

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОНТАКТНОМ АППАРАТЕ С ПЛЕНОЧНЫМИ ФОРСУНКАМИ

В.П. Семенов, Н.И. Платонов

г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный университет

THE ANALYSIS OF HEAT TRANSFORM IN A CONTACT FILM JET APPARATUS

V.P. Semenov, N.I. Platonov

Magnitogorsk, Magnitogorsk State University

Предложена модель теплообмена между потоком газа и свободной пленкой жидкости, вытекающей из кольцевой щели. Аналитически получены основные параметры процесса: локальные температуры, толщина пограничного слоя. Результаты аналитического расчета согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: исследование теплообмена в контактном аппарате с пленочными форсунками.

There has been developed a model of heat transform between a gas flow and a free liquid film flowing out of an annular slot. The following primary analytical parameters of the process have been identified: local temperatures, and thickness of the boundary layer. The results of the analytical estimation correspond with the experimental data.

Keywords: heat transform, free liquid film, temperature field, boundary layer, open-type heat transformer.

В ряде тепломассообменных аппаратов энергетики и химической технологии происходит непосредственное взаимодействие газа и сплошной жидкостной пленки, вытекающей из кольцевой щели. В реактивном пространстве таких аппаратов газ взаимодействует со сплошной жидкостной пленкой, каплями, на которые распадается струя, и пленкой жидкости, стекающей по стенкам камеры. Существующие методики расчета подобных аппаратов оперируют параметрами, относящимися в целом к контактной камере, не выделяя из общего процесса тепломассообмена вклад каждой из зон. Анализ многочисленных опытных данных, полученных на промышленных и лабораторных установках [1, 2], позволил авторам создать упрощенную математическую модель процесса теплообмена в малоисследованной зоне – в свободной жидкостной пленке.

Рассмотрим установившееся течение осесимметричной жидкостной пленки, вытекающей из кольцевой щели (рис. 1). При взаимодействии жидкостной пленки с газовым потоком в полости тепломассообменного аппарата силы тяжести и поверхностного натяжения, действующие на элемент жидкости и стремящиеся свернуть пленку, компенсируются динамическим напором газа.

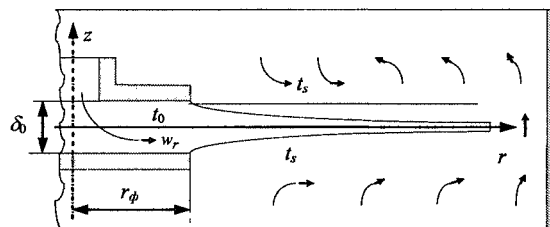


Рис. 1. Схема течения жидкостной пленки

В результате такого взаимодействия форма пленки становится близкой к форме диска, что характерно для многих тепломассообменных аппаратов. Неравномерный профиль скоростей на выходе из сопла достаточно быстро релаксирует к равномерному [3], и затем при взаимодействии с газом мало отличается от равномерного [4]. Длина участка релаксации может быть определена по уравнению $l = C\delta Re$ [5], где значение коэффициента C принято равным $1/24$, как и для случая истечения струи из бесконечной щели, поскольку поперечный размер пленки δ_r в реальных условиях меньше радиуса отбойного диска форсунки r_ϕ на порядок и более. Для некоторых жидкостей, в частности для воды, длина участка релаксации со-

ставляет 0,5–2,5 см, что значительно меньше радиуса разлета жидкостной пленки.

Задача значительно упрощается, если учесть отмеченные выше замечания и пренебречь влиянием пульсаций, обусловленных взаимодействием сил тяжести, инерции, поверхностного натяжения и вязкости. Результаты решения такой задачи могут быть распространены от устья форсунки до места распада струи на капли.

При постановке краевой задачи сделаны следующие предположения: процесс стационарный, свободная жидкостная пленка имеет форму диска, поле скоростей в жидкостной пленке практически равномерно, радиальная скорость и теплофизические параметры жидкости являются величинами постоянными, величина осевого градиента температур много больше радиального.

