

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ
ХИМИИ ИМ. Н.С.КУРНАКОВА

На правах рукописи

МАКСИМОВ Виктор Валентинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ НИСКОЛЯЩЕГО КОЛЬЦЕВОГО
ТЕЧЕНИЯ ГАЗА И ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ
05.17.08 - Процессы и аппараты химической технологии

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва 1980 год

Работа выполнена в Ордена Ленина Институте общей и неорганической химии им. Н.С.Курнакова АН СССР.

Научные руководители: член-корреспондент АН СССР, доктор технических наук Малисов В.А., старший научный сотрудник, кандидат химических наук Кулов Н.Н.

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук Чехов О.С., профессор, доктор технических наук Николаев Н.А.

Ведущая организация: Государственный научно-исследовательский и проектный институт азотной промышленности и продуктов неорганического синтеза (ГИАП)

Защита состоится "24" апреля 1980 г.

на заседании специализированного совета К.002.37.02 по химии и технологии неорганических веществ Ордена Ленина Института общей и неорганической химии им.Н.С.Курнакова АН СССР (Москва, Ленинский проспект, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "21" марта 1980 г.

Ученый секретарь специализированного совета
К. И. Н.

В.П. Лашков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из прогрессивных путей создания современных тепло-и массообменных аппаратов широкого назначения является использование пленочного течения жидкости по элементам контактного устройства. Пленочные аппараты характеризуются малым временем пребывания целевого продукта в зоне контакта и малой задержкой по жидкости, они позволяют получать исключительно низкие значения перепада давления, которые не могут быть достигнуты в аппаратах других конструкций, а также позволяют работать при очень низких и весьма высоких нагрузках по фазам.

Особое место среди пленочного массообменного оборудования занимают аппараты с нисходящим прямоточным течением жидкости и газа. В таких аппаратах можно достичь нагрузок по жидкости, во много раз превышающих допустимые нагрузки в современном колонном оборудовании, и, что особенно важно, относительная скорость газа в них может плавно меняться от весьма малых значений порядка 0,1 м/с до 50 м/с и более. Пленочные аппараты с нисходящим прямоточком фаз в последние годы находят все более широкое применение в качестве испарителей, предназначенных для обработки термолabile веществ и органических продуктов, испарительных теплообменников, когда скорость процесса лимитируется массопередачей, химических реакторов и т.п.

Увеличение количества примеров практического применения нисходящего прямотока и значительные потенциальные возможности этого способа контакта фаз определяют актуальность исследований в этой области.

Пленочные аппараты состоят, как правило, из серии параллельно работающих одинаковых труб или каналов, по внутренним стенкам которых течет пленка жидкости, а внутри этого жидкостного потока движется газ. Поэтому расчет аппаратов любого диаметра может быть проведен, если известно как протекает процесс в одной трубе или канале и обеспечено равномерное распределение фаз по всему сечению аппарата.

Основными гидродинамическими характеристиками, необходимыми для проведения гидравлического расчета тепло- и массообменных пленочных аппаратов, являются средняя толщина пленки, перепад давления и брызгоунос. Эти величины, в основном, определяют энергетические затраты и диаметр аппарата, оказывая влияние таким образом на металлоемкость конструкции, поэтому методика их расчета необходима при оптимальном проектировании колонного оборудования.

Большое значение для понимания процессов переноса количества движения, тепла и массы при пленочных двухфазных течениях, а также для совершенствования существующих методов их расчета имеет изучение структуры потоков, включающее исследование состояния межфазной границы (частота, фазовая скорость, длина и амплитуда волн) и распределение фаз в ядре потока (профили скорости газа, распределение капель по сечению трубы). Эти исследования представляют не только практический, но и чисто научный интерес, как экспериментальная база развития теории двухфазных потоков.

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании основных гидродинамических характеристик (средней толщины пленки, перепада давления и брызгоуноса) от расходных параметров и физико-химических свойств системы для разработки методики расчета трубчатых пленочных аппаратов, работающих в режиме нисходящего

прямотока, а также изучение структуры двухфазных пленочных течений (волновые характеристики, профили скоростей, распределение жидкости в ядре потока).

Научная новизна. В настоящей работе проведено полное исследование основных гидродинамических характеристик нисходящего пленочного течения в трубе в широком диапазоне изменения нагрузок по фазам. Предложено расчетное соотношение для определения начала сильного взаимодействия фаз. Получены формулы для расчета средней толщины пленки и перепада давления. Впервые получены соотношения для расчета брызгоуноса, позволяющие учесть изменение количества дисперсной фазы по длине трубы. Установлена связь между изменением режима течения и структурой потоков.

Практическая ценность. На основании полученных соотношений, а также анализа литературных данных, составлена полная методика гидравлического расчета трубчатых пленочных аппаратов, работающих в режиме нисходящего прямотока, которая может быть использована при проектировании соответствующего тепло-массообменного оборудования.

