

кадров для управления городом // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 32. – К.: Техніка, 2001. – С.7-10.

11. Семенов В.Т. "Міський проект" – багатощільова програма розвитку міста // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 32. – К.: Техніка, 2001. – С.10-11.

12. Моник де Винтер, Филипп Аллар, Марк Клима. "Городской проект" – итоги и перспективы // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 32. – К.: Техніка, 2001. – С.28-31.

13. Финансовый менеджмент / Под ред. Е.С.Стояновой. – М.: Перспектива, 1996. – 405 с.

14. Порывай Г.А. Организация, планирование и управление эксплуатацией зданий: Уч. пособие для вузов. – М.: Строитель, 1983. – 384 с.

15. Корт Д. и др. Организация работ по сносу зданий / Пер. с нем. Л.В.Дорошенко. Под ред. А.Г.Убоженко. – М.: Стройиздат, 1985. – 116 с.

16. Жван В.Д. Поиск путей оптимизации жизненных циклов строительной продукции // Науковий вісник будівництва. Вип.9. – Харків: ХДТУБА, 2000. – С.108-110.

*Получено 10.07.2001*

УДК 542.48

В.С.ФОКИН, д-р техн. наук, В.М.КОШЕЛЬНИК, канд. техн. наук,  
Л.И.ЗБАРАЗ

*Харьковский национальный политехнический университет "ХПИ"*

### **К ПОСТАНОВКЕ И РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ КИПЯЩИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ**

Предлагается для решения система дифференциальных уравнений, описывающая основные особенности процесса переноса тепла при условиях фазового перехода, протекающего в щелевых каналах теплообменных аппаратов.

Как известно, теплообмен при кипении наиболее интенсивно протекает при направленном движении потока жидкости. Реализовать этот процесс целесообразно в щелевых каналах пластинчатых теплообменников (как наиболее перспективных) и в выпарных аппаратах со стекающей пленкой. Однако в этих случаях парообразование в щелевых каналах, протекающее с фазовыми превращениями, вносит существенные трудности для формулирования и решения задач тепломассопереноса. Механизм взаимодействия рассматриваемой системы переноса теплоты при пленочном течении с переменным содержанием фаз особенно сложный. В связи с этим названные процессы в настоящее время недостаточно изучены, а их практическое использование требует проведения специальных теоретических и экспериментальных исследований.

Одним из этапов решения указанных задач при разработке математической модели сложных процессов тепло- и массопереноса, протекающих при пленочном движении жидкости и теплообмена на гра-

нице поверхности нагрева – жидкость, является составление уравнений переноса тепла и энергии в исследуемых объектах [1, 2].

При постановке задачи (развитие процесса кипения см. на рисунке) и составлении уравнений нами приняты следующие условия и допущения [3, 4]:

- изменение температуры движущегося потока осуществляется как по оси  $x$  вдоль поверхности нагрева, так и по нормали к ней (ось  $y$ );
- температуры компонентов смеси (двухфазная в щелевых каналах) равны между собой, т.е.  $t' = t''$ , где  $t', t''$  – соответственно значения температур жидкой и паровой фаз;
- имеет место выделение или поглощение тепла при фазовых превращениях (внутренний источник тепла);
- перенос тепла в жидкой фазе пленки осуществляется конвекцией и теплопроводностью.

В общем виде задача формулируется такими уравнениями:

1. Уравнение переноса энергии.

Если в движущейся пленке выделить элементарный участок многофазного потока, то количество тепла на входе в этот участок будет равно

$$Q_1 = Q' + Q'' \quad (1)$$

а на выходе из участка

$$Q_2 = Q' + Q'' + \frac{\partial Q'}{\partial \tau} + \frac{\partial Q'}{\partial x} + \frac{\partial Q'}{\partial y} + \frac{\partial Q''}{\partial \tau} + \frac{\partial Q''}{\partial x} + \frac{\partial Q''}{\partial y} \quad (2)$$

Согласно первому закону термодинамики для смесей с переменным содержанием фаз изменение количества теплоты элементарного объема  $dV$  на отрезках  $dx$  и  $dy$  за время  $d\tau$  равно изменению энтальпий фаз:

$$Q_2 - Q_1 = dQ = \left[ \beta' \rho' c' \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega' \frac{\partial t}{\partial x} + \omega' \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \beta'' \rho'' c'' \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega'' \frac{\partial t}{\partial x} + \omega'' \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_{ис} \right] dx dy d\tau, \quad (3)$$

