

А.А. Генбач<sup>1</sup>, Д.Ю. Бондарцев<sup>1</sup>, А.А. Айтмагамбетов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,  
г. Алматы, Казахстан

---

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ПТУ И ГТУ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

---

---

**Аннотация.** Особую опасность при переходных режимах вызывает неодинаковость во времени температурных расширений вращающихся и неподвижных деталей и возникающие температурные напряжения, которые не приводят к каким-либо опасным ситуациям на текущий момент, но при циклическом повторении, спустя годы, часто приводят к появлению трещин малоциклового усталости. Значительный интерес представляют внутренние процессы, протекающие в пористых структурах, в частности интенсивность процесса фазового перехода в зонах пористой структуры. В статье приведено изучение характера влияния кипения капиллярной структуры (КС) на интенсивность теплоотдачи. Представлена методика проектирования пористых систем применительно к разработанным устройством тепловых энергоустановок. Проведенные исследования позволяют внедрять охлаждающую жидкость, материал корпуса и структуры, вид пористого покрытия, провести расчеты теплопределов, сопротивления, термических напряжений и приводят экономическую и экологическую оценку.

**Ключевые слова:** тепловой поток, паро (газо) турбинная установка, капиллярно-пористые структуры и покрытия, система охлаждения.

• • •

**Түйіндеме.** Өтпелі режимдердегі ерекше қауіп температураның кеңеюінің, айналмалы және қозғалмайтын бөліктердің уақыт бойынша теңсіздігін тудырады; пайда болатын температуралық кернеулер, қазіргі уақытта қауіпті жағдайларға әкелмейді, циклдік қайталанумен, көбінесе жылдар өткен соң, төмен циклді шаршау жарықтарының пайда болуына әкеледі. Кеуекті құрылымдарда жүретін ішкі процестер, атап айтқанда кеуекті құрылым аймақтарындағы фазалық ауысу процесінің қарқындылығы үлкен қызығушылық тудырады. Бұл жұмыста капиллярлық құрылымның (КС) қайнауының жылу беру қарқындылығына әсер ету сипаты зерттелді. Әзірленген жылу электр қондырғыларының құрылғысына қатысты кеуекті жүйелерді жобалау әдістемесі ұсынылған. Зерттеулер салқындатқышты, корпус материалы мен құрылымын, кеуекті жабынның түрін енгізуге, жылу анықтауды, қарсылықты, жылу кернеуін есептеуге және экономикалық және экологиялық баға беруге мүмкіндік береді.

**Түйінді сөздер:** жылу ағыны, бу (газ) турбиналық қондырғы, капиллярлық-кеуекті құрылымдар мен жабындар, салқындату жүйесі.

**Abstract.** A special danger during transient conditions is caused by the difference in time of temperature expansions, rotating and stationary parts; the arising thermal stresses, without leading to any dangerous situations at the current moment, during cyclic repetition, often after years, lead to the appearance of low-cycle fatigue cracks. Internal processes occurring in porous structures, in particular, the intensity of the phase transition process in the zones of the porous structure, are of considerable interest. In this work, we study the nature of the effect of boiling of the capillary structure (CS) on the intensity of heat transfer. The method of designing porous systems in relation to the developed device of thermal power plants is presented. The conducted research makes it possible to introduce the cooling liquid, the material of the body and structure, the type of porous coating, perform calculations of heat determination, resistance, thermal stresses, and give an economic and environmental assessment.

**Keywords:** heat flow, steam (gas) turbine unit, capillary-porous structures and coatings, cooling system.

**Введение.** К переходным режимам относятся такие процессы как пуски и остановки турбины. Пуски и остановки газовой турбины являются наиболее ответственными этапами эксплуатации газотурбинной установки. Эти операции связаны со значительными изменениями механического и термического состояния элементов турбины. Поэтому от правильного проведения данных режимов существенно зависят эксплуатационная надежность и долговечность газотурбинной установки. Переходный или не стационарный режимы работы - процесс перехода от одного стационарного режима к другому. Поскольку параметры газа и температурное состояние деталей на различных стационарных режимах разные, то в процессе переходного периода параметры газа и температурное состояние деталей изменяются, что приводит к ряду новых явлений. Несмотря на то, что каждый из стационарных режимов не представляет для турбины непосредственной опасности, сам переходный процесс может быть очень опасным, провоцируя в некоторых случаях аварийную ситуацию. Особую опасность при переходных режимах вызывает изменение температуры внутри турбины, неодинаковость во времени температурных расширений вращающихся и неподвижных деталей вызывает опасность задеваний с тяжелой аварией; возникающие температурные напряжения, не приводя к каким-либо опасным ситуациям на текущий момент, при циклическом повторении, спустя годы часто приводят к появлению трещин малоциклового усталости [1].

