

Согласно расчетам Я.И. Френкеля, значительная скорость вскипания соответствует вероятности

$$e^{-\frac{\Delta\Phi_B}{kT}} = 10^{-20}.$$

Радиус критического зародыша находится из уравнения

$$\frac{\Delta\Phi_B}{kT} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi R^2}{kT} \sigma = 20 \cdot 2,3 = 47$$

и равен  $R = 10^{-9}$  м.

Такому радиусу, согласно уравнению (3), соответствует перегрев порядка 1000 К, что заставило Я.И. Френкеля признать, что "теория вскипания перегретой жидкости остается пустой схемой, имеющей весьма ограниченное значение для понимания действительных явлений, если не принимать во внимание факторов, облегчающих эти процессы и практически всегда имеющих в наличии" [1].

Согласно уточненному уравнению вскипания (4) радиусу  $R = 10^{-9}$  м соответствует перегрев  $\Delta T = 45$  К, что достаточно близко к реально осуществляемым величинам.

Резюме. Учет зависимости удельного объема от давления для паровой фазы в известном уравнении Я.И. Френкеля снижает перегрев, обеспечивающий заметную скорость вскипания, до 45°С.

#### Л и т е р а т у р а

1. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. М. - Л., 1945.

УДК 536.244

А.М. Заватко, Л.И. Тарасевич, канд. техн. наук,  
Г. А. Фатеев, канд. техн. наук

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОТНОГО СЛОЯ В РЕЖИМЕ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН

Принцип обработки слоя дисперсного материала в режиме резонансных тепловых волн следует из условий реакционного теплообмена, складывающихся в агломерационном процессе [1, 2]. Тепло, подведенное к поверхности тела в первый период процесса

под влиянием фильтрующего потока газа, заглубляется внутрь тела, перемещаясь в виде тепловой волны. Вследствие особых условий взаимосвязи переносов тепла и реагирования в слое формируется узкая реакционная зона горения частиц твердого топлива, перемешанного с инертным материалом, и перемещающаяся примерно синхронно с тепловой волной. Этим и определяется условие теплового резонанса [2].

При обработке слоя в режиме теплового резонанса достигается значительная экономия тепла в сравнении со способом разогрева слоя по всей его массе [3].

Стремление распространить метод теплового резонанса на некоторые другие технологические процессы, использовать его при термической регенерации насыщенного слоя адсорбента позволяет отказываться от реакционной системы, заменив ее системой дискретно расположенных и попеременно включаемых источников тепла [4]. Такая система утрачивает свою способность к саморегулированию, присущую реакционным системам [5].

Для устранения указанного недостатка был разработан саморегулируемый источник тепла, представляющий последовательно соединенную цепь электрического источника тепла (спирали) и нелинейного элемента (термистора). Подобно реагирующей частице мощность, выделяемая в цепи под взрывным пределом, экспоненциально связана с температурой

$$W_T = \frac{V^2}{R_T} \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

или, используя метод разложения экспоненты по Франк-Каменецкому [5],

$$W_T = \frac{V^2}{R_0} \exp(\alpha_T t_T).$$

Закон конвективного охлаждения термистора газовым потоком примем в виде

$$W_{\Pi} = S\alpha(t_T - t_{\Pi}).$$

Вводя параметрическую связь между мощностями, выделяемыми в нелинейной цепи, и мощностью, отводимой от термистора в поток, запишем следующую систему соотношений:

$$\begin{aligned} \frac{W_{\text{сп}}}{W_0} &= \frac{X^2}{(1+X)^2}; & \frac{W_T}{W_0} &= \frac{X}{W_0} = \frac{X}{(1+X)^2}; & \frac{W_{\Sigma}}{W_0} &= \\ &= \frac{X}{1+X}; & & & & \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{W_{\Pi}}{W_0} = \frac{S \alpha R_{\text{СП}}}{\alpha_{\tau} V^2} \left[ Z - \ln \left( \frac{R_{\text{СП}}}{R_0^{\text{СП}}} \right) - \alpha t_{\Pi} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $X = 1^Z$ ;  $X = \frac{R_{\text{СП}}}{R_{\tau}}$ ;  $W_{\tau}$ ,  $W_{\text{СП}}$ ,  $W_{\Sigma}$  - мощности термистора, спирали и суммарная цепи соответственно,  $W$  - мощность спирали при нулевом сопротивлении термистора,  $R_{\tau}$ ,  $R_{\text{СП}}$  - сопротивление термистора и спирали соответственно,  $R_0^{\text{СП}}$  - сопротивление холодного термистора,  $t_{\tau}$ ,  $t_{\Pi}$  - температура термистора и потока соответственно,  $\alpha_{\tau}$  - температурный коэффициент сопротивления,  $\alpha$ ,  $S$  - коэффициент и поверхность теплообмена соответственно,  $V$  - напряжение.

