

*Розглянуті питання пасивної інтенсифікації процесів тепломасообміна, які відбуваються у контактних апаратах. Дослідження плівкової течії на поверхнях з сітковим покриттям при протитечійній взаємодії з газовим потоком дозволило значно розширити діапазон роботи апаратів, що обмежен гідродинамічними кризами, які пов'язані з початком перекидання течії плівки та її розривом*

*Ключові слова: тепломасообмін, контактні апарати, канали, сіткове покриття, протитечійний рух, газ*

*Rассмотрены вопросы пассивной интенсификации процессов теплообмена, происходящих в контактных аппаратах. Исследование плёночного течения на поверхностях с сеточным покрытием при противоточном взаимодействии с газовым потоком позволило значительно расширить диапазон работы аппаратов, ограниченный гидродинамическими кризисами, связанными с началом опрокидывания течения плёнки и её разрывом*

*Ключевые слова: теплообмен, контактные аппараты, каналы, сеточное покрытие, противоточное движение, газ*

*The questions of passive intensification of processes of heat-mass exchange, what are going in contact vehicles are considered. Research of pellicle flow on surfaces with net coverage at the counter-current interaction with a gas stream allowed considerably to extend the range of work of vehicles, limited by hydrodynamic crises, related to beginning of overturning of flow of tape and its break*

*Key words: heat-mass exchange, contact vehicles, canals, net coverage, the counter-current flow, gas*

# ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В КАНАЛАХ С СЕТОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ ПРИ ПРОТИВОТОЧНОМ ДВИЖЕНИИ ГАЗА

**В. Е. Туз**

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: 8-050-386-63-76

E-mail: valeriy\_tuz@list.ru

**Е. Н. Письменный**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

Контактный тел.: 8 (044) 241-75-87

E-mail: dekantef@inet.ua

**Н. Л. Лебедь**

Кандидат технических наук, ассистент\*

\*Кафедра атомных электрических станций и инженерной теплофизики

НТУУ «КПИ»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03037

Контактный тел.: 8-063-633-40-13

E-mail: lebeddom@ukr.net

## 1. Введение

В процессах испарительного охлаждения либо контактного нагрева рабочих жидкостей энергетических установок или расчётах вентиляции и кондиционирования часто приходится сталкиваться с необходимостью определения количества испарившейся жидкости, количества перенесённой при этом теплоты и параметров сред. Процесс испарения, происходящий при непосредственном контакте газа с плёнкой жидкости, сочетает в себе явление переноса теплоты и массы, что

приводит к изменению термодинамического состояния системы.

Процесс тепло- и массообмена при непосредственном контакте плёнки жидкости является сложной комплексной задачей. Гидродинамические особенности течения плёнки жидкости при противоточном движении газа или пара, допустимые границы взаимодействия без нарушения характера взаимодействия, температурное состояние фаз определяют движущий напор процессов. Градиент температуры на границе раздела «плёнка жидкости – газ» приводит к воз-

никновению эффекта Марангони [1]. Термокапиллярная конвекция в движущейся плёнке жидкости существенно влияет на интенсивность теплообмена и в некоторых случаях приводит к разрыву плёнки [2]. Неизотермичность плёнки является одной из основных причин, оказывающих влияние на тепло- и массообмен. Влияние газового потока на поверхностные явления остаётся не до конца изученным. Испаряющиеся плёнки жидкости могут обеспечить высокую интенсивность теплопередачи, как при умеренных, так и при высоких плотностях теплового потока.

Совместное влияние испарения, термокапиллярных эффектов, динамического воздействия газа в каналах с сеточным покрытием при противоточном движении жидкости и газа является сложной задачей, требующей для своего решения как аналитических, так и экспериментальных исследований. Изучение этих явлений требует тщательных локальных измерений и построения физических моделей, нацеленных на понимание реальных процессов.