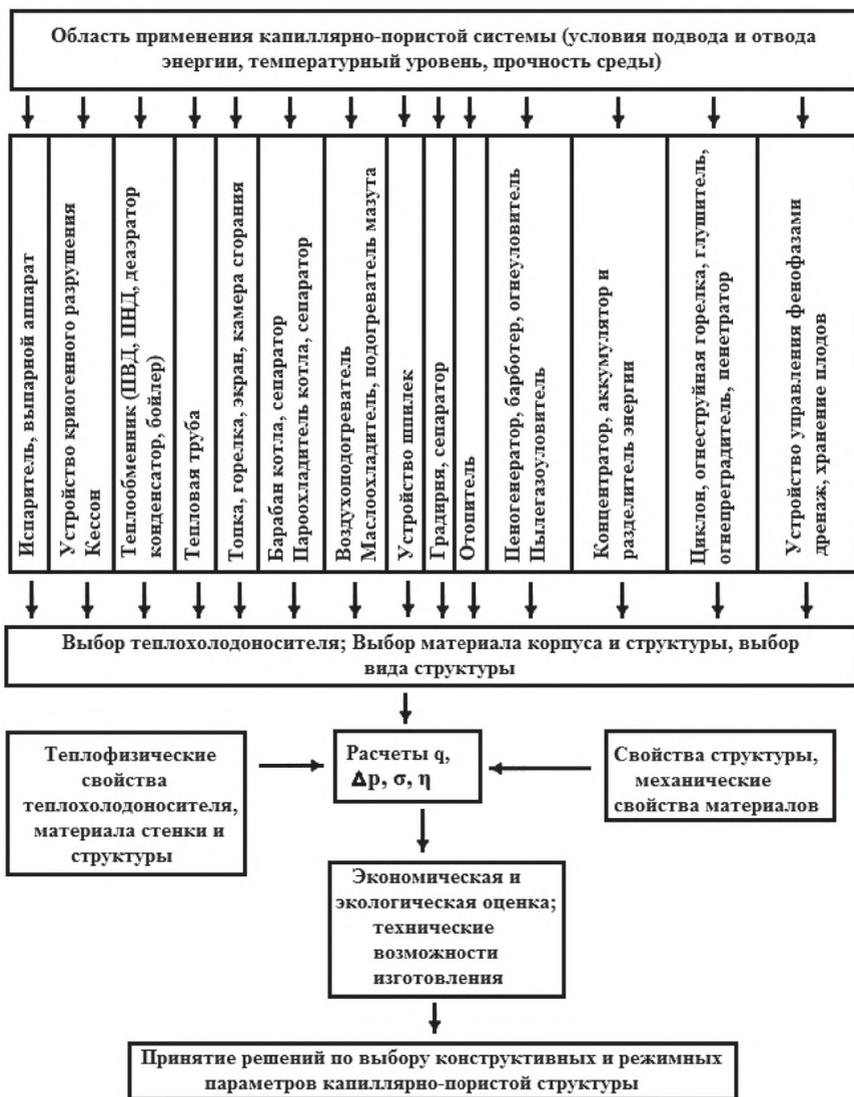
Вопросы переходных режимов являются основными в понимании теории эксплуатации паро(газо)-турбинных установок. Умение решать подобные задачи в условиях эксплуатации турбомашин позволяет повысить их надежность, экономичность, маневренность (подвижность) с учетом жестких требований экологии. Для охлаждения теплообменных поверхностей различных теплоэнергетических установок (паровых и газовых машин, котельных агрегатов, теплообменников) широкое применение нашли КПП. В последние годы для их изготовления начато использование природных минеральных материалов, в частности горных пород. Дополнительное введение в их состав тугоплавких элементов, например циркония, позволяет повысить теплостойкость таких покрытий до 1200°C и выше. Из используемых в настоящее время методов интенсификации теплообмена широко применяются автоматизированные расчеты и использование программного обеспечения [2-3]. В литературе [4] рассмотрено экспериментальное исследование для новой микро структурированной поверхности, которое позволяет рекомендовать методы выявления и предотвращения кризиса кипения в промышленной аппаратуре. Вместе с этим значительный интерес представляют внутренние процессы, протекающие в пористых структурах, в частности интенсивность процесса фазового перехода в зонах пористой структуры.

