



ОТКРЫТАЯ НАУКА
издательство

Международный журнал информационных технологий и
энергоэффективности

Сайт журнала:

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



УДК 66.045.13

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ НАСАДОК

¹ Шацких Ю.В., ² Шарапов А.И., ³ Арзамасцев А.Г., ⁴ Юнусова М.А.

^{1,4} *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия (111250, Москва, Красноказарменная, 14), e-mail: ¹ shatskih_jv@mail.ru ⁴ YunusovaMA@mpei.ru*

^{2,3} *Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия (398600, Липецк, Московская, 30), e-mail: ² sharapov-lipetsk@yandex.ru, ³ arzamastcev-ag@mail.ru*

В работе представлены результаты расчетного исследования режимов работы регенеративного теплообменного аппарата. Расчеты проводились на основе математической модели регенеративного теплообмена. Ранее показывалось, что оптимальным для регенеративного теплообменника является режим, обеспечивающий линейное распределение температуры теплоносителя и насадки по высоте аппарата. Показано, что в рамках регулярного режима снижение продолжительности периодов нагрева/охлаждения насадки сопровождается увеличением коэффициента использования тепла. Также показано, что границу реализации регулярного режима можно оценить с помощью критериев подобия, сочетающих в себе конструктивные и режимные характеристики регенеративного теплообменника. Проведенные расчеты показали, что имеет смысл повышать коэффициент теплоотдачи насадки только при установленном диапазоне изменения расходов теплоносителей и времени периодов нагрева и охлаждения и режимных параметров работы теплообменников.

Ключевые слова: регенеративные теплообменники, теплообменный аппарат.

STUDY OF REGENERATIVE HEAT EXCHANGERS WITH DIFFERENT TYPES OF PACKINGS

¹ Shatskikh Yu. V., ² Sharapov A. I., ³ Arzamastsev A.G., ⁴ Yunusova M.A.

^{1,4} *National Research University MPEI, Moscow, Russia (111250, Moscow, Krasnokazarmennaya 14), e-mail: ¹ shatskih_jv@mail.ru ⁴ YunusovaMA@mpei.ru*

^{2,3} *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia (398600, Lipetsk, Moskovskaya, 30), e-mail: ² sharapov-lipetsk@yandex.ru, ³ arzamastcev-ag@mail.ru*

The paper presents the results of a computational study of the operating modes of a regenerative heat exchanger. The calculations were carried out on the basis of a mathematical model of regenerative heat transfer. Previously, it was shown that the optimal mode for a regenerative heat exchanger is the mode that provides a linear distribution of the temperature of the coolant and packing along the height of the apparatus. It is shown that, within the framework of the regular regime, a decrease in the duration of the heating/cooling periods of the packing is accompanied by an increase in the heat utilization coefficient. It is also shown that the boundary of the implementation of the regular mode can be estimated using similarity criteria that combine the design and operating characteristics of a regenerative heat exchanger. The calculations performed showed that it makes sense to increase the heat transfer coefficient of the packing only for the established range of changes in the flow rates of heat carriers and the time of heating and cooling periods and the operating parameters of the heat exchangers.

Keywords: regenerative heat exchangers, heat exchanger.

Выбор оптимального режима работы регенеративного теплообменника

Регенеративные теплообменные аппараты широко применяются в технологии и промышленности. Этот тип теплообменников отличается большим разнообразием [1-3]. Но для любого регенеративного теплообменника общим является взаимосвязь конструктивных характеристик и режимных параметров [4].

Теплообмен в регенеративном аппарате в период охлаждения насадки можно описать системой дифференциальных уравнений [5], численное решение которых позволяют получить распределение температуры насадки и теплоносителей по высоте теплообменника. Проведенные расчеты показывают, что при соответствующем подборе соотношения приведенных расходов и времени периодов охлаждения и нагрева можно получить линейное распределение температуры насадки по высоте при квазистационарном режиме. В этом случае мы имеем регулярный режим нагрева (охлаждения) насадки, так как линейное распределение температуры насадки сохраняется в течении всего времени периода [6]. Анализ существующих исследований показывает, что в действующих регенеративных воздухоподогревателях котельных установок и доменных воздухонагревателях распределение температуры насадки и теплоносителей по высоте действительно близко к линейному.

