

**ТУЗ В.Е.**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., доцент  
Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев  
**БЕЛОДЕД В.Д.**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.  
Институт общей энергетики НАН Украины, Киев  
**ЛЕБЕДЬ Н.Л.**, канд. техн. наук  
Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев

## ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗОВОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ ТЕПЛОМАССОБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГТУ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

*Представлены результаты экспериментального исследования минимальной плотности орошения в каналах с сеточным покрытием стенок теплообменного оборудования систем подготовки технологического и топливного газа предприятий газовой промышленности.*

### Введение

Наряду с созданием новых мощных и экономичных ГТУ актуальными являются задачи повышения экономичности и надёжности эксплуатации существующего парка газоперекачивающих агрегатов. Повышению надёжности работы агрегата способствует соответствующая подготовка циклового воздуха и топливного газа. Для реализации поставленной задачи была разработана система подготовки топливного газа, основными элементами которой являются рекуперативный теплообменный и контактный теплообменный аппараты. Использование в процессах подготовки газа теплообменного оборудования требует снижения массогабаритных показателей, что, возможно, выполнить путём интенсификации теплообменных процессов при непосредственном контакте жидкости и газа. Перспективным методом пассивной интенсификации процессов тепло- и массообмена между плёнкой жидкости и газом является использование поверхностей контакта с регулярной шероховатостью, либо с пористым или сеточным покрытием стенок каналов.

Важным условием обеспечения эффективности работы аппаратов контактного типа, имеющих определённую гидравлическую схему, является использование особенностей взаимодействия жидкости и газа, а также диапазона изменения рабочих параметров, в преде-

лах которых реализуется устойчивое течение плёнки жидкости.

Выбранный способ пассивной интенсификации процессов тепло- и массообмена в контактных насадочных аппаратах путём нанесения сеточного покрытия на стенки каналов существенно изменил характер плёночного течения, что привело к значительному расширению рабочего диапазона нагрузки теплообменного аппарата.

### Динамика взаимодействия плёнки жидкости и газового потока в двухфазных кольцевых системах

Верхняя граница, определяемая процессом начала захлёбывания, для гравитационно стекающей плёнки в вертикальном канале с сеточным покрытием при противоточном движении газа либо пара, находится значительно выше по сравнению с процессами, происходящими в каналах с гладкими стенками.

Нижняя граница рабочего диапазона определяется не только физическими и физико-химическими свойствами жидкости и поверхности контакта, но и геометрическими характеристиками сеточного покрытия, которые непосредственно влияют на адгезию, смачивание, толщину плёнки и оцениваются минимальной плотностью орошения  $\Gamma_{\min 2}$ . Динамическое взаимодействие гравитационной плён-

ки и газового потока в канале приведёт к тому, что возникшее при этом касательное напряжение на свободной поверхности плёнки изменит баланс сил, действующих на неё и при этом, очевидно, изменится значение  $\Gamma_{\min 2}$ .

Нанесённый на вертикальные стенки слой сеточного покрытия можно рассматривать как регулярную шероховатость. В этом случае наличие этого покрытия приводит к более раннему переходу от ламинарного течения в турбулентное из-за дополнительных возмущений. При небольшой толщине сеточного слоя, которая определяется диаметром проволоки  $d_{пр}$ , возмущения лежат ниже уровня, определяемых степенью турбулентности внешнего течения. В этом случае сеточный слой не оказывает влияния на переход ламинарного течения в турбулентный. С другой стороны, при очень крупных размерах ячейки и диаметрах проволоки сетки переход может произойти непосредственно в ячейке при низких скоростях газового потока.

В литературе отсутствуют данные о влиянии геометрических размеров сеточного покрытия на переход от ламинарного режима течения в плёнке к турбулентному. Однако по характеру воздействия на поток газа наиболее близки случаи использования регулярной шероховатости в виде рядов поперечных проволок с круглым сечением на гладкой поверхности и поверхностей с искусственными кавернами или лунками различной формы.

Исследования гидродинамики течения в каналах с искусственной шероховатостью в виде проволок [1,2] позволили определить условия перехода ламинарного режима течения в турбулентное в области, прилегающей непосредственно к элементу шероховатости. Это происходит при:

$$\frac{u_c^* \cdot k_{кр}}{\nu} \approx 15 \dots 20,$$

где  $k_{кр}$  – характерный размер шероховатости.

Полученные результаты важны не только для объяснения причины интенсификации процессов тепло- и массообмена, но и выяснения механизма воздействия газового потока в ячейке сеточного покрытия.

В [3–5] описаны сложные вихревые течения и изменения их структуры в зависимости от режимных параметров и геометрии углублений на гладкой стенке. Сравнительный анализ

эволюции вихревого течения в элементарной каверне [4, 5] подтвердил существенное влияние пространственного характера движения жидкости. Увеличение числа Рейнольдса приводит к существенной интенсификации вихревого течения в каверне, что вызывает усиление интенсивности циркуляционного течения основного крупномасштабного вихря, а также увеличивает размеры вторичных угловых вихрей.

