

*Ильичев В. Ю., к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашины»
Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет), г. Калуга, Россия*

*Лужецкий А. А., магистрант кафедры «Тепловые двигатели и гидромашины»
Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет), г. Калуга, Россия*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация: Статья посвящена разработке методики проектирования устройства, предназначенного для повышения КПД малоразмерной газотурбинной установки – пластинчатого теплообменника (рекуператора). Данный процесс проектирования должен решать несколько взаимосвязанных задач: достижение наибольшего КПД при получении приемлемых габаритов рекуператора и наименьшей его удельной стоимости. Все этапы разработки конструкции теплообменника производятся с использованием современных программных продуктов, в том числе разработанных авторами.

Ключевые слова: газотурбинная установка, регенерация, пластинчатый рекуператор, язык Python, библиотека CoolProp, SolidWorks.

Annotation: The article is devoted to the development of a design technique for a device designed to increase the efficiency of a small gas turbine plant - a plate heat exchanger (recuperator). This design process solves several interrelated problems: achieving the greatest efficiency when obtaining acceptable dimensions of the recuperator and its lowest unit cost. All stages of heat exchanger design development

are made using modern software products, including those developed by the authors.

Keywords: gas turbine plant, regeneration, plate recuperator, Python language, CoolProp library, SolidWorks.

Введение

Газотурбинные установки (ГТУ), отличающиеся компактностью и малой мощностью (до 1 МВт), получают всё большее распространение в энергетике отдалённых регионов, автономных предприятий и жилищных комплексов [1]. Для достижения конкурентоспособности таких установок важно обеспечить их высокую энергоэффективность (характеризуемую удельным расходом топлива на единицу вырабатываемой мощности или КПД). Данную задачу можно решить с помощью подогрева воздуха перед камерой сгорания за счёт использования теплоты, уходящих из газовой турбины продуктов сгорания. Такой подогрев осуществляется с помощью специальных теплообменных аппаратов – рекуператоров [2]. С другой стороны, малоразмерные ГТУ должны быть сравнительно дешёвы для приобретения конечным пользователем, поэтому рекуператор не должен значительно увеличивать габариты и удорожать установку [3]. В настоящее время наиболее перспективными с точки зрения обеспечения перечисленных требований являются пластинчатые рекуператоры [4], оптимизация которых в процессе проектирования и является предметом данной работы.

Оптимизация заключается в уменьшении срока окупаемости средств, затрачиваемых на изготовление рекуператора, за счёт уменьшения его стоимости и повышения КПД ГТУ, и в обеспечении компактности теплообменника и совершенства газодинамики, протекающих в нём потоков газов.

Материал и методы исследования

В работе авторов [5] описан разработанный ими метод технико-экономического обоснования выбора материала теплообменных поверхностей, с рассмотрением примера его применения для рекуператора малоразмерной ГТУ 9И113М0,2 (наиболее подходящим материалом в данном случае оказалась сталь

15X2M2ФБС), а также степени рекуперации r , при которой длина рекуператора получается приемлемой. Для осуществления указанного обоснования разработана программа на языке Python. Также разработан метод расчёта срока окупаемости спроектированного рекуператора.

Для дальнейшего развития методики проектирования пластинчатого рекуператора необходимо произвести следующие более глубокие исследования:

1. узнать влияние толщины пластин рекуператора и степени рекуперации на срок его окупаемости;
2. исследовать влияние толщины пластин и диаметров входных отверстий в них на прочность и деформацию;
3. рассмотреть изменение параметров потоков нагреваемой и нагревающей сред в пространствах между пластинами; по результатам их визуализации сделать выводы о совершенстве рассматриваемых конструкций.

Срок окупаемости дополнительного устройства - рекуператора в цикле ГТУ можно определить, сравнивая стоимость рекуператора и сумму сэкономленных денежных средств за счёт уменьшения расхода топлива. Результаты определения срока окупаемости рекуператора с помощью программы [5] при различных степенях регенерации и толщины пластин приведены на рис. 1.

