



ОТКРЫТАЯ НАУКА
издательство

Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 66.045.13

РАСЧЕТ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

¹Шацких Ю.В., ²Шарапов А.И., ³Арзамасцев А.Г

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия (111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14), ^{2,3}Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия (398600, г. Липецк, ул. Московская, д.30), e-mail: ¹shatskih_jv@mail.ru, ²sharapov-lipetsk@yandex.ru, ³arzamastcev-ag@mail.ru

В статье рассмотрена программа расчета регенеративных теплообменных аппаратов. Программа позволяет рассчитывать теплообменники как с подвижной, так и с неподвижной насадкой. В основу программы положены аналитические зависимости, полученные из решения дифференциального уравнения теплового баланса с принятым линейным распределением температуры по расчетному слою. Отличительной особенностью программы является учет влияния температур газов и насадки на их теплофизические характеристики и коэффициенты теплоотдачи для каждого расчетного слоя, что позволяет добиться высокой точности расчетов при выборе достаточно большого количества расчетных слоев.

Ключевые слова: регенерация теплоты, энергоэффективность, конструктивные характеристики насадки, режимные параметры.

CALCULATION OF REGENERATIVE HEAT EXCHANGERS

¹Shatskikh Y.V., ²Sharapov A.I., ³Arzamastsev A.G.

¹National Research University MPEI, Moscow, Russia (111250, Moscow, st. Krasnokazarmennaya, 14), ^{2,3}Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia (398600, Lipetsk, st. Moscovskaya, 30), e-mail: ¹shatskih_jv@mail.ru, ²sharapov-lipetsk@yandex.ru, ³arzamastcev-ag@mail.ru

The article considers a program for calculating regenerative heat exchangers. The program allows you to calculate heat exchangers with both a movable and a fixed nozzle. The program is based on analytical dependencies obtained from the solution of the differential heat balance equation with the assumed linear temperature distribution over the calculated layer. A distinctive feature of the program is taking into account the effect of gas and packing temperatures on their thermophysical characteristics and heat transfer coefficients for each calculation layer, which makes it possible to achieve high accuracy of calculations when choosing a sufficiently large number of calculation layers.

Keywords: heat recovery, energy efficiency, design characteristics of the packing, operating parameters.

Введение

Проектирование регенеративных теплообменников предоставляет собой ложную задачу. Во-первых, расчет нестационарного теплообмена сам по себе сложен и подразумевает использование программного обеспечения. Во-вторых, эффективность работы регенеративного теплообменника определяется сочетанием конструктивных характеристик

насадки и режима работы аппарата. Поэтому при проектировании регенеративного теплообменника нужно «нащупать» это сочетание, что подразумевает большое количество многовариативных трудоемких расчетов.

Различные авторы разрабатывали программное обеспечение для расчета конкретных конструкций регенеративных теплообменников [1]. Причем использованы разные методики расчета, не подходящие для аппаратов другой конструкции. Нужно отметить, что отличия в подходах объясняются скорее историей развития прикладной науки в той или иной отрасли, чем сутью физических явлений, проходящих в регенераторах [2-4]. Таким образом, если в одних и тех же условиях предстоит сравнить регенераторы с подвижной и неподвижной насадкой и выбрать лучший, то на данный момент нет единой методики расчета различных типов теплообменников и методики их сравнительного анализа.

Из вышесказанного следует, что при проектировании регенеративного теплообменного аппарата необходимо предварительно выбрать оптимальное сочетание режимных и конструктивных характеристик аппарата, а затем провести его тепловой расчет. Методика расчета должна подходить как для аппаратов с подвижной насадкой, так и для аппаратов с неподвижной насадкой.

Предварительный анализ регенеративного теплообменника

Анализ различных работ в этой области [4-6] и собственные исследования авторов [7] показывают, что регенеративные теплообменники обеспечивают наибольшую эффективность, в случае если распределение температуры насадки и теплоносителей по высоте близко к линейному, поскольку при линейном распределении обеспечивается постоянный по всей высоте насадки локальный температурный напор, т.е. $v = const$.