Данные по расчету толщины пленки жидкости при сильном и слабом взаимодействии фаз, а также зависимость для расчета начала брызгоуноса были включены в РТМ 26-01-71-75 " Испарители со стекающей пленкой" (Методика теплового и гидромеханического расчета). Экономический эффект, достигаемый за счет применения РТМ только в разработках УКРНИИКИММАШ составляет 91515 руб. в год.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на двух Международных семинарах по тепло- и массообмену (Дубровник, Югославия, 1975 и 1978 гг.); Всесоюзном теплофизическом семинаре (Новосибирск, Академгородок, 1976г.);

VI Международном конгрессе ХИСА (Прага, Чехословакия, 1978г.); двух Всесоюзных семинарах ТОХТ (Москва, 1979, 1980 гг.).

Отдельные главы работы были удостоены 3-ей премии на конкурсе научно-исследовательских работ в ИОНХ АН СССР, 1978г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 37 рисунков. Состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы, включающего 121 источник, и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Методы расчета двухфазных пленочных течений в трубах и каналах. Приводится аналитический обзор методов расчета двухфазных пленочных течений. Обсуждается квазигомогенная модель; модель Локкарта-Мартинелли; модель раздельного течения; параметрические соотношения. Показано, что указанные выше модели не позволяют произвести гидравлический расчет пленочного аппарата на основе заданных расходных параметров и физико-химических свойств системы без дополнительной экспериментальной информации.

На основе анализа литературных данных показано, что в зависимости от характера гидродинамического взаимодействия газа и жидкости, закономерности изменения основных параметров пленочного течения целесообразно рассматривать раздельно для случаев слабого и сильного взаимодействия фаз. Под слабым взаимодействием фаз здесь следует понимать такое состояние двухфазного потока, когда движение газа не влияет на толщину, среднюю и поверхностную скорость пленки жидкости, характеристики которой

остаются такими же как при гравитационном стекании в неподвижном газе. Этот случай часто реализуется на практике и, например, для противоточных пленочных колонн охватывает практически весь рабочий диапазон вплоть до явления подвисания и захлебывания. При нисходящем пленочном течении слабое взаимодействие фаз реализуется в тех случаях, когда аппарат работает при высоких плотностях орошения и малых нагрузках по газу, т.е. в условиях малой относительной скорости фаз.

При увеличении скорости газа более 5-6 м/с в структуре двухфазного потока газ-пленка жидкости происходят существенные изменения. Волновая структура поверхности пленки жидкости и средняя толщина пленки начинают существенно зависеть от касательного напряжения на границе раздела фаз. Жидкость срывается потоком газа с гребней волн, возникает брызгоунос и количество жидкости, стекающей по стенкам трубы в виде пленки, изменяется как с изменением плотности орошения, так и скорости газа. Этот интенсивный режим кольцевого двухфазного течения будем называть областью сильного взаимодействия фаз.

2. Экспериментальная установка и методы измерения. Дан литературный обзор экспериментальных методов, применяющихся при исследовании двухфазных течений и приведено описание установок, используемых в настоящей работе.

Изучение основных гидродинамических характеристик проводили на колонне, изготовленной из органического стекла, которая состояла из нескольких цилиндрических частей в внутреннем диаметром 25 мм. Длину колонны в зависимости от задач исследования меняли от 0,2 до 2,4 м. Для создания устойчивой пленки жидкости, равномерно орошающей всю внутреннюю поверхность тру-

бы использовали щелевой ороситель, представляющий собой отрезок трубы меньшего диаметра и высотой 70 мм, размещенный в верхней части рабочей трубки коаксиально ей.

Измерения средней толщины пленки жидкости проводили методом электропроводности, основанном на измерении электросопротивления участка пленки жидкости, заключенного между тремя кольцевыми электродами. Показано, что на измеряемую величину заметное влияние оказывает расстояние между электродами. С целью исключения этого влияния были проведены специальные исследования по выбору оптимального расстояния между электродами.

Измерение перепада давления проводили методом подпитки питания и с помощью пьезометрических трубок, расположенных в разных точках по высоте орошаемой трубы. Обе методики показали близкие результаты.

Измерения полного уноса жидкости проводили методом меланической сепарации капель из газок капельного потока после удаления пленки щелевым методом.

Измерение распределения по сечению трубы количества жидкости, находящейся в виде капель в газовом потоке, и профиля скорости газа проводили методом изокINETического отбора, для осуществления которого предложены специальные конструкции зондов.

3. Средняя толщина пленки жидкости. В настоящей работе проведены измерения средней толщины пленки жидкости с различной вязкостью в широком диапазоне изменения плотностей орошения α_L до $95 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ при линейных скоростях воздуха \bar{v}_a от 0 до 50 м/с. Для изменения вязкости жидкой фазы μ_L от 1 до 40 мПа·с использовали водно-глицериновые смеси.

На рис. 1 приведена типичная зависимость средней толщины пленки от скорости газа. Анализ хода кривых на этом рисунке

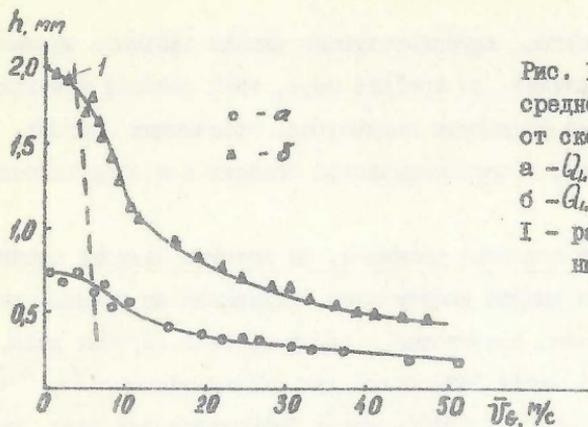


Рис. 1. Зависимость средней толщины пленки от скорости газа:
 а - $Q_{\text{ж}} = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$;
 б - $Q_{\text{ж}} = 35,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$;
 1 - расчет по уравнению (3).