Запишем уравнение распространения тепла в жидкостной пленке в цилиндрических координатах, полагая, что осевой градиент температур много больше радиального градиента и радиальная скорость жидкости w_r значительно больше осевой скорости w_z :

$$w_r \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Начальные условия на выходе из сопла:

$$r = r_\phi, \quad t = t_0. \quad (2)$$

Граничные условия определим из условия, что на поверхности струи температура жидкости равна температуре насыщения:

$$z = \pm \frac{1}{2} \delta_r, \quad t = t_s. \quad (3)$$

При заданных условиях теплообмена задача становится симметричной и начало координат удобно поместить на оси струи, как показано на рис. 1. Условие симметрии запишем в виде:

$$z=0, \quad \frac{\partial t}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Введем безразмерные координаты. Обозначим $R = r/r_\phi$, $Z = z/\delta_r$, $\vartheta = (t_s - t)/(t_s - t_0)$, где r_ϕ и r – радиус форсунки и текущий радиус струи; δ_r – поперечный размер струи на удалении r от сопла форсунки; t_0 , t_s – начальная температура струи и температура насыщения. Экспериментальные исследования динамики свободной жидкостной пленки, представленные в [6], показывают, что скорость жидкости вдоль радиуса можно считать постоянной. Тогда из закона сохранения массы $2\pi r w_0 \delta_0 r_\phi = 2\pi r w_r \delta_r r$ выразим поперечный размер пленки

$$\delta_r \frac{\delta_0 r_\phi}{r} = \frac{\delta_0}{R}. \quad (5)$$

С учетом последнего выражения и новых переменных R и Z уравнение (1) запишем в виде

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial R} = R^2 \frac{L_\phi}{Pe} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial Z^2} - \frac{Z}{R} \frac{\partial \vartheta}{\partial Z}, \quad (6)$$

где $Pe = \frac{\delta_0 w_r}{a}$ – число Пекле, $L_\phi = \frac{r_\phi}{\delta_0}$ – геометрическая характеристика форсунки. Начальное (2)

и граничные (3) условия примут вид:

$$R=1, \quad \vartheta=1; \quad (7)$$

$$Z = \pm \frac{1}{2}, \quad \vartheta = 0. \quad (8)$$

Условие симметрии в безразмерных координатах примет вид:

$$Z=0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial Z} = 0. \quad (9)$$

Краевая задача (6)–(9) решена численными методами. Расчет средней температуры $\bar{\vartheta}$ в сечении R представлен на рис. 2. Задача решена для чисел Пекле и параметра L_ϕ характерных для режимов эксплуатации контактного теплообменника [1].

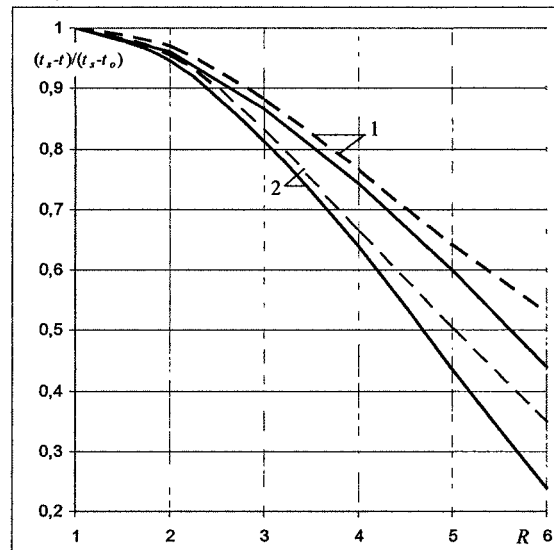


Рис. 2. Относительный прогрев жидкостной пленки: 1 – $(L_\phi/Pe)=0,0005$, 2 – $0,001$; прерывистая линия – численный расчет, сплошная линия – расчет по формуле (12)

Предположим, что в уравнении (6) второе слагаемое в правой части с увеличением радиуса незначительно влияет на распределение температуры в пленке. Тогда уравнение теплообмена запишем в виде

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial R} = R^2 \frac{L_\phi}{Pe} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial Z^2}. \quad (10)$$

Краевую задачу (7)–(10) можно решить методом разделения переменных:

$$\vartheta = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n 4}{\beta_n} \exp(-\beta_n^2 (L_\phi/Pe)(R^3 - 1)) \cos \beta_n Z, \quad (11)$$

где $\beta = (2n+1)\pi$.

Уравнение (11) позволяет определить температуру жидкости в любой точке струи. На рис. 3

представлено распределение температуры в пленке на различном удалении от форсунки для характерного режима работы контактного теплообменника с пленочными форсунками. Для такого случая расчеты показывают, что верхний и нижний тепловые пограничные слои соединяются на расстоянии $R=3,5$.

