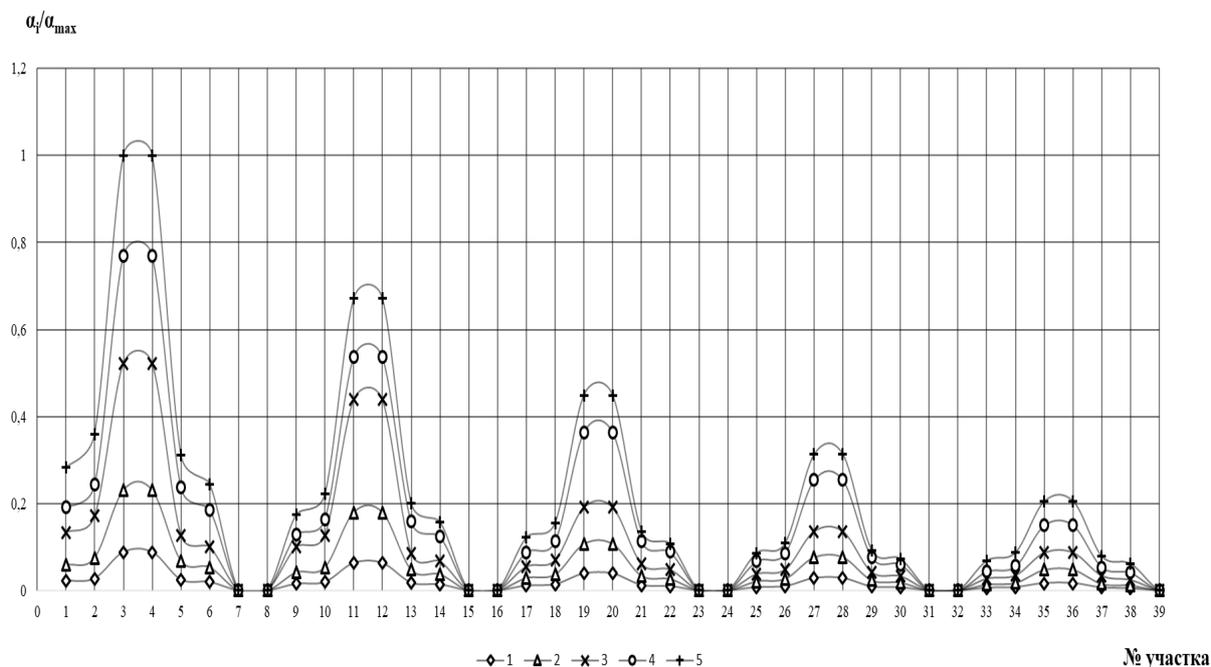


Рис. 4 – Распределение относительного коэффициента теплоотдачи вдоль поверхности ротора высокого давления паровой турбины К-1000-60/3000 для пуска из холодного состояния при следующих относительных значениях расхода пара:

1 – $G/G_0 = 0,06$; 2 – $G/G_0 = 0,2$; 3 – $G/G_0 = 0,4$; 4 – $G/G_0 = 0,8$; 5 – $G/G_0 = 1,0$

Выводы

1. Построена пространственная 3-D модель ротора высокого давления типовой турбины К-1000-60/3000.

2. Определены характерные участки высокого давления паровой турбины К-1000-60/3000 для которых рассчитаны коэффициенты теплоотдачи.

3. Рассчитаны граничные условия при пусках из холодного, неостывшего и горячего состояний с учетом изменения режимных параметров.

4. Определена зависимость изменения коэффициентов теплообмена от мощности турбины,

при этом максимальное значение приходится на номинальный режим.

5. Представленные результаты могут быть использованы для определения теплового состояния и дальнейшей оценки ресурса ротора высокого давления с применением программных средств на базе конечно-элементного метода.

Список литературы

1. Инструкция по эксплуатации. Турбина паровая. № 1(2). ТЦ.0166.ИЭ, ИЭ.3.0005.0078, 122-01/4-Э-ТЦ.
2. РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчёт температурных полей роторов и цилиндров паровых

- турбин методом электро моделирования. Москва, 1973. № ВК-002/3209. 104 с.
- Трояновский В. М., Филиппов Г. А., Булкин А. Е. *Паровые и газовые турбины атомных электростанций*. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
 - Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. *Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии*. Изд. 8-е. Ленинград: Химия, 1976. 552 с.
 - Трояновский В. М., Филиппов Г. А., Булкин А. Е. (1985), *Паровые и газовые турбины атомных электростанций* [Steam and Gas Turbines of Nuclear Power Plants], Energoatomizdat, Moscow, 256 p.
 - Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. (1976), *Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии* [Examples and Problems in Chemical Engineering Processes and Equipment], Khimiya, Leningrad, 552 p.
- Поступила (received) 28.02.2018*

References (transliterated)

- Instruktsiya po ekspluatatsii. Turbina parovaya* [Operating Guidelines. Steam Turbine]. No. 1(2).ТТs.0166.IE, IE.3.0005.0078, 122-01/4-E-TTs.
- (1973), *Turbiny parovye statsyonarnie. Raschet temperaturnikh poley rotorov y tsylyndrov parovikh turbyn metodom elektro-*

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Черноусенко Ольга Юрійвна (Черноусенко Ольга Юрьевна, Chernousenko Olga Yuriiivna) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 504–82–92; e–mail: chernousenko20a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>.

Нікуленков Анатолій Геннадійович (Нікуленков Анатолій Геннадьевич, Nikulenkov Anatolii Hennadiiovych) – Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (063) 82–94–86; e–mail: ag.nikulenkov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4345-8575>.

Нікуленкова Тетяна Володимирівна (Нікуленкова Татьяна Владимировна, Nikulenkova Tetiana Volodymyrivna) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 375-54-44; e–mail: tetyana.nikulenkova@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1880-1124>.

Бутовський Леонід Сергійович (Бутовский Леонид Сергеевич, Butovskiy Leonid Serhiiiovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (096) 633-07-21; e–mail: homet129@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8947-9887>.

Беднарська Інна Станіславівна (Беднарская Инна Станиславовна, Bednarska Inna Stanislavivna) – Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», магістрант кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (098) 810-60-01; e–mail: innabednarska1@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5558-4467>.