

В.И. Терехов, А.Ф. Серов, К.А. Шаров, А.Д. Назаров

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА СПУТНОСТИ ДВУХФАЗНЫХ ПРИСТЕННЫХ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ СТРУЙ НА ДИНАМИКУ ОСАЖДЕНИЯ И ВОЛНОВЫЕ СПЕКТРЫ ЖИДКИХ ПЛЁНОК

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование образования плёнок жидкости в вертикальном цилиндрическом канале из пристенных газокапельных струй при вариации скорости спутного потока газа. Измерение мгновенной толщины плёнки жидкости произведено датчиком емкостного типа. Получены распределения толщины осаждённой плёнки и спектры волн на её поверхности при различных расстояниях от входа в рабочий участок. Проведено сравнение характера осаждения с известными эмпирическими зависимостями, полученными для турбулентных газокапельных потоков на гидродинамически стабилизированном участке труб.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование пристенных газокапельных струй является одним из перспективных способов защиты поверхности от воздействия высокотемпературных потоков газа. В последние годы были проведены обширные экспериментальные [1] и теоретические [2] исследования эффективности тепловой защиты такого рода. В этих работах установлено, что даже небольшое количество капель жидкости приводит к существенному повышению эффективности тепловой защиты. Однако имеющиеся теоретические модели отражают не все факторы, способные оказать влияние на защитные свойства и динамику течения пристенных газокапельных потоков. В частности, не учитывается такой важный фактор, как осаждение части жидкости, находящейся в пристенной струе, на стенки канала. Образующаяся при этом плёнка может иметь волновой характер, а также уноситься в виде отдельных капель или полностью срываться со стенок канала. Наличие плёночного течения может внести существенные коррективы в результаты теоретических расчётов эффективности охлаждения. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию динамики движения жидкой плёнки, образующейся в результате осаждения капель из пристенной струи, и является развитием работы [3]. Основное внимание было уделено изучению влияния концентрации жидкой фазы и скорости основного спутного потока на характер течения, толщину плёнки и её расход.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема эксперимента изображена на рис. 1. Исследования проводились в вертикальном цилиндрическом канале диаметром $D=100$ мм и длиной

$L=640$ мм. Канал набирался из отдельных секций, что позволяло варьировать его длину и измерять количество осажденной влаги на различных удалениях от входа.

