

УДК 536.242

Влияние состава рабочего тела на объём теплообменных аппаратов замкнутой газотурбинной установки

Шафиков Г. А.^{1,*}

^{*}88347@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе проанализированы области применения замкнутых газотурбинных установок и показаны их основные недостатки. Обоснованы принципы выбора теплообменных поверхностей в рекуператоре, охладителе и подогревателе. Получены зависимости коэффициентов теплопроводности и вязкости гелий-ксеноновой смеси от температуры и процентного содержания гелия. Проанализировано влияние состава смеси на параметры потока теплоносителя в подогревателе. Выполнена оценка влияния состава рабочего тела ЗГТУ на объёмы теплообменных аппаратов и показано, что определяющим в теплообменных аппаратах ЗГТУ является подогреватель, массогабаритные параметры которого значительно превосходят охладитель и рекуператор. Выбран оптимальный состав смеси для получения минимальной массы и стоимости теплообменного оборудования ЗГТУ.

Ключевые слова: свойства гелий-ксеноновой смеси, замкнутая газотурбинная установка, теплообменный аппарат, объём теплообменного аппарата

Введение

Замкнутые газотурбинные установки (ЗГТУ) находят своё применение в космической отрасли [1], атомной энергетике [2] и энергоснабжении централизованных [3] и удалённых потребителей [4]. Это обуславливается наличием у ЗГТУ ряда положительных свойств [5]:

- 1) Возможность получения высокой мощности при относительно малых габаритах проточной части.
- 2) Высокая экономичность на режимах частичной мощности.
- 3) Большой ресурс узлов ЗГТУ, связанный с чистотой рабочего тела.
- 4) Использование любого вида источника теплоты.

При этом ЗГТУ могут вырабатывать не только электроэнергию, но и теплоту для обогрева и холод для нужд кондиционирования и/или термостатирования [6], а так же для

решения специальных задач [7, 8]. В случае ЗГТУ, работающей на органическом топливе, одним из основных недостатков являются большие габариты подогревателя. Это обусловлено низким коэффициентом теплоотдачи со стороны греющих продуктов сгорания, находящихся при атмосферном давлении [5]. В связи с этим возникает потребность в поиске метода снижения объема теплообменных аппаратов (ТА) ЗГТУ. Одним из методов является подбор оптимального состава рабочего тела.

1. Постановка задачи

Изучение влияния состава рабочего тела на габариты подогревателя является частью работы по проектированию долгоресурсной ЗГТУ мощностью 25 кВт с температурой газа 1273 К перед турбиной для удаленного автономного потребителя энергии. В качестве топлива принят природный газ. Проектируемая замкнутая газотурбинная установка состоит из компрессора, рекуператора теплоты смеси, подогревателя, турбины, охладителя, рекуператора теплоты продуктов сгорания и нагрузки (рис. 1).

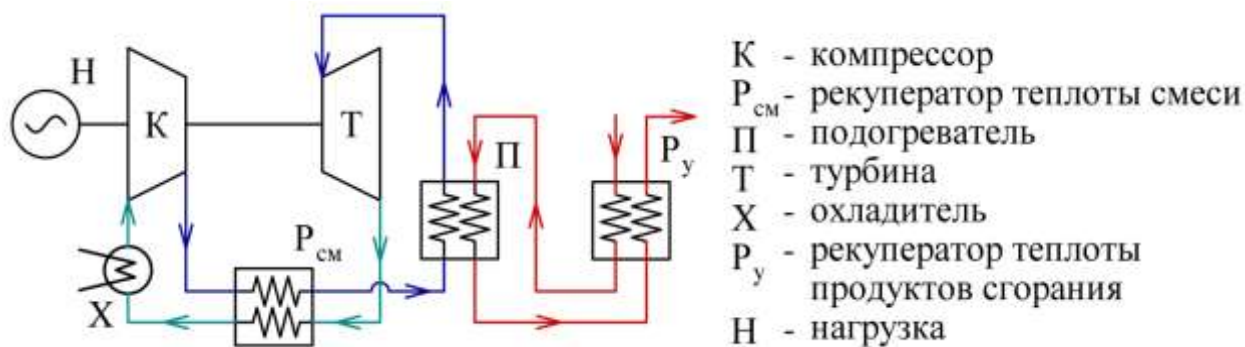


Рис. 1. Принципиальная схема ЗГТУ

В качестве рабочего тела выбрана гелий-ксеноновая смесь, так как инертные газы не вызывают химическую коррозию поверхностей деталей, что позволяет существенно продлить срок службы деталей проточной части ЗГТУ. Изменяя процентное содержание газов в гелий-ксеноновой смеси возможно варьировать в широком диапазоне её теплофизические параметры. Зависимости коэффициентов теплопроводности и вязкости гелий-ксеноновой смеси от температуры и процентного содержания гелия получены по методике, представленной в [7, 8] (рис. 2 и 3).

