

Математическая модель и оптимизация параметров работы пластинчатого рекуператора

И.В. Кряклина

Важное народнохозяйственное значение для энергосбережения и повышения энергоэффективности имеет использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ). Строительство энергоэффективного жилья с НВИЭ является актуальным для России [1]. Поэтому необходимо интенсифицировать работы по внедрению для отопления, вентиляции и кондиционирования зданий машин и устройств, которые могут уменьшить энергопотребление при сохранении комфортных условий [2, 3]. Рекуператоры как раз такие устройства, которые применяются для повторного использования тепла отходящего воздуха в системе вентиляции зданий.

Рекуператоры вентиляционного воздуха бывают различными по конструкции: пластинчатыми, роторными, камерными, рекуператорами с промежуточным теплоносителем, рекуператорами – тепловыми трубами [4,5].

Для повышения эффективности работы пластинчатого рекуператора вентиляционного воздуха необходимо использовать его максимальные возможности для возврата тепла отработанного воздуха при оптимальных режимах функционирования.

Разрабатываем функциональную математическую модель процесса работы пластинчатого рекуператора в виде динамической системы, которая выполняет преобразование входных возмущающих и управляющих воздействий в выходные переменные параметры [6]:

$$\Phi_i(X, Y, Z, t) = 0,$$

где $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] t$ - вектор входных параметров; $Y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_n]$ t - вектор выходных параметров; $Z = [z_1, z_2, z_3, \dots, z_n] t$ - вектор управляющих параметров; t – координата времени.

Принимаем входными параметрами процесса возврата тепла в энергоэффективный дом параметры наружного и удаляемого воздуха, значения которых заранее известны и определяют режим работы пластинчатого рекуператора. Выходными параметрами являются параметры приточного и вытяжного воздуха. Значения выходных параметров определяются режимом процесса работы пластинчатого рекуператора и управляющими параметрами. Управляющие параметры – это переменные характеристики процесса, на которые можно оказывать прямое воздействие в соответствии с требованиями, что позволяет управлять процессом возврата тепла в энергоэффективный дом.

Графическое изображение функциональной математической модели пластинчатого рекуператора представлено на рисунке.

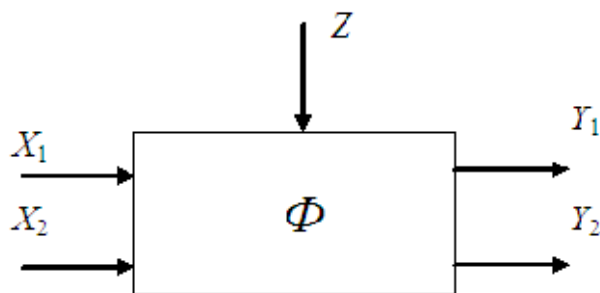


Схема функциональной динамической математической модели пластинчатого рекуператора

Обозначим векторы:

$X_1 = \{ t_n; G_n; c_n; \varphi_n \}$ – входной вектор параметров наружного воздуха.
 t_n - температура наружного воздуха, °С; G_n – расход наружного воздуха, кг/с;
 c_n – теплоемкость наружного воздуха, Дж/(кг·К); φ_n – относительная влажность наружного воздуха, %.

$X_2 = \{ t_y; G_y; c_y; \varphi_y; q_1 \}$ – входной вектор параметров удаляемого воздуха. t_y , °С – температура удаляемого воздуха; G_y – расход удаляемого воздуха, кг/с; c_y – теплоемкость удаляемого воздуха, Дж/(кг·К); φ_y – относительная влажность удаляемого воздуха, %; q_1 – тепловой поток, передающийся удаляемым наружному воздуху, Вт.

$Y_1 = \{G_{\text{п}}; c_{\text{п}}; \varphi_{\text{п}}; q_2\}$ – выходной вектор приточного воздуха.

$G_{\text{п}}$ – расход приточного воздуха, кг/с; $c_{\text{п}}$ – теплоемкость приточного воздуха, Дж/(кг·К); $\varphi_{\text{п}}$ – относительная влажность приточного воздуха, %; q_2 – тепловой поток, получаемый приточным воздухом, Вт.