В данной работе проведено изучение характера влияния кипения капиллярной структуры (КС) на интенсивность теплоотдачи. Поскольку нельзя получить данные по внутренним характеристикам, использовалась скоростная киносъемка для определения термодинамических характеристик, например, плотность центров парообразования, отрывной диаметр пузыря [9]. В литературе [5-6] численно исследован тепло- и массоперенос с фазовым переходом в пористых материалах. Рассмотрены исследования температуры внутри КПС, выводы могут быть применены только к некоторым проблемам [7, 8]. Представляет интерес в качестве пористых структур использовать перспективные КПС и КПП из естественных минеральных сред.

**Методика проектирования пористых систем.** На рисунке 1 представлена методика проектирования пористых систем применительно к разработанным устройствам тепловых энергоустановок. Проведенные исследования [9-11] позволяют внедрять охлаждающую жидкость, материал корпуса и структуры, пористое покрытие, провести расчеты теплопределов, сопротивления, термических напряжений и дать экономическую и экологическую оценку.

Охлаждение поверхности нагрева изучается от минимально возможного расхода жидкости, при котором слив равнялся нулю, до расхода жидкости в 14 раз превышающего расход генерируемого пара  $m_1$ . Необходимое изменение расхода жидкости определяется по нарушению равномерности в распределении температуры по поверхности охлаждаемой стенки. При этом обеспечивается надежный теплосъем за счет сохранения устойчивой пульсирующей пленки жидкости, что выгодно отличает рассматриваемую систему охлаждения от тонкопленочных испарителей [12], в которых происходит разрыв стекающей жидкостной пленки и появляется необходимость в значительном увеличении расхода жидкости (в 100...10000 раз), достаточно подавать жидкость в размере  $G_{*} = q/r$ , как это имеет место в тепловых трубах [13,14]. Для охлаждения поверхностей, имеющих большую высоту (до 0,7 м), требуется повышенные расходы охладителя, что затягивает выравнивание температуры стенки при низких и умеренных тепловых нагрузках. Поэтому в обобщающих зависимостях коэффициент теплообмена  $\alpha$  выражается через высоту стенки  $h$  как  $\alpha \sim h^{0,26}$ .

Для области, близкой и критической, значительное увеличение расхода жидкости не оказывает влияния на процессы теплообмена [9]. При развитом пузырьковом кипении основное влияние на теплообмен оказывает удельная плотность теплового потока. Влияние плотности орошения значительно меньше, чем в случае переходного поверхностного кипения, протекающего в начальной области, хотя при больших значениях чисел Рейнольдса усиливается теплопроводность пленки, так как возникающие вихри приводят к увеличению вязкости, стабилизации толщины пленки, что придает ей дополнительную устойчивость к кризису кипения. На кинограммах [9] наблюдается увеличение времени «жизни» паровых пузырей для тех случаев, когда устанавливается баланс притока тепла от стенки и перегретой жидкости и стока его посредством теплоты конденсации в ядре стекающего недогретого потока. Рост парового пузыря в пределах ячейки, что, в целом, увеличивает время его «жизни» [10]. Пуски и остановки турбомашин приводят к существенным изменениям их механического и термического состояний, а также примыкающим к турбинам трубопроводов, клапанов, патрубков. От происходящих при этом изменений зависит эксплуатационная надежность и долговечность, экономичность и способность к маневренности турбин, влияние на экологию.