Важной проблемой в процессе эксплуатации ТА является загрязнение теплообменных поверхностей, которое вносит дополнительное термическое сопротивление, загромождает проходное сечение каналов, что приводит к изменению теплогидравлических характеристик поверхности теплообмена [11]. В нашем случае загрязнению подвержены поверхности рекуператора теплоты продуктов сгорания, подогревателя (со стороны продуктов сгорания) и охладителя (со стороны охлаждающего воздуха).

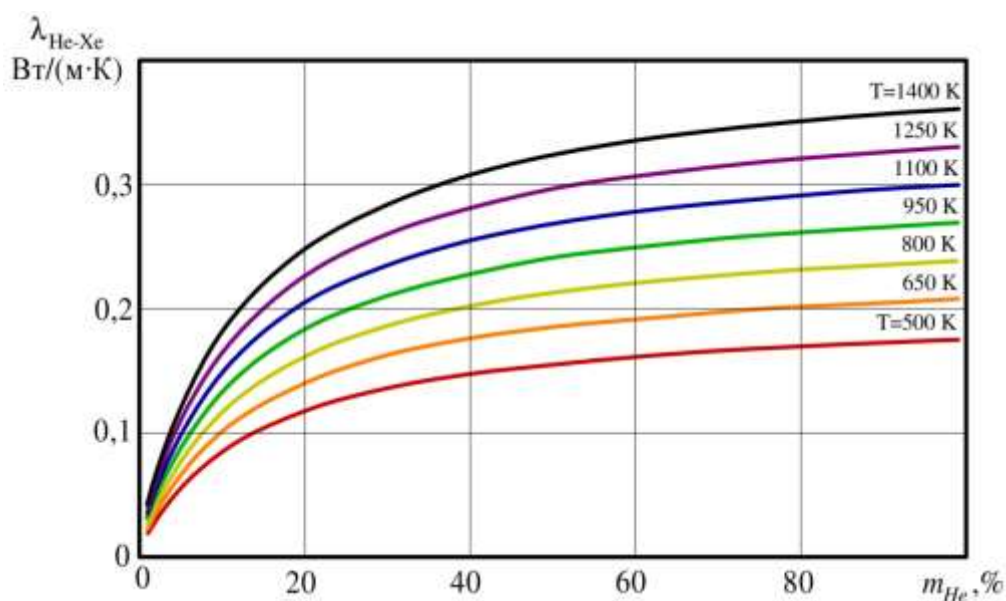


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности гелий-ксеноновой смеси от температуры и процентного содержания гелия

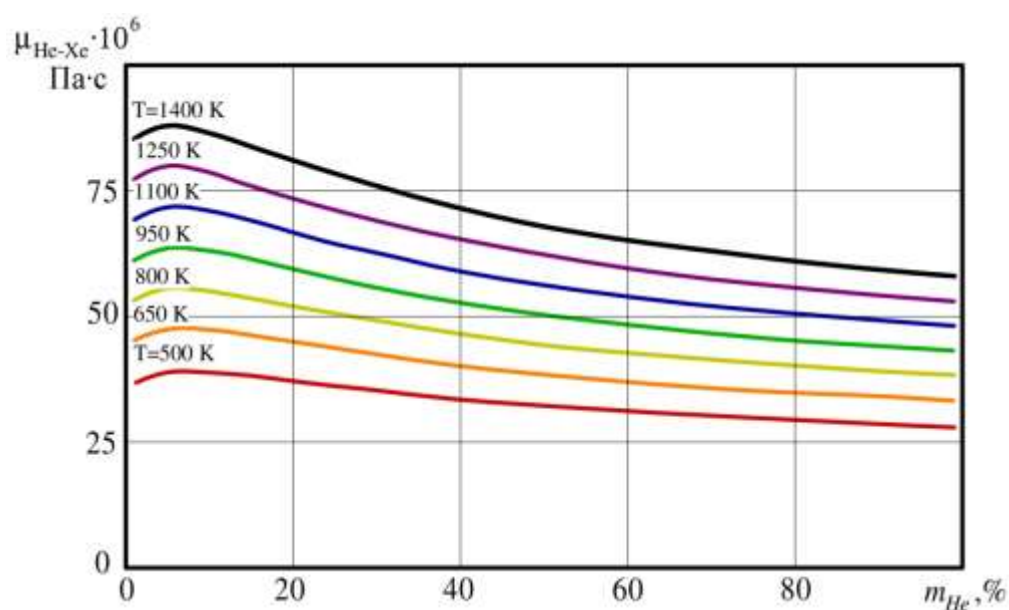


Рис. 3. Зависимость коэффициента вязкости гелий-ксеноновой смеси от температуры и процентного содержания гелия

Для снижения загрязнения поверхностей теплообмена предлагается использовать трубчатые матрицы ТА, так как они менее подвержены загрязнению и коррозии по сравнению с компактными поверхностями теплообмена [12]. Вне рассмотрения остаются вопросы дополнительной турбулизации потока на границе матрицы и корпуса [13], однако эта задача может быть решена в процессе оптимизации, т.к. данный анализ можно выполнять только для конкретной конструкции матрицы и корпуса.