## 2. Тепломассообмен в каналах с сеточным покрытием

Основой современных методов расчёта тепло- и массообмена являются дифференциальные уравнения движения для плёнки жидкости и газового потока, неразрывности, теплопроводности и диффузии в жидкости и газе. В совокупности с условиями однозначности они составляют систему уравнений, решение которой позволяет получить поля скоростей, температур и концентрации.

Характерные для процессов тепло- и массообмена при непосредственном контакте жидкости и газа их невысокие скорости, разности температур, концентраций и давлений позволяют существенно упростить дифференциальные уравнения переноса массы и энергии в пограничном слое с некоторыми допущениями: пренебрегая эффектами термо- и бародиффузии, работой внешних сил и диссипацией энергии.

Решению такого типа задач посвящено ограниченное количество работ. На практике для упрощения расчётов тепломассообмена в контактных аппаратах до сих пор, во многих случаях, используют результаты, полученные в [3]. Дальнейшее развитие методик расчётов позволило значительно повысить точность получаемых результатов.

Рассмотрим стационарное осесимметричное гравитационное течение в канале диаметром  $d_3$  с сеточным покрытием нормального плетения с размером ячейки в свету  $S$ , выполненным из проволоки диаметром  $d_{пр}$ , и противоточное движение газа снизу вверх. Так как канал может иметь не только круглое сечение, но и квадратное или прямоугольное, а в общем случае, и более сложный профиль сечения, то в данном случае будем рассматривать осесимметричное движение контактирующих фаз, причём поперечные составляющие ускорений, вызванные пристенной турбулентностью, будут малы по сравнению с составляющими, параллельными оси канала. Поэтому можно не учитывать отличие скоростей от их осевых составляющих. Будем пренебрегать энергией пульсационных движений, а также поперечным градиентом давления и считать, что в любом сечении канала давление  $P$  однородно

по сечению, одинаково в фазах и является функцией только осевой координаты  $x$ .

Учитывая конструктивные особенности исследуемого канала можно предположить что:

- стенка с сетчатым покрытием адиабатная, т.е. тепловой поток на границе «плёнка-жидкость» равен 0;
- температура жидкости меняется от  $t'_ж$  до  $t''_ж$ , причём  $t'_ж$  может быть больше  $t''_ж$  при испарительном охлаждении и меньше при контактном нагреве;
- температура газа меняется от  $t'_г$  до  $t''_г$ ;
- влагосодержание газа меняется от  $d'$  до  $d''$ ;
- процесс тепломассообмена симметричный вдоль оси  $Ox$ .

Предположим, что при использовании оросительного устройства переливного типа в точке с координатой  $x = 0$  скорость плёнки жидкости равна нулю. При контакте плёнки жидкости с газом происходит процесс тепломассообмена, а движущей силой процесса является разность температур между плёнкой и газом, а так же разность парциальных давлений паров у поверхности плёнки и в ядре газового потока. Процесс происходит тем интенсивнее, чем выше значение движущего напора.

При испарительном охлаждении плёнки жидкости происходит перенос теплоты от адиабатной стенки к поверхности раздела фаз, при этом в плёнке образуется тепловой пограничный слой, толщина которого увеличивается в направлении оси  $Ox$ .

Для процесса охлаждения плёнки характерно наличие двух последовательно расположенных участка. На первом, при  $0 < x < x_{нт}$  ( $x_{нт}$  – конечная координата начального теплового участка) толщина теплового пограничного слоя, развивающегося от поверхности раздела фаз к стенке, меньше толщины плёнки и температура теплоносителя в пристенном подслое постоянна и равна начальной температуре жидкости  $t'_ж$ . На втором участке, при  $x > x_{нт}$  имеет место равенство толщин плёнки и теплового пограничного слоя, а температура жидкости в пристенном слое асимптотически понижается и стремится в конце этого участка к температуре мокрого термометра, которая соответствует параметрам воздуха на входе в канал.