Система (1) - (2) имеет то достоинство, что нелинейные выражения мощностей (1) являются функцией только параметра  $Z$ , и инвариантна ко всем физическим параметрам, которые вошли в уравнение мощности конвективного охлаждения (2), линейного относительно параметра  $Z$ . Кривые мощностей нелинейной цепи и прямые мощности конвективного охлаждения по параметру  $Z$  представлены на рис. 1.

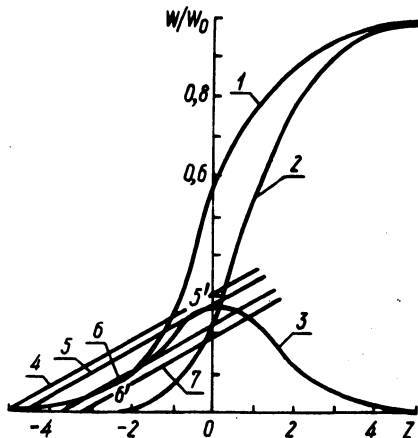


Рис. 1. Кривые относительных мощностей: 1, 2, 3 - соответственно суммарная нелинейная цепь, спирали, термистора; 4-7 - прямые конвективного охлаждения термистора.

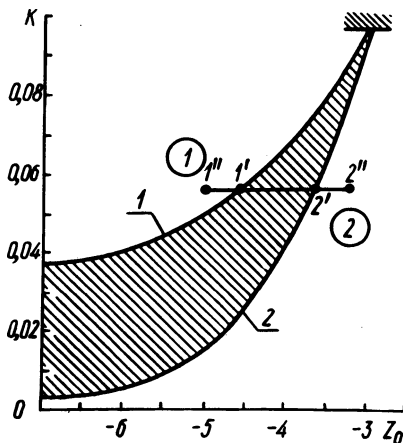


Рис. 2. Области затухания 1 и воспламенения 2 для нелинейной цепи.

Моделирование условий реакционного теплообмена требует, чтобы система была устойчива до подхода тепловой волны к источнику тепла (источник при этом должен быть отключен). Такое соотношение может быть задано прямой 4 относительно кривой 3

(рис. 1). При смещении температуры потока вследствие набегающей тепловой волны прямая конвективного охлаждения соответственно занимает положения 5, 6, при котором моделируется эффект воспламенения и, наконец, положение 7, соответствующее амплитуде тепловой волны. На ниспадающей ветке тепловой волны прямая конвективного охлаждения проходит обратные положения 7, 6, 5, при которых моделируется эффект затухания, и, наконец, возвращается к исходному положению 7. Моделирование эффектов воспламенения и затухания при различном относительном положении функций мощности выделения и отвода тепла на рис. 1 обуславливает гистерезис обратного протекания процесса.

Методика расчета при проектировании параметров регулируемого источника тепла может быть проиллюстрирована с помощью рис. 2. Здесь кривая 1 коррелирует между собой угловой коэффициент касательной к кривой 3 рис. 1 и величину  $Z_0$ , отсекаемую этой касательной на оси  $Z$  после точки перегиба. Кривая 2 сопоставляет те же параметры, но до точки перегиба. Следовательно, кривая 1 соответствует предельным условиям затухания, кривая 2 – условиям воспламенения.

