

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ В НАСАДКЕ

КУРЧЕВ А.О., инж., ЕЛИН Н.Н., д-р техн. наук, МИЗОНОВ В.Е., д-р техн. наук

Предложена ячеечная математическая модель теплообмена между потоком газа и насадкой, внутри которой находится среда, имеющая фазовый переход в рассматриваемом интервале температуры, обеспечивающий постоянство температуры поверхности теплообмена. Модель базируется на теории цепей Маркова и позволяет численно моделировать теплообменные процессы без ограничений на линейность описываемых явлений.

Ключевые слова: насадка регенератора, теплопередача, фазовые переходы, ячеечная модель.

MODELING OF REGENERATIVE HEAT TRANSFER WITH PHASE TRANSFORMATIONS IN A FILLING

A.O. KURCHEV, Engineer, N.N. YELIN, Doctor of Engineering, V.E. MIZONOV, Doctor of Engineering

A cell model of heat transfer between a gas flow and a filling, inside which a medium with phase transformation within the temperature interval under observation is placed, is proposed. This filling provides the constant temperature of the heat exchange surface. The model is based on the theory of Markov chains and allows modeling the heat exchange processes without the requirement to linearity of the phenomena in question. The features of organization of the cycle "cooling of gas – heating of air" in regenerators with such the filling are examined.

Key words: filling of regenerator, heat transfer, phase transformations, cell model.

Одним из недостатков традиционного регенеративного теплообменника с твердой насадкой является значительное изменение температуры охлажденного газа и нагретого воздуха в течение установившегося цикла его работы. Это происходит из-за того, что при подводе теплоты к насадке от горячего газа и последующем ее отводе к холодному воздуху температура самой насадки существенно меняется. Одним из возможных путей стабилизации температуры насадки и вообще поддержания ее постоянной является использование в качестве насадки среды, в которой в течение цикла работы происходят не доходящие до конца фазовые переходы (например, кипение-конденсация или плавление-отвердевание). В этом случае температура среды с достаточной для теплотехнических расчетов точностью остается постоянной, что и позволяет снизить неравномерность во времени температуры участвующих в процессе газов. Подобного рода насадки использовались в энергетических установках специального назначения; переход к их использованию в промышленной теплоэнергетике требует расчетных оценок специфики протекающих процессов в новых условиях. Ниже представлено построение математической модели процесса в регенераторе с насадкой с фазовыми переходами, учитывающей эффекты только первого порядка важности. Теоретической основой моделирования является математический аппарат теории цепей Маркова, успешно зарекомендовавший себя при описании различных процессов энергетической и химической технологии [1].

Расчетная схема процесса и его ячеечное представление показано на рис. 1.

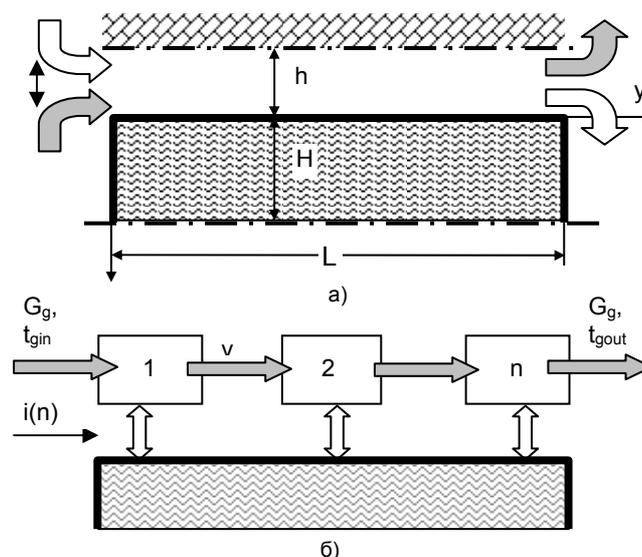


Рис. 1. Расчетная схема процесса (а) и его ячеечное представление (б)

Из последовательности каналов для прохода газа и слоев насадки выделен расчетный элемент в виде половины ширины канала для газа и половины ширины насадки. Считается, что в силу симметрии тепловые потоки, перпендикулярные движению газа, за пределы этого элемента равны нулю. Насадка заключена в контейнер со стенками, термическое сопротивление которых пренебрежимо мало. Канал для газа разбит на m ячеек идеального смешения длиной $\Delta x = L/m$ одинакового объе-

ма $\Delta V = A\Delta x$, где A – площадь поперечного сечения канала, а среда насадки представлена одной ячейкой с постоянными по ее объему параметрами. Для определенности положим, что фазовым переходом является плавление находящейся в контейнере среды, происходящее при температуре t_m с удельной теплотой q_m . Масса газа в ячейке рассчитывается по формуле $M_{i1} = \rho_{i1}\Delta V$, где ρ_{i1} – плотность газа.