Анализ полученных результатов по исследованию движения жидкости по стенкам каверны позволил определить наличие особых точек типа фокус и линии стекания. При достижении  $Re \approx 400$  отмечено, что на дне каверны постепенно формируется срединная зона квазидвумерного отрывного течения. Было так же отмечено, при небольших числах  $Re \approx 100$  на боковых стенках формируется закрученный струйный поток, который направлен к оси каверны. Таким образом, наличие сложного вихревого движения в элементарной ячейке сеточного покрытия канала, фокусирующих точек и линий стоков даже при небольших числах  $Re$  повлияет на гидродинамику плёночного течения при плотностях орошения близких к минимальным.

### Методика проведения экспериментов

Влияние динамического воздействия потока газа на процесс нарушения сплошности течения, сопровождающееся разрывом плёнки и переходом в ручейковое течение, исследовался на экспериментальном стенде. Стенд представляет собой гидродинамический контур, состоящий из экспериментального участка, приёмного коллектора, сборного бака, насоса, сетевого коллектора, бака конденсата, системы подачи, регулирования и замера расхода воздуха, соединительных трубопроводов регулировочных вентилей и измерительной системы. Измерительная система состоит из двух последовательно соединённых ротаметров РС-3 с различным диапазоном расходов и с перекрытием шкал измерений, термопар с вторичным прибором Щ-300 либо А-565. Погрешность определения толщины плёнки в момент её разрыва при различных скоростях газового потока контактным методом может оказаться значительной из-за нарушения гидродинамики потока в элементарной ячейке сеточного покрытия, вызванного измерительным щупом, а так-

же складністю точної юстировки його в ячейке сетки. Поэтому момент разрыва плёнки определялся косвенным способом по изменению показаний термодпар, фиксирующих значения температур плёнки жидкости и газового потока, вследствие изменения площади плёнки при переходе от плёночного режима течения в ручейковый.

Методика определения минимальной плотности орошения состояла в следующей последовательности действий. Первоначальный расход жидкости выбирался таким образом, чтобы на поверхности канала отсутствовали сухие пятна, т.е. плёночное течение было сплошным. Наружные стенки канала были теплоизолированы. После стабилизации режима течения плёнки в нижнюю часть экспериментального участка подавался воздух при помощи двух компрессоров СО-7Б, производительностью  $V \approx 30 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Используя регулировочные вентили и измерительные устройства (два параллельно установленных ротаметра РС-5 и один РМ-7) подавался необходимый расход воздуха. Затем производился нагрев воздуха до температуры на входе  $t'_r = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  и жидкости  $t_m$  до такой температуры, чтобы она была близка к температуре мокрого термометра при соответствующей средней температуре воздуха в канале. После наступления термодинамического равновесия системы “жидкость – газ” фиксировались все параметры процесса. В ходе экспериментов ступенчато изменялся расход жидкости с определением параметров на каждом этапе. Момент разрыва плёнки сопровождался монотонным ростом температуры воздуха на выходе из канала  $t''_r$  при постоянстве температур жидкости на входе и выходе и воздуха на входе в экспериментальном канале. Монотонный рост температуры воздуха на выходе вызван уменьшением площади тепло- и массообмена вследствие перехода от плёночного режима течения к ручейковому. Температурный диапазон нагрева воздуха и жидкости выбирался из соображений минимизации погрешности определения минимальной плотности орошения, которая связана с убылью массы плёнки за счёт её испарения. Процедура измерений повторялась несколько раз до получения необходимой статистики. После получения соответствующих результатов, исследования проводились при другом значении расхода воздуха.

## Результаты физического моделирования процесса

Результаты исследования по определению влияния скорости газового потока на минимальную плотность орошения в канале с сеточным покрытием представлены на рис.1.

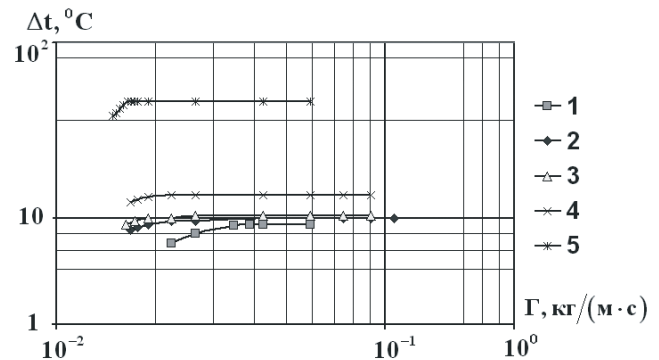


Рис. 1 Разрыв плёнки с образованием сухих пятен на поверхности канала при переходе плёночного течения жидкости в ручейковое в зависимости от скорости газа. Размер ячейки в свету  $S = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$   
1 -  $w = 12,0 \text{ м/с}$ ; 2 -  $10,12 \text{ м/с}$ ; 3 -  $6,57 \text{ м/с}$ ; 4 -  $4,68 \text{ м/с}$ ; 5 -  $2,01 \text{ м/с}$