При контакте плёнки жидкости и газа происходят процессы конвективного переноса теплоты в газовой фазе и диффузия пара в газ. В результате этого в газовой фазе также происходит развитие теплового пограничного слоя от температуры плёнки жидкости на границе, равной  $t_ж$ , до температуры  $t_г$  в ядре потока.

Наличие двух пограничных слоёв в плёнке жидкости и газе существенно усложняет расчёт процессов тепло- и массообмена.

Дифференциальные уравнения переноса теплоты и массы в данном случае, с учетом сделанных выше допущений, можно записать в виде:

$$U \frac{\partial t_ж}{\partial E} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ (a_ж + a_ж^r) \frac{\partial t_ж}{\partial y} \right]; \quad (1)$$

– уравнения переноса теплоты и массы в газе:

$$V \frac{\partial t_г}{\partial E} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ (a_г + a_г^r) \frac{\partial t_г}{\partial y} \right]; \quad (2)$$

$$V \frac{\partial \rho_n}{\partial E} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ (D + D^t) \frac{\partial t_r}{\partial y} \right], \quad (3)$$

где индекс «т» относится к коэффициентам турбулентного переноса.

В общем случае найти аналитическое решение системы весьма затруднительно. Использование численных методов позволяет получить решение для такого рода задач, однако необходимо знать соответствующие краевые условия. Уравнения (1) - (3) решаются при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 \quad t_{ж} &= t'_{ж}, \quad t_r = t''_r; \\ \text{при } x = L \quad t_{ж} &= t''_{ж}, \quad t_r = t'_r; \quad \rho_n = \rho'_n; \\ \text{при } y = \delta \cdot \frac{\partial t_r}{\partial y} &= 0, \quad \frac{\partial \rho_n}{\partial y} = 0, \quad t_r = t_{ж} = t_{ж\delta}; \\ \text{при } y = 0 \quad \frac{\partial t_{ж}}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Количество теплоты, которое отдаёт плёнка жидкости в результате испарительного охлаждения, расходуется на нагрев и увлажнение газа:

$$q_{ж} = q_r + q_{\text{вип}} + q_n, \quad (5)$$

причём парциальное давление пара у поверхности плёнки достигает давления насыщения при температуре  $t_{p\delta}$

$$P_n = P_n(t_{p\delta}). \quad (6)$$

В результате интегрирования системы дифференциальных уравнений (1)-(3) получаем следующую систему уравнений

$$\frac{d\langle t_{ж} \rangle}{dx} = - \frac{\lambda_{ж}}{\langle U \rangle \cdot \bar{\delta}^2 \cdot C_{жр} \cdot \rho_{ж}} (t_{ж\delta} - \langle t_{ж} \rangle); \quad (7)$$

$$\frac{d\langle t_r \rangle}{dx} = - \frac{\alpha}{\langle V \rangle \cdot \left( \frac{d_s}{2} - \bar{\delta} \right) \cdot C_{пр} \cdot \rho_r} (\langle t_r \rangle - t_{ж\delta}); \quad (8)$$

$$\frac{d\langle \rho_n \rangle}{dx} = - \frac{\beta}{\langle V \rangle \cdot \left( \frac{d_s}{2} - \bar{\delta} \right)} (\rho_{n\delta} - \langle \rho_n \rangle). \quad (9)$$

Средняя скорость газового потока  $\langle V \rangle$  в сечении  $x$  определяется выражением:

$$\langle V \rangle = \frac{G_r}{\rho_r \cdot \pi \cdot (d_s - \bar{\delta})^2}. \quad (10)$$

Для поверхностей с сеточным покрытием среднюю толщину плёнки определяется используя эмпирическую зависимость при соответствующей плотности орошения:

$$\delta^*_{ПВХ} = 147,68 \cdot Fr^{0,27} \cdot Bo^{0,5} \cdot (1 - \cos\theta). \quad (11)$$

Таким образом, задача сводится к решению системы уравнений (7) – (9) с учётом уравнения теплового баланса (5) при следующих начальных условиях:

$$\text{при } x = 0 \quad \langle t_{ж} \rangle = t'_{ж}; \quad \text{при } x = L \quad \langle t_r \rangle = t_r, \quad \langle \rho_n \rangle = \rho'_n \quad (12)$$

Решение системы уравнений возможно при известных значениях коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta_p$ .