позволяет сделать вывод, что при скоростях газа примерно до 5 м/с в области слабого гидродинамического взаимодействия фаз значение толщины пленки во всех случаях остается таким же, как и при гравитационном стекании и в ламинарно-волновой области ($Re_{\text{ж}} \leq 1600$), хорошо описываются уравнением Нуссельта

$$h/\theta = \sqrt[3]{\frac{3}{4}} Re_{\text{ж}}^{1/3} \quad (1)$$

а в турбулентной (особенно при $Re_{\text{ж}} > 5000$) лежат ближе всего к расчетной кривой, полученной на основании модели плоского турбулентного течения пленки жидкости с учетом распределения касательного напряжения и влияния молекулярной вязкости во всем слое. Влияние вязкости в широком диапазоне ее изменения с достаточной точностью учитывается параметром $\theta = (\nu_{\text{ж}}^2/g)^{1/3}$, где $\nu_{\text{ж}}$ - кинематическая вязкость жидкости, g - ускорение свободного падения. При дальнейшем увеличении скорости газа, в сравнительно узком интервале от 5 до 15 м/с, наблюдается резкое уменьшение толщины пленки, а затем плавное падение величины h с ростом \bar{v}_g . Такой ход кривых позволяет предположить существование некоторых критических значений плотности орошения и ско-

рости газового потока, характеризующих начало сильного взаимодействия фаз и наличие, по крайней мере, трех режимов течения: в области значений расходных параметров, отвечающих слабому взаимодействию фаз, в предкритической области и в закритической области.

Заметим, что основные величины, от которых зависит средняя толщина пленки, а именно, касательное напряжение на границе раздела фаз $\tau_{пог}$ и сила, приводящая к срыву гребней крупных волн, зависят только от числа Рейнольдса для пленки жидкости $Re_L = 4Q_L/\nu_L$ и $Re_{г,0}$, где $Re_{г,0} = U_{г,0}(d-2R)/\nu_g$ - число Рейнольдса для газа, вычисленное по относительной скорости газа $U_{г,0} = \bar{U}_g - \bar{U}_L$, \bar{U}_L - среднерасходная скорость течения жидкости, d - диаметр труб, ν_g - кинематическая вязкость газа. Таким образом, зависимость $k/\theta = \psi(Re_L)$ в области сильного гидродинамического взаимодействия фаз, должна быть записана в виде $k/\theta = \psi(Re'_L; Re_{г,0})$. Здесь штрих при числе Рейнольдса для пленки жидкости означает, что Re'_L следует определять с учетом брызгуноса, т.е. по плотности орошения $Q_{пл} = Q_L - Q_E$, где Q_E - часть объемного расхода жидкости, унесенная газовым потоком в виде капель.

Поскольку для определения $Re_{г,0}$ необходимо знать среднюю толщину пленки, а расчет k предшествует расчету перепада давления ΔP_0 и брызгуноса E (которые также зависят от $Re_{г,0}$) в качестве независимых параметров при обработке данных по толщине пленки были выбраны Re'_L и $Re_{г,0}$. Аппроксимирующую функцию искали, в соответствии с общепринятыми методами теории подобия, в виде степенной зависимости

$$k/\theta = A Re'_L{}^a Re_{г,0}{}^b, \quad (2)$$

а значения констант находили путем обработки данных на ЭМ методом наименьших квадратов.

Заметим, что в соотношение (2) не входит параметр, характеризующий влияние длины колонны. Наши данные были получены на колонне одной длины. Однако, как следует из литературных данных, влияние длины колонны на среднюю толщину пленки незначительно и соотношение (2) носит общий характер.

В результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ было найдено уравнение, характеризующее начало сильного взаимодействия фаз

$$Re_c^* = 532 \cdot 10^4 Re_L^{-0,9} \quad (3)$$

а для расчета средней толщины пленки следующие выражения: при $Re_c \geq Re_c^*$ и $0,893 \text{ мПа} \cdot \text{с} \leq \mu_0 \leq 40 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ в области ламинарно-волнового режима течения жидкости $Re_L < 1200$

$$h/\theta = 169,1 \cdot Re_L^{0,52} \cdot Re_c^{-0,66} \quad (4)$$

в области турбулентного течения жидкости $Re_L > 1200$

$$h/\theta = 62,9 \cdot Re_L^{0,52} \cdot Re_c^{-0,66} \quad (5)$$

На рис. 1 пунктиром приведена линия, рассчитанная по формуле (3).