$q$  – удельные тепловые потоки в элементах ТЭУ;  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление;  $\sigma$  – термические напряжения;  $\eta$  – к.п.д. ТЭУ

Рисунок 1 – Схема проектирования капиллярно-пористой структуры

Обзор литературы [15-20] и критический анализ аварий ГТУ показывает, что большинство из аварийных ситуаций происходит при пусках. Причины сводятся к трем основным факторам: неправильно выбран режим прогрева турбомашин; ошибки персонала; конструкционные недостатки, допущенные при стадии проектирования и изготовления, а также при монтаже и ремонте турбины. К наиболее сложным случаям неустановившегося тепломеханического состояния турбины относится пуск, поскольку возникающие в процессе его термические и механические напряжения в элементах агрегата, как правило, суммируются. Кроме того, при пуске остывших турбин возникают дополнительные трудности, которые не встречаются в процессах остановки. Особые проблемы возникают при пуске блочных турбоагрегатов на докритические и закритические параметры пара. Явления, вызываемые нестационарностью теплового состояния элементов турбины при пуске:

1. Появление термических напряжений в стенках и фланцах корпуса турбины, паропроводов, стопорных и регулирующих клапанов;
2. Появление дополнительных растягивающих напряжений в шпильках горизонтального разъема корпуса турбины, а также в шпильках фланцевых соединений клапанов и паропроводов;
3. Возникновение термических напряжений в роторе турбины;
4. Возникновение прогиба цилиндра вследствие разности температур верхней и нижней части корпуса турбины.

Все перечисленные явления усложняют пуск турбины и могут послужить причиной аварии при нарушении режима прогрева [21].

При пуске турбины её состояние условно можно охарактеризовать как механическое, так и термическое. Детали и узлы работают под действием статических и динамических нагрузок.

Классификация пусков паровой турбины:

1. Пуск из холодного состояния – процесс, которому отвечает температура турбины (т.е. стенки в районе паровпуска), не повышающая  $150^{\circ}\text{C}$ , при этом котел и паропроводы находятся в полностью остывшем состоянии. Для крупных энергоблоков такое состояние достигается не менее, чем через 90-100 ч., а время пуска из этого состояния – не менее 6-7 ч., иногда достигает 12 ч. и более. На АЭС это время значительно меньше (3 ч. и более);
2. Пуск из горячего состояния – температура турбины не менее  $420-450^{\circ}\text{C}$ . Такое снижение температуры происходит за 6-10 ч. (например, после ночного простоя);
3. Пуск из остывшего состояния – характеризуется значением

температуры, имеющим промежуточное значение (после простоя в субботу и воскресенье).

В основе разрушения, с одной стороны, лежат разрывы межатомных связей, обусловленные тепловыми флуктуациями, а с другой – разрушение есть кинетический термоактивационный процесс, в основе которого лежит перемещение вакансий к трещинам, рост которых определяет кинетику разрушения. Возможны деформации и разрушения КПП с остроконечными концентраторами напряжений типа трещин в виде прямолинейных, криволинейных, дискообразных, эллиптических и круговых узких щелей. В окрестности острия концентратора возникает высокая интенсивность напряжений и наступает пластическое течение материала или распространение хрупкой трещины. Установлено предельное равновесие хрупких тел с трещинами.

Механизм разрушения металлов отличается от механизма разрушения хрупких покрытий, ряд термомеханических свойств также различны. Несмотря на это, на основе решения уравнения теплопроводности при граничных условиях второго рода [9-10] проведена аналогия в поведении материалов и выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений, что позволяет предсказывать и предотвращать возникновение предельных состояний для парогенерирующей поверхности и оценивать толщину отрывающихся частиц. Размеры отрывающихся частиц при разрушении КПП подтверждены скоростной съемкой СКС-1М [7]. Для турбинных сталей предел прочности на растяжение  $\sigma_{\text{в}} \approx (400 \div 1000)$  МПа. Предел текучести при рабочей температуре –  $(400 \div 550)$  °С понижается до  $(200 \div 900)$  МПа при деформации 0,2%. Пределы длительной прочности снижаются до  $(70 \div 260)$  МПа при деформации в  $(10 \div 20)\%$ . Величина временного термонапряжения уменьшается до  $(40 \div 120)$  МПа, т.е. на порядок. Основные оценочные напряжения усталости составляют всего до 0,45 от  $\sigma_{\text{в}}$ . Следовательно, велика вероятность, что  $\sigma_{\text{пр.раст}} \approx \sigma_{\text{пр.сж.}}$ , а  $\sigma_{\text{пр.раст}}$  доходят до 10 МПа и становятся одного порядка для пористых покрытий.