### 3. Интенсивность процессов тепло- и массообмена в каналах с сеточным покрытием

Аналитическое определение коэффициентов теплопроводности  $a_p$  и  $a_{ж}^T$ ,  $a_r$  и  $a_r^T$ , а также коэффициентов диффузии  $D$  и  $D^t$  представляет собой сложную теоретическую задачу, требующую для своего решения соответствующие условия однозначности и применения сложного математического аппарата. Поэтому на практике в основном, для решения используют численные и экспериментальные методы.

Нельзя не отметить тот факт, что большинство исследователей связывает возможность интенсификации процессов в контактных аппаратах с волновым течением плёнки жидкости. Вследствие неустойчивости плёночного течения поверхность плёнки всегда покрыта волнами, которые существенно увеличивают коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи. По мере уменьшения  $Re_\delta$  эффективность влияния волнообразования на процессы снижается. Положительный эффект волн на массообмен в восходящем спутном потоке в [4] объяснён нелинейным вкладом пульсаций локального потока массы. При этом полагалось, что толщина диффузионного слоя колеблется в соответствии с пульсациями толщины плёнки.

Упорядочить процесс волнообразования при гравитационном течении плёнки возможно, используя методы пассивной турбулизации, в частности, используя поверхности с регулярной шероховатостью, пористые поверхности и сетчатое покрытие.

При рассмотрении влияния пассивного интенсификатора в [5] рекомендуется учитывать относительные геометрические характеристики: соотношение высоты и ширины выступа шероховатости и толщину плёнки жидкости. В частности, когда плёнка жидкости намного превосходит высоту выступа, влияние шероховатости на тепло- и массообмен практически нивелируется.

Возникновение неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, в результате которой образуются возмущения на гравитационно текущей плёнке жидкости, а также волнообразование, связанное с использованием поверхности с регулярной шероховатостью, при противоточной схеме движения жидкой и газовой фаз на затопленных структурах приводит к более раннему появлению кризисных явлений гидродинамики плёночного течения, рассмотренных ранее. Данное обстоятельство существенно сокращает диапазон нагрузки контактного аппарата.

С другой стороны, анализируя результаты исследования гидродинамики плёночного течения в каналах с сеточным покрытием, можно отметить, что режимы, при которых плёнка жидкости не выходит за пределы сеточного покрытия, значительно повышают значения

Re газа, соответствующих началу процесса захлёбывания. Таким образом, удаётся повысить скорость газового потока до  $w = 8...12$  м/с, что примерно в 2-4 раза выше, чем в контактных насадочных аппаратах, используемых в промышленности.

Учитывая особенности процессов в контактных аппаратах, длину начального теплового участка целесообразно определять в зависимости от режимных параметров контактирующих фаз при условии, что изменение коэффициента теплоотдачи на начальном участке не будет превышать его среднего значения на этом участке более, чем на 1%, т.е.:

$$\frac{\alpha_x - \alpha_{x+1}}{\alpha_x + \alpha_{x+1}} \cdot 100 \leq 1\%, \quad (13)$$

где  $\alpha_x$  и  $\alpha_{x+1}$  – локальные коэффициенты теплоотдачи на начальном и конечном сечениях рассматриваемого элементарного участка длины канала.

Баланс теплоты на этом участке учитывал, что количество теплоты, выделившееся при испарительном охлаждении плёнки, расходовалось на нагрев воздуха, нагрев водяных паров, содержащихся в воздухе, и на образование пара.

Температурный напор на участке определялся как среднелогарифмический между температурой плёнки и воздуха в рассматриваемых сечениях.