Таким образом, задачей данной работы является оценка влияния состава гелий-кислородной смеси на объёмы ТА. Состав рабочего тела ЗГТУ не влияет на характеристики рекуператора теплоты уходящих газов, поэтому далее рассматриваются подогреватель, рекуператор теплоты смеси и охладитель.

2. Влияние состава смеси на параметры подогревателя

Для повышения технологичности и надёжности в процессе эксплуатации нагреватель выполнен в виде трубчатого теплообменного аппарата. Трубчатые матрицы способны работать при высоких давлениях при относительно малых толщинах стенок труб, просты в изготовлении и обслуживании, обладают стойкостью к гидроударам [12].

Подогреватель подвержен загрязнению поверхности теплообмена со стороны продуктов сгорания. Для снижения загрязнения необходимо чтобы поток продуктов сгорания имел турбулентный режим течения (число Рейнольдса продуктов сгорания $Re_{пс} \geq 10^4$ для труб).

Согласно расчетам, минимальные объёмы подогревателя (с соблюдением условия $Re_{пс} \geq 10^4$) получаются при использовании труб $\varnothing 30$ мм с относительным шагом 1,5.

Объём теплообменного аппарата зависит от коэффициента теплопередачи, который в свою очередь зависит от коэффициентов теплоотдачи смеси и продуктов сгорания.

На коэффициент теплоотдачи смеси $\alpha_{см} \left[\frac{Вт}{м^2 \cdot К} \right]$ влияют следующие термодинамические параметры смеси: коэффициент теплопроводности $\lambda_{см} \left[\frac{Вт}{м \cdot К} \right]$; коэффициент динамической вязкости $\mu_{см} [Па \cdot с]$; теплоёмкость $c_{р,см} \left[\frac{Дж}{кг \cdot К} \right]$; плотность $\rho_{см} \left[\frac{кг}{м^3} \right]$. Зависимости указанных параметров от процентного содержания гелия в смеси (для средней температуры смеси в нагревателе 1124 К) представлены на рис. 4.

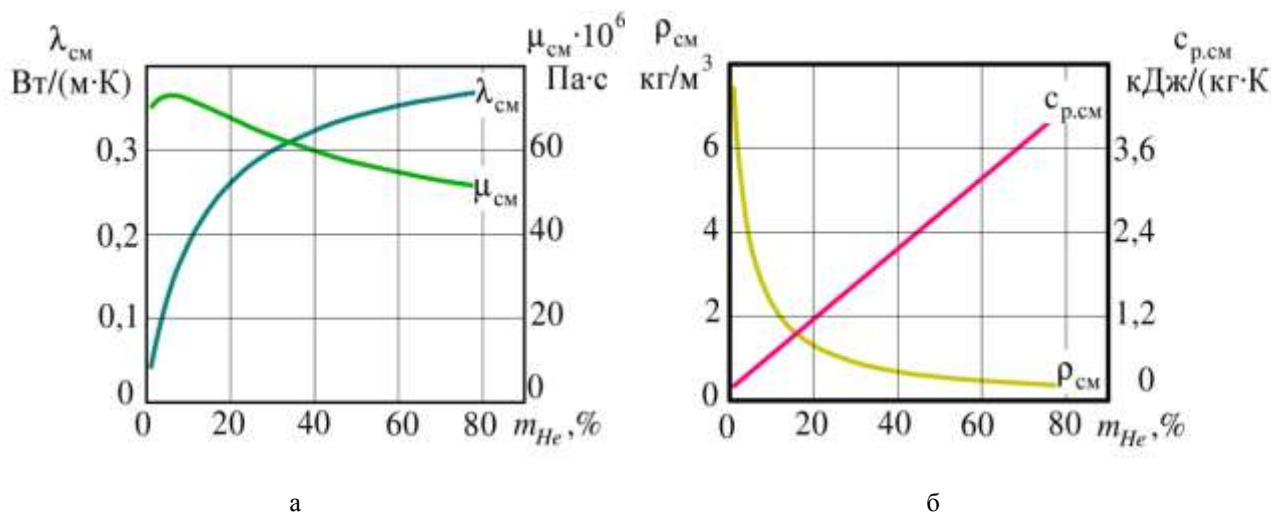


Рис. 4. Зависимость коэффициентов теплопроводности и вязкости смеси от процентной доли гелия в смеси (а); зависимость теплоёмкости и плотности смеси от процентной доли гелия в смеси (б)

Используя значения вышеперечисленных параметров смеси, вычисляется коэффициент теплоотдачи смеси. На рисунке 5 представлена диаграмма зависимостей приведённых параметров смеси от процентного содержания гелия в смеси.