**Выводы.** Диапазон критических значений удельных тепловых потоков в нагреваемом слое определяет предельное и устойчивое ведение процесса охлаждения при высокой производительности энергоустановки. Верхний предел предельных значений для тешенитного покрытия не более  $0,08 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, для гранитного – до  $0,5 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, для кварцевого – до  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, а нижний предел, при котором ещё наблюдается отрыв частиц под действием термонапряжений сжа-

тия, для кварцевого покрытия составит  $0,25 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, для гранитного в пять раз меньше ( $0,05 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>), а для тешенитного – в десять ( $0,025 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>). Меньшие удельные тепловые потоки будут вызывать разрушение покрытий от растяжения.

### Список литературы

1 Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки. – М.: МЭИ, 2002. – 540с., [Trukhniĭ A.D., Lomakin B.V. Teplofikatsionnye parovye turbiny i turboustanovki. – М.: МЭИ, 2002. – 540с.]

2 Верховский В.В., Данилова Г.Н., Тихонов А.В. Внутренние характеристики процесса и теплообмен при кипении хладагентов на поверхностях с искусственными центрами парообразования // In: Proc. 4th Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. Minsk, Belarus. – 2000. – P. 168-175., [Verkhovskij V.V., Danilova G.N., Tikhonov A.V. Vnutrennie kharakteristiki protsessa i teploobmen pri kipenii khladagentov na poverkhnostyakh s iskusstvennymi tsentrami paroobrazovaniya // In: Proc. 4th Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. Minsk, Belarus. – 2000. – R. 168-175.]

3 Arik M. Enhancement of pool boiling critical heat flux in dielectric liquids by microporous coatings / Mehmet Arik, Avram Bar-Cohen, Seung Mun You // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 997-1009.

4 Vafai K., Tien C. L. Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media // ht. 1. Heat mass transfer. – 1980. – Vol. 24, – P. 195-203.

5 Ustinov A., Mitrovic J. Special boiling effects of novel microstructured surface // 5th European Thermal – Sciences Conference, The Netherlands. – 2008. – P. 105-109.

6 Vafai K. and Tien H. C. A numerical investigation of phase change effects in porous materials // ht. 1. Heat mass transfer. – 1989. – Vol. 32, – P. 1261-1277.

7 Genbach A.A., Bondartsev D.Y. Modeling of thermal stresses destroying the porous coating of heat-exchange surfaces of power plants. Power engineering: research, equipment, technology. 2019; 21(3): 117 – 125. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-117-125>

8 Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Experimental method of investigation of the heat transfer crisis in a capillary-porous cooling system // News of the academy of sciences of the RK. – Vol. 2, №4 (28). – P. 81 – 88.

9 Genbach A.A., Bondartsev D. Yu., Iliev I.K., Georgiev A.G.. Scientific method of creation of ecologically clean capillary-porous systems of cooling of power equipment elements of power plants on the example of gas turbines. Energy. 199 (2020), 117458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117458>

10 Genbach A.A., Bondartsev D.Y., I.K. Iliev. Thermal Science. 2019, Volume 23, Issues 2, Pages 849 – 860. <https://doi.org/10.2298/TSCI171016139G>

11 Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Айтмагамбетов А.А. Исследование кризиса теплопередачи и предельного состояния теплообменной поверхности, покрытой капиллярно-пористой средой. Вестник КазННТУ, №5 (141) 2020. – с. 159-165., [Genbach A.A., Bondartsev D.YU., Ajtmagambetov A.A. Issledovanie krizisa teploperedachi i predel'nogo sostoyaniya teploobmennoj poverkhnosti, pokrytoj kapillyarno-poristoj sredoj. Vestnik KazNITU, №5 (141) 2020. – s. 159-165.]

12 Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.И. Теплообмен в жидкостных пленках. – Киев, 1972. – 275 с., [Vorontsov E.G., Tananajko YU.I. Teploobmen v zhidkostnykh plenkakh. – Kiev, 1972. – 275 s.]