Исследуемый диапазон скоростей газового потока включал в себя ламинарный режим при  $Re < 2230$  и переходную область  $2230 < Re < 1 \cdot 10^4$  (максимальное значение  $Re = 7900$ ). Для каждого из этих режимов длина начального теплового участка определяется по зависимости:

- для ламинарного режима

$$\ell_{н.т.} = 85,62 \cdot d_3 \cdot Pe_x^{0,12} \cdot Fr_x^{0,2} \cdot K_x^{-0,42}, \quad (14)$$

- для переходной области

$$\ell_{н.т.} = 42,98 \cdot d_3 \cdot Pe_x^{0,2} \cdot Fr_x^{0,2} \cdot K_x^{-0,42}. \quad (15)$$

В пределах начального теплового участка проводилось определение локальных значений  $\alpha_x$  и  $\beta_{px}$  на

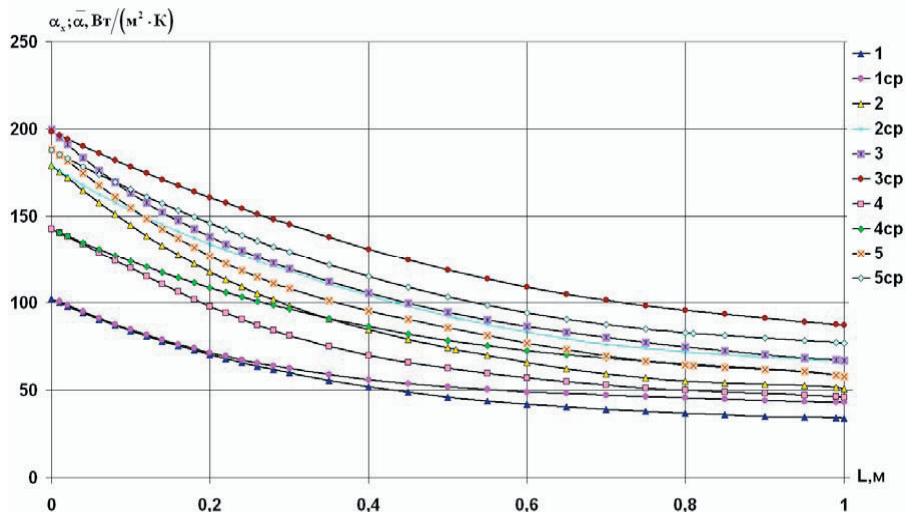


Рис. 1. Локальный и средний коэффициенты теплоотдачи при испарительном охлаждении плёнки жидкости и вынужденной конвекции воздуха при различной плотности орошения. Температура жидкости и газа на входе в канал  $t'_{ж} = 80$  °С,  $t'_r = 22,2$  °С, скорость воздуха  $w = 4,9$  м/с: 1 -  $\Gamma = 0,0235$  кг/(м·с); 2 -  $0,0415$  кг/(м·с); 3 -  $0,0553$  кг/(м·с); 4 -  $0,0688$  кг/(м·с); 5 -  $0,0871$  кг/(м·с)