Как было показано в работе [7] при линейном распределении температуры по высоте насадки систему дифференциальных уравнений нестационарного теплообмена можно привести к критериальному виду. Также в [8] рассмотрены критерии подобия, включающие в себя как конструктивные, так и режимные характеристики регенеративного теплообменника. На основе критериев подобия можно сделать предварительный анализ конструкции регенеративного теплообменника. Например, при заданных характеристиках насадки подобрать оптимальные расходы теплоносителей и продолжительность периодов нагрева и охлаждения. Либо, при заданной температуре одного из теплоносителей на выходе из теплообменника подобрать конструктивные характеристики насадки и режимные параметры аппарата. Разумеется, полученные результаты будут приближенными, но это существенно сокращает область поиска оптимального сочетания режимных и конструктивных характеристик аппарата. Точное значение параметров теплообменника можно получить при использовании разработанной авторами программы расчета.

Расчет регенеративного теплообменного аппарата

В основу расчета положена модель Меншикова – Соломенцева [8], в которой вычисления ведутся по аналитическим зависимостям, полученным из решения дифференциального уравнения теплового баланса с принятым линейным распределением температуры по расчетному слою. Достоинством данной модели является учет влияния температур газов и насадки на их теплофизические характеристики и коэффициенты теплоотдачи для каждого

расчетного слоя, что позволяет добиться высокой точности расчетов при выборе достаточно большого количества расчетных слоев.

На основании данной модели разработана «Программа для расчета регенеративных теплообменных аппаратов» [9]. Отличительной особенностью программы является определение числа циклов, при которых для заданного распределения температур насадки и параметров теплоносителей наступает квазистационарный режим, характеризующийся равенством температурных полей насадки в конце предыдущего и начале следующего цикла.

Программа позволяет рассчитать конечные температуры теплоносителей на выходе из регенератора в заданные моменты времени, что имеет большое значение при проверке соблюдения ограничений по величине выходной температуры греющего теплоносителя. Расчет теплообмена по известным методикам дает только средние температуры на выходе из регенератора, в то время как для проверки соблюдения этих ограничений часто необходимо знать значения выходной температуры греющего теплоносителя в течение всего периода нагрева.

Расчет регенеративного теплообменника с использованием программы основан на следующих принципах:

- Начальное распределение температур насадки принято линейным. Насадка рассматривается как термически тонкое тело с поправкой на коэффициент массивности. Отсчет координаты ведется от входа греющего теплоносителя.
- Задаются начальная температура и расход греющего теплоносителя на входе в теплообменник.
- Принято линейное распределение температуры насадки по высоте Δz расчетного слоя насадки за расчетный отрезок времени $\Delta \tau$ (1):

$$t_{z\tau} = t_{0\tau} - bz \quad (1)$$

- где $t_{0\tau}$ – средняя по массе температура насадки на входе в расчетный слой насадки в момент времени τ расчетного отрезка времени $\Delta \tau$, °С; b – константа, характеризующая изменение температуры насадки по высоте z данного слоя насадки в данный отрезок времени $\Delta \tau$, К/м.
- Коэффициент теплоотдачи определяется по критериальным уравнениям для соответствующего типа поверхности насадки. Коэффициент теплоотдачи рассчитывается для каждого слоя и каждого шага по времени с учетом изменения температуры среды. Это позволяет повысить точность расчета. Для расчета принимаются средние значения температур теплоносителей в слое в предыдущий момент времени.

Расчет регенеративного теплообменного аппарата с помощью программы строится по следующему алгоритму:

1. Задаются состав теплоносителей, высота и материал слоев насадки, геометрические характеристики насадки.
2. Задаются температура греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в насадку, продолжительность периодов нагрева/охлаждения, расход нагреваемого и греющего теплоносителя.
3. При заданной неизменной входной температуре греющего теплоносителя для первого отрезка времени для каждого расчетного слоя в конце данного временного интервала определяются температуры насадки на входе в слой и температура газов

на выходе из слоя. Температура греющего теплоносителя на выходе из данного слоя принимается как входная температура для следующего слоя, температура насадки на выходе из слоя рассчитывается как входная температура для следующего слоя. Для второго и последующего расчетного отрезка времени начальным распределением температур насадки является уже распределение температур для предыдущего временного интервала. При расчетах для каждого слоя и шага по времени теплофизические параметры теплоносителей и насадки вычисляются с учетом их температур.