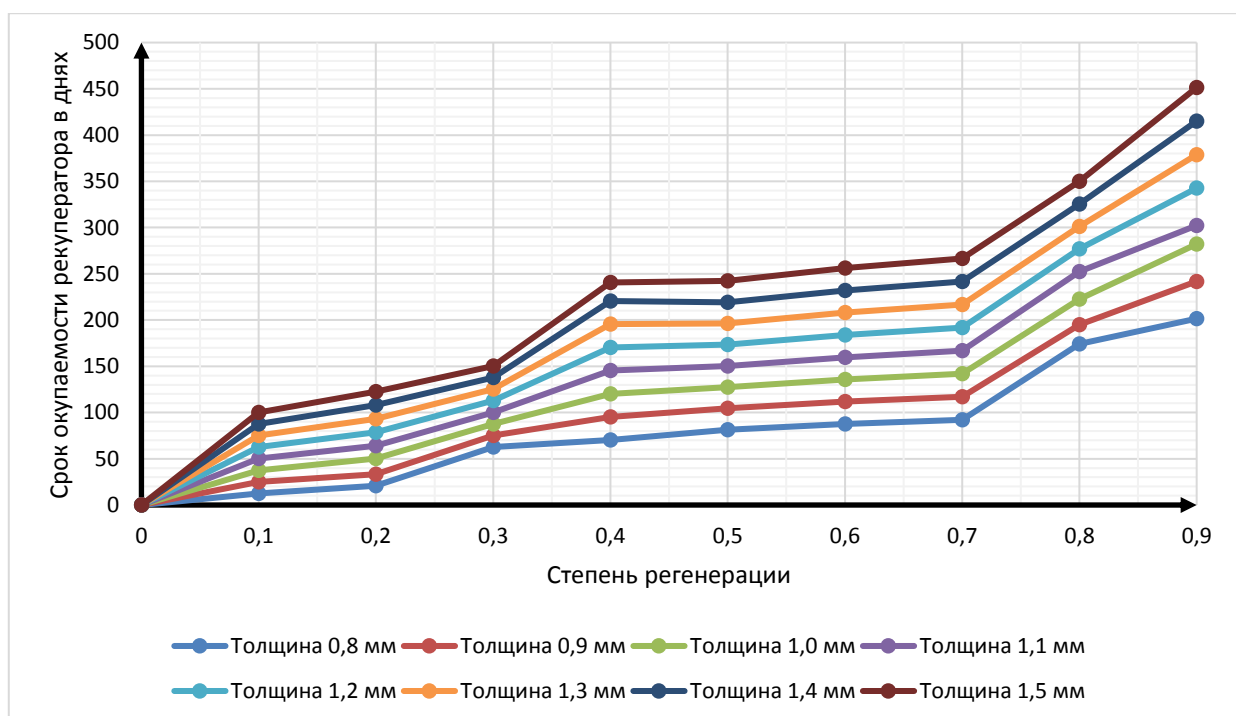


Рис. 1. График зависимости срока окупаемости пластинчатого рекуператора от степени регенерации и толщины пластин

Из графика видно, что срок окупаемости увеличивается с повышением степени регенерации и увеличением толщины пластин – это связано с большим темпом увеличением площади поверхности теплообмена и соответствующей стоимости рекуператора по сравнению с повышением КПД цикла и экономией денежных средств на топливный газ. При степени регенерации, большей 0,7, наблюдается резкий рост срока окупаемости, поэтому для рекуператора в данном случае рекомендуется не превышать это значение.

Для дальнейших исследований использовалась программа SolidWorks Simulation. Этот продукт предназначен для численного моделирования физических процессов с использованием метода конечных элементов, что позволяет выбрать наиболее удачный вариант конструкции без проведения натурального эксперимента на стендах. Такое математическое моделирование позволяет существенно сократить время проектирования новых изделий.