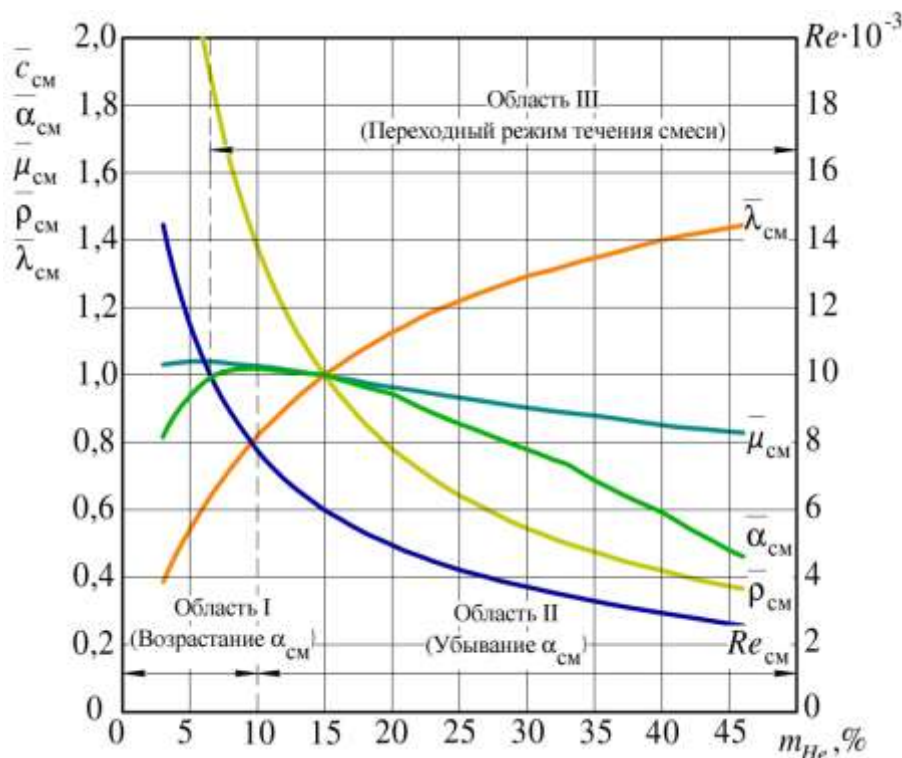


Рис. 5. Диаграмма зависимостей приведённых параметров смеси от процентного содержания гелия в смеси

Данная диаграмма (рис. 5) делится на три области:

- 1) Первая область характеризуется постепенно замедляющимся ростом коэффициента теплоотдачи смеси $\alpha_{см}$ до своего максимума. Основной причиной роста $\alpha_{см}$ является резкое возрастание коэффициента теплопроводности смеси $\lambda_{см}$.
- 2) Вторая область характеризуется регрессией коэффициента теплоотдачи смеси $\alpha_{см}$ из-за превалирующего снижения плотности смеси $\rho_{см}$.
- 3) Третья область характеризуется переходным режимом течения смеси ($2 \cdot 10^3 < Re_{см} < 10^4$), когда интенсивность теплоотдачи падает.

Коэффициент теплоотдачи продуктов сгорания $\alpha_{пс}$ слабо меняется по сравнению с коэффициентом теплоотдачи смеси $\alpha_{см}$. Поэтому объём подогревателя в основном зависит от $\alpha_{см}$:

$$V_{п} \sim \frac{\alpha_{см} \cdot \alpha_{пс}}{\alpha_{см} + \alpha_{пс}}$$

Ниже представлена диаграмма зависимости приведённых параметров подогревателя от процентной доли гелия в смеси (рис. 6).

Минимальный объём подогревателя равный $2,37 \text{ м}^3$ получается при 15% содержании гелия в смеси.