Используя теорему о среднем определим среднюю температуру жидкости в сечении R

$$\bar{\vartheta} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \vartheta dZ = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 (L_\phi / Pe)(R^3 - 1)) \cdot (12)$$

Расчет средней температуры жидкости в сечении R , выполненный по формуле (12), представлен на рис. 2. Так как сплошность пленки воды сохраняется на расстояниях $R=1 - 4,5 \dots 5,5$ [6], то в этом диапазоне можно отметить хорошее соответствие численного и аналитического расчетов и справедливость принятого упрощения в отношении уравнения (6).

На рис. 4 представлены расчетные и опытные данные по теплообмену в жидкостной пленке. Опыты проведены на лабораторной установке [2], в которой свободная жидкостная пленка контактировала с продуктами сгорания дизельного топлива. За температуру t_s взята температура мокрого термометра входящих газов, являющейся предельной температурой нагрева воды в контактных аппаратах. В расчетное уравнение (12) заложены исходные параметры, создаваемые в экспериментальной установке, но при этом обнаружилось расхождение расчетных и опытных данных – в среднем на 38 % (рис. 4). Объяснение такого расхождения может быть следующее.

В опытах газ поступает в контактную камеру снизу и основной нагрев струи происходит через нижнюю поверхность, затем газ огибает жидкост-

ную пленку у стенки контактной камеры и далее на некотором расстоянии основной поток газа сосредотачивается у стенки контактной камеры. Над пленкой образуется застойная зона с небольшой циркуляцией уже частично охлажденного газа. В этой зоне интенсивность теплообмена низка и не обеспечивается прогрев поверхностного слоя пленки до температуры насыщения входящих газов. Таким образом, условие (8) на верхней поверхности пленки в опытах не выполнялось.

Для учета этого фактора сформулируем новую краевую задачу, в которой будем считать верхнюю поверхность жидкостной пленки теплоизолированной. Для удобства решения ось OZ свяжем с нижней поверхностью жидкостной пленки. Значения Z будут меняться от 0 до 1. В краевой задаче (7)–(10) уравнение теплопроводности (10) и начальное условие (7) остаются без изменений, условие симметрии (9) не соблюдается, а граничные условия (8) примут вид:

$$\text{при } Z = 0 \quad \vartheta = 0, \quad (13)$$

$$\text{при } Z = 1 \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial Z} = 0. \quad (14)$$

Решение краевой задачи (10), (7), (13), (14) также проведем методом разделения переменных. Ее решение имеет вид:

$$\vartheta = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(1 - \cos \beta_n)}{\beta_n - \sin \beta_n \cos \beta_n} \exp(-\beta_n^2 (L_\phi / Pe)(R^3 - 1)) \sin \beta_n Z, \quad (15)$$

$$\text{где } \beta_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi.$$

На рис. 5 представлено распределение температуры в жидкостной пленке на различном удалении от форсунки, рассчитанное по уравнению (15) при значении $(L_\phi / Pe) = 0,0021$.

Средняя температура жидкости в сечении R

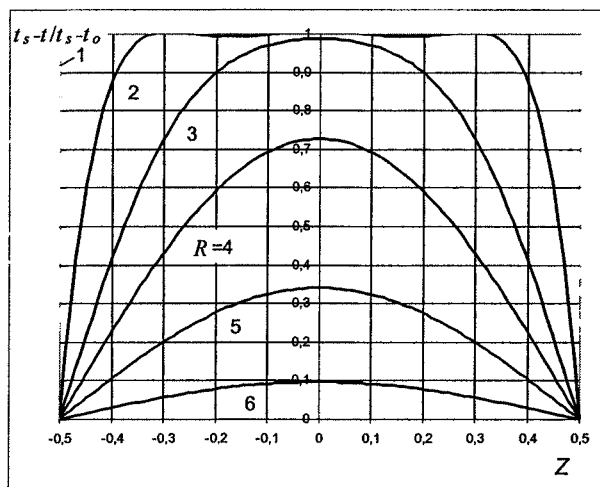


Рис. 3. Распределение температуры в жидкостной пленке: нагрев с двух сторон, $(L_\phi / Pe) = 0,0021$