Для регулярного режима можно перейти от дифференциальной формы записи уравнений к интегральной, а затем привести к критериальному виду [4] с использованием критериев подобия.

Критерий $Kp1_f = \frac{C_f Q_f^* \tau}{Cm \rho^* H}$ определяет соотношение между тепловоспринимающей

способностью холодного теплоносителя ($f=1$) или горячего теплоносителя ($f=2$) и теплоаккумулирующей способностью насадки.

Критерий $Kp2_f = \frac{C_f Q_f^*}{\alpha_f \rho^* f_0 H}$ – соотношение между тепловоспринимающей способностью

холодного теплоносителя ($f=1$) или горячего теплоносителя ($f=2$) и интенсивностью конвективного теплообмена.

Здесь C – теплоемкость насадки, Дж/(кг·К);

C_f – теплоемкость теплоносителей, Дж/(м³·К);

f_0 – удельная поверхность насадки, м²/кг;

H – высота насадки, м;

m – коэффициент массивности насадки;

Q_f^* – приведенный расход теплоносителей, м³/(м²·с);

α_f – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

ρ^* – плотность насадки, кг/м³;

τ – время, с.

Индекс f – номер теплоносителя: $f=1$ – холодный теплоноситель, $f=2$ – горячий теплоноситель.

Удельная поверхность насадки $f_0 = H' / \rho^*$

Коэффициент массивности насадки [3] $m = 1 + Bi/3$, где Bi – число Био.

Приведенный расход теплоносителей $Q_f^* = Q_f / S$, где S – полное сечение насадки, м.

Полученные критерии включают в себя как конструктивные, так и режимные характеристики регенеративного теплообменника. Используя эти критерии, можно для имеющихся аппаратов подобрать рациональный режим работы.

Можно решить и обратную задачу. Используя полученные критерии, можно, задаваясь температурой нагрева холодного теплоносителя, получить необходимые значения конструктивных и режимных параметров. Разумеется, полученные результаты будут приближенными, но они позволят оценить эффективность внедрения новых конструкций насадок и подобрать соответствующий режим работы.

Анализ критериальных уравнений для регулярного режима регенеративного теплопереноса позволяет выявить связи между всеми теплофизическими, конструктивными и режимными параметрами регенеративного теплообменного аппарата. Обобщенная, безразмерная форма критериальных уравнений дает возможность выбора требуемых параметров любых РТА в зависимости от предъявляемых требований и оптимизации как характеристик насадки, так и режимов работы. Решение критериальных уравнений [4] в заданных условиях однозначности (начальные и конечные температуры теплоносителей) дает конкретные значения критериев $Kp1$ и $Kp2$, которые могут быть получены при различных комбинациях входящих в них параметров. В частности, критерий показывает соответствие между длительностью периодов и высотой насадки, позволяет определить необходимый приведенный расход теплоносителей Q^* , м³/(м²·с). Причем один и тот же результат можно получить при разных характеристиках насадки за счет соответствующего подбора режимных параметров.

Регулярный режим можно реализовать для любых значений времени нагрева и охлаждения при условии линейного повышения температуры греющего теплоносителя в период нагрева и линейного снижения до минимальной температуры холодного теплоносителя в течении периода охлаждения. При постоянных температурах теплоносителей на входе в насадку с ростом продолжительности периода происходит переход к нерегулярному режиму.

Проиллюстрируем на примере как можно применить критериальный анализ. По программе [7] выполнена серия расчетов доменного воздухонагревателя при следующих исходных данных:

1. Высота насадки $H= 40,6$ м.
2. Полное сечение насадки $S= 42$ м².
3. Живое сечение насадки $F= 14,07$ м².
4. Удельное живое сечение насадки $f= 0,335$ м²/м².
5. Удельная поверхность нагрева $H'= 32,7$ м²/м³.
6. Эквивалентная полутолщина слоя $\delta=0,02035$ м.
7. Гидравлический диаметр $d_3=0,041$ м.
8. Удельная масса насадки $\rho^*=1415,8$ кг/м³.
9. Удельная поверхность насадки $f_0= 0,0231$ м²/кг.
10. Длительность периода нагрева $\tau_1=7200$ с.
11. Длительность периода охлаждения $\tau_2= 3000$ с.
12. Расход холодного теплоносителя $Q_1=92$ м³/с.
13. Приведенный расход холодного теплоносителя $Q_1^*=2,1905$ м³/(м²·с).
14. Температура холодного дутья $t_{11}= 70$ °С.