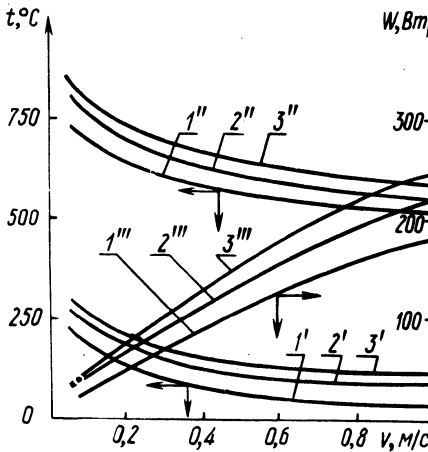


Рис. 3. Температура воспламенения ( $1', 2', 3'$ ) максимального разогрева ( $1'', 2'', 3''$ ) термистора и суммарная мощность нелинейной цепи от скорости газового потока при сопротивлении холодного термистора (Ом) 1-100, 2-200, 3-300.

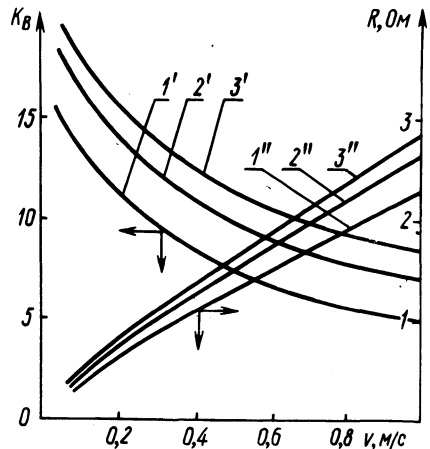


Рис. 4. Скачок мощности при воспламенении ( $1', 2', 3'$ ) и сопротивление спирали ( $1'', 2'', 3''$ ) от скорости газового потока при сопротивлении холодного термистора (Ом): 1-100, 2-200, 3-300.

Проектирование процесса состоит в том, чтобы исходное состояние источника соответствовало точке в области затухания 1 (рис. 2). Это обеспечит отключение источника после прохождения тепловой волны. При прохождении амплитуды тепловой волны

условия процесса должны сместиться в область воспламенения 2 (рис. 2). Отрезок  $1'' - 2''$  на рис. 2 иллюстрирует процесс, воспроизведенный на рис. 1, причем соотношение кривой 3 и прямой 4 на рис. 1 представлено точкой  $1''$  относительно кривой 1 на рис. 2, точка  $1'$  соответствует прямой  $5,2'$  - прямой  $6,2''$  - прямой 7 на рисунках 2 и 1 соответственно.

В качестве нелинейного элемента для регулируемых источников тепла предполагается использовать пусковой термистор [6]. Он имеет следующие номинальные параметры: поверхность теплообмена  $0,0031 \text{ м}^2$ , температурный коэффициент сопротивления  $0,0098 \frac{1}{\text{C}}$ , предельную силу тока  $10 \text{ А}$ , сопротивление при  $20^\circ \text{C}$   $100 \text{ Ом}$ . Примем закон конвективного теплообмена в виде [7]

$$\text{Nu} = 0,106 \text{ Re}$$

Зададимся амплитудой тепловой волны  $300^\circ \text{C}$ , достаточной для регенерации слоя цеолита от  $\text{CO}_2$ . Предельные значения параметров для этих условий представлены на рис. 3 и 4 кривыми 1. Кривые 2 и 3 (рис. 3, 4) показывают, как изменяются параметры регулируемых источников тепла, если сопротивление термистора увеличить до  $200$  и  $300 \text{ Ом}$ .

Резюме. Представленные результаты показывают принципиальную осуществимость процесса с помощью имеющихся технических средств и позволяют сконструировать электрическую цепь, содержащую несколько термисторов, для осуществления технической обработки слоя в режиме резонансных тепловых волн.

#### Л и т е р а т у р а

1. Voice E.W., Wild R. Heat agglomeration research. - Iron and Coal Trades Review, 1957, N175.
2. Фатеев Г.А. Перенос тепла в реагирующем пористом теле при наличии фильтрации газа. - В сб.: Тепло- и массообмен при фазовых и химических превращениях. Минск, 1963.
3. Вегман Е.Ф. Процесс агломерации. М., 1963.
4. Бицютко И.Я. и др. Тепловая эффективность обработки продуваемого слоя распределенными источниками тепла. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 2. Минск, 1975.
5. Франк - Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., 1967.
6. Шефтель И.Т. Терморезисторы. М., 1973.
7. Тимофеев В.Н. Теплообмен в слое. - "Изв. ВТИ", № 2, 1949.