Для области нагрузок по газу, соответствующих интервалу $8000 \leq Re_c \leq Re_c^*$ при $Re_L > 1200$, толщину пленки можно определять по формуле

$$h/\theta = 0,266 Re_L^{0,6} Re_c^{-0,1} \quad (6)$$

Относительная ошибка при расчете по формулам (4) - (6) составляет 5%.

Приведенные выше формулы позволяют определять среднюю толщину пленки в области сильного гидродинамического взаимодействия фаз при нисходящем течении газа и пленки жидкости в вертикальных трубах различной длины. В области слабого взаимодействия расчет толщины пленки следует проводить, как это отмечалось выше, по формулам для гравитационного стекания жидкости. Однако, при тур-

булентном течении жидкости ($Re_c > 1200$) в интервале чисел Рейнольдса для газа $8000 < Re_c < Re_c^*$ для расчета предложена формула (6), в которой учитывается небольшое влияние Re_c на величину k .

4. Перепад давления. Анализ литературных данных показывает, что, если для области слабого взаимодействия фаз методика расчета ΔP_0 в орошаемых вертикальных трубах при нисходящем потоке можно считать в целом разработанной, то в области сильного гидродинамического взаимодействия имеется лишь несколько работ, а результаты расчета по предложенным в них уравнениям существенно различаются. Однако, во всех случаях на кривых зависимости коэффициентов сопротивления трения для орошаемой трубы λ_0 от Re_c или $Re_{c,0}$ наблюдался экстремум - кривые проходят через максимум, что свидетельствует о наличии по крайней мере двух характерных режимов в области сильного взаимодействия фаз.

Экспериментальные данные по перепаду давления получены на системе воздух-вода при различных нагрузках по фазам. Скорость газа в опытах достигала 50 м/с, максимальная плотность орошения соответствовала значению числа Рейнольдса для пленки жидкости 13500. Измерения давления проводили в различных сечениях по высоте трубы с помощью пьезометрических трубок и по дифференциальной схеме с подпиткой питания. Обе методики дали близкие результаты.

Было установлено, что во всех опытах давление по длине колонны изменяется линейно. Поскольку первая точка отбора давления отстояла от входа в колонну на расстоянии 0,3 м, можно сделать вывод, что во всем изучаемом интервале нагрузок по фазам входной участок не превышал этого расстояния. Анализ литературных данных показывает, что входной участок по ΔP_0 в немногочис-

ленных работах, в которых измеряли давление по длине колонны, имеет длину порядка 0,1 м. Поэтому можно считать, что линейная экстраполяция зависимости давления по всей длине колонны не должна привести к существенным погрешностям при проведении расчета для трубок длиной порядка 0,5 м и более, т.е. практически для всех длин труб, которые используются в пленочных аппаратах.

Для расчета коэффициента сопротивления λ_0 использовалась, как и в случае однофазных течений, формула

$$\Delta P_0 = \lambda_0 \frac{\ell}{d \cdot 2R} \cdot \frac{\rho_0 v_{G,0}^2}{2} \quad (7)$$

Обработка всех экспериментальных данных на ЭВМ в виде зависимости $\lambda_0 = \varphi(Re_L; Re_{G,0})$ позволила найти в области сильного взаимодействия фаз уравнение разграничивающей режимы линии

$$Re_{G,0}^{**} = 1,8 \cdot 10^5 \cdot Re_L^{-0,242} \quad (8)$$

и следующие формулы для расчета коэффициента сопротивления орошаемой трубы, которые справедливы во всем изученном диапазоне

плотностей орошения: при $Re_{G,0}^* < Re_{G,0} < Re_{G,0}^{**}$

$$\lambda_0 = 0,18 \cdot 10^{-9} \cdot Re_L^{0,93} \cdot Re_{G,0}^{1,35} \quad (9)$$

при $Re_{G,0} > Re_{G,0}^{**}$

$$\lambda_0 = 0,893 \cdot Re_L^{0,49} \cdot Re_{G,0}^{-0,492} \quad (10)$$

Суммарный график зависимости коэффициента сопротивления от $Re_{G,0}$ при различных плотностях орошения представлен на рис. 2.

Линия I рассчитана по формуле

$$\lambda_0' = 0,335 \cdot Re_{G,0}^{-0,25}, \quad (11)$$

полученной для случая гладкой безволновой пленки жидкости. Все опытные данные лежат выше линии I, поскольку в реальных условиях волюнтаризация на поверхности пленки приводит к увеличению сопротивления течению газа. При заданной плотности орошения зависимость $\lambda_0 = \varphi(Re_{G,0})$ имеет три характерных участка. При относительно небольших значениях $Re_{G,0}$ (вплоть до пунктирной