где  $q_{ис} = r\rho''/\tau$  – количество теплоты, которое расходуется на изменение температурного поля элементарного объема при парообразовании.

$$dQ = \left[ \beta' \lambda' \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \beta'' \lambda'' \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \right] dx dy d\tau. \quad (4)$$

Приравняв приведенные уравнения, получим уравнение энергии:

$$\begin{aligned} & \beta' \rho' c' \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{w}' \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{w}' \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \beta'' \rho'' c'' \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{w}'' \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{w}'' \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{r \rho'' d \tau}{\tau^2} = (\beta' \lambda' + \beta'' \lambda'') \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

2. Уравнение теплообмена в пристенном слое:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} \left[ q - \lambda \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y \rightarrow 0} \right], \quad (6)$$

где  $\lambda$  — кажущаяся теплопроводность пограничного слоя:  $\lambda = f(\lambda'; \lambda''; Re; \beta'')$ .

3. Уравнение движения двухфазного потока с переменным содержанием фаз:

$$\begin{aligned} & g \rho' - 2\mu \left[ 2 \frac{\left( \frac{\partial^2 \bar{w}'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}'}{\partial y^2} \right)}{d_{\text{экв}}} + \sigma \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = \beta' \rho' \left( \frac{\partial \bar{w}'}{\partial \tau} + \bar{w}' \frac{\partial \bar{w}'}{\partial x} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \bar{w}' \frac{\partial \bar{w}'}{\partial y} \right) + \beta'' \rho'' \left( \frac{\partial \bar{w}''}{\partial \tau} + \bar{w}'' \frac{\partial \bar{w}''}{\partial x} + \bar{w}'' \frac{\partial \bar{w}''}{\partial y} \right) + (\bar{w}'' - \bar{w}') \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} (\beta'' \rho') + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\partial}{\partial x} (\beta'' \rho' \bar{w}') + \frac{\partial}{\partial y} (\beta'' \rho' \bar{w}') \right] \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

4. Уравнение неразрывности двухфазного потока:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho' \left[ 1 + \beta'' \left( 1 - \frac{\rho'}{\rho''} \right) + \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] \cdot \left[ \rho' \left( 1 - \beta'' \frac{\rho'}{\rho''} \right) \bar{w}' + \beta'' \bar{w}'' \right] = 0. \quad (8)$$

5. Уравнение теплопроводности в жидкой фазе:

$$\rho' c' \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}' \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}' \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \lambda' \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right). \quad (9)$$

6. Условия неравновесности процесса фазового превращения (парообразования):

$$t_k = t_s + \mathcal{G}_{тер} = t_s + \frac{r \rho''}{c' \rho'}. \quad (10)$$

Здесь  $\mathcal{G}_{тер} = \frac{r \rho''}{c' \rho'}$  – величина термодинамической депрессии,

которая характеризует неравновесность процесса фазового перехода и является параметром, определяющим интенсивность парообразования.

7. Вероятность образования паровых пузырей в центрах парообразования и их отрыва имеет вид

$$\omega \approx \exp(\mathcal{G}_{тер}). \quad (11)$$

8. Условия механического взаимодействия на границе раздела фаз:

$$\mu'' \left( \frac{\partial \bar{\omega}''}{\partial n} \right)_{гр} = \mu' \left( \frac{\partial \bar{\omega}'}{\partial n} \right)_{гр}; \quad (\bar{\omega}''_{x,y})_{гр} = (\bar{\omega}'_{x,y})_{гр}. \quad (12)$$

9. Масштаб оторвавшихся пузырей с определенными допущениями при относительно невысоких давлениях:

$$d_0 = 0,064 \left( \frac{\sigma}{\rho'} \right)^{0,5}. \quad (13)$$

Таким образом, уравнения (5)-(13) представляют собой основу для разработки математической модели, которая описывает физическую сущность процесса кипения в щелевых каналах и в стекающей пленке выпарных аппаратов.