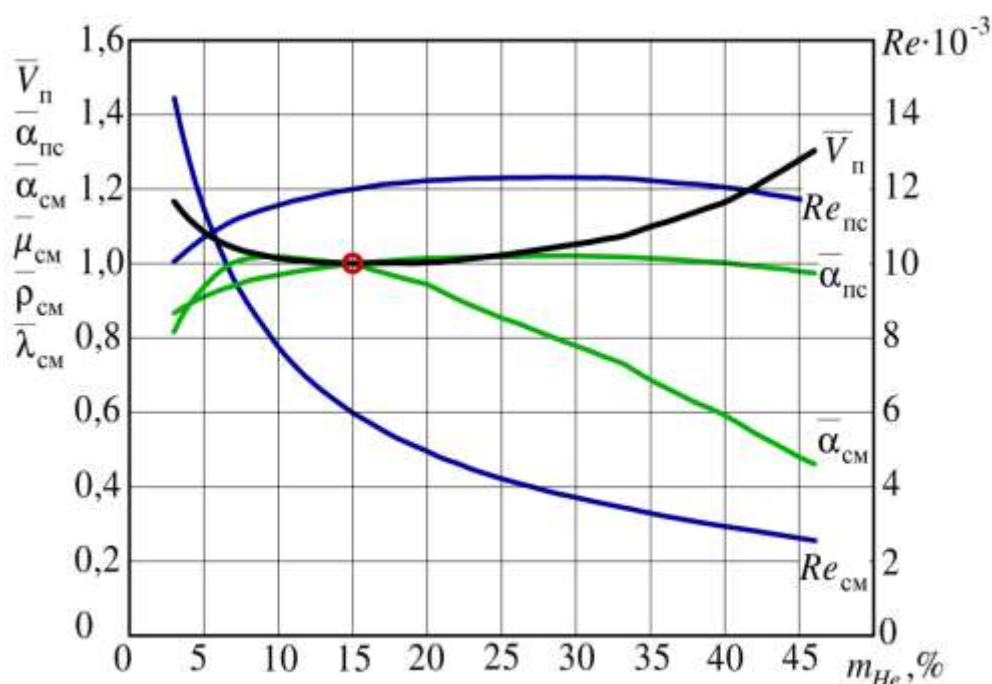


Рис. 6. Зависимость приведённых параметров подогревателя от процентной доли гелия в смеси

3. Влияние состава смеси на объём рекуператора теплоты

Рекуператор теплоты смеси не подвержен загрязнению и химической коррозии поверхностей теплообмена в среде инертных газов. Поэтому для снижения массы и габаритов рекуператора целесообразно использовать компактные поверхности теплообмена. Расчёт выполнен для пластинчатой матрицы, состоящей из поверхностей теплообмена типа ПлР-11 [14]. Ниже приведена диаграмма зависимости объёма рекуператора от процентного содержания гелия в смеси (рис. 7).

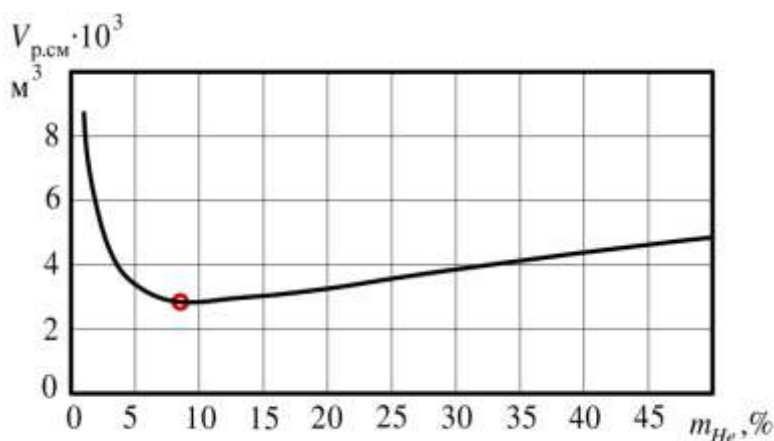


Рис. 7. Зависимость объёма рекуператора от процентного содержания гелия в смеси

Минимальный объём рекуператора равный $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ получается при 9% содержании гелия в смеси. Для сравнения, отношение объёмов подогревателя и рекуператора при 15% содержании гелия в смеси составляет:

$$\frac{V_{\Pi}^{15\%He}}{V_{p.cm}^{15\%He}} = \frac{2,37 \text{ м}^3}{0,0025 \text{ м}^3} = 948.$$

4. Влияние состава смеси на объём охладителя

По тем же причинам, что и для подогревателя, охладитель представляет собой трубчатый ТА (матрица состоит из труб $\varnothing 20$ мм с относительным шагом 1,3) с турбулентным режимом течения охлаждающего воздуха. Ниже приведена диаграмма зависимости объёма охладителя от процентной доли гелия в смеси (рис. 8). Минимальный объём охладителя (равный $0,40 \text{ м}^3$) получается при 16% содержании гелия в смеси.