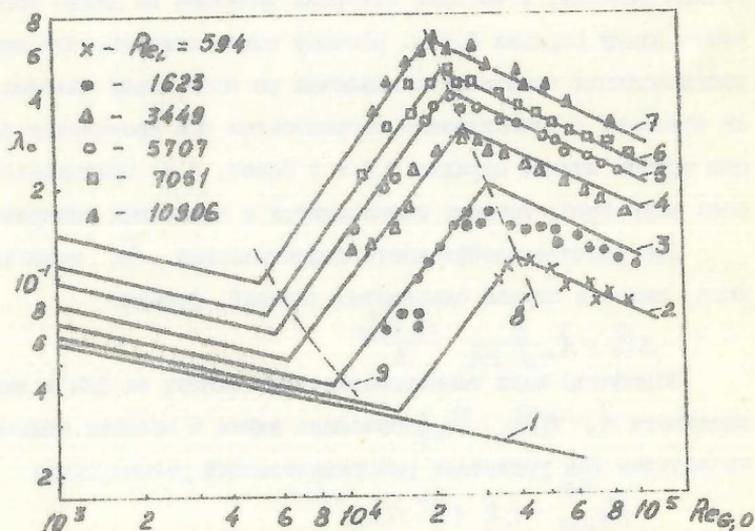


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления орошаемой трубы от $Re_{G,0}$ при различных плотностях орошения: 1 - рассчитано по формуле (II); 2 - 7 - рассчитано по формулам (9), (10), (12); 8 - по формуле (8); 9 - по формуле (3); экспериментальные точки соответствуют $Re_L = 594, 1623, 3449, 5707, 7051, 10906$.

линии 9) наблюдается участок слабого взаимодействия фаз, когда брызгоунос отсутствует, а течение газа в орошаемой колонне подобно течению его в трубе с волнистой поверхностью. Прямые линии, параллельные линии I, рассчитаны по формуле

$$\frac{\lambda_0 - \lambda_0'}{\lambda_0} = A \left(\frac{R}{\theta} \right)^2 - B, \quad (12)$$

где для ламинарно-волнового течения пленки ($500 < Re_L < 1600$)

$A = 2,1 \cdot 10^3$ и $B = 0,11$, для турбулентного ($Re_L > 1600$)

$A = 1,9 \cdot 10^3$ и $B = 0,16$. Здесь λ_0' значение коэффициента сопротивления для гладкой пленки жидкости. Шумпирная линия 9 показывает начало сильного взаимодействия фаз и рассчитана по формуле

(3). Заметим, что эта формула получена при обработке данных по

толщине пленки, однако хорошо согласуется с характером изменения λ_0 .

Отрезки прямых, заключенные между пунктирными линиями 8 и 9 отвечают области течения, в которой резко нарастает брызгоунос и увеличивается скорость движения пленки жидкости вследствие взаимодействия ее с потоком газа. Далее кривая зависимости $\lambda_0 = \varphi(Re_{г0})$ проходит через максимум и меняет свой наклон. В области $Re_{г0} > Re_{г0}^{**}$ значения λ_0 убывают с ростом $Re_{г0}$. Здесь толщина пленки изменяется со скоростью газа слабо, вследствие срыва крупных волн становится более гладкой, интенсивность брызгоуноса снижается. Рис. 2 охватывает все основные реализующиеся на практике режимы течения.

5. Брызгоунос. Количество жидкости, перемещающееся в виде капель в ядре газового потока при кольцевых двухфазных течениях, определяется закономерностями отрыва капель с поверхности пленки и их осаждения.

Попытки теоретического расчета брызгоуноса пока что не привели к положительным результатам и все опубликованные в литературе соотношения получены на основе обработки экспериментальных данных. Для нисходящего прямотока можно назвать всего несколько работ, в которых были сделаны попытки дать корреляции для расчета количества уносимой в виде брызг жидкости, однако опыты, на которых основывались эти корреляции, как правило, проводили в узком диапазоне нагрузок по фазам. Следует подчеркнуть, что основным недостатком всех работ по изучению брызгоуноса является отсутствие данных по увеличению количества дисперсной фазы по длине трубы. Как правило, в различных работах измеряется, так называемый, установившийся брызгоунос вдали от входа в канал.

Экспериментальные данные по суммарному брызгоуносу, полученные на системе вода-воздух в трубе диаметром 25 мм различной длины (от 0,3 до 2,4 м), охватывают диапазон скоростей газа от начала брызгоуноса до 50 м/с и Re_L до 25000.

При анализе изменения брызгоуноса по длине колонны при различных скоростях газа и плотностях орошения нетрудно убедиться, что с увеличением расстояния от входа количество жидкости, переносимое газовым потоком в виде капель, нарастает. Однако рост концентрации капель в газовой фазе приводит к тому, что процессы отрыва гребней волн и ударов капель о поверхность пленки приходят в динамическое равновесие. На некотором расстоянии от входа порядка 1,2 - 1,3 м можно принять, что суммарный брызгоунос стабилизируется. Однако во всех случаях с ростом скорости газа процент уноса растет.

Зависимость брызгоуноса от плотности орошения более сложная, чем монотонное увеличение, которое наблюдается с увеличением скорости газа. Оказалось, что процент уноса E , т.е. количество жидкости, уносимое в виде брызг, отнесенное к исходному количеству жидкости и выраженное в %, с ростом Re_G вначале увеличивается относительно резко, примерно до $Re_L = Re_{L,кр} = 1600 \div 2000$, а затем рост E становится значительно более плавным. Следует отметить, что область резкого увеличения брызгоуноса с ростом Re_G приходится на режим ламинарно-волнового течения жидкости. В настоящей работе для определения начала брызгоуноса рекомендуется использовать уравнение (3), полученное на основе обширного экспериментального материала по толщине пленки. Следует отметить, что такая характеристика, как средняя толщина пленки, учитывая крутой ход кривых на рис. 1, оказалась наиболее чувствительной при определении начала сильного взаимодействия фаз. Кроме того, расчет

по формуле (3) отчетливо разграничил области сильного и слабого взаимодействия на кривых $\lambda = \varphi(Re_L; Re_{G,0})$ (рис. 2).

