

УДК 532.529:536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА С ПРИСТЕННОЙ ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ СТРУЕЙ

В.И. ТЕРЕХОВ, К.А. ШАРОВ, Н.Е. ШИШКИН

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Экспериментально исследуется смешение горячего потока с коаксиальным газокапельным потоком в цилиндрическом канале. Получены распределения температуры адиабатической стенки и эффективности охлаждения по длине канала при различных значениях температуры основного потока и концентрации жидкости, а также распределения полей температур, влажности и концентрации пара в пристенной области. Температура основного потока в экспериментах составляла 50, 100 и 150 °С, массовая концентрация жидкости, распыленной в пристенной струе, имела значения 0, 5 и 10 %. Полученные данные позволяют оценить масштаб слоя смешения потоков и изменение влажности в сечениях канала.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы развития новой техники и повышения ее экономичности тесно связаны с увеличением уровня температур рабочих процессов в различных машинах и установках. В этой связи широкое распространение получили системы тепловой защиты стенок с использованием пристенных газовых тепловых завес. В настоящее время ведется поиск новых методов повышения эффективности работы систем завесного охлаждения. Одним из них является организация газожидкостных пристенных тепловых завес путем вдува в пограничный слой двухфазного охладителя.

Ранее было показано [1 – 4], что распыление капель жидкости в газовой завесе приводит к существенному улучшению защиты рабочей поверхности от воздействия высокотемпературных потоков. Однако использование двухфазных завес в реальных технических устройствах сдерживается отсутствием достаточно полной экспериментальной информации, на основе которой можно было бы создать надежные инженерные методы расчета тепловой эффективности пристенных газокапельных струй. Эта проблема особенно актуальна при описании локальных характеристик слоя смешения, поскольку опытные исследования профилей температур, концентраций жидкой и паровой фаз в пристенных газокапельных струях до сих пор не проводились.

В настоящей работе экспериментально изучается структура теплового слоя смешения горячего основного потока с коаксиальной пристенной газокапельной завесой. Опыты проводились на начальном участке трубы. Основное внимание уделялось изучению влияния температуры основного потока и концентрации капель в струе на характеристики теплового слоя смешения, а также на температуру адиабатической поверхности и эффективности газокапельной завесы. Для сравнительного анализа была проведена серия экспериментов при однофазном режиме течения, когда расходные соотношения сохранялись, а жидкие капли в пристенную струю не подавались.

2. ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты проводились в горизонтальном цилиндрическом канале диаметром $D_0 = 100$ мм и длиной $L = 1000$ мм (рис. 1). Для измерения температуры теплоизолированной стенки на внутренней поверхности канала по всей длине устанавливались хромель-копелевые термодатчики. При визуализационных исследованиях стенки были выполнены из прозрачного материала, причем канал мог состыковываться из секций различной длины, что позволяло производить наблюдения за развитием пристенной струи на различных расстояниях от входа. При измерении профилей температур канал также был разборным, а измерение распределения параметров в слое смешения производилось на срезах рабочих каналов различной длины.

На входе в канал располагалась щель высотой $s = 5$ мм, через которую подается охлаждающая струя. Для распыла жидкости в пристенную воздушную струю внутри тангенциальной щели были установлены равномерно по окружности 44 стальные трубки внутренним диаметром 0,5 мм. Вода поступала по трубкам внутрь кольцевой щели, быстро распылялась, образуя уже в начальном сечении рабочего канала равномерный кольцевой слой мелкодисперсной пыли. При таком способе распыления массовая концентрация воды в струе охлаждающего воздуха могла изменяться в пределах 0–50 %.

Проведенные оценки размеров частиц с помощью их осаждения на подложки показали, что при данном способе распыла частицы на входе в канал имеют диаметр порядка $d_s = 100 - 200$ мкм. Визуальные наблюдения также свидетельствовали об отсутствии крупных капель в потоке.

Поскольку в опытах рабочий канал располагался горизонтально, возник вопрос о возможном перетекании жидкой пленки, образующейся за счет взаимодействия капель со стенкой, в нижнюю часть цилиндрического канала. Чтобы этого не происходило, опыты проводились при достаточно большой скорости основного потока ($U_0 = 25 - 45$ м/с). При таких скоростях инерционные силы преобладали над гравитационными и течение газодисперсного кольцевого слоя было близким к осесимметричному.