$Y_2 = \{t_{\text{в}}; G_{\text{в}}; c_{\text{в}}; \varphi_{\text{в}}\}$ – выходной вектор вытяжного воздуха. $t_{\text{в}}$ – температура вытяжного воздуха, °С; $G_{\text{в}}$ – расход вытяжного воздуха, кг/с; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость вытяжного воздуха, Дж/(кг·К); $\varphi_{\text{в}}$ – относительная влажность вытяжного воздуха, %.

$Z = \{t_{\text{п}}; q_3; G_{\text{к}}\}$ – вектор переменных управляющих параметров; $t_{\text{п}}$ – температура приточного воздуха, °С; q_3 – потери тепла рекуператором в окружающую среду, Вт; $G_{\text{к}}$ – расход конденсата, кг/с.

В соответствие с проведенными исследованиями имеем выражения для функциональной математической модели пластинчатого рекуператора вентиляционного воздуха:

$$Y_1 = \Phi_1 [X_1, X_2, Z] = \Phi_1 [t_{\text{н}}; G_{\text{н}}; c_{\text{н}}; \varphi_{\text{н}}; t_{\text{у}}; G_{\text{у}}; c_{\text{у}}; \varphi_{\text{у}}; q_1; q_3] \quad (1)$$

$$Y_2 = \Phi_2 [X_1, X_2, Z] = \Phi_2 [t_{\text{н}}; G_{\text{н}}; c_{\text{н}}; \varphi_{\text{н}}; t_{\text{у}}; G_{\text{у}}; c_{\text{у}}; \varphi_{\text{у}}; q_1; q_3] \quad (2)$$

На основании разработанной функциональной математической модели пластинчатого рекуператора вентиляционного воздуха переходим к расчету и оптимизации параметров пластинчатого рекуператора с определением целевой функции для нахождения критерия оптимизации.

Главная цель практического использования пластинчатого рекуператора – получение максимума тепла от удаляемого из помещения воздуха при имеющихся технических возможностях рекуператора и физических параметрах наружного и удаляемого воздуха [7, 8].

В соответствии с функциональной математической моделью функционирование пластинчатого рекуператора полностью характеризуется следующими информационными переменными: $t_{\text{н}}; G_{\text{н}}; c_{\text{н}}; \varphi_{\text{н}}; t_{\text{у}}; G_{\text{у}}; c_{\text{у}}; \varphi_{\text{у}}; q_1; q_2; q_3; t_{\text{п}}$.

Регламентированными переменными являются: $t_{\text{н}}; G_{\text{н}}; c_{\text{н}}; \varphi_{\text{н}}; t_{\text{у}}; G_{\text{у}}; c_{\text{у}}; \varphi_{\text{у}}$.

Устанавливаем, что оптимизирующей информационной переменной является $t_{\text{п}}$ - температура приточного воздуха.

На основании функциональной математической модели пластинчатого рекуператора для расчета используем математический аппарат, который включает в себя систему уравнений, отражающую сущность явлений, протекающих в объекте моделирования, и неравенств, которые определяют область изменения значений независимых переменных. Неравенства являются ограничениями, которые позволяют сформулировать требования, накладываемые на границы изменения характеристик функционирования системы.

Система уравнений включает 5 уравнений: основное уравнение энергетического баланса (3); уравнения термодинамики (4 -6), уравнение для определения коэффициента полезного действия пластинчатого рекуператора (7):

$$q_1 = q_2 + q_3, \quad (3)$$

$$q_1 = c_y G_y (t_y - t_b) \quad (4)$$

$$q_2 = c_n G_n (t_{\text{п}} - t_n) \quad (5)$$

$$q_m = c_n G_n (t_y - t_n) \quad (6)$$

$$\eta_p = q_2 / q_m, \quad (7)$$

где q_m - количество тепла, теоретически максимально возможного, получаемого приточным воздухом, с помощью разности температур удаляемого (внутреннего) воздуха и наружного воздуха, т.е. соотношением между теплом, полученным в действительности приточным воздухом, и теоретически максимально возможным полученным теплом.

