

Оптимизация геометрических параметров перекрестноточных пластинчатых рекуператоров

Н.В. БЕЛОНОГОВ, В.А. ПРОНИН
СПбГУИиПТ

The method of optimization of crossflow plate recuperators is proposed. The optimization calculations are given for recuperators RKP1-200, RKP1-250 and RKP1-315 with the change of the height of the plate from 1 to 8,5 mm. Thermal efficiency of a recuperator, pressure drop of the removed air and the total area of plates of the heat exchange pack are chosen as the criteria of optimization. A global function of quality for the considered task is given, and on the basis of its analysis the optimum height of the plate is found. The method can be used for the optimization by the arbitrary number of independent values.

При решении задач оптимизации конструкции перекрестноточных рекуператоров необходимо иметь в виду, что любое изменение геометрических параметров теплообменника неоднозначно сказывается на таких показателях, как аэродинамическое сопротивление, материалоемкость и эффективность. Так, обеспечение более высокой эффективности может приводить к высоким падениям давления в пакете и увеличению материалоемкости рекуператора. Поскольку выбор научно обоснованного варианта компоновки требует учета большого числа факторов, оптимизационная задача является многоцелевой. Наряду с отсутствием вычислительных способов поиска экстремума нескольких целевых функций, которые слагают многокритериальный или векторный показатель качества установки, существуют некоторые методологические трудности поиска альтернативы. Многокритериальную оптимизацию рационально проводить в скалярной постановке с использованием метода «справедливого компромисса» [1]. Пусть каждый критерий $d_i(u)$ характеризует некоторый оптимизируемый показатель изделия u . Лучший вариант характеризуется наиболее удачным сочетанием всех показателей качества. Многоцелевая задача, таким образом, сводится к поиску экстремума функции вида

$$D = \prod_{i=1}^n [d_{i,m}(u)]^{\lambda_i}, \quad (1)$$

где λ_i — коэффициент значимости i -го показателя качества, причем $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Значения λ_i для каждого критерия выбираются на основе экспертной оценки в рамках конкретной задачи. Поскольку единицы измерения отдельных критериев различны, их приводят к инвариантному диапазону с помощью линейного преобразования.

Часто в качестве альтернативы описанному подходу для комплексной оценки используют эксергетический КПД [3], определяемый для перекрестноточного теплообменника по формуле

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{e_{12}}{(e_{21} + \Delta p_2) \frac{G_2}{G_1} + \Delta p_1}, \quad (2)$$

где e_{12} — эксергия нагреваемого воздуха на выходе из рекуператора;

e_{21} — эксергия охлаждаемого воздуха на входе в рекуператор;

G_1, G_2 — массовые расходы теплоносителей;

$\Delta p_1, \Delta p_2$ — падение давления по трактам нагреваемого и охлаждаемого воздуха соответственно.

Формула (2) связывает термическую эффективность теплообменника и аэродинамические потери.

Исследования проведены для рекуператоров, теплообменная матрица которых представляет собой пакет, набранный из тонкостенных полимерных пластин, имеющих сотовую структуру [2]. Охлаждаемый воздух подается в сотовую часть пакета, нагреваемый — в шелевую (рис. 1).

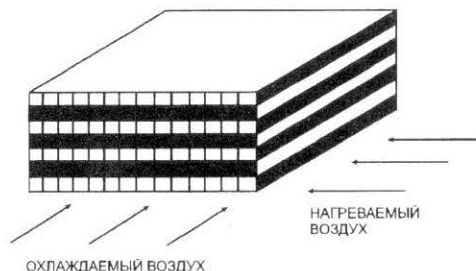


Рис. 1. Теплообменный пакет пластинчатого перекрестноточного рекуператора

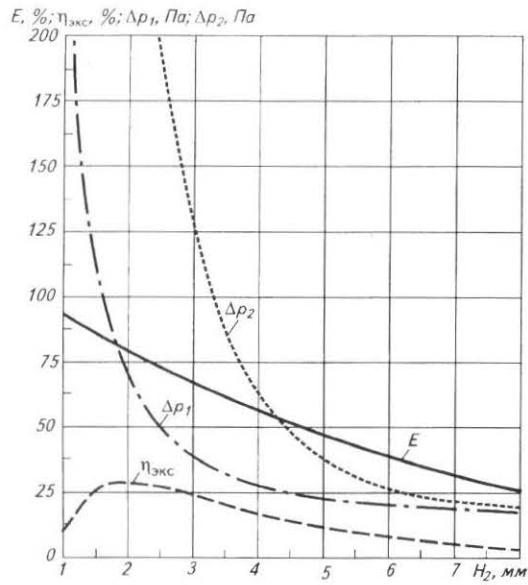


Рис. 2. Зависимость термической эффективности, эксергетического КПД и падения давления приточного и удаляемого воздуха от высоты пластины пакета