Аналогично рассчитывается период охлаждения насадки.

В программе заданы функции зависимости теплофизических параметров теплоносителей и насадки от температуры, поэтому на каждом шаге по высоте и по времени расчет теплообмена происходит с учетом изменения температур, что позволяет повысить точность расчетов. Также при расчете теплофизических параметров теплоносителей учитываются потери давления теплоносителей при течении вдоль насадки.

Программа позволяет выполнить два вида расчета.

- Определение температуры теплоносителей на выходе из регенеративного теплообменника при заданных расходах греющей и нагреваемой сред. Расчет выполняется в несколько итераций (их количество можно задать в программе), пока температура насадки в конце цикла для каждой рассмотренной точки не будет отличаться от температуры насадки в начале цикла для соответствующей точки не более чем на заданную величину температурного расхождения (в программе принято 1 °С), т.е. пока режим не станет квазистационарным. Результат расчета цикла, при котором это условие соблюдается, программа выдает на экран.
- Определение расхода греющего теплоносителя, при котором будет получена требуемая температура нагрева холодного теплоносителя или требуемая температура охлаждения греющего теплоносителя. В этом случае расход греющего теплоносителя задается предварительно. Программа рассчитывает теплообмен в насадке по вышеописанному алгоритму. Если заданные температуры не достигаются (разница 1 °С), то программа корректирует значение расхода греющего теплоносителя и повторяет расчет.

Таким образом, программа позволяет рассчитывать температурные поля теплоносителей и насадки в расчетные моменты времени. В конце расчета выдаются минимальные, максимальные и средние значения температур теплоносителей на выходе из регенератора. Также по запросу для каждого шага по времени выдается распределение по высоте насадки теплофизических параметров насадки и теплоносителей и значения локальных коэффициентов теплоотдачи.

Проведённые расчеты позволяют получить распределение температуры насадки и теплоносителей по высоте, что дает возможность судить о том, насколько выбранный режим работы аппарата обеспечивает линейное распределение температуры по высоте насады. Кроме того, программа рассчитывает значения средних коэффициентов теплоотдачи теплоносителей и теплопроводности насадки, что позволяет оценить интенсивность теплообмена.

Пример вывода результаты расчета приведены на рисунке 1. Результаты расчета выводятся в графическом виде и в виде текстового файла в формате txt, распределение температуры теплоносителей и насадки по высоте выводится в файле формата xlsx.