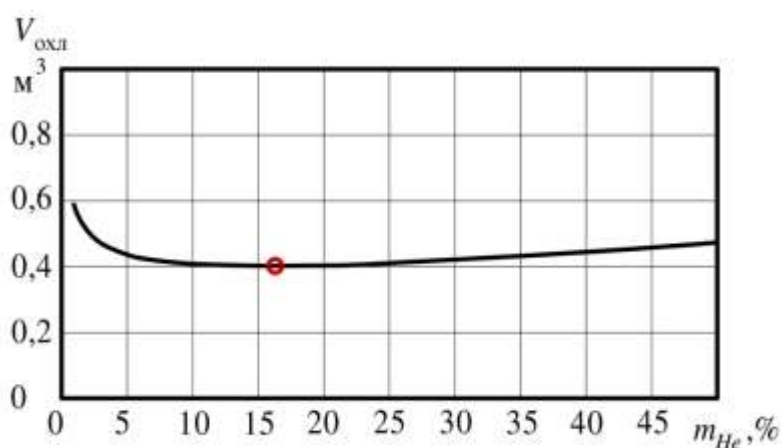


Рис. 8. Зависимость объёма охладителя от процентной доли гелия в смеси

Для сравнения, отношение объёмов подогревателя и охладителя при 15% содержании гелия в смеси составляет:

$$\frac{V_{\Pi}^{15\%He}}{V_{охл}^{15\%He}} = \frac{2,37 \text{ м}^3}{0,41 \text{ м}^3} = 5,8.$$

5. Выбор оптимального состава смеси для теплообменного оборудования

Согласно результатам расчетов, объём подогревателя в 5,8 раз больше объёма охладителя и в 948 раз больше объёма рекуператора. Максимальная рабочая температура в подогревателе составляет 1300 К, в рекуператоре – 1000 К, в охладителе – 520 К. Стоимость материалов подогревателя выше стоимости материалов рекуператора и охладителя в 2 и 4 раза соответственно.

Т.е. на стоимость теплообменного оборудования оказывает большое влияние объём подогревателя. Поэтому целесообразно использовать гелий-ксеноновую смесь с 15 % содержанием гелия, при которой объём, и, соответственно, стоимость подогревателя минимальны.

Следует отметить, что существуют перспективные способы интенсификации теплообмена, позволяющие сократить объёмы ТА [15, 16, 17]. Например, нанесение на трубы

сферических [18] или овальных [19] лунок в качестве интенсификаторов теплообмена позволяет значительно увеличить коэффициент теплоотдачи [20], сократив объём матрицы трубчатого теплообменного аппарата примерно в 2 раза [21], и снизить загрязнение поверхности теплообмена [22].

Заключение

Из диаграмм зависимостей объёмов подогревателя, рекуператора теплоты смеси и охладителя можно сделать следующий вывод: при дальнейшем проектировании ЗГТУ следует придерживаться диапазона $15 \pm 10\%$ содержания гелия в гелий-ксеноновой смеси, при котором объёмы ТА имеют минимальные значения.

Список литературы

1. Арбеков А.Н., Леонтьев А.И., Самсонов В.Л., Суровцев И.Г., Каторгин Б.И., Чванов В.К., Кашкаров А.М., Елисеев Ю.С., Трдатян С.А., Бабаев И.Г. Безъядерная энергетика пилотируемой экспедиции на Марс // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2002. № 4. С. 3-12.
2. Манушин Э.А., Бекнев В.С., Осипов М.И., Суровцев И.Г. Ядерные газотурбинные и комбинированные установки. М.: Энергоатомиздат. 1993. 272 с.
3. Стерман Л.С., Тевлин С.А., Шарков А.Т. Тепловые и атомные электростанции. 2-е изд., перераб. и доп. М: Энергоздат. 1982. 457 с.
4. Арбеков А.Н. Автономная долгоресурсная малообслуживаемая замкнутая газотурбинная установка, работающая на органическом топливе // Вестник СГАУ. № 3-2(34). Спец. вып. Самара, 2012. С. 307-312.
5. Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Осипов М.И., Суровцев И.Г. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: учеб. для втузов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 635 с.
6. Леонтьев А.И., Арбеков А.Н., Бурцев С.А., Голубев С.В. Теплохладоэнергетический агрегат. Патент на полезную модель РФ № 123069, МПК F01K25/10. 20.12.2012.
7. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/359008.html> (дата обращения 28.01.2016).
8. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки параллельной схемы // Тепловые процессы в технике. 2012, Т. 4 № 7. С. 326-331.
9. Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния доли гелия на значение критерия Прандтля газовых смесей // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С. 314-329. DOI: [10.7463/0514.0710811](https://doi.org/10.7463/0514.0710811).

10. Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния состава бинарных смесей инертных газов на их теплофизические свойства // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 217–237. DOI: [10.7463/1115.0822897](https://doi.org/10.7463/1115.0822897).
11. Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. М.: МГТУ им. Баумана. 2003. 591 с.
12. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Казань: Центр инновационных технологий. 2009. 531 с.
13. Афанасьев В.Н., Бурцев С.А., Егоров К.С., Кулагин А.Ю. Цилиндр в пограничном слое плоской пластины // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 2. С. 3-22.
14. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.: Государственное энергетическое издательство. 1962. 160 с.
15. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
16. Бурцев С.А., Киселёв Н.А., Леонтьев А.И. Особенности исследования теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. №. 6. С. 895-898. DOI: [10.7868/S0040364414060052](https://doi.org/10.7868/S0040364414060052).
17. Ligrani P.M., Oliveira M.M., Blaskovich T. Comparison of Heat Transfer Augmentation Techniques // AIAA Journal, 2003. V. 41, No. 3. P. 337-362.
18. Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Киселёв Н.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик поверхностей с коридорным расположением лунок // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 5. С. 348–369. DOI: [10.7463/0515.0776160](https://doi.org/10.7463/0515.0776160).
19. Бурцев С.А., Васильев В.К., Виноградов Ю.А., Киселёв Н.А., Титов А.А. Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых регулярным рельефом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 1. С. 263-290. DOI: [10.7463/0113.0532996](https://doi.org/10.7463/0113.0532996).
20. Киселев Н.А., Бурцев С.А., Стронгин М.М. Методика определения коэффициентов теплоотдачи поверхностей с регулярным рельефом // Метрология. 2015. № 3. С. 34 – 45.
21. Шафиков Г.А. Интенсификация теплоотдачи при помощи лунок и накатки на поверхности теплообмена // Молодёжный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015, № 4. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/775066.html> (дата обращения: 25.02.2016).

22. Мунябин К.Л. Эффективность интенсификации теплообмена углублениями и выступами сферической формы // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10. №. 2. С. 235-247.

Fluid Composition Impact on Heat Exchangers Volume of Closed-Cycle Gas Turbine Plant

G.A. Shafikov^{1,*}

^{*}88347@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: properties of a helium-xenon gas mixture, closed-cycle gas turbine plant, heat exchanger, volume of the heat exchanger

The paper subject is a choice of the fluid composition for the heat exchangers (HE) of a closed-cycle gas turbine plant (CGTP).

The study of the fluid composition impact on heater dimensions is a subtask in designing a 25 kW long-resourced CGTP with gas temperature of 1273 K before the turbine for a remote autonomous consumer of energy. The aim of this study is to find the optimal mixture to have the HE minimum volumes of the CGTP. Herein, heating is provided through the heat supply from the combustion of various cheap kinds of fuel, which, in turn, may result in contaminating heat exchange surfaces. In the analysis an additional condition is that it is necessary to reduce the level of contamination of heat exchange surfaces, which is reached by using a HE tubular matrix and a turbulent regime of flow.

A mixture of inert gas and helium- xenon is used, as a fluid, to increase the life of the plant. The paper illustrates how the thermal conductivity and viscosity of the helium-xenon mixture depend on the percentage composition of helium in the mixture.

The paper describes in detail the effect of the helium-xenon mixture composition on the mixture flow parameters in the preheater and on the volume of its matrix. In addition, it gives the calculation results on how the helium-xenon mixture composition effects on the volumes of the regenerator and cooler matrices.

After assessing the impact of the helium-xenon mixture composition on the HE parameters their comparison is conducted in terms of volume and cost of materials from which to make them. From these data a conclusion is drawn that the heater volume has a great effect on the cost of heat exchange equipment, and it is advisable to choose the mixture composition with which its volume is minimal.

References

1. Arbekov A.N., Leont'yev A.I., Samsonov V.L., Surovtsev I.G., Katorgin B.I., Chvanov V.K., Kashkarov A.M., Eliseev Yu.S., Trdat'yan S.A., Babaev I.G. Denuclearized energetics