Учитывая все сказанное выше, можно рекомендовать соотношение (3) для расчета начала брызгоноса в вертикальных трубах при нисходящем течении газа и пленки жидкости.

Для количественного описания брызгоноса была использована достаточно простая и в то же время физически вполне обоснованная зависимость

$$E = \varphi(Re_L; Re_{G,0}; l/d) \quad (13)$$

В приведенном выше уравнении отсутствует, пожалуй, лишь одна существенная для рассматриваемого процесса физико-химическая характеристика системы - поверхностное натяжение σ , которая в сочетании с другими переменными могла бы дать еще один безразмерный параметр в виде критерия устойчивости двухфазных газо-жидкостных систем. Однако опыты в настоящей работе проводились на системах воздух-вода и водные растворы глицерина. Поскольку в промышленности существует обширный класс двухфазных систем, в которых поверхностное натяжение мало отличается от значений σ для системы воздух-вода можно ограничиться при обработке опытных данных и выводе корреляционных соотношений зависимостью (13).

На рис. 3 в плоскости $Re_L; Re_{G,0}$ показаны три характерные области А, В, С, выявленные в результате предварительного анализа опытных данных. Линия 4 рассчитана по формуле (3) и соответствует началу брызгоноса. При всех режимах, расположенных выше линии 4 поток газа содержит капли жидкости. Границы областей могут быть определены из соотношений

$$Re_{G,0}^{(AB)} = 2,16 Re_L \quad (14)$$

$$Re_{G,0}^{(AC)} = 70,5 Re_L^{0,643} \quad (15)$$

$$Re_{G,0}^{(BC)} = 4,4 \cdot 10^{11} Re_L^{-1,82} \quad (16)$$

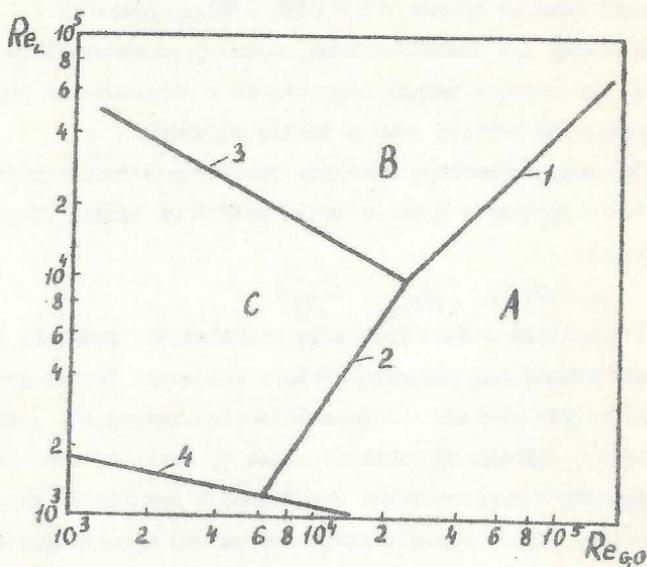


Рис. 3. Области брызгоуноса: 1 - расчет по уравнению (14); 2 - (15); 3 - (16); 4 - (3).

Для расчета величины E могут быть рекомендованы следующие формулы:

$$E_A = 1,52 \cdot 10^{-7} Re_L^{0,292} Re_{G,0}^{1,475} (1 - e^{-0,092 l/d}), \quad (17)$$

$$E_B = 2,54 \cdot 10^{-7} Re_L^{0,968} Re_{G,0}^{0,808} (1 - e^{-0,092 l/d}), \quad (18)$$

$$E_C = 4,0 \cdot 10^{-6} Re_L^{0,781} Re_{G,0}^{0,706} (1 - e^{-0,092 l/d}). \quad (19)$$

Величины E_A , E_B и E_C - значения брызгоуноса в соответствующих областях, показанных на рис. 3. При $l \rightarrow 0$, $E \rightarrow 0$, а при достаточно больших l брызгоунос практически перестает зависеть от длины трубы и определяется только значениями $Re_{G,0}$ и Re_L .

Заметим, что при фиксированной длине трубы l , чем больше d , тем медленнее наступает насыщение, поскольку капли распределяются в большем объеме. Области В и С охватывают в основном ламинарно-волновое течение пленки, характеризующееся сильными возмущениями поверхности и резкой зависимостью брызгоуноса от плотности орошения. При переходе к режиму турбулентного течения (область А) поверхность пленки сглаживается и зависимость E от Re_d заметно ослабевает.