Температура основного потока воздуха принимала значения $T_0 = 50, 100$ и 150 °С. Нагрев основного потока осуществлялся омическим нагревателем с максимальной мощностью 100 кВт. Воздух в установку подавался из центральной системы газоснабжения. Как показали измерения, влажность его была близка к нулевой. Температура охлаждающей струи воздуха и распыленной в ней воды была примерно одинакова и составляла $T_s \approx 18$ °С. При небольшом отличии температур воды и воздуха в струе за температуру охладителя принималась средняя температура смеси, которая находилась из баланса теплосодержаний как

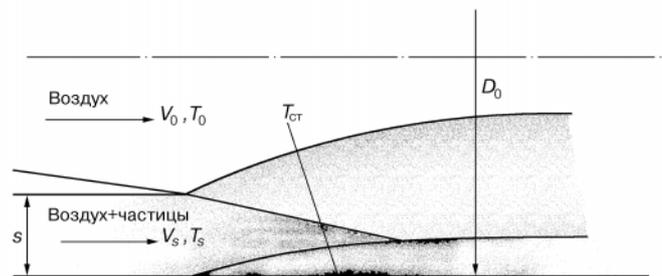


Рис. 1. Схема рабочего участка.

$$T_s = (G_B C_{p_B} T_B + G_{ж} C_{p_{ж}} T_{ж}) / (G_B + G_{ж}) C_{p_{см}},$$

Здесь G_B и $G_{ж}$ — массовые расходы воздуха и воды в пристенной струе, C_{p_B} и $C_{p_{ж}}$ — теплоемкости воздуха и воды до их смешения в струе, $C_{p_{см}} = C_{p_B} (1 - K_{ж}) + C_{p_{ж}} K_{ж}$ — теплоемкость смеси воздуха и воды в струе, $K_{ж}$ — начальная массовая концентрация воды в охлаждающем воздухе.

Параметр вдува определялся по среднерасходным величинам охладителя, в целом содержащим в себе газовую фазу и жидкость: $m = \rho_s U_s / \rho_0 U_0$, где $\rho_s U_s = (G_B + G_{ж}) / F_s$, F_s — площадь кольцевой щели. В опытах параметр вдува изменялся в пределах $m = 0,5 - 1$.

Программа экспериментальных исследований включала изучение тепловых характеристик процесса смешения при вариации концентрации жидких капель в пристенной струе. Массовая концентрация их составляла $K_{ж} = 0; 0,05$ и $0,1$.

Измерения профилей температур сухого и мокрого термометров по радиусу трубы проводились на расстоянии 40, 270 и 440 мм от среза щели. Датчик сухого термометра представляет собой медь-копелевую термопару из проводов диаметром 0,1 мм, спай которой прикрывался со стороны набегающего потока металлическим экраном диаметром около 1,5 мм. Температура мокрого термометра измерялась аналогичной термопарой, горячий спай которой был запечен в пористое органическое стекло.

Вблизи стенки термопара смачивалась каплями, содержащимися в пристенной струе, а в ядре потока перед измерением производилось ее опрыскивание. По результатам измерений температур сухого и мокрого термометров с использованием психрометрических таблиц [5] оценивалась величина локальной влажности парогазовой смеси. Термодатчики сухого и мокрого термометров предварительно тестировались путем сравнения результатов измерения с показаниями аспирационного психрометра.

Оценки показали, что относительная погрешность измерения температуры адиабатической стенки составила 1,8 %, а погрешность измерения температуры сухого и мокрого термометров равнялась соответственно 1,8 и 3,6 %. Относительная погрешность измерения влажности на внешней границе пограничного слоя и вблизи стенки достигала 25 %, что связано с особенностями психрометрического метода измерения. Как известно, при значениях влажности, близких к 0 и к 100 %, требуется повышенная точность в определении разности температур сухого и мокрого термометров. Относительная погрешность измерения влажности внутри пограничного слоя не превышала 5 %.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Температура адиабатической стенки и эффективность завесы