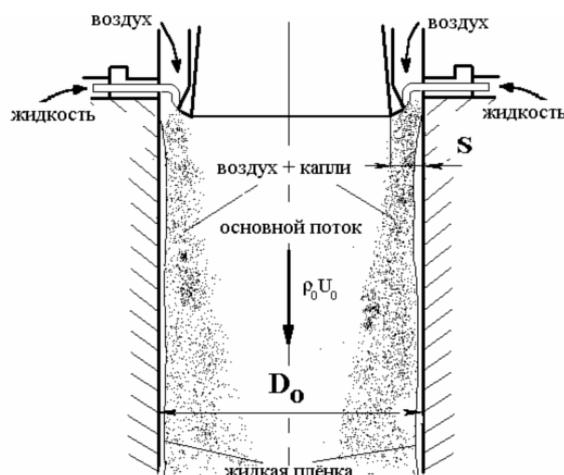


Рис. 1. Схема эксперимента

В него подавался коаксиальный поток, состоящий из однофазной центральной (основной поток) и газожидкостной пристенной (вторичный поток) струй. Канал был выполнен из прозрачного материала, что позволяло визуально наблюдать картину течения плёнки и фиксировать местоположение её срыва со стенки. Подробно конструкция установки описана в работе [1]. Массовая концентрация жидкости $K_{ж}$ в пристенной струе составляла 1,6; 2,6; 5; 10% от массы вдуваемого газа. В качестве жидкой фазы использовалась дистиллированная вода. Концентрация жидкости в пристенной струе соответствовала опытам по исследованию эффективности охлаждения газожидкостных завес [1]. Скорость вторичного потока на входе в канал не менялась и составляла ~ 25 м/с. Скорость основного потока принимала значения 0; 16; 29; 39 м/с, что соответствовало диапазону чисел Рейнольдса газового потока, построенному по скорости основного потока и диаметру канала, $Re_D = 0 \div 2,6 \cdot 10^5$. Таким образом, исследовалось влияние на процесс осаждения параметра вдува $m = \rho_s U_s / \rho_0 U_0$, где ρ_s , ρ_0 – плотности газа соответственно в пристенной струе и основном потоке, U_s , U_0 – соответствующие скорости. Температура основного и вторичного потоков не менялась и составляла примерно 20°C . Для определения толщины и амплитудных характеристик волн жидкой плёнки использовалась измерительная система с

емкостным методом измерения локальной толщины. Сигнал с емкостного датчика подавался в преобразователь ёмкость-частота, оцифровывался и представлялся на экране компьютера в графическом виде как зависимость частоты измерительного генератора от времени. Эта зависимость сохранялась как файл в цифровом виде, и в дальнейшем по тарировочным значениям частота измерительного генератора переводилась в толщину плёнки. Данная система позволяла получать функцию локальной толщины от времени. Тарировка системы производилась с помощью специального тарировочного устройства.

В ходе опытов измерялось количество осаждённой влаги из образуемой плёнки жидкости. Отбор осуществлялся через кольцевую щель в стенке канала в специально изготовленный насадок. Жидкость отводилась в мерную пробирку. Одновременно емкостным датчиком производилось измерение толщины плёнки жидкости. Измерения толщины проводились на расстояниях 67, 170, 267, 370, 467, 570 мм от входа в канал. Отбор жидкости производился примерно в тех же сечениях.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Распределение толщины плёнки жидкости и её частотный спектр

Измерение осредненной по времени толщины пленки жидкости вдоль стенки канала при различных скоростях спутного потока и содержании жидкой фазы в пристенной струе представлено на рис. 2. Толщина пленки, как правило, возрастает по длине канала независимо от параметра спутности. Это объясняется непрерывным подводом массы жидкости из газокapельной струи. Исключение составляют пристенные струи с малой концентрацией жидкой фазы на достаточно больших удалениях от места вдува. В ряде режимов (рис. 2, в и г) происходит полный срыв пленки без повторного осаждения на стенку канала.

Увеличение скорости спутного потока приводит к заметному утончению пленки, что объясняется ростом скорости пленки за счёт более сильных межфазных касательных напряжений.

Для сравнения с экспериментальными данными проведен расчет толщины гравитационной стекающей пленки на стабилизированном участке при максимальной ($K_{ж} = 10\%$, линия 5, рис. 2) и минимальной концентрациях ($K_{ж} = 1.6\%$, линии 6, рис. 2) жидкой фазы. Расчет производился по формуле Нуссельта

$$\delta_o = 1.44 \sqrt[3]{\text{Re}_s v_{ж}^2 / g} .$$

При этом полагалось, что вся жидкая капельная фаза подавалась в виде равномерно распределенной по образующей канала пленки.

Как видно (рис. 2, а), толщина плёнки, образованной из капельной фазы, меньше, чем дает расчет по теории Нуссельта. Это объясняется содержанием большей части жидкости в этой области в капельном виде. К выходу из канала измеренные и рассчи-

танные значения сближаются между собой, что свидетельствует о практически полном осаждении капель на поверхность канала. Для больших значений скорости спутного потока (рис. 2, в, г) совпадения между теорией Нуссельта и экспериментом не наблюдается, что объясняется, как упоминалось выше, влиянием межфазного взаимодействия. В этом случае расчёт толщины плёнки должен производиться с учетом касательных напряжений между жидкой плёнкой и спутным потоком.