15. Температура дымовых газов на входе в насадку $t_{21}=1300$ °С.

В расчетах менялось время периодов нагрева и охлаждения при прочих неизменных условиях.

Проведённые расчеты, во-первых, дают распределение температуры насадки и теплоносителей по высоте, т.е. позволяют судить о том насколько выбраны режим работы аппарата обеспечивает линейное распределение температуры по высоте насады. Во-вторых, программа рассчитывает значения средних коэффициентов теплоотдачи теплоносителей и теплопроводности насадки.

Расчеты показывают, что для насадки 4 при приведенном расходе $Q^*_1=2,1905$ м³/(м²·с) регулярный режим можно реализовать при продолжительности периода охлаждения не более 50 мин. Результаты расчета следующие:

1. Расход топлива 15,031 м³/с, ему соответствует расход дымовых газов $Q_2=36,5283$ м³/с и приведенный расход горячего теплоносителя $Q^*_2=0,875$ м³/(м²·с).

2. Температура газа (°С) на выходе из насадки:

Период нагрева насадки:

- в начале периода: 143,78;

- в конце периода: $t_{22}=400,05$;

- средняя за период: 275,73.

Период охлаждения насадки:

- в начале периода: 1248,25;

- в конце периода: $t_{12}=1143,91$;

- средняя за период: 1198,26.

Средняя теплоемкость кладки $C=1220,1241$ Дж/(кг·К).

Средний коэффициент теплоотдачи:

- период нагрева $\alpha_2=21,7634$ Вт/(м²·К);

- период охлаждения $\alpha_1=28,3951$ Вт/(м²·К).

Данному режиму работы регенеративного теплообменника соответствует значение критерия $\Phi=0,1$.

Распределение температуры насадки и теплоносителя по высоте аппарат показано на рисунке 1.

Допустим, что мы решили поменять насадку теплообменника на более эффективную и обеспечить тот же уровень нагрева теплоносителя. Выясним, какой должен быть режим работы теплообменника и его конструкция, чтобы обеспечить наиболее эффективную его работу. Анализ на основе критерия Φ показывает, что при той же температуре нагрева холодного теплоносителя и той же продолжительности нагрева (охлаждения) необходимо на 4 м уменьшить высоту насадки. Такое сравнительно небольшое изменение в габаритах объясняется сравнительно низкой аккумулялирующей способностью насадки по сравнению с более развитой поверхностью нагрева.

Чтобы использовать данную насадку более эффективно необходимо использовать материал с большей плотностью, теплопроводностью и теплоемкостью, например вместо диоксида кремния использовать муллитокорундовые огнеупоры. В этом случае при сохранении той же температуры нагрева холодного теплоносителя и продолжительности нагрева при условии $\Phi=0,1$ можно сократить высоту насадки на 10 м, т.е. на 25%.