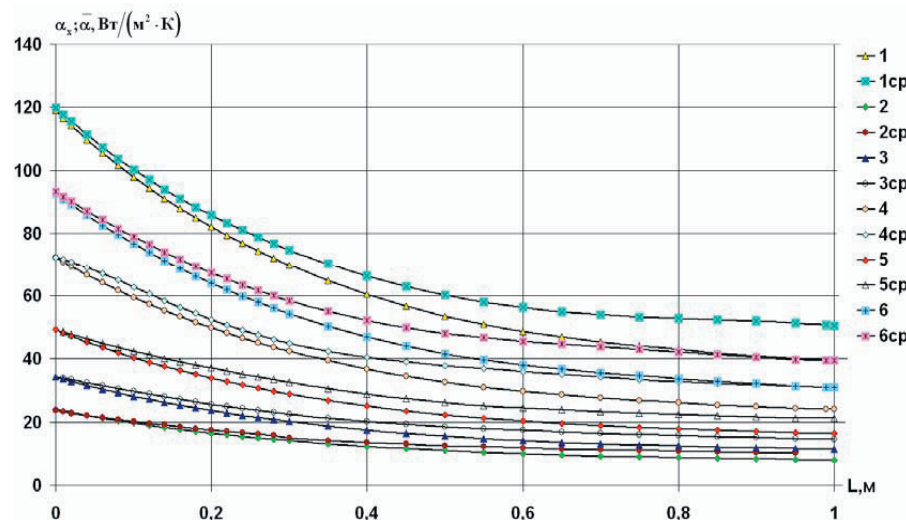


Рис. 2. Локальный и средний коэффициенты теплоотдачи при испарительном охлаждении плёнки жидкости и вынужденной конвекции воздуха при различной скорости воздуха. Температура газа и жидкости на входе в канал  $t'_r = 220$  °С,  $t'_{ж} = 80$  °С, плотность орошения  $\Gamma = 0,0235$  кг/(м·с): 1 -  $w = 0,39$  м/с; 2 -  $0,76$  м/с; 3 -  $1,47$  м/с; 4 -  $2,87$  м/с; 5 -  $4,25$  м/с; 6 -  $6,29$  м/с

элементарном участке длины канала и средние значения  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{\beta}_p$  по длине канала от входного сечения до выбранного.

Анализ экспериментальных данных по влиянию плотности орошения  $\Gamma$  на интенсивность теплоотдачи  $\alpha$  (рис. 1) показывает значительный рост  $\alpha_x$  и  $\bar{\alpha}$  (примерно в 2 раза во всём исследуемом диапазоне изменения параметров жидкости и газа).

Изменение скорости газового потока  $w$  также оказывает существенное влияние на процессы тепло- и массоотдачи. Выбранный диапазон изменения  $w$  не приводил к изменению стабильности течения плёнки. Изменение скорости в диапазоне  $w = 0,39...6,3$  м/с при-

водило к увеличению  $\alpha_x$  и  $\bar{\alpha}$  примерно в 5 раз, что следует из экспериментальных данных, приведенных на рис. 2. Причём в переходной области теплоотдача несколько интенсивнее, чем при ламинарном режиме.

Судя из результатов экспериментальных исследований, примерно таким же образом изменение параметров контактирующих фаз оказывают влияние на изменение интенсивности массоотдачи.

Анализ экспериментальных данных по исследованию процесса испарительного охлаждения гравитационной плёнки жидкости при вынужденной конвекции газа в условиях противотока показал нелинейный характер изменения интенсивности тепло- и массообмена. Максимальная интенсивность процессов на начальном тепловом участке, длина которого определяется зависимостями (14) и (15), по сравнению с участком стабилизированного теплообмена требует соответствующего подхода при обобщении экспериментальных данных.

#### 4. Обобщение экспериментальных данных

Процесс испарительного охлаждения плёнки при вынужденном движении газа, который представляет собой парогазовую смесь, соответствует условиям полупроницаемой поверхности. На полупроницаемой поверхности в условиях процесса испарения стефанов поток компенсирует встречный молекулярный поток газа и реально возникает лишь поперечный поток пара. В случае испарительного охлаждения плёнки при направлении поперечного потока вещества от поверхности раздела фаз толщина пограничного слоя увеличивается, при этом градиенты скорости потока  $w_x$  и температуры парогазовой смеси  $y$  у поверхности плёнки непосредственно зависят от её температуры.