Для исследования характеристик пластинчатого массива был выделен блок, состоящий из двух соединённых пластин. Этого вполне достаточно для выявления качественного проявления различных эффектов и для первичной оптимизации. Для расчёта полной конструкции пластинчатого рекуператора требуются огромные вычислительные мощности, к тому же такое исследование на данном этапе не является необходимым.

При проведении исследования были получены следующие эпюры: напряжения, перемещения, деформации, запас прочности.

Исследование проводилось при изменении входных диаметров отверстий и толщины пластин. В качестве примера полученных результатов расчёта на рис. 2 приведен график изменения минимального коэффициента запаса прочности рассматриваемого блока.

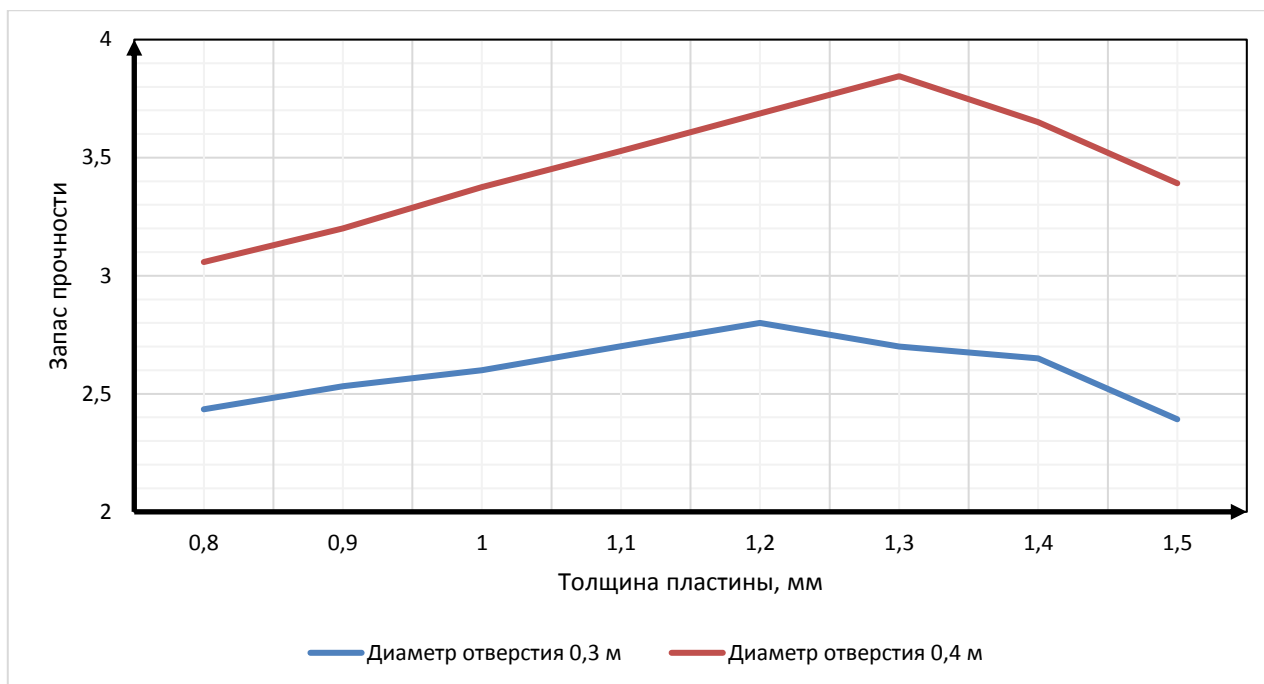


Рис. 2. График зависимости коэффициента запаса прочности пластин от их толщины и диаметров входных отверстий

Из графика видно, что при увеличении диаметров входных отверстий коэффициент запаса прочности увеличивается, так как площадь, на которую действует распределенная нагрузка, создаваемая высоким давлением газа, уменьшается. Однако, во всех случаях минимальный коэффициент запаса прочности является достаточным, поэтому с точки зрения прочности (рис. 2) и обеспечения минимального срока окупаемости (рис. 1) целесообразно выбрать толщину пластин 0,8 мм. Меньшую толщину принимать нельзя, так как при этом, как показали дополнительные исследования, деформации пластин оказываются недопустимыми.