6. Структура двухфазного потока в трубах при нисходящем пленочном течении. Изучение волновых характеристик при гравитационном стекании пленки жидкости и в области сильного взаимодействия фаз проводили на той же самой установке, что и изучение толщины пленки, перепада давления и брызгоуноса. Измерения проводили методом локальной электропроводности. Каждая измерительная цапга содержала четыре пары электродов, изготовленных в виде сегментов из платиновой фольги толщиной 0,05 см; расстояние по вертикали между парами электродов составляло 0,5 см, зазор между двумя соседними сегментами - 0,02 см. В результате обработки осциллограмм, находили значение частоты волн f и фазовой скорости C , а затем рассчитывали длину волны $\lambda = C/f$. Опыты проводили при плотностях орошения Q_d , соответствующих диапазону изменения чисел Рейнольдса для пленки жидкости: при гравитационном стекании $30 \leq Re_d \leq 8000$; в области сильного взаимодействия $800 \leq Re_d \leq 14000$.

Анализ осциллограмм волновой поверхности, полученных при различных плотностях орошения, позволяет выделить из всего многообразия различных по форме и амплитуде волн по крайней мере два типа: крупные, наиболее образные волны, отстоящие друг от друга на значительном расстоянии, и мелкие волны, движущиеся по ос-

таточному слою жидкости в промежутке между крупными волнами. В дальнейшем, частоту, фазовую скорость и длину крупных волн будем обозначать f_B , C_B и Λ_B , а для мелких волн соответственно f_s , C_s и Λ_s .

В настоящее время известно, что волновая картина течения меняется в зависимости от длины трубы или канала. Так, например, в ряде работ отмечается, что при малых скоростях газа, т.е. в условиях, близких к гравитационному стеканию жидкости, фазовая скорость непрерывно возрастает, а частота падает по всей длине трубы, однако при расстояниях от оросителя более 9 м изменение этих параметров становится незначительным. В наших опытах частота волн с увеличением длины трубы l падает во всем изученном интервале изменения l , причем основное, наиболее резкое изменение, происходит при $l < 1,5$ м. Аналогичная картина наблюдается и для f_s . Однако абсолютное значение f_B в 3-4 раза больше f_s . Фазовая скорость крупных C_B и мелких C_s волн с ростом l увеличивается.

Учитывая описанный выше характер изменения волновых характеристик вдоль по потоку, основные измерения при гравитационном стекании пленки жидкости проводили на расстоянии 238,6 см от оросителя, когда значения f , C и Λ можно считать примерно установившимися при фиксированном расходе жидкости. Результаты измерения представлены в таблице.

Наличие четырех режимов, не считая безволнового, на зависимости частоты и фазовой скорости волн от Re_L , согласуется с теоретическими и экспериментальными работами по определению режимов течения волновой пленки жидкости.

Обращает на себя внимание тот факт, что при $30 \leq Re_L \leq 100$ значения безразмерной фазовой скорости $Z = C/\bar{v}_L$ крупных

Таблица.

$$f_B = a_B Re_L^{b_B} \quad 1/c;$$

$$C_B = C_B Re_L^{d_B} \quad m/c;$$

$$\Lambda_B = g_B Re_L^{h_B} \quad m;$$

$$f_S = a_S Re_L^{b_S} \quad 1/c;$$

$$C_S = C_S Re_L^{d_S} \quad m/c;$$

$$\Lambda_S = g_S Re_L^{h_S} \quad m;$$

A < Re _L < B													
A	B	a _B	a _S	b _B	b _S	C _B	C _S	d _B	d _S	g _B	g _S	h _B	h _S
32	80	3,4	1,4	0	0	0,4	0,3	0	0	0,11	0,03	0	0
80	260	0,5	4,1	0,4	0,3	0,1	0,1	0,5	0,4	0,09	0,02	0	0,1
260	1500	2,1	4,7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,07	0,02	0,1	0
1500	8000	7,7	30	0	0	0,8	1,0	0	0	0,1	0,03	0	0

и мелких волн больше 3, тогда как $Z = 3$ - теоретически является предельной величиной.

Отметим еще один интересный вывод, который можно сделать, наблюдая за характером изменения кривых $Z = Y(Re_L)$. При $Re_L > 1600$ значение фазовой скорости волн становится соизмеримым с \bar{V}_L . Отсюда можно предположить, что в области турбулентного течения пленки волнообразование может не оказываться на скорости массоотдачи, лимитируемой жидкой фазой.

Анализ волновых характеристик в области сильного взаимодействия фаз показывает, что с увеличением скорости газового потока частота и фазовая скорость крупных и мелких волн начинают резко увеличиваться с ростом скорости газа. Граница этого перехода достаточно хорошо описывается уравнением для начала сильного взаимодействия фаз (3). Зависимость длины волны от Re_c при фиксированном Re_L имеет максимум, положение этого экстремума качественно согласуется с уравнением (8).

Сопоставление экспериментальных данных по зависимости брызгоуноса и частоты крупных и мелких волн по длине трубы при турбулентном течении жидкости показывает, что брызгоунос растет по длине канала, в то время как частота крупных волн падает, а мелких — остается примерно постоянной. Этот факт может служить качественным подтверждением волнового механизма уноса капель с поверхности пленки.

Изучение профиля скорости и распределение количества дисперсной фазы по диаметру трубы проводили при $300 \leq Re_L \leq 14000$ и $10 \text{ м/с} \leq \bar{U}_L \leq 52 \text{ м/с}$ на расстояниях от оросителя 0,37, 1 и 1,5 м методом изокинетического отбора.