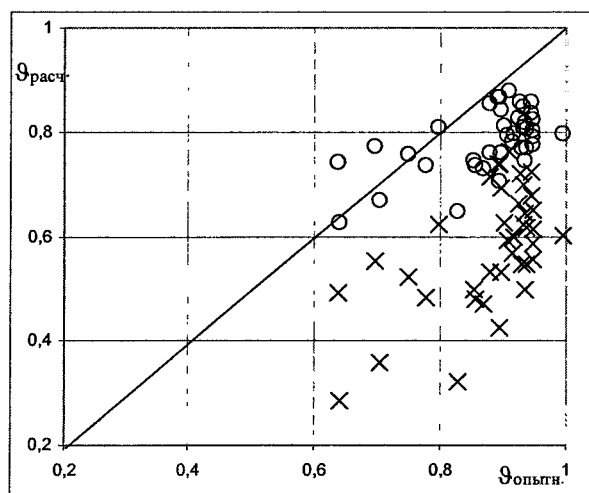


Рис. 4. Соотношение опытных и теоретических данных по теплообмену в жидкостной пленке: x – расчет по уравнению (12), o – расчет по уравнению (16)

$$\bar{\vartheta} = \int_0^1 \vartheta dZ = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(1-\cos\beta_n)^2}{\beta_n(\beta_n - \sin\beta_n \cos\beta_n)} \exp(-\beta_n^2(L_\phi/Pe)(R^3-1)) \cdot (16)$$

На рис. 4 сопоставлены опытные данные по теплообмену в свободной жидкостной пленке и расчетные данные по уравнению (16). Расхождение составляет в среднем 9,3 %.

Полученные выше уравнения позволяют приближенно решать задачу тепломассообмена в контактном аппарате с пространственными жидкостными пленками. Более точные данные, на наш взгляд, можно получить численным экспериментом, рассматривая сопряженную задачу тепломассообмена между газом и свободной жидкостной пленкой. В то же время уравнения (11), (12), (15) и (16) могут служить основой в постановке и отладке такого численного эксперимента.

Рассмотрим возможности упрощения расчета уравнений (11), (12), (15) и (16). Анализ сходимости ряда выполнен с помощью программы обработки электронных таблиц Excel, установленной в компьютере типа IBM. В [7] приведено классическое решение задачи теплообмена в плоской неограниченной пластине. Приведенный в [7] ряд при числе Фурье $\geq 0,3$ становится настолько быстросходящимся, что распределение температуры достаточно точно можно описать первым членом ряда. Аналогичная зависимость выполняется для рядов, приведенных выше, но только в отношении комплекса L_ϕ/Pe . Кроме того, исследования показали, что ряд при фиксированном значении L_ϕ/Pe существенно сходится с удалением от сопла. Это объясняется тем, что безразмерный ра-

диус пленки R имеет показатель степени 3. Очевидно, что для уравнений (11), (12), (15) и (16) вопрос об ограничении ряда в практических расчетах необходимо решать по показателю $(L_\phi/Pe)(R^3-1)$, который при значениях $< 0,3$ может обеспечить достаточную точность вычислений (рис. 6). Обозначив в уравнениях (11), (12), (15) и (16) коэффициенты ряда в виде

$$\vartheta = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp(-\beta_n^2(L_\phi/Pe)(R^3-1)) \cos(\sin)\beta_n Z,$$

приведем их значения:

Коэф-ты уравне- ния	β_n (11),(12)	A_n (11)	A_n (12)	β_n (15),(16)	A_n (15)	A_n (16)
n=0	3,141593	1,27324	0,810569	1,570796	1,27324	0,810569
n=1	9,424778	-0,42441	0,090063	4,712389	0,424413	0,090063
n=2	15,70796	0,254648	0,032423	7,853982	0,254648	0,032423
n=3	21,99115	-0,18189	0,016542	10,99557	0,181891	0,016542
n=4	28,27433	0,141471	0,010007	14,13717	0,141471	0,010007
n=5	34,55752	-0,11575	0,006699	17,27876	0,115749	0,006699

Выводы

Сформулирована математическая модель теплообмена в сплошной жидкостной пленке и получено аналитическое решение в виде быстро сходящегося ряда.

1. Проведено сравнение экспериментальных данных с аналитическими решениями для двух вариантов граничных условий.

2. Показано, что для принятой схемы движения теплоносителей можно пренебречь теплообменом в кормовой зоне сплошной жидкостной пленки, обтекаемой поперечным потоком газа.