При помощи созданной программы и описанной выше методики были рассчитаны площади теплообмена для различных размеров пластин рекуператора. Исходя из полученных результатов были выведены графики зависимостей длины рекуператора от расстояния между пластинами. На рис. 3 показана такая зависимость для размера пластин 1000 мм на 1200 мм.

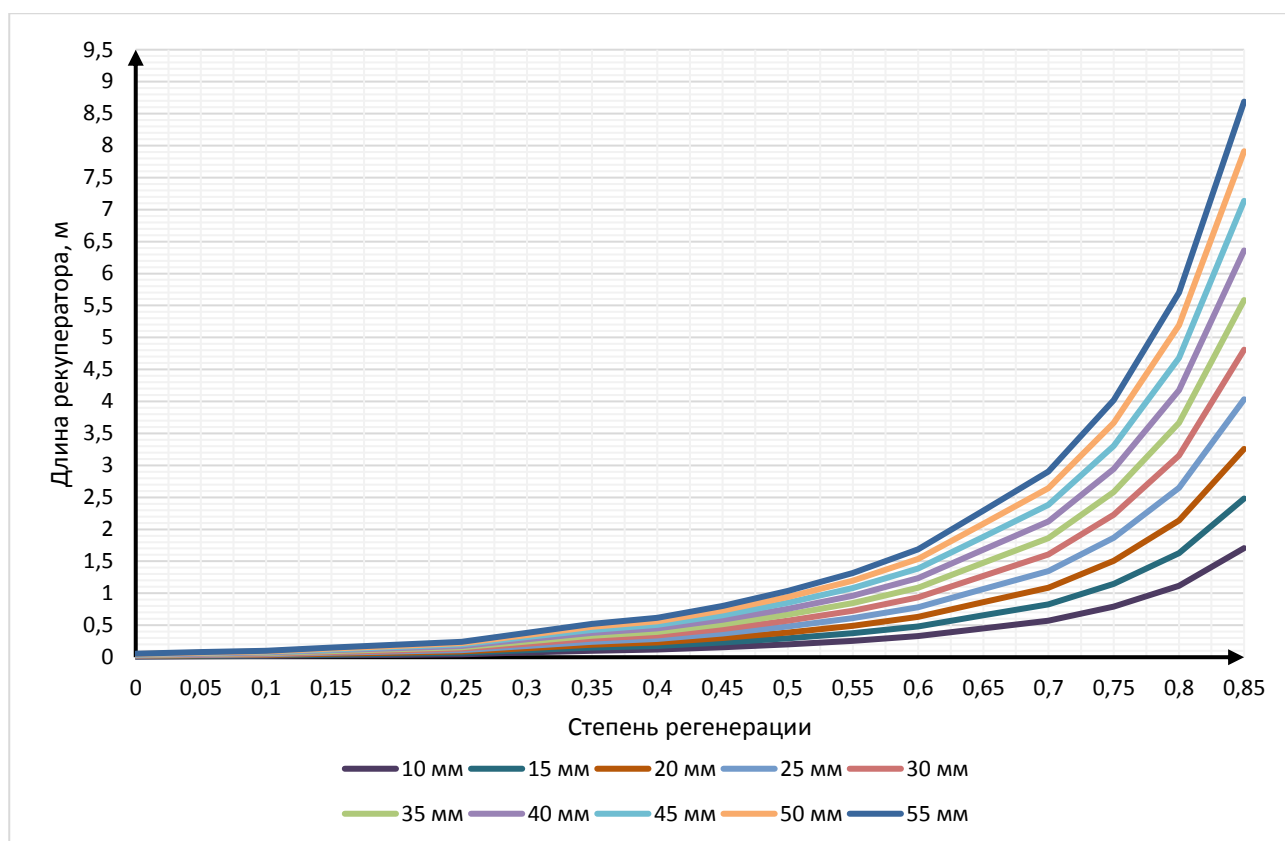


Рис. 3. График зависимости длины рекуператора от степени регенерации для различных расстояний между пластинами размером 1000x1200 мм

Зависимости, подобные рис. 3, были построены для тех же расстояний между пластинами, но для размеров пластин 1000x700 мм и 800x600 мм.