Рассмотрим зависимость $\eta_{экс}$, падения давления в рекуператоре Δp_1 , Δp_2 и термической эффективности по нагреваемому воздуху E от изменения высоты сотовой панели с 1 до 8 мм для перекрестноточного пластинчатого рекуператора РКПл-200 производительностью 500 м³/ч. Результаты расчета представлены на рис. 2. Как видно из приведенных на рисунке графиков, снижение эксергетического КПД при уменьшении высоты пластины происходит в области очень больших значений Δp_1 , Δp_2 . Экстремум кривой $\eta_{экс}(H_2)$ лежит в окрестностях точки $H_2 = 2$ мм. Перепад давления удаляемого воздуха при этом значении H_2 составляет $\Delta p_2 \approx 275$ Па, что недопустимо для рекуператора данного типа. Отсюда можно заключить, что формула (2) имеет низкую чувствительность к изменению аэродинамического сопротивления. Кроме того, метод эксергетического анализа не лишен ряда недостатков, основным из которых является сложность определения энтропии влажного воздуха при переменной массе пара, особенно при переходе в область гетерогенных состояний и отрицательных температур. В связи с этим сопротивление рекуператора и термическую эффективность рационально рассматривать отдельно как целевые взаимно нейтральные функции в рамках многокритериальной оптимизации.

Увеличение высоты сотовой пластины теплообменного пакета перекрестноточного рекуператора приводит, во-первых, к изменению числа Рейнольдса, следовательно, к изменению коэффициента теплопередачи; во-вторых, к увеличению массового расхода через пластину, что снижает эффективность рекуператора; в-третьих, к сни-

жению аэродинамического сопротивления пакета; в-четвертых, к уменьшению совокупной площади пластин и снижению стоимости пакета.

Ниже приведены оптимизационные расчеты для рекуператоров РКПл-200, РКПл-250, РКПл-315 производительностью 500, 700 и 1000 м³/ч соответственно при изменении высоты пластины в диапазоне $H_2 = 1 \dots 8,5$ мм. Исходные данные:

- ✓ температура удаляемого воздуха $t_{21} = 22$ °С;
- ✓ влажность удаляемого воздуха $\phi_{21} = 60$ %;
- ✓ температура приточного воздуха $t_{11} = 0$ °С;
- ✓ влажность приточного воздуха $\phi_{11} = 75$ %.

Зависимость частных критериев от высоты пластины носит монотонный характер без экстремумов, что иллюстрируют рис. 3 – 6. Из представленных графиков видно, что увеличение H_2 влечет за собой снижение всех частных показателей качества. Следует отметить сильную нелинейность в снижении аэродинамического сопротивления

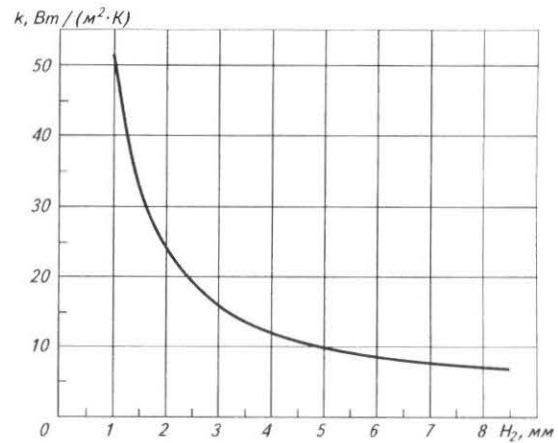


Рис. 3. Зависимость среднего коэффициента теплопередачи от высоты сотовой пластины теплообменного пакета (РКПл-200)

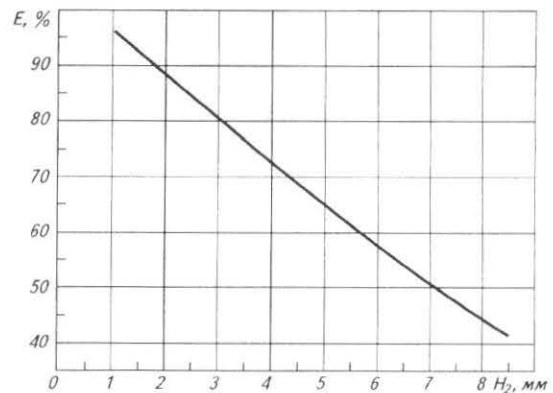


Рис. 4. Зависимость термической эффективности рекуператора от высоты сотовой пластины теплообменного пакета (РКПл-200)

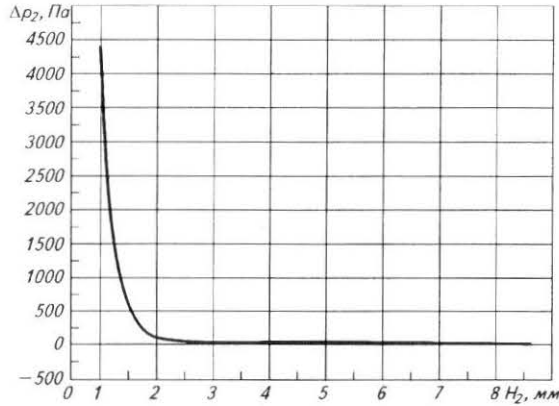


Рис. 5. Зависимость падения давления удаляемого воздуха в рекуператоре от высоты сотовой пластины теплообменного пакета (РКПл-200)