Опыты показали, что основное количество уносимой жидкости сосредоточено вблизи поверхности пленки, причем неравномерность профиля брызгоуноса с увеличением плотности орошения возрастает. С увеличением расстояния от оросителя профиль распределения капель жидкости по диаметру трубы выравнивается и в ядре газового потока становится однородным, резко изменяясь только в пристенной области. Профиль скорости газового потока имеет сильно вытянутую форму по сравнению с профилем скорости турбулентного потока в сухом канале, а отношение максимальной скорости газа к среднерасходной меняется в пределах 1,12 + 2,25 и зависит от плотности орошения, расхода газа и расстояния от оросителя.

Установлено, что форма профиля скорости газа в большой степени зависит от количества жидкости, унесенной с поверхности пленки. Наблюдается симбатная зависимость вытягивания профиля скорости и увеличения концентрации дисперсной фазы вблизи границы раздела пленка жидкость — газ.

Для ламинарного течения пленки жидкости при $Re_L < 1600$ наиболее резкое изменение профиля скорости от расхода газа наблю-

дается при скорости газа соответствующей Re_{GD}^{**} (уравнение (8)).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование основных гидродинамических характеристик (толщины пленки, перепада давления и брызгоуноса) для нисходящего кольцевого течения газа и пленки жидкости в трубе.

2. Предложено соотношение для определения начала сильного взаимодействия фаз, удовлетворительно коррелирующееся с данными по перепаду давления и брызгоуносу.

3. Изучена зависимость средней толщины пленки от плотности орошения и вязкости жидкости в области слабого взаимодействия фаз. Показано, что влияние вязкости в широком диапазоне ее изменения с достаточной точностью описывается параметром $\theta = (\nu_k/g)^{1/3}$.

4. Получены соотношения для расчета средней толщины пленки жидкости в области сильного взаимодействия фаз.

5. Получены формулы для расчета перепада давления в области сильного взаимодействия фаз, хорошо смыкающиеся с зависимостями для области слабого взаимодействия, что позволяет предложить методику расчета ΔP_0 во всем реализуемом на практике диапазоне нагрузок по фазам.

6. Впервые получены соотношения для расчета величины брызгоуноса, позволяющие также учесть изменение количества дисперсной фазы по длине трубы.

7. Проведено исследование структуры двухфазного потока в трубе при нисходящем пленочном течении, включающее изучение состояния межфазной границы (частота, фазовая скорость и длина волны) и распределение фаз в ядре потока (профили скорости газа, распределение капель по сечению трубы). Установлена связь между измене-

нием режима течения и структурой потоков.

8. На основании полученных соотношений, а также анализа литературных данных составлена методика полного гидравлического расчета пленочных аппаратов, работающих в режиме нисходящего прямотока, которая может быть использована в проектных организациях для расчета соответствующего тепло- массообменного оборудования.

Уравнения для расчета толщины пленки при сильном и слабом взаимодействии фаз и начала брызгоуноса были включены в РТМ 26-01-71-75 "Испарители со стекающей пленкой" (Методика теплового и гидромеханического расчета). Экономический эффект, достигаемый за счет применения РТМ только в разработках УРНИИХИММАШ составляет 91516 руб. в год.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах.

1. В.В.Максимов, Н.Н.Кулсв, В.А.Малюсов, Исследование волновых характеристик стекающей пленки жидкости, в об. "Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах", Новосибирск СО АН СССР, Институт теплофизики, стр. 153 - 158, 1977.

2. N.N.Kulov, V.V.Maksimov, S.K.Myasnikov, V.P.Veretilin, V.A.Maljusov, Studies of Downward Annular Two-Phase Flow, Proc. International Seminar "Future Energy Production: Heat and Mass Transfer Problems", August 25 - 30, 1975, Dubrovnik, Yugoslavia, Nem. Publ. Cor; (Washington), 1977.

3. N.N.Kulov, V.V.Maksimov, V.A.Maljusov, N.M.Zhavorenkov, Pressure drop, mean film thickness and entrainment in two-phase flow, VI Congress CHISA Lecture Summaries A.2. 4, August 1978, Prague, Czechoslovakia.

4. V.A.Maljusov, V.V.Maksimov, N.N.Kulov, L.P.Kholpanov, N.M.Zhavoronkov, Investigation of waves and mass transfer in falling liquid film, Proc. International Seminar "Momentum, Heat and Mass Transfer in Two-Phase Energy and Chemical Systems", September 4 - 9, 1978, Dubrovnik, Yugoslavia, Hem. Publ. Cor. (Washington), 1979.

5. N.N.Kulov, V.V.Maksimov, V.A.Maljusov, N.M.Zhavoronkov, Pressure Drop, Mean Film Thickness and Entrainment in Downward Two-Phase Flow, Chemical Engineering Journal, 18 pp. 183 - 188, 1979.

Т - 00512

Подписано в печать 13 марта 1980 года
Заказ № 146. Тираж 150 экз. В/л 1.2
Отпечатано в Редакционно-издательском
отделе ФИАН СССР
Москва, В-312, Ленинский проспект, 53