Из полученных графиков видно, что при уменьшении размеров пластин и увеличении расстояния между ними возрастают осевые габариты рекуператора, что значительно увеличивает количество ходов для рабочих тел внутри рекуператора, из-за чего повышаются гидравлические потери (потери давления).

Максимальная длина рекуператора, подходящая для малоразмерной ГТУ 9И113М0,2, составляет приблизительно 1400 мм. При увеличении расстояния между пластинами пропускная способность межпластинчатого пространства увеличивается. Исходя из данных соображений, для исследования изменения параметров потоков в рекуператоре, выбраны три конструкции:

1. Размеры пластин 1200x1000 мм, расстояние между пластинами 20 мм. Рассчитанная длина рекуператора составила 1080 мм.
2. Размеры пластин 1000x700 мм, расстояние между пластинами 15 мм.

Длина рекуператора составила 1400 мм.

3. Размеры пластин 800x600 мм, расстояние между пластинами: 10 мм.
Длина рекуператора составила 1410 мм.

Моделирование изменения параметров потоков нагревающих и нагреваемых сред в рекуператоре, произведённое с помощью программы Flow Simulation, показало существенные недостатки конструкций №2 и №3. В проточной части образуются запирающие потоки, обратные течения; потери давления составляют более 5%.

Конструкция №1 показала удовлетворительные результаты: завихрений по ходу течения рабочих тел не наблюдается, потери давления составляют менее 5%, расхождение с расчетными с помощью программы [5] данными менее 1%. Результаты визуализации изменения давлений нагревающей и нагреваемой сред для конструкции №1 приведены на рис. 4.