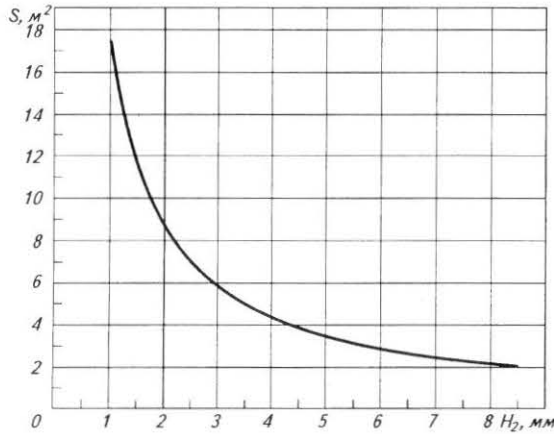


Рис. 6. Зависимость суммарной площади пластин теплообменного пакета от высоты сотовой пластины теплообменного пакета (РКПл-200)

на участке $H_2 = 1 \dots 2$ мм, после чего Δp_2 при дальнейшем увеличении высоты пластины изменяется незначительно.

Оптимальной высотой пластины следует считать такое ее значение, которое соответствует минимальной площади пластин, минимальному сопротивлению пакета и максимальной эффективности. Зависимости инвариантных частных критериев от H_2 представлены на рис. 7. Задача оптимизации заключается в определении максимума глобальной функции качества и значения высоты пластины, соответствующего экстремуму этой функции. Таким образом, используя формулу (2), глобальное качество можно представить в виде

$$D = [\Delta p_{2\text{inv}}(H_2)]^{0.4} [E_{\text{inv}}(H_2)]^{0.4} [S_{\text{inv}}(H_2)]^{0.2}. \quad (3)$$

При выводе формулы (3) вес каждого из показателей получен из соображений о равной значимости эффективности и аэродинамического сопротивления и более низкой значимости стоимости материалов (площади пластин). Соотношение весов показателей степени при эф-

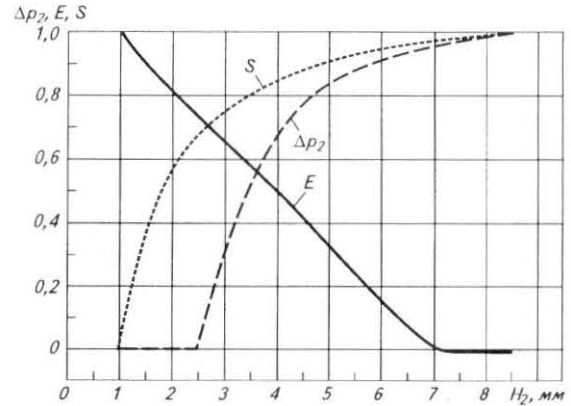


Рис. 7. Зависимость безразмерных падения давления удаляемого воздуха в рекуператоре, площади пластин и термической эффективности от высоты сотовой пластины теплообменного пакета (РКПл-200)

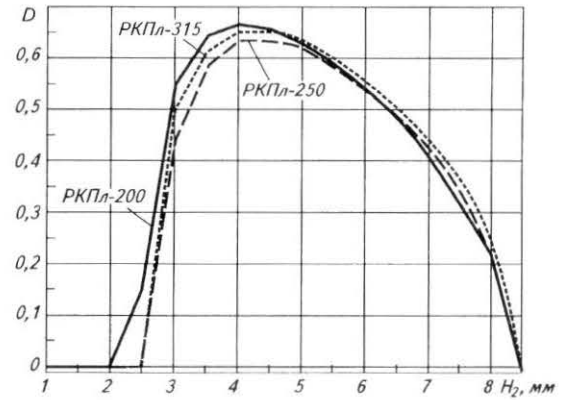


Рис. 8. Зависимость глобальной функции качества от высоты сотовой пластины теплообменного пакета

фективности E , сопротивлению Δp_2 и площади S составляет соответственно 1:1:0,5.

Зависимость глобальной функции качества от высоты пластины пакета приведена на рис. 8. Ее анализ графиков позволяет заключить, что для исследованных рекуператоров в диапазоне расходов 350...1000 м³/ч высоту пластины $H_2 = 4$ мм можно считать оптимальной.

Руководствуясь аналогичными соображениями, можно проводить оптимизацию рекуператоров по произвольному числу независимых величин (геометрическим размерам и режимным параметрам).

Список литературы

1. Анисимов С.М. Утилизация теплоты вытяжного воздуха в перекрестноточном рекуператоре // Инженерные системы. 2003, Т. 8, № 4.
2. Белоногов Н.В., Пронин В.А. Энергоэффективные теплообменники в системах вентиляции / Теплоэнергоэффективные технологии // Информационный бюллетень. 2003. № 3 (32).
3. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. — М.: Энергия, 1968.