Результаты измерений температуры адиабатической стенки при вариации концентрации жидкой фазы на входе и температуры основного потока показаны на рис. 2. Опытные данные здесь получены при параметре вдува $m \approx 1$ и числе Рейнольдса основного потока $Re_0 = (1 - 2) \cdot 10^5$. Как видно, концентрация жидкости в струе и температура основного потока оказывают существенное влияние на характер распределения температуры стенки по длине канала. Увеличение содержания жидкой фазы при фиксированной температуре ядра потока (рис. 2, а) приводит к снижению температуры стенки преимущественно в средней части канала. В начальных сечениях канала температура стенки близка к температуре адиабатического испарения жидкости, поэтому величина концентрации слабо сказывается на $T_{ст}$ в конечных сечениях вследствие того, что жидкие капли успевают к этому времени полностью испариться,

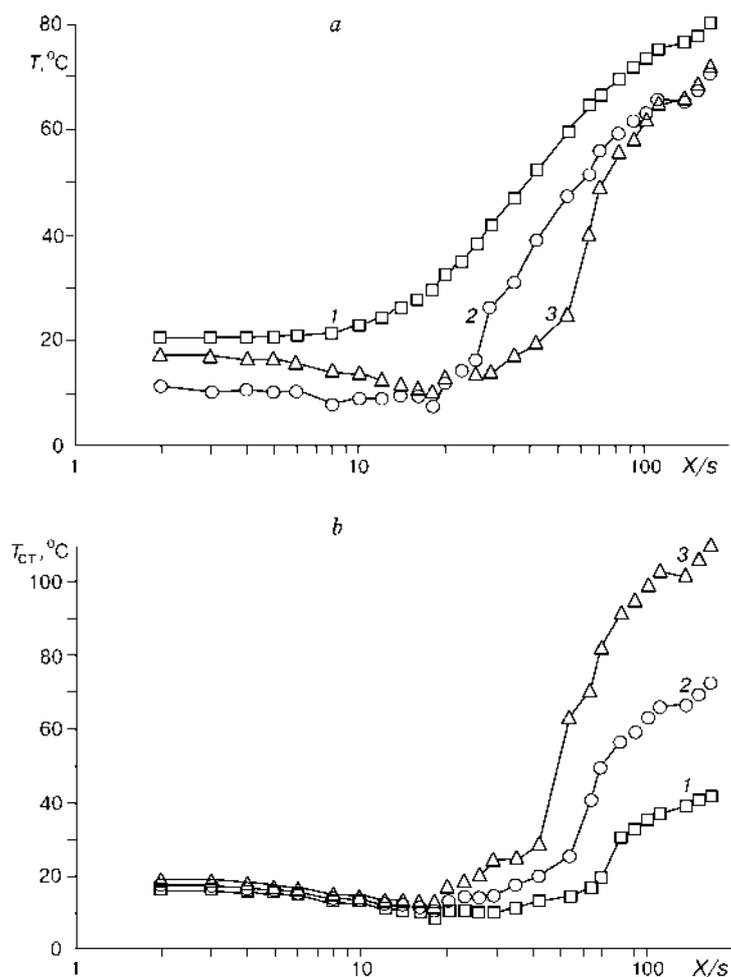


Рис. 2. Распределение температуры адиабатической стенки по длине цилиндрического канала при различных концентрации жидкости (а) и температуры основного потока (б).
 а: $T_0 = 100$ °С, $K_{ж} = 0$ (1), 0,05 (2), 0,1 (3); б: $G_0 = 224,2$, $G_s = 41,23$, $G_{ж} = 4,42$ г/с, $T_s = 18,1$, $T_{ж} = 17,7$ °С, $K_{ж} = 0,1$, $T_0 = 55$ (1), 100 (2), 150 °С (3).

опытные точки при различных концентрациях жидкости сближаются между собой.

При фиксированной концентрации частиц на входе при различных температурах ядра потока (рис. 2, б) значения температуры стенки в начальных сечениях ($x/s < 20$) практически совпадают между собой, а затем по мере удаления от входа приближаются к температуре основного потока.