- of manned flight to Mars. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika = Proceedings of RAS. Power Engineering*, 2002, no. 4, pp. 3-12. (In Russian).
2. Manushin E.A., Beknev B.C., Osipov M.I., Surovtsev I.G. *Yadernye gazoturbinnnye i kombinirovannye ustanovki* [Nuclear gas-turbine and integrated units]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1993. 272 p. (In Russian).
 3. Sterman L.S., Tevlin S.A., Sharkov A.T. *Teplovye i atomnye elektrostantsii* [Thermal and nuclear power station]. Moscow, Energozdat Publ., 1982. 457 p. (In Russian).
 4. Arbekov A.N. Off-line long-life unservice close gas organic fuel-powered turbine. *Vestnik SGAU = Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2012, no. 3-2(34), spec. iss., p. 307-312. (In Russian).
 5. Eliseev Yu.S., Manushin E.A., Mikhail'tsev V.E., Osipov M.I., Surovtsev I.G. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Theory and development of gas-turbine and integrated units]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 635 p. (In Russian).
 6. Leont'yev A.I., Arbekov A.N., Burtsev S.A., Golubev S.V. *Teplokhloadoenergeticheskiy agregat* [Heat-and-cool power aggregate]. Patent RF no.123069, MPK F01K25/10. 20.12.2012.
 7. Arbekov A.N., Burtsev S.A. Research of the working cycle of a closed gas turbine in a tri-generation unit operating on a sequential scheme. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 3, pp. 1-14. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/359008.html> (accessed: 28.01.2016). (In Russian).
 8. Arbekov A.N., Burtsev S.A. Research of closed gas turbine cycle of a trigeneration unit operating on parallel schema. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2012, vol. 4, no. 7, pp. 326-331. (In Russian).
 9. Burtsev S.A., Kochurov D.S., Shchegolev N.L. Investigation of the helium proportion influence on the Prandtl number value of gas mixtures. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 5, pp. 314-329. (In Russian). DOI: [10.7463/0514.0710811](https://doi.org/10.7463/0514.0710811)
 10. Burtsev S.A., Kochurov D.S., Shchegolev N.L. Investigating the effect of the binary mixtures composition of noble gases on their thermodynamic and transport properties. *MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 11, pp. 217-237. (In Russian). DOI: [10.7463/1115.0822897](https://doi.org/10.7463/1115.0822897)
 11. Ivanov V.L., Leont'yev A.I., Manushin E.A., Osipov M.I. *Teploobmennyye apparaty i sistemy okhlazhdeniya gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat-exchange apparatuses and cooling systems of gas-turbine and integrated units]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2003. 591 p. (In Russian).
 12. Gortyshov Yu.F., Popov I.A., Olimpiev V.V., Shchelchikov A.V., Kas'kov S.I. *Teplogidravlicheskaya effektivnost' perspektivnykh sposobov intensivifikatsii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya* [Thermohydraulic efficiency of promising meth-

- ods of heat transfer augmentation in heat-transfer equipment channels]. Kazan': "Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy" Publ., 2009. 531 p. (In Russian).
13. Afanas'yev V.N., Burtsev S.A., Egorov K.S., Kulagin A.Yu. Cylinder in boundary layer of flat plate. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Ser. Mechanical Engineering*, 2011, no. 2, pp. 3-22. (In Russian).
 14. Keys V.M., London A.L. *Kompaktnye teploobmenniki* [Compact heat-exchange units]. Moscow, "Gosudarstvennoe energeticheskoe" Publ., 1962. 160 p. (In Russian).
 15. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Kopp I.Z. *Effektivnye poverkhnosti teploobmena* [Effective heat-transfer surfaces]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1998. 408 p. (In Russian).
 16. Burtsev S.A., Kiselev N.A., Leont'yev A.I. Osobennosti issledovaniya teplogidravlicheskih kharakteristik rel'yefnykh poverkhnostey. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2014, vol. 52, no. 6, pp. 895-898. (In Russian). DOI: [10.7868/S0040364414060052](https://doi.org/10.7868/S0040364414060052). (English version of journal: *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 6, pp. 869-872. DOI: [10.1134/S0018151X14060054](https://doi.org/10.1134/S0018151X14060054))
 17. Ligrani P.M., Oliveira M.M., Blaskovich T. Comparison of Heat Transfer Augmentation Techniques. *AIAA Journal*, 2003, vol. 41, no. 3, pp. 337-362.
 18. Burtsev S.A., Vinogradov Yu.A., Kiselev N.A., Strongin M.M. Experimental study of thermo-hydraulic characteristics of surfaces with in-line dimple arrangement. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 5, pp. 348-369. (In Russian). DOI: [10.7463/0515.0776160](https://doi.org/10.7463/0515.0776160)
 19. Burtsev S.A., Vasil'yev V.K., Vinogradov Yu.A., Kiselev N.A., Titov A.A. Experimental study of parameters of surfaces coated with regular relief. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 1, pp. 263-290. (In Russian). DOI: [10.7463/0113.0532996](https://doi.org/10.7463/0113.0532996)
 20. Kiselev N.A., Burtsev S.A., Strongin M.M. Method for estimation heat-loss coefficients of surfaces with regular profile. *Metrologiya*, 2015, no. 3, pp. 34-45. (In Russian).
 21. Shafikov G.A. Heat transfer intensification by means of dimples and knurl on heat cooling surface. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik. MGTU im. N.E. Baumana = Electronic periodical youth scientific and technical bulletin*, no. 4, 2015. (In Russian). Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/775066.html> (accessed: 25.02.2016).
 22. Munyabin K.L. Effectiveness of spherical recesses and bulges as heat-transfer intensifiers. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics*, 2003, vol. 10, no. 2, pp. 235-247. (In Russian).