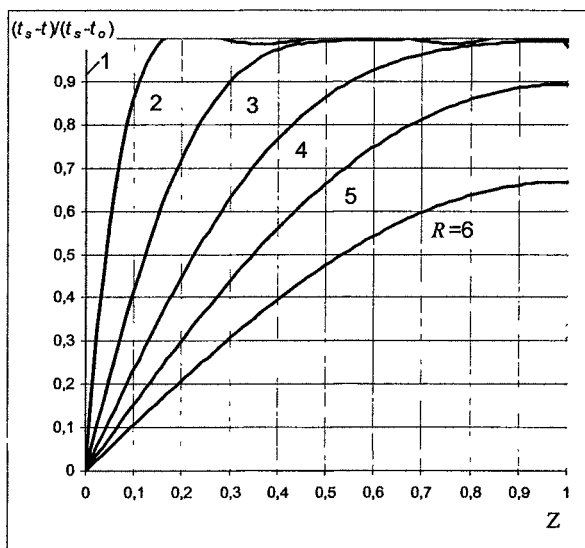


Рис. 5. Распределение температуры в жидкостной пленке: нагрев с одной стороны, $(L_\phi/Pe)=0,0021$

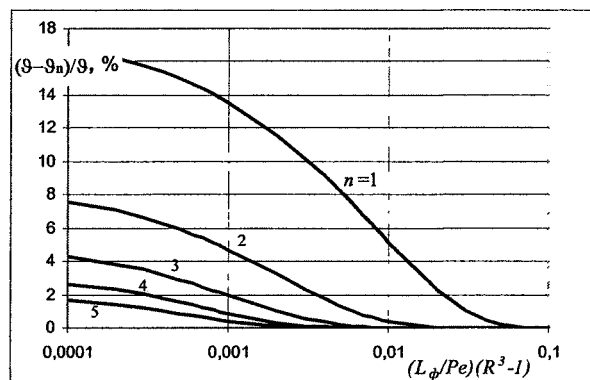


Рис. 6. Относительная погрешность в определении средней температуры жидкостной пленки по n членам ряда уравнения (16)

Литература

1. Семенов, В.П. Эффективность контактных теплообменников с рециркуляцией нагреваемой воды / В.П. Семенов, Н.И. Платонов, В.М. Лимитовский // Судостроительная промышленность. Серия «Промышленная энергетика, охрана окружающей среды и энергосбережение судов». – 1991. – Вып.15. – С. 13–17.
2. Платонов, Н.И. Исследование тепло- и массообмена между свободной пленкой жидкости и поперечным потоком газа в контактном теплообменнике: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Н.И. Платонов. – Магнитогорск: Изд-во МГПИ, 1998. – 23 с.
3. Етихин, В.Е. О течении закрученных кольцевых струй капельной жидкости в окружающей среде / В.Е. Етихин // Вестн. Моск. ун-та. Серия «Математика, механика». – 1978. – № 1. – С. 74–83.
4. Сысоев, Г.М. Течение и устойчивость свободной осесимметричной пленки жидкости / Г.М. Сысоев, В.Я. Шкадов // Изв. АН СССР, МЖГ. – 1988. – № 5. – С. 23–29.
5. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг – М.: Наука, 1974.
6. Численное и экспериментальное исследование свободных пленок тонких куполообразных пленок движущейся жидкости / Э.Ф. Шургальский, В.Л. Коленков, И.Х. Еникеев, А.В. Петренко. – М., 1984. – Деп. в ОНИИТЭхим, №64хп-Д84.
7. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

Поступила в редакцию 10.09.2008 г.

Семенов Владимир Петрович. Кандидат технических наук, профессор, ректор Магнитогорского государственного университета, г. Магнитогорск. Область научных интересов – теплофизика, теоретическая теплотехника, гидродинамика и тепломассообмен при конденсации пара. E-mail: semenov@masu.ru.

Semenov Vladimir Petrovich. Candidate of technical sciences, professor, Rector of Magnitogorsk State University, Magnitogorsk; does research in thermal physics, heat engineering, hydrodynamics, and heat-mass transform at steam condensation. E-mail: semenov@masu.ru.

Платонов Николай Иванович. Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики Магнитогорского государственного университета, г. Магнитогорск. Область научных интересов – теплофизика, теоретическая теплотехника, гидродинамика и тепломассообмен в аппаратах энергетики и металлургии, утилизации теплоты вторичных энергоресурсов. E-mail: platonov@masu.ru.

Platonov Nikolay Ivanovich. Candidate of technical sciences, associate professor, Head of the Department of Physics at Magnitogorsk State University, Magnitogorsk; does research in thermal physics, heat engineering, hydrodynamics, and heat-mass transform in power engineering, metallurgical, and heat waste disposal energy resource devices. E-mail: platonov@masu.ru.