На следующем этапе исследовалось влияние жидких капель на эффективность газожидкостной завесы. Параметр тепловой эффективности определялся таким же образом, как и для однофазного режима течения:

$$\Theta = (T_0 - T_{ct}) / (T_0 - T_s). \quad (1)$$

Изменение эффективности охлаждения адиабатической стенки при введении во вторичный поток капель жидкости показано на рис. 3. Можно заключить, что с возрастанием концентрации жидкой фазы эффективность охлаждения существенно увеличивается, причем ее значение превышает единицу. Данный эффект объясняется влиянием скрытой теплоты парообразования

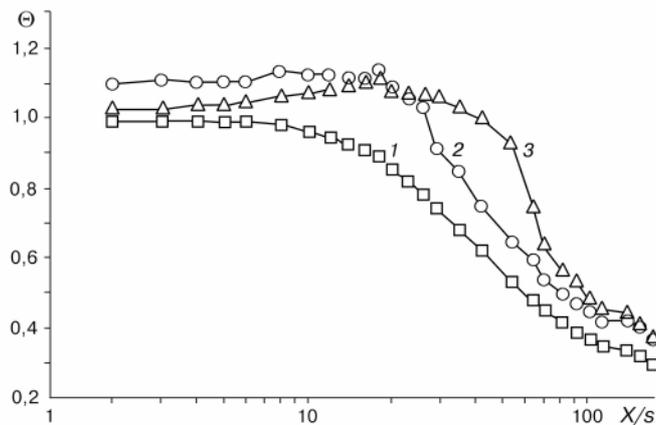


Рис. 3. Изменение тепловой эффективности пристенных газок капельных струй.
 $T_0 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $K_{ж} = 0(1), 0,05(2), 0,1(3)$.

жидких капель. Вследствие неравновесности процесса тепломассообмена между потоком и каплями и осаждения их на стенку, температура последней принимает значения, близкие к температуре адиабатического испарения. Соответственно температура стенки становится меньше температуры газок капельной смеси в щели: $T_{ст} < T_s$ и $\Theta > 1$.

Отметим еще один важный вывод, следующий из анализа рис. 3. Введение жидких капель в пристенную струю повышает величину эффективности в 2-3 раза по сравнению с таковой при однофазном течении. При этом массовый расход жидкой фазы составляет относительно небольшую величину от расхода основного потока. Более подробно этот вопрос обсуждается в работах [1, 2].

Влияние неізотермичности течения на параметр тепловой эффективности иллюстрирует рис. 4. Как видно, при фиксированных условиях в пристенной струе увеличение температуры основного потока приводит к заметному ухудшению ее защитных свойств. Это происходит, в отличие от однофазного течения, когда фактор неізотермичности практически не влияет на величину Θ [6], вследствие увеличения температуры адиабатического испарения и более бы-

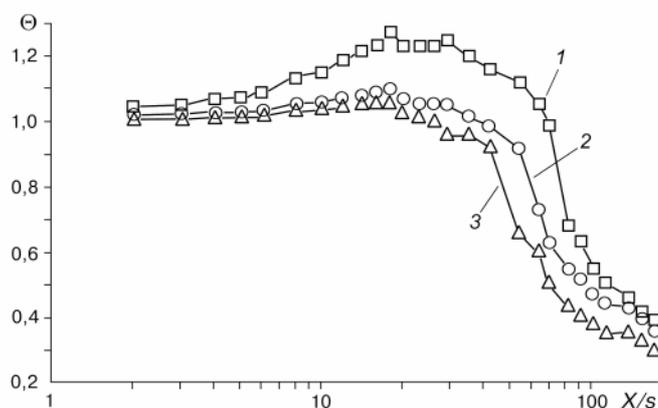


Рис. 4. Влияние неізотермичности течения на параметр тепловой эффективности.
 $T_0 = 55(1), 100(2), 150 \text{ }^\circ\text{C}(3)$; $K_{ж} = 0,1$.

строого протекания испарительных процессов в газокпельной системе.

3.2. Профили температур и влажности

Характер смешения коаксиальных потоков в канале изучался посредством измерений радиальных распределений температур газа и адиабатического испарения. Перед основной серией экспериментов были проведены опыты по смешению в канале однофазных потоков.

Результаты измерений температур сухого и мокрого термометров показаны на рис. 5. Величина влажности, найденная по этим измерениям, оказалась близкой к нулю ($\varphi \rightarrow 0$) по всему сечению слоя смешения.