Текущее тепловое состояние газа представлено распределением его параметров по ячейкам в виде векторов-столбцов температуры \mathbf{t} , теплоты \mathbf{Q} и массы \mathbf{M} , каждый из которых имеет размер $n \times 1$. Выберем продолжительность перехода между последовательными состояниями Δt настолько малой, чтобы газ и переносимая с ним теплота могли перейти только в соседние (как вперед, так и назад) ячейки, но не далее. Текущее время определяется как $\tau_k = (k - 1)\Delta t$, где k – номер временного перехода. Кинетика процесса в газе определяется рекуррентными матричными равенствами:

$$\mathbf{M}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{M}_1^k + \mathbf{M}_f^k, \quad (1)$$

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{Q}^k + \mathbf{Q}_f^k - \Delta\mathbf{Q}^k, \quad (2)$$

где движение массы и теплоты вдоль цепи контролируется переходной матрицей \mathbf{P} и векторами внешних источников \mathbf{M}_f^k , \mathbf{Q}_f^k , а теплообмен между цепями – вектором передаваемой за переход теплоты от газа к насадке $\Delta\mathbf{Q}^k$.

Подача газа локализована на входе, а его векторы источников имеют единственный ненулевой элемент для первой ячейки $M_{f1}^k = G_0\Delta t$, $Q_{f1}^k = ct_0G_0\Delta t$, где G_0 – массовый расход газа, c ; t_0 – его теплоемкость и температура на входе.

Структура переходной матрицы имеет вид

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1-d-v_1 & d & 0 & \dots \\ d+v_1 & 1-2d-v_2 & d & \dots \\ 0 & d+v_2 & 1-2d-v_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $d = D\Delta t/\Delta x^2$ – вероятность чисто случайных (симметричных) переходов, D – коэффициент макродиффузии; $v_i^k = W_i^k\Delta t/\Delta x$ – вероятность конвективного переноса, W_i^k – скорость продольного движения, зависящая от номера ячейки, в силу меняющейся с температурой плотности газа, и от номера перехода в неустановившемся процессе. Величина \mathbf{v}^k также задается вектором, определяемым по формуле

$$\mathbf{v}^k = G_{10}\Delta t \cdot \mathbf{M}_g, \quad (4)$$

где \mathbf{J} – оператор поэлементного деления.

Вектор теплообмена между газом и насадкой рассчитывается по известным соотношениям конвективного и радиационного теплопереноса с использованием векторов коэффициентов конвективной и радиационной теп-

лоотдачи α_c^k и α_r^k и поверхности теплообмена в ячейке S [2].

Рассчитываемая на каждом переходе температура газа связана с его теплотой и массой формулой

$$t^k = \mathbf{Q}^k / (c\mathbf{M}^k). \quad (5)$$

Полная теплота, передаваемая за переход к насадке от газа, есть сумма всех ее значений по ячейкам. Эта теплота идет на убыль твердой фазы в среде насадки

$$\Delta m_s^k = \Sigma \Delta Q_i^k / q_m. \quad (6)$$

Убыль продолжается до тех пор, пока содержание твердой фазы не станет равным нулю.

Формулы (1)–(6) полностью описывают кинетику теплообмена горячего газа с насадкой с незавершенным фазовым переходом.

На рис. 2 показана расчетная эволюция температуры газа ($t_0 = 1000$ °C) и воздуха ($t_0 = 20$ °C) при температуре плавления среды в насадке $t_m = 300$ °C для относительно короткого регенеративного цикла. Для существования устойчивого цикла необходимо, чтобы образовавшаяся в среде насадки жидкая фаза при ее нагреве полностью переходила в твердую фазу при охлаждении при одинаковом времени нагрева и охлаждения. При прочих равных условиях влиять на этот процесс можно только расходом холодного воздуха. Расчетный пример изменения относительного содержания твердой фазы в течение цикла показан на рис. 3. Устойчивый цикл возможен только в случае, если расход холодного воздуха составляет 1,67 расхода горячего газа. При больших расходах за несколько циклов вся среда насадки перейдет в жидкое состояние, при меньших расходах конец цикла будет завершаться с твердой насадкой.