Однако из-за сложности решения практических задач, которые могут быть описаны представленными выше уравнениями, данная система дифференциальных уравнений не является замкнутой. В ней отсутствуют зависимости, характеризующие вероятность образования и частоту отрыва пузырьков пара. Поэтому целесообразно выполнить преобразования, позволяющие заменить приведенные уравнения критериальными. Последние, как известно, широко применяются для проведения разнообразных инженерных теплотехнических расчетов раз-

личных объектов. При этом физические величины дифференциальных операторов заменяются конечными величинами. Задача преобразования приведенных уравнений (5)-(13) в критериальное уравнение нами решалась с использованием достаточно отработанного метода анализа размерностей. Этот метод широко применяется для решения задач теплоотдачи, в том числе с фазовыми превращениями [1]. В результате применения данного метода было получено следующее критериальное уравнение [5]:

$$Nu = c Re^{n_1} Pr^{n_2} (We^{(j)})^{n_3} \omega^{n_4} \quad (14)$$

где  $Nu = \frac{\alpha d_{эКВ}}{\lambda}$  – число Нуссельта;  $Re = \frac{q d_{эКВ}}{r \rho^{(j)} v}$  – число Рейнольдса;

$Pr = \frac{c' v' \rho'}{\lambda'}$  – число Прандтля;  $\omega^{(j)} = \frac{q}{r \rho^{(j)}}$  – приведенная скорость

паровой фазы;  $We^{(j)} = \frac{g \rho^{(j)} (\omega^{(j)})^2 d_0}{\sigma}$  – число Вебера.

Уравнение (14) в дальнейшем использовали при исследовании процессов тепло- и массопереноса в аппаратах пластинчатого типа с щелевыми каналами. Значения коэффициентов  $c, n_1, n_2, n_3, n_4$ , которые входят в уравнение (14), определяли путем обработки данных, полученных экспериментальным путем. Условные обозначения:  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, н/м;  $\beta$  – массовое содержание компонента в смеси;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг;  $\Delta t_{п}$  – полезный температурный напор, °С;  $\Delta t$  – перепад температуры в пристеночном слое, °С;  $t_s$  – температура насыщения, °С;  $\frac{\partial t}{\partial y}$  – скорость изменения температуры жидкой фазы при движении парового пузыря от поверхности нагрева в ядро парожидкостной смеси; пределы изменения координат  $x$  и  $y$ ;  $0 < x \leq \ell_k$ ;  $0 < y \leq \frac{\delta_k}{2}$ ; индексы: <sup>(j)</sup> – жидкая фаза, <sup>(j')</sup> – паровая фаза.

1. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при

парообразовании. – М.: Высш. шк., 1986. – 448 с.

2. Толубиский В.И. Теплообмен при кипении. – К., 1980. – 315 с.

3. Гиббс Дж.В. Термодинамические работы. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – 492с.

4. Перцев Л.П., Ковалев Я.М., Фокин В.С.. Теплообмен при кипении растворов на поверхностях ламелей // Вестник ХГПУ. – 1999. – № 29. – С. 80-82.

5. Фокин В.С., Кошельник В.М., Збараз Л.И. Исследование теплообмена при кипении в плоских щелевых каналах // Междунар. науч.-техн. конф. "Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования". – М., 2000. – С. 17.

Получено 02.07.2001

УДК 697.34

Л.В. ЛЫСАК

ЗАО "Теплоэлектроцентральный", г. Харьков

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ НАГРУЗОК ПИКОВЫХ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Решается задача выбора рациональных нагрузок пиковых водогрейных котлов в течение отопительного сезона.

Рассмотрим теплофикационную систему, схема которой приведена на рис.1. Система предназначена для совместного производства тепловой и электрической энергии. Она состоит из турбогенераторов ВТ-24 с конденсаторами и электрогенераторами Т-490-24, пиковых водогрейных котлов ПТВМ-100, парогенераторов ТКЗ и ЛМЗ, бойлеров, деаэраторов, тепловых сетей, сетевых и конденсатных насосов и др.

В работе [1] была решена следующая задача. Для заданной температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  найдены рациональные значения суммарного расхода пара в парогенераторах  $G_0$ , кг/с, суммарной нагрузки на турбины  $N_t$ , МВт, суммарной нагрузки на пиковые водогрейные котлы  $Q_{пк}$ , МВт, обеспечивающие температуру теплоносителя на выходе из пиковых котлов  $t_1$ , равную  $t_{1\text{норм}}$ , которая получена из температурного графика  $t_{1\text{норм}}(t_{нв})$  для заданной  $t_{нв}$ . Следующим этапом решения задачи управления теплоэнергетической системой является рациональное распределение суммарных нагрузок  $G_0$ ,  $N_t$  и  $Q_{пк}$  между отдельными парогенераторами, турбинами и котлами. В качестве примера рассмотрим задачу рационального распределения суммарной тепловой нагрузки на пиковые котлы  $Q_{пк}$  между  $i$  отопительными котлами,  $i = \overline{1, n}$ .