В результате обобщения экспериментальных данных были получены зависимости:

- для начального теплового участка

локальная теплоотдача при ламинарном режиме течения газа:

$$Nu_x = 3,889 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Fr_x^{0,2} \cdot Pr_x^{0,33} \cdot K_x^{-0,42} \cdot \left(\frac{x}{d_s}\right)^{0,3}; \quad (16)$$

средняя теплоотдача при ламинарном режиме течения газа:

$$\bar{Nu}_\ell = 5,567 \cdot Re_\ell^{0,5} \cdot Fr_\ell^{0,2} \cdot Pr_\ell^{0,33} \cdot K_\ell^{-0,42} \cdot \left(\frac{\ell}{d_s}\right)^{0,3}; \quad (17)$$

локальная массоотдача при ламинарном режиме течения газа:

$$Nu_{Dx} = 2,192 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Fr_x^{0,2} \cdot Pr_{Dx}^{0,33} \cdot K_x^{-0,42} \cdot \left(\frac{x}{d_s}\right)^{0,3}; \quad (18)$$

средняя массоотдача при ламинарном режиме течения газа:

$$\bar{Nu}_{D\ell} = 3,873 \cdot Re_\ell^{0,5} \cdot Fr_\ell^{0,2} \cdot Pr_D^{0,33} \cdot K_\ell^{-0,42} \cdot \left(\frac{\ell}{d_s}\right)^{0,3}; \quad (19)$$

локальная теплоотдача при переходном режиме течения газа:

$$Nu_x = 1,17 \cdot Re_x^{0,67} \cdot Fr_x^{0,2} \cdot Pr_x^{0,33} \cdot K_x^{-0,42} \cdot \left(\frac{x}{d_s}\right)^{0,3}; \quad (20)$$

средняя теплоотдача при переходном режиме течения газа:

$$\bar{Nu}_\ell = 1,52 \cdot Re_\ell^{0,67} \cdot Fr_\ell^{0,2} \cdot Pr_\ell^{0,33} \cdot K_\ell^{-0,42} \cdot \left(\frac{\ell}{d_s}\right)^{0,3}; \quad (21)$$

локальная массоотдача при переходном режиме течения газа:

$$Nu_{Dx} = 0,87 \cdot Re_x^{0,67} \cdot Fr_x^{0,2} \cdot Pr_{Dx}^{0,33} \cdot K_x^{-0,42} \cdot \left(\frac{x}{d_e}\right)^{0,3}; \quad (22)$$

средняя массоотдача при переходном режиме течения газа:

$$\bar{Nu}_{D\ell} = 0,946 \cdot Re_\ell^{0,67} \cdot Fr_\ell^{0,2} \cdot Pr_D^{0,33} \cdot K_\ell^{-0,42} \cdot \left(\frac{\ell}{d_e}\right)^{0,3}; \quad (23)$$

- для участка стабилизированного теплообмена  
средняя теплоотдача при ламинарном режиме течения газа:

$$\bar{Nu}_\ell = 2,984 \cdot Re_\ell^{0,5} \cdot Fr_\ell^{0,2} \cdot Pr_\ell^{0,33} \cdot K_\ell^{-0,42}; \quad (24)$$

средняя массоотдача при ламинарном режиме течения газа:

$$\bar{Nu}_{D\ell} = 2,411 \cdot Re_\ell^{0,5} \cdot Fr_\ell^{0,2} \cdot Pr_D^{0,33} \cdot K_\ell^{-0,42}; \quad (25)$$

средняя теплоотдача при переходном режиме течения газа:

$$\bar{Nu}_\ell = 0,821 \cdot Re_\ell^{0,67} \cdot Fr_\ell^{0,2} \cdot Pr_\ell^{0,33} \cdot K_\ell^{-0,42}; \quad (26)$$

средняя массоотдача при переходном режиме течения газа:

$$\bar{Nu}_{D\ell} = 0,611 \cdot Re_\ell^{0,67} \cdot Fr_\ell^{0,2} \cdot Pr_D^{0,33} \cdot K_\ell^{-0,42}. \quad (27)$$

Эмпирические зависимости получены в диапазоне изменения чисел  $Re_\ell = 400 \dots 7900$   $Fr_\ell = 0,059 \dots 0,22$ . Аппроксимация выполнялась методом наименьших квадратов. Точность обобщения составила  $\pm 12\%$ .