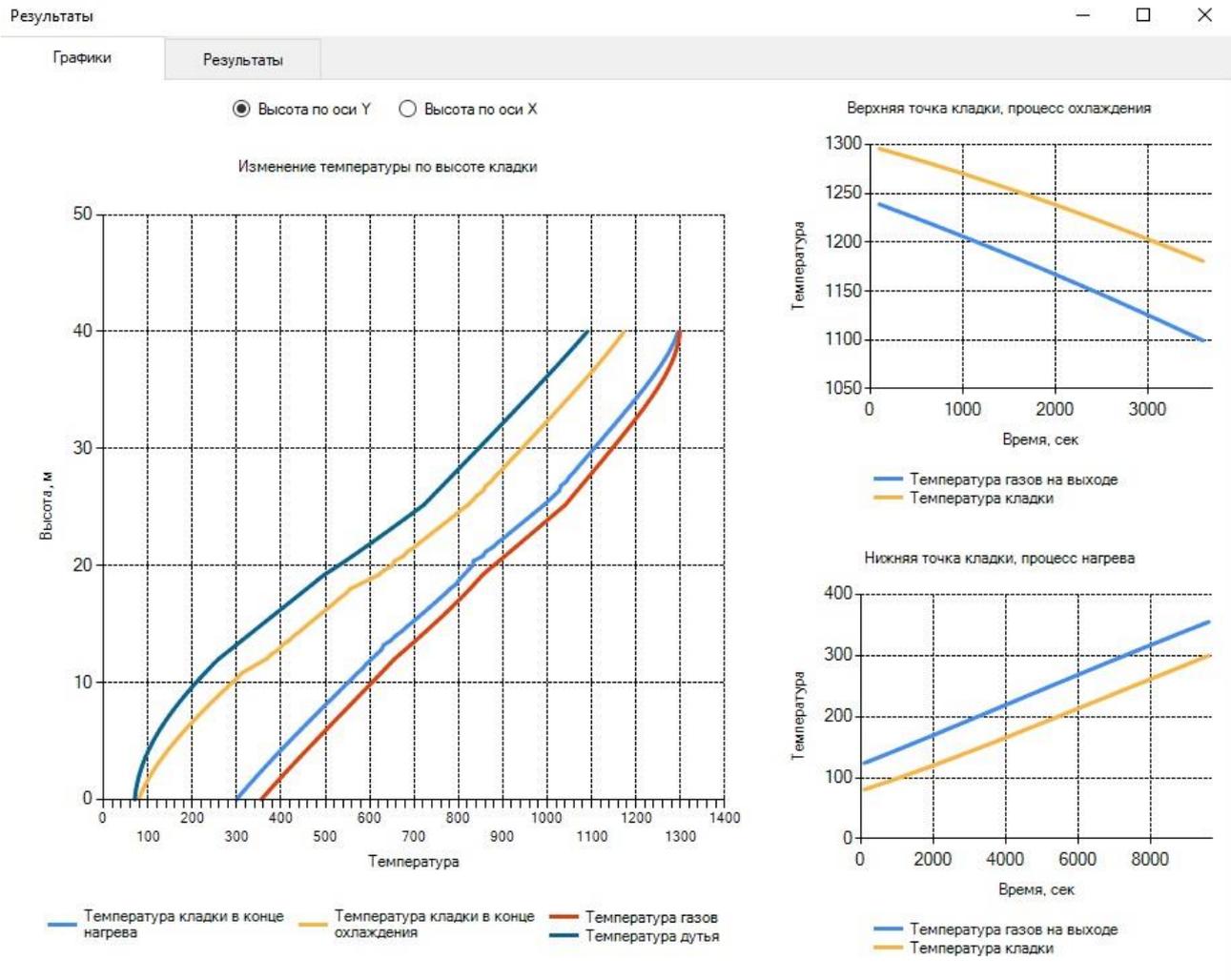


Рисунок 1 – Интерфейс вывода результатов расчета в графическом виде

Заключение

Авторы предложили метод инженерного расчета регенеративных теплообменников с разным типом насадки. На основе критериального анализа нестационарного теплообмена в насадке выбирается оптимальное сочетание конструктивных характеристик насадки и режимных параметров работы аппарата. То есть для заданного типа насадки можно подобрать оптимальный режим нагрева/охлаждения. Затем, с помощью разработанной авторами программы проводится расчет регенеративного теплообменника. В результате расчета можно получить распределение температуры по высоте насадки в конце периодов нагрева/охлаждения, изменение температуры теплоносителей на выходе из насадки в течение периодов нагрева/охлаждения, средний за период нагрева/охлаждения коэффициент теплоотдачи. Также с помощью программы можно определить расход греющего теплоносителя при заданном расходе нагреваемого теплоносителя. Предложенный подход позволяет значительно сократить количество расчетов при проектировании регенеративных теплообменников.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01078 А.