В отличие от [6], где отмечалось, что при скоростях  $w \leq 4 \text{ м/с}$  динамическое воздействие газового потока не оказывает влияния на устойчивость плёночного течения, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о существенном вкладе касательного напряжения на поверхности плёнки на процесс перехода плёночного течения жидкости в ручейковое. Касательное напряжение вызвано газовым потоком и усиленно вихревой структурой в элементарной ячейке сеточного покрытия. Как видно из рис.1, во всём исследуемом диапазоне скоростей газового потока, чем скорость выше, тем при больших значениях  $\Gamma_{\min 2}$  наступает разрыв плёнки. Анализ полученных экспериментальных значений, с учётом результатов исследования гидродинамики гравитационного течения плёнок по вертикальным стенкам каналов с сеточным покрытием, позволил получить эмпирическую зависимость минимальной плотности орошения от скорости газового потока и геометрических характеристик сетки:

$$Fr_{\min 2} = 0,0067 \cdot Re^{0,4} \cdot Bo^{1,44} \cdot (1 - \cos\theta).$$

На рис. 2 представлена зависимость числа Фруда  $Fr_{\min 2}$ , которое соответствует мини-

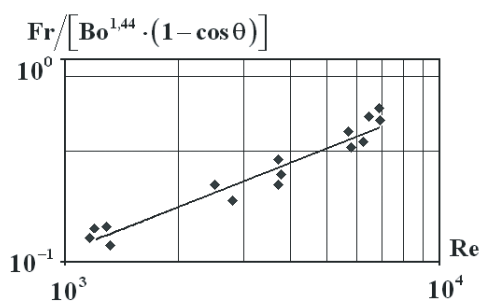


Рис. 2. Минимальная плотность орошения при переходе плёночного течения жидкости в ручейковое в зависимости от скорости газа

мальной плотности орошения от скорости газового потока  $Re$ .

Опытно-промышленные испытания системы подготовки топливного газа ГПА ГТ-750-6 показали, что определяющим параметром, ко-

## ВЫВОДЫ

1. В отличие от гладкой поверхности, где условия разрыва плёнки определяются физическими свойствами жидкости, смачиваемостью поверхности и зависят от баланса сил, действующих на элементарный объём плёнки, для поверхности с сеточным покрытием необходимо дополнительно учитывать капиллярные эффекты в ячейке сетки.

2. Динамическое взаимодействие гравитационной плёнки и газового потока приводит к изменению баланса сил, действующих на неё. Наличие сложного вихревого движения в элементарной ячейке сеточного покрытия, фокусирующих точек и линий стоков приводит к более раннему нарушению сплошности течения, сопровождающееся разрывом плёнки и переходом в ручейковое течение. В результате обобщения экспериментальных данных была

получена зависимость минимальной плотности орошения от скорости газового потока и геометрических характеристик сетки.

3. Опытно-промышленные испытания системы подготовки топливного газа ГПА ГТ-750-6 показали, что использование контактных аппаратов с сеточным покрытием поверхностей теплообмена позволило:

- расширить диапазон работы по скорости газа, что обеспечило требования к качеству топливного газа в системе топливоприготовления ГТУ ГПА;
- снизило расход топливного газа на 0,3–0,5% от номинального расхода путём его нагрева в рекуперативном теплообменном аппарате за счёт частичной утилизации теплоты уходящих газов.

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя : пер. с нем. / Г.Шлихтинг. — М. : Наука, 1974. — 711 с.
2. Касилов В.Ф. Справочное пособие по гидродинамике для теплоэнергетиков: [справочник] / В.Ф.Касилов. — М.: МЭИ, 2000. — 370 с.
3. Кесарев В.С. Структура течения и теплообмен при обтекании полусферического углубления турбулизированным потоком воздуха / В.С.Кесарев, А.П.Козлов // Вестник МГУ. — Серия Машиностроение. — 1993. — № 1. — С. 106–115.
4. Исаев С.А. Численный анализ влияния вязкости на вихревую динамику при ламинарном отрывном обтекании лунки на плоскости с учётом её асимметрии / С.А.Исаев, А.И.Леонтьев, П.И.Баранов // ИФЖ. — 2001. — Т. 74, № 2. — С. 635–645.
5. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика околоповерхностных углублений (лунок) / А.А.Халатов. — К.: Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 2005. — 140 с.
6. Живайкин Л.Я. Течение плёнок жидкости по вертикальной поверхности / Л.Я.Живайкин, В.П.Волгин // Журнал прикладной химии. — 1961. т.34 — № 6. — С.1236–1243.