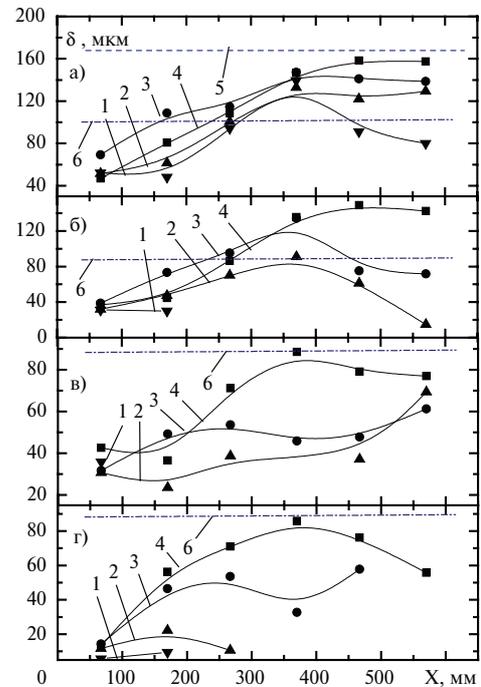


Рис. 2. Средняя толщина плёнки, осаждённой из пристенной газожидкостной завесы: а- $U_0=4,78$ м/с; б- $U_0=16$ м/с, $m=1,8$; в- $U_0=29$ м/с, $m=1$; г- $U_0=37$ м/с, $m=0,6$; 1 - $K_{ж}=10\%$; 2 - $K_{ж}=5\%$; 3 - $K_{ж}=2,6\%$; 4 - $K_{ж}=1,6\%$

Увеличение начальной концентрации капель в струе приводит к росту числа Рейнольдса пленки. Эта тенденция имеет место для всех скоростей спутного потока, но абсолютное значение числа Рейнольдса пленки невелико и составляет $\text{Re}_{пл} < 6$, что соответствует ламинарному режиму течения гравитационных плёнок. Однако из-за воздействия спутного потока и возможных возмущений за счёт соударений капель с поверхностью плёнки режим её течения является типично волновым. Об этом говорят данные по измерению мгновенной толщины плёнки жидкости, показанные на рис. 3. Из рисунка следует, что даже при отсутствии внешнего потока (рис. 3, а) поверхность плёнки имеет волновой характер, а с увеличением скорости спутного потока амплитуда и скорость волн возрастают (рис. 3, б, в, г). На рис. 3, ж, з показано, что изменение высокочастотного участка спектра $\Phi \sim F^{-5}$. Согласно представлениям О.М. Филиппа [4], исследовавшего процессы волнообразования на глубокой воде, высокочастотный участок спектра имеет следующий вид: $\Phi(f) = C_1 g^2 F^{-5}$, где C_1 – эмпирическая константа, g – ускорение свободного падения, F – частота.