Берем для примера энергоэффективный дом площадью 280 кв.м и вводим ограничения:

$$+15^{\circ}\text{C} < t_y < +25^{\circ}\text{C};$$

$$-20^{\circ}\text{C} < t_n < +30^{\circ}\text{C};$$

$$+10^{\circ}\text{C} < t_{\text{п}} < +15^{\circ}\text{C};$$

$$+16^{\circ}\text{C} < t_b < +18^{\circ}\text{C};$$

$$100 < G_n < 600 \text{ м}^3/\text{час};$$

$$100 < G_y < 600 \text{ м}^3/\text{час}$$

В результате решения системы уравнений (3- 7) получаем целевую функцию для определения критерия оптимизации - коэффициента полезного действия пластинчатого рекуператора:

$$\eta_p = (t_n - t_n)/(t_y - t_n) \rightarrow \max \quad (8)$$

Таким образом, полученная оптимизационная задача с целевой функцией (8), уравнениями (3 - 7) и условиями ограничений представляет собой задачу получения максимального коэффициента полезного действия пластинчатого рекуператора при изменении температуры приточного воздуха t_n .

Формулируется оптимизационная задача следующим образом: среди множества допустимых управляющих воздействий t_n , обладающих тем свойством, что соответствующее решение системы уравнений (3-7) удовлетворяет условиям (ограничениям), найти такие значения t_n , которые максимизируют функционал (8).

В результате исследований устанавливаем, что для получения оптимальных режимов работы пластинчатых рекуператоров при низких температурах наружного воздуха и получения высоких значений коэффициента полезного действия, необходим подогрев наружного воздуха перед входом в рекуператор, который приводит к увеличению температуры приточного воздуха t_n [9]. С помощью грунтовых теплообменников можно также решить такую проблему односекционных пластинчатых рекуператоров, как образование конденсата. Из-за выпадения конденсата при низких температурах существует опасность замерзания рекуператора и выхода из строя всей вентиляционной системы. Если расчетные значения температуры наружного воздуха ниже -10°C , необходимо, в зависимости от предполагаемой влажности вытяжного воздуха, выбрать установку предварительного подогрева воздуха перед рекуператором, которая обеспечит повышение температуры воздуха на входе в рекуператор, или

установку байпаса рекуператора с активной защитой от замерзания. Для подогрева наружного воздуха, поступающего в рекуператор, предлагаем использовать грунтовые теплообменники [10].

На основании разработанной математической модели был определен критерий оптимизации параметров работы пластинчатого рекуператора и установлены оптимальные режимы его работы.

Литература:

1. Краснов С.А., Краснов В.С., Кряклина И.В., Загребельный М.Н., Лисиенков И.Д. Концепция энергоэффективного интеллектуального дома с ВИЭ для различных слоев населения в агломерации мегаполиса // Стратегия развития мегаполиса (некоторые аспекты). Взгляд в 2014 год. Международная конференция. Издательство Информиздат, Москва. 2012. С.48-55.

2. Ивакин Е.К., Вагин А.В. Классификация объектов малоэтажного строительства [Электронный ресурс]// «Инженерный вестник Дона», 2012. № 3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/nly2012/937//> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

3. Магомадова Х.А. Методологические подходы формирования инновационно-инвестиционного механизма средозащитных инноваций в строительном комплексе [Электронный ресурс]// «Инженерный вестник Дона», 2012. № 4 (часть 2) – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1463//> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

4. Барановский Н.В. Пластинчатые рекуператоры [Текст]/ Н.В. Барановский. -М.: Агропромиздат. 1962.- 210 с.

5. Барон В.Г. Рекуперация тепла в современных системах вентиляции [Текст] // Новости теплоснабжения. –М.: 2006. №6. С. 46-51.

6. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 912 с.

7. Olesen B.W. A simplified calculation method for checking the indoor climate // ASHRAE Transactions 98(28). 1983. P. 710-723.

8. Olesen B. Wet al. Thermal comfort in a room heated by different methods // ASHRAE Transactions 86(1). 1980. P. 34-48.

9. Кряклина И.В. Теоретическое обоснование оптимальных режимов работы пластинчатых рекуператоров на основе метода золотого сечения [Текст] // Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы 3 Международной научно-практической конференции. Саратов. СГАУ имени Н.И. Вавилова. 2012. С.127-130.

10. Кряклина И.В. Использование грунтовых теплообменников для повышения энергосбережения рекуперационных систем вентиляции в АПК // Актуальные проблемы науки в АПК. Сборник статей 63-й международной научно-практической конференции. Кострома. КГСХА. 2012. Т2. С. 107-111.