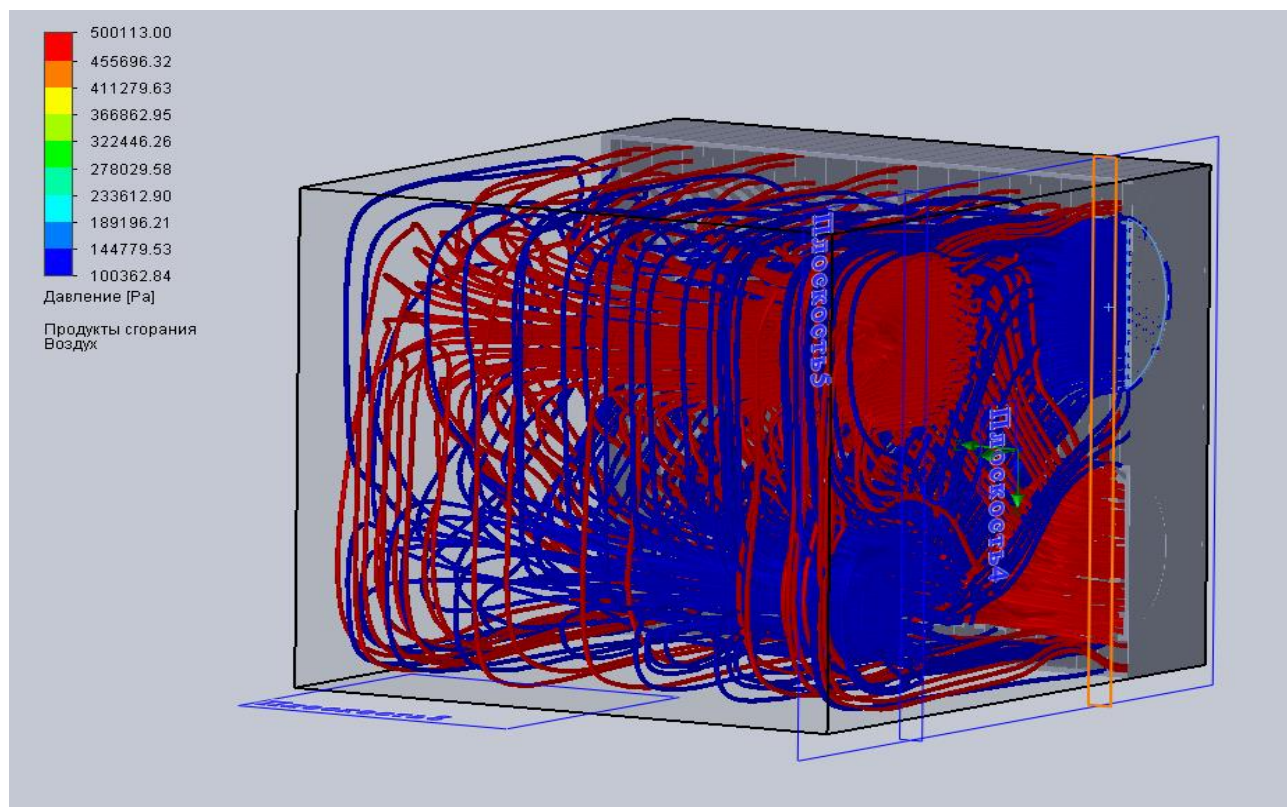


Рис. 4. Эпюра изменения давлений потоков

Заключение

В ходе описанного исследования разработаны процедуры, позволяющие оценить степень совершенства конструкции пластинчатых рекуператоров и выбрать наилучшую конструкцию их рассматриваемых вариантов.

Рассмотрен пример такой оценки для пластинчатого рекуператора малоразмерной ГТУ 9И113М0,2, позволивший выбрать конструкцию с размерами пластин 1200x1000 мм и расстоянием между пластинами 20 мм. При этом удалось добиться минимальной потери давления обменивающихся теплом сред, а рассчитанная длина рекуператора составила 1080 мм, что значительно меньше допустимой для данной установки. Таким образом, разработанный теплообменник обеспечивает минимальный срок окупаемости капитальных вложений в его изготовление (за счёт существенной экономии топлива при повышении КПД газотурбинной установки) при обеспечении достаточной прочности конструкции и минимальных потерь давления протекающих через него сред.

Проект осуществлён с применением современных средств программного математического моделирования [6; 7], позволяющих существенно сократить временные и трудовые затраты проектировщиков.

Библиографический список:

1. Беляев В.Е., Беляева С.О., Трофимович И.В. Применение малоразмерных ГТУ в системах децентрализованного энергоснабжения. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 3. № 2 (45). С. 59-61.
2. Кузьмичёв В.С., Омар Х.Х., Ткаченко А.Ю. Способ повышения эффективности газотурбинных двигателей для наземного применения за счет регенерации тепла. // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 133-141.
3. Завальный Ф.Г., Ильичев В.Ю., Шевелев Д.В. Технико-экономическое обоснование применения газотурбинных двигателей на маневровых локомотивах. // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 2. С. 10-14.

4. Ардатов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А. Классификация высокоэффективных рекуператоров газотурбинных двигателей. // Труды МАИ. 2013. № 71. С. 13.

5. Ильичев В.Ю., Лужецкий А.А. Методика технико-экономического обоснования применения пластинчатых рекуператоров в малоразмерных ГТУ. // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 1. С. 40-45.

6. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Создание программы расчёта упорных подшипников скольжения на языке Python. // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 3. С. 14-18.

7. Абрамов Д.Д., Кислякова Т.В., Пальчикова Г.С. Особенности создания в SolidWorks 3D моделей механизмов с целью повышения эксплуатационных качеств. // В сборнике: Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 10-19.