#### 5. Выводы

Для замыкания полуэмпирической модели тепло- и массообмена в двухфазных кольцевых потоках, основанной на дифференциальных уравнениях движения плёнки жидкости и газа, неразрывности, теплопроводности и диффузии в жидкости и газе при соответствующих условиях однозначности, необходима информация о закономерностях изменения интенсивности процессов испарительного охлаждения жидкости и охлаждения газа при вынужденной конвекции газа в зависимости от режимных параметров контактирующих фаз.

Экспериментальное исследование процессов тепло- и массообмена при испарительном охлаждении жидкости и охлаждении газа позволило установить нелинейный характер изменения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta_p$  по длине исследуемого канала.

На основании полученных результатов были определены длины начальных тепловых участков в зависимости от режимных параметров контактирующих

фаз и геометрических характеристик канала. Для ламинарного режима течения газа при  $Re < 2300$  длина начального участка определяется по зависимостям (14), а для переходной области при  $2300 < Re < 10000$  – по (15).

В результате обобщения экспериментальных данных по исследованию процесса испарительного охлаждения плёнки жидкости и вынужденной конвекции воздуха были получены эмпирические зависимости для начального теплового участка при ламинарном режиме течения и в переходной области локальной и средней теплоотдачи и массоотдачи (16)...(23) и на участке стабилизированного теплообмена (24)...(27).

*Розглянуто проблеми утилізаційних технологій для електростанцій, що повітряно-акумулюють, і можливості реалізованих проєктів. Приділено увагу рішенню проблеми розробки енергоперетворювача продукту-газу при утилізації твердих побутових відходів*

*Ключові слова: технологія, газоежекторнотурбінний агрегат, енергоперетворювач*

*Рассмотрены проблемы утилизационных технологий для воздушно-аккумулирующих электростанций и возможности реализуемых проектов. Уделено внимание решению проблемы разработки энергопреобразователя продукт-газа при утилизации твердых бытовых отходов*

*Ключевые слова: технология, газоежекторнотурбинный агрегат, энергопреобразователь*

*Problems rendering technologies for air-accumulating power stations and possibility of realized projects are considered. The attention is paid to the decision of a problem of working out energy-transuding product-gas at recycling of a firm household waste*

*Key words: technology, gas-turbine-ejector aggregate, energy converter*

## 1. Введение

Сжатый воздух является одним из универсальных энергоносителей. Он может служить аккумулятором избыточной электроэнергии, что широко используется на воздушно-аккумулирующих электростанциях – ВАЭС [1]. Широкое применение ВАЭС в Германии и

## Литература

1. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении плёнки жидкости/ Г.Гимбутис. – Вильнюс: Моклас, 1988. – 233 с.
2. Ганчев Б.Г. Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими плёнками/ Б.Г.Ганчев. -М.: Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.
3. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение/ Л.Д.Берман. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 320 с.
4. Алексеенко С.В. Волновое течение плёнок жидкости/ С.В.Алексеенко, В.Е.Накоряков, Б.Г.Покусаев. – Новосибирск: ВО "Наука", 1992. – 256 с.
5. Холпанов Л.П. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела/ Л.П.Холпанов, В.Я.Шкадов. -М: "Наука", 1990. – 271 с.

УДК 533.697.5.011

# ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

**В.И. Гуров**

Доктор технических наук, руководитель сектора  
ФГУП ЦИАМ  
ул. Авиамоторная, 2, г. Москва, Россия, 111116  
Контактный тел.: 8 (095) 362-93-44

США привели к заметному повышению надежности, экономичности и экологичности энергоснабжения потребителей за счет того, что базовое генерирующее оборудование функционирует всегда на постоянном режиме при переменности энергопотребления. Это достигается путем использования накопленных (в период избытка вырабатываемой электроэнергии) запасов