13 Воронин В.Г., Ревякин А.В., Сасин В.Я., Тарасов В.С. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с., [Voronin V.G., Revyakin A.V., Sasin V.YA., Tarasov V.S. Nizkotemperaturnye teplovyje truby dlya letatel'nykh apparatov. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 200 s.]

14 Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратах. – М.: Машиностроение, 1998. – 168 с., [Polyaev V.M., Majorov V.A., Vasil'ev L.L. Gidrodinamika i teploobmen v poristyx ehlementakh konstruksij letatel'nykh apparatakh. – M.: Mashinostroenie, 1998. – 168 s.]

15 Шитикова Е.В., Табунщик Г.В. Анализ рисков газотурбинных установок наземного применения // Вісник двигунобудування. – 2012. – №1. – С. 54 - 59., [SHitikova E.V., Tabunshhik G.V. Analiz riskov gazoturbinykh ustanovok nazemnogo primeneniya // Visnik dvigunobuduvannya. – 2012. – №1. – S. 54 - 59]

16 Скиба М.В. Тенденции развития рынка газотурбинных установок // Вестник Самарского государственного университета. Серия «Экономика и управление». – 2015. – №9/2 (131). – С. 156 – 164., [Skiba M.V. Tendentsii razvitiya rynka gazoturbinykh ustanovok // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «EHkonomika i upravlenie». – 2015. – №9/2 (131). – S. 156 – 164.]

17 Имангазин М.К., Ермуханбетова Ж.Г. Оценка риска опасности аварий на электростанции ТОО «ЖАНАЖОЛСКАЯ ГТЭС» Актыубинская область // Успехи современной науки. – 2017. – Т.6, №6. – С. 119 - 123., [Imangazin M.K., Ermukhanbetova ZH.G. Otsenka riska opasnosti avarij na ehlektrostantsii ТОО «ZHANAZHOLSKAYA GTEHS» Aktyubinskaya oblast' // Uspekhi sovremennoj nauki. – 2017. – Т.6, №6. – S. 119 - 123.,]

18 Минацевич С.Ф., Долинов А.Л., Минацевич Е.С. Анализ безопасности современных газоперекачивающих агрегатов и экономическая оценка рисков чрезвычайных ситуаций // Научные исследования и инновации. – 2013. – Т.7, № 1-4. – С. 140 – 146., [Minatsevich S.F., Dolinov A.L., Minatsevich E.S. Analiz bezopasnosti sovremennykh gazoperekachivayushhikh agregatov i ehkonomicheskaya otsenka riskov chrezvychajnykh situatsij // Nauchnye issledovaniya i innovatsii. – 2013. – Т.7, № 1-4. – S. 140 – 146]

19 Соколов В.С. Газотурбинные установки. // М.: Издат. Высшая школа,

1986. – С. 150., [Sokolov V.S. Gazoturbinnye ustanovki. // М.: Izdat. Vysshaya shkola, 1986. – С. 150.]

20 *Цанев С.В., Буров В.Д., Осыка А.С.* Газотурбинные энергетические установки: учебное пособие для вузов / под ред. С.В. Цанева – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 174 с., [Tsanev S.V., Burov V.D., Osyka A.S. Gazoturbinnye ehnergeticheskie ustanovki: uchebnoe posobie dlya vuzov / pod red. S.V. TSaneva – М.: Izdatel'skij dom МЭИ, 2011. – 174 с.]

21 *Плоткин Е.Р., Трубилов М.А.* К вопросу о пуске паровых турбин паром номинальных и скользящих параметров // Теплоэнергетика. – 1963. – № 9. – С. 6- 8., [Plotkin E.R., Trubilov M.A. K voprosu o puske parovykh turbin parom nominal'nykh i skol'zyashhikh parametrov // Teploehnergetika. – 1963. – № 9. – С. 6- 8]

**Генбач А.А.**, доктор технических наук, профессор,

**Бондарцев Д.Ю.**, доктор PhD , доцент, e-mail: d.bondartsev@inbox.ru

**Айтмагамбетов А.А.**, магистрант, e-mail: Aitmagambetov12@gmail.com