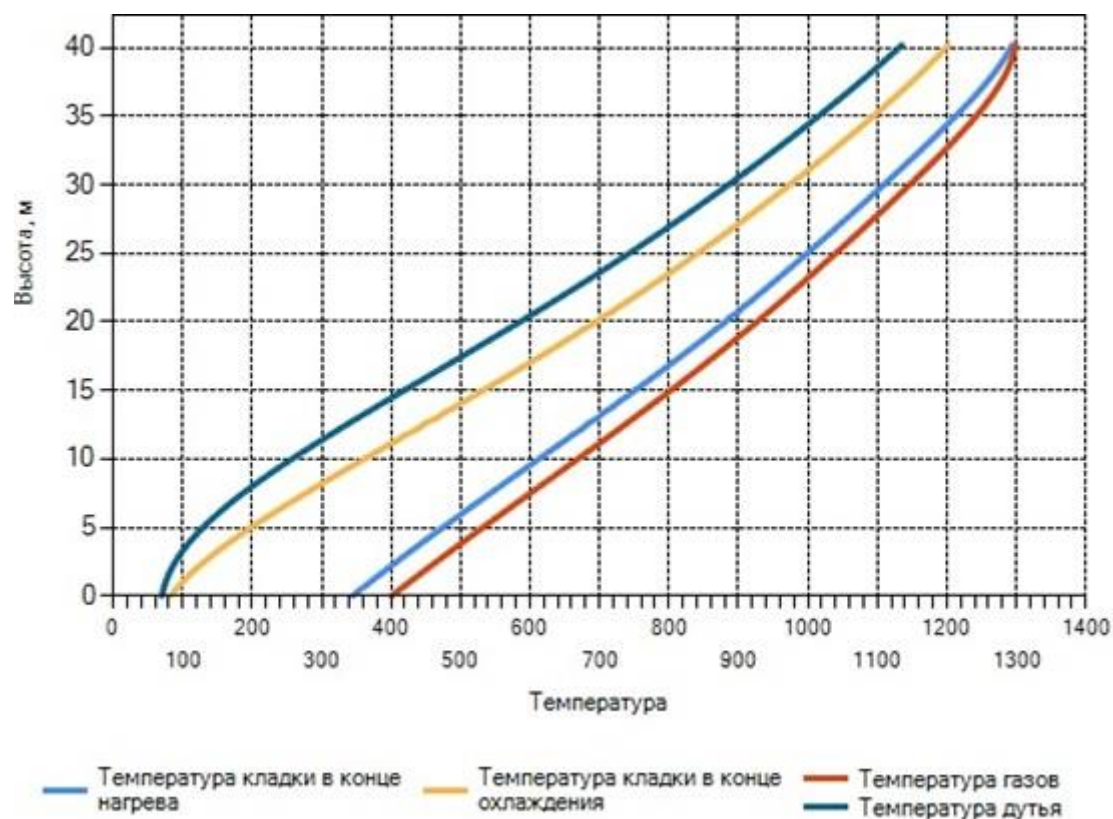


Рисунок 1 – Изменение температуры по высоте насадки при реализации регулярного режима

Учитывая обобщенный характер критерия Kpl_1 , его значение 0,1 является границей реализации регулярного режима для любого типа насадки. Снижение расхода теплоносителя сопровождается увеличением временного диапазона реализации регулярного режима, например, при приведенном расходе нагреваемого теплоносителя $1,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ регулярный режим реализуется при продолжительности 80 мин. В рамках регулярного режима снижение продолжительности периода охлаждения и приведенного расхода сопровождаются увеличением температуры дутья, снижением температуры дымовых газов и увеличением коэффициента использования тепла.

Заключение

Расчеты, выполненные с помощью программы, показали, что наиболее рациональным для работы регенеративного теплообменника является режим, обеспечивающим линейное распределение температуры по высоте насадки. Добиться такого распределения возможно при определенном сочетании конструктивных параметров насадки и режимных параметров работы теплообменного аппарата. С помощью критериев подобия определена граница существования режима, обеспечивающего линейное распределение температуры по высоте насадки.

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

Список литературы

1. Кирсанов Ю.А. Циклические тепловые процессы и теория теплопроводности в регенеративных воздухоподогревателях. М.: ФИЗМАТЛИТ –2007, 240 с.
2. Самарин О.Д. Температурная эффективность пластинчатых и роторных теплоутилизаторов при различных расходах воздуха // Сантехника, Отопление, Кондиционирование, 2014, № 1 (145). – С. 118-119.
3. 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.: Metallurgia, 1982. – 176 с.
4. 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.
5. Соломенцев С.Л. Рациональные типы насадок и доменных воздухонагревателей. Липецк: ЛГТУ., 2001. 432 с.
6. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: ГИТТЛ, Гостехиздат, 1954. 408 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668760 «Программа для расчета регенеративных теплообменников с неподвижной насадкой».

References

1. Kirsanov Yu.A. Cyclic thermal processes and the theory of heat conduction in regenerative air heaters. M.: FIZMATLIT -2007, 240 p.
2. 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.
3. 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 p.
4. 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.
5. Solomentsev S.L. Rational types of nozzles and blast furnaces. Lipetsk: LGTU., 2001. 432 p.
6. Kondratiev G.M. Regular heat. M.: GITTL, Gostekhizdat, 1954. 408 p.
7. Certificate of state registration of the computer program No. 2021668760 “Program for calculating regenerative heat exchangers with a fixed nozzle”.