Список литературы

1. Губарев А.Ю., Кудинов А.А. Программы теплового расчета стандартных регенеративных воздухоподогревателей и регенеративных воздухоподогревателей в форме усеченного конуса // Тезисы докладов междунауч. конф., «XIX Туполевские чтения». – Казань: КНИТУ-КАИ, 2011, т.1, с. 190-192.
2. Кирсанов Ю.А. Циклические тепловые процессы и теория теплопроводности в регенеративных воздухоподогревателях. М.: ФИЗМАТЛИТ –2007, 240 с.
3. Самарин О.Д. Температурная эффективность пластинчатых и роторных теплоутилизаторов при различных расходах воздуха // Сантехника, Отопление, Кондиционирование, 2014, № 1 (145). – С. 118-119.
4. Шкляр Ф.Р. Доменные воздухонагреватели (конструкции, теория, режимы работы) / Шкляр Ф.Р., Малкин В.М., Каштанова С.П., Калугин Я.П., Советкин В.Л.– М.: Metallurgy, 1982. – 176 с.
5. Соломенцев С.Л. Рациональные типы насадок и доменных воздухонагревателей. Липецк: ЛГТУ., 2001. 432 с.
6. Yu. V. Shatskikh, A. I. Sharapov, A. G. Arzamashev and Yu. A. Geller. Optimization of the operation mode of regenerative heat exchangers / Published under licence by IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Conference Series, Volume 2119, The XXXVII Siberian Thermophysical Seminar (STS37), 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2119 012156. DOI:10.1088/1742-6596/2119/1/012156
7. Yu. V. Shatskikh, Yu. A. Geller. Development of optimization criteria of regenerative heat exchangers and operating regime of regenerative heat exchangers / Published under licence by IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Conference Series, Volume 1683, Actual issues of thermal power engineering and thermal engineering, 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1683 042028. DOI:10.1088/1742-6596/1683/4/042028.
8. Меншиков Р.И., Соломенцев С.Л. Приближенный метод расчета температур по высоте воздухонагревателей. Известия вузов. Черная Metallurgy. 1983. № 111.С.140-143.
9. Программа для расчета регенеративных теплообменных аппаратов. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ 2022683184, 01.12.22. Заявка № 2022682401 от 22.11.2022.

References

1. Gubarev A.Yu., Kudinov A.A. Programs for thermal calculation of standard regenerative air heaters and regenerative air heaters in the form of a truncated cone // Abstracts of reports int. scientific Conf., "XIX Tupolev Readings". - Kazan: KNRTU-KAI, 2011, v.1, p. 190-192.
2. Kirsanov Yu.A. Cyclic thermal processes and the theory of heat conduction in regenerative air heaters. M.: FIZMATLIT -2007, 240 p.
3. Samarin O.D. Temperature efficiency of plate and rotary heat exchangers at different air flow rates // Sanitary engineering, Heating, Air conditioning, 2014, No. 1 (145). - S. 118-119.
4. Shklyar F.R. Blast furnaces (designs, theory, modes of operation) / Shklyar F.R., Malkin V.M., Kashtanova S.P., Kalugin Ya.P., Sovetkin V.L. - M.: Metallurgy, 1982. - 176 With.

5. Solomentsev S.L. Rational types of nozzles and blast furnaces. Lipetsk: LGTU., 2001. 432 p.
 6. Yu. V. Shatskikh, A. I. Sharapov, A. G. Arzamashev and Yu. A. Geller. Optimization of the operation mode of regenerative heat exchangers / Published under license by IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Conference Series, Volume 2119, The XXXVII Siberian Thermophysical Seminar (STS37), 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2119 012156. DOI:10.1088/1742-6596/2119/1/012156
 7. Yu. V. Shatskikh, Yu. A. Geller. Development of optimization criteria of regenerative heat exchangers and operating regime of regenerative heat exchangers / Published under license by IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Conference Series, Volume 1683, Actual issues of thermal power engineering and thermal engineering, 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1683 042028. DOI:10.1088/1742-6596/1683/4/042028.
 8. Menshikov R.I., Solomentsev S.L. An approximate method for calculating temperatures from the height of air heaters. Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy. 1983. No. 111.S.140-143.
 9. Program for calculation of regenerative heat exchangers. Certificate of state registration of the computer program 2022683184, 01.12.22. Application No. 2022682401 dated 11/22/2022.
-