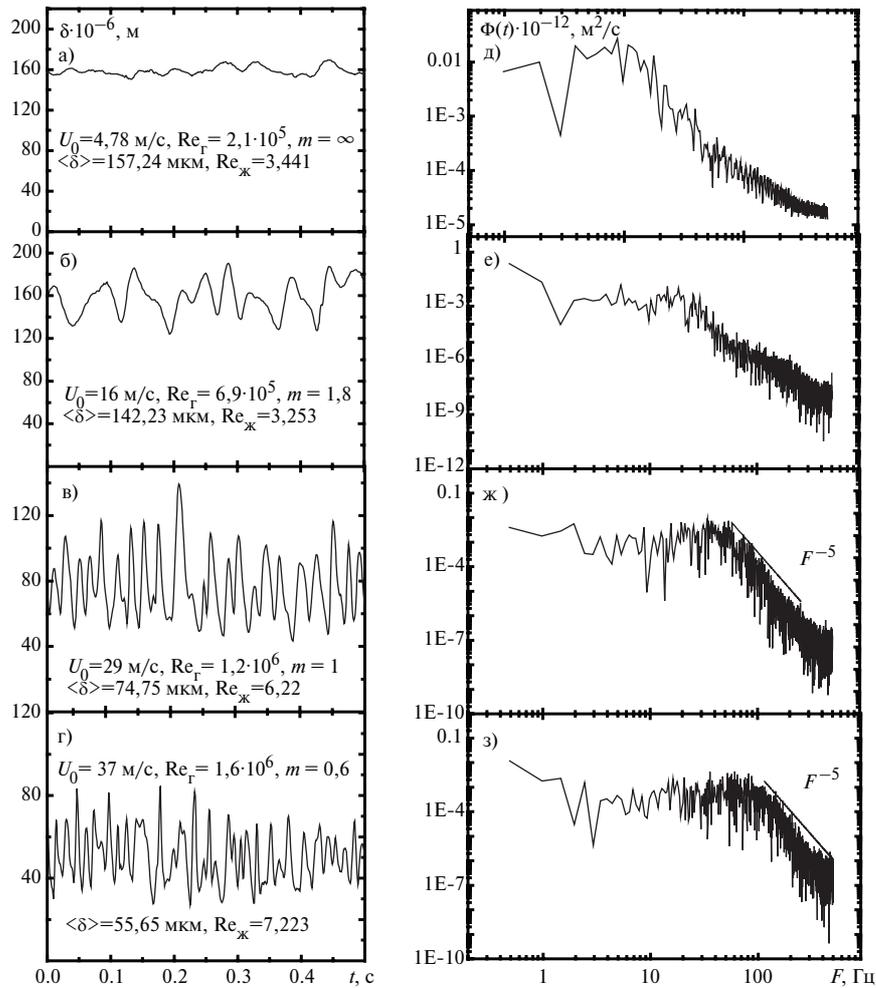


Рис. 3. Мгновенная толщина осаждаемой плёнки жидкости (а, б, в, г) и соответствующие частотные спектры (д, е, ж, з) на расстоянии $L = 644$ мм от места вдува и массовой концентрации жидкости в пристенной струе $K_{ж} = 0,1$

3.2. Скорость осаждения жидкой фазы из пристенных газок капельных струй

Результаты представлены в виде зависимости безразмерной скорости осаждения k_D^+ от безразмерного времени релаксации частиц τ^+ , определяемых по формулам:

$$k_D^+ = \frac{J_W}{v^*},$$

$$\tau^+ = \frac{d^2 v^* \rho_\Gamma \rho_{ж}}{18 \mu_\Gamma^2}.$$

Здесь $v^* = \sqrt{\tau_W / \rho}$ – динамическая скорость трения; d – диаметр частиц жидкости; ρ_Γ , $\rho_{ж}$ – плотности газа и жидкости; μ_Γ – динамическая вязкость газа. Динамическая скорость трения вычислялась из интегральных соотношений пограничного слоя [5]. Расчёт осаждения производился с учетом уменьшения объемной плотности за счет непрерывного выпадения капель на стенку по длине. Также учитывалось расширение струи и подмешивание в нее газа без капель из основного потока. Диаметр частиц принимался равным 200 мкм, согласно данным работы [6].

Результаты обработки данных по скорости осаждения показаны точками на рис. 4, а. Как видно, относительная скорость осаждения для развитого течения в трубах [7] не зависит от времени релаксации частиц ($k_D^+ = 0,17$). Для пристенных струй картина осаждения совершенно иная, и с ростом времени релаксации частиц скорость осаждения снижается и зависит от концентрации капель в пристенной струе, а также скорости спутного потока.

На рис. 4, б приводятся данные по влиянию спутного потока газа на скорость осаждения. Измерения проводились в наиболее удалённом от входа сечении $L = 640$ мм. Видно, что с увеличением скорости процесс осаждения интенсифицируется, при этом скорость осаждения становится выше, чем для стабилизированного течения двухфазных потоков в трубах. Зависимость носит куполообразный характер с максимумом $\tau^* \sim 20000 \div 30000$, при дальнейшем увеличении скорости спутного потока скорость осаждения стремится к значению 0,6–0,7 что значительно превышает приведённое в работе [7] значение k_D/v^* .