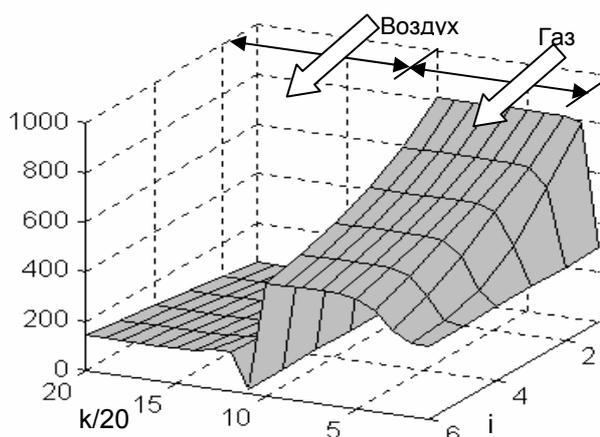


Рис. 2. Кинетика изменения распределения температуры газа и воздуха по каналу в течение цикла

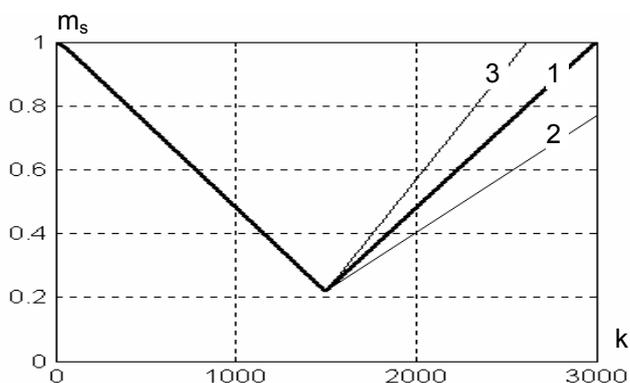


Рис. 3. Изменение относительного содержания твердой фазы в насадке в течение цикла при различных соотношениях расходов холодного и горячего газа: 1 – 1,67; 2 – 2,61; 3 – 1,08

Однако, если допустить работу насадки с полностью жидкой фазой, устойчивый цикл будет формироваться автоматически, но положительный эффект использования фазового перехода будет проявляться не в полной степени.

Построенная модель позволяет рассмотреть общие требования, которым должна удовлетворять эффективная насадка регенератора. Одной из важнейших характеристик насадки является соотношение dt_s/dq , описывающее рост температуры насадки с ростом аккумулируемой в ней теплоты.

При насадке в виде твердого тела $dt_s/dq = 1/c$, где c – теплоемкость материала, практически не меняющаяся с повышением температуры. Таким образом, с ростом запаасаемой теплоты прямо пропорционально растет температура, а разность температуры газа и насадки уменьшается, то есть замедляется ее прогрев. К другой группе насадок относятся насадки, внутри которых может происходить фазовый переход, позволяющий использовать теплоту фазового перехода для увеличения аккумулируемой теплоты при одинаковом объеме насадки. Если фазовый переход – плавление, как рассмотрено выше, а цикл нагрева и охлаждения организован так, что оно не завершается полностью, то температура насадки

практически постоянна и равна температуре плавления, а $dt_s/dq = 0$. С точки зрения поддержания высокого температурного напора этот случай наиболее благоприятный. Однако далеко не всегда удается подобрать материал или сплав с подходящей температурой плавления, а цикл нагрева и охлаждения трудно организовать без полного завершения фазовых переходов. Заметим, что если в твердотельной насадке ее температура может существенно меняться по ее длине и ширине, то в насадке с фазовым переходом приемлемым является допущение одинаковости температуры во всех ее точках, когда все элементы вектора t_s^k одинаковы, но меняются от перехода к переходу.

Другим вариантом насадки с фазовым переходом является насадка с кипением жидкости в постоянном объеме насадки. Здесь $dt_s/dq > 0$, но температура с ростом q возрастает медленнее, чем в твердотельной насадке, то есть ее тепловые свойства занимают промежуточное положение между твердотельной насадкой и насадкой с фазовым переходом в виде плавления. Преимуществом такой насадки являются большие возможности регулирования ее характеристик, например, путем изменения давления в ее объеме. Однако для расчета процесса с такой насадкой необходимо знать количественную характеристику dt_s/dq .

Таким образом, разработанная математическая модель теплового процесса в одном из вариантов насадки с фазовым переходом типа плавление позволяет рассчитывать регенеративный процесс и сравнивать его с процессами в регенераторах с насадками с фазовыми переходами других типов.

Список литературы

1. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2004. – V.85. – № 6. – P. 1143–1168.
2. Хавер С.В., Елин Н.Н., Мизонов В.Е., Иванов А.Б. Моделирование нагрева и охлаждения насадки регенеративного теплообменника // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50. – Вып. 12. – С. 105–107.

Курчев Андрей Олегович,
Ивановский государственный архитектурно-строительный университет,
инженер кафедры гидравлики,
e-mail: yelinnn@mail.ru

Елин Николай Николаевич,
Ивановский государственный архитектурно-строительный университет,
доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики,
e-mail: yelinnn@mail.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,
e-mail: mizonov@home.ivanovo.ru