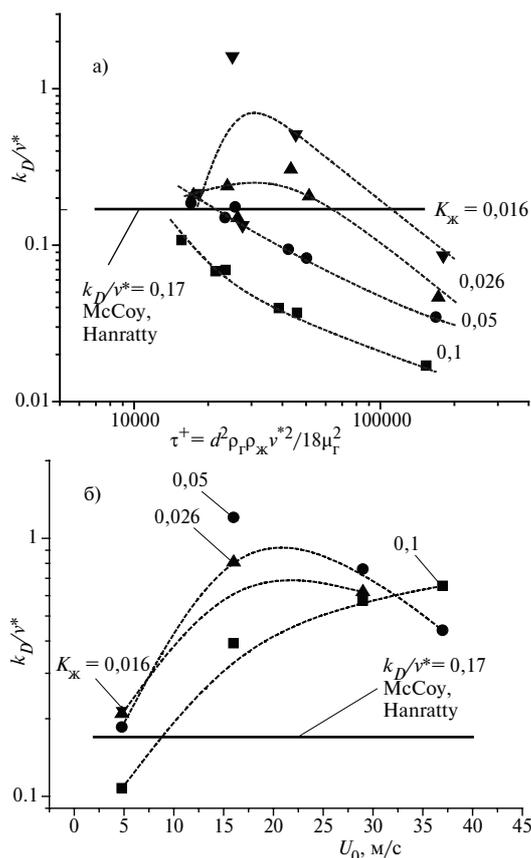


Рис. 4. Влияние на скорость осаждения частиц из пристенной двухфазной струи времени релаксации частиц жидкости (а) и скорости основного потока (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование осаждения капель жидкости из пристенных двухфазных затопленных и спутных струй на входном участке вертикального цилиндрического канала. Толщина образующейся пленки жидкости существенно зависит от скорости спутного потока, и с ее увеличением за счет усиления межфазного взаимодействия пленка утончается. Анализ изменений толщины пленки во времени показал, что в

условиях наших экспериментов наблюдался более ранний по сравнению с чисто гравитационным стеканием переход к волновому режиму течения.

Обобщение опытных данных по скорости осаждения выявило принципиальное отличие характера осаждения капель в наших условиях от характера осаждения из турбулентных потоков в трубах, что свидетельствует об особенностях структуры течения в пристенных струях, механизме миграции и осаждения капель из пристенных двухфазных струй.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов РФФИ 05-08-33586-а и РФФИ 05-08-3358-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. Теплозащитные свойства двухфазных газок капельных завес в вертикальном цилиндрическом канале // Изв. Акад. Наук. Энергетика. 2003. № 6. С. 135-143.
2. Репухов В.М. Эффективность неравновесной газопарожидкостной тепловой завесы // Пром. Теплотехника. 1986. 8. № 6. С. 11-19.
3. Терехов В.И., Серов А.Ф., Шаров К.А., Назаров А.Д. Экспериментальное исследование осаждения капель жидкости на стенки вертикального цилиндрического канала из пристенных газок капельных струй // ТВТ. 2003. Т.41. № 5. С.726-733.
4. Phillips O.M. On some properties of the spectrum of wind-generated ocean waves // J. Marine Research. 1958. V. 16. P. 231-245.
5. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
6. Волчков Э.П., Лебедев В.П., Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование влияния концентрации мелкодисперсных капель жидкости на эффективность газовой завесы // Сиб. физ.-техн. журн. (Изв. СО РАН). 1992. Вып.1. С. 28-32.
7. McCoy D.D. and Hanratty T.J. Rate of deposition of droplets in annular two-phase flow // Int. J. Multiphase Flow. 1977. V. 3. P. 319-331.