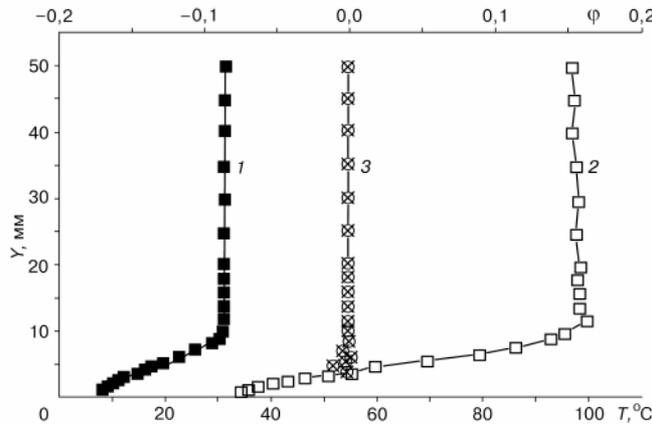


Рис. 5. Профили температур сухого (1), мокрого (2) термометра и влажности воздуха (3) при $L = 40$ мм, $K_x = 0$.

Профили температур как сухого, так и мокрого термометра в относительном виде описываются кривой Вигхардта [7] (рис. 6):

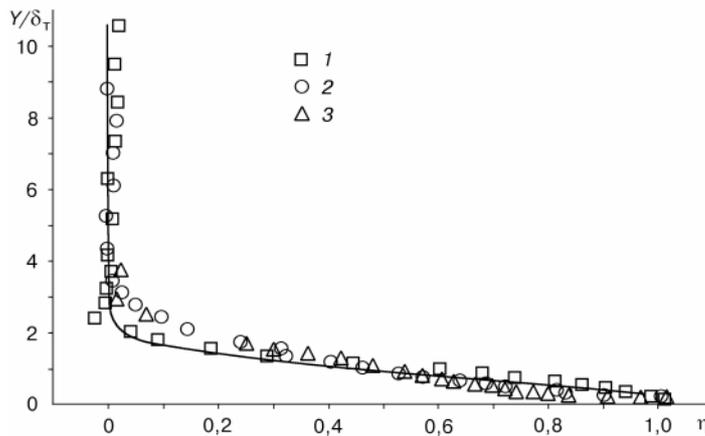


Рис. 6. Профили температур при нулевой концентрации жидкости. $L = 40$ (1), 240 (2), 440 мм (3); $K_x = 0$.

$$\eta = (T - T_0) / (T_w - T_0) = \exp\left[-0,748(y / \delta_T^*)^{3/6}\right], \quad (2)$$

где $\delta_T^* = \int_0^\infty (1 - \eta) dy$ — тепловой интегральный масштаб слоя смешения.

Аналогичные измерения были проведены для двухфазного режима течения. В качестве примера на рис. 7 представлены профили температур и влаж-

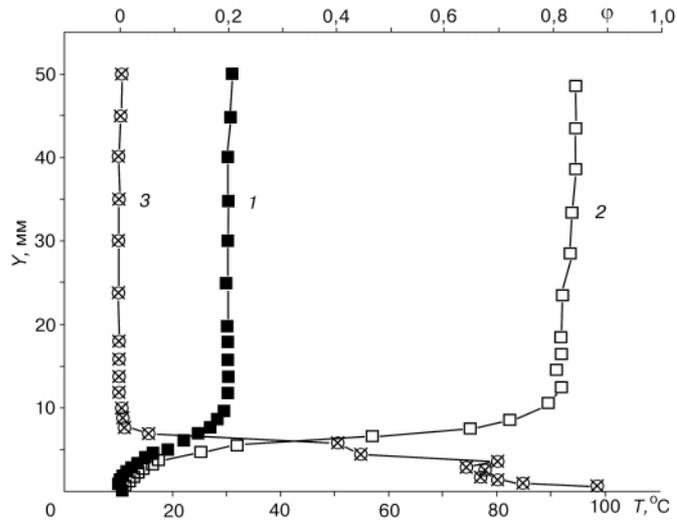


Рис. 7. Профили температур сухого (1), мокрого (2) термометра и влажности воздуха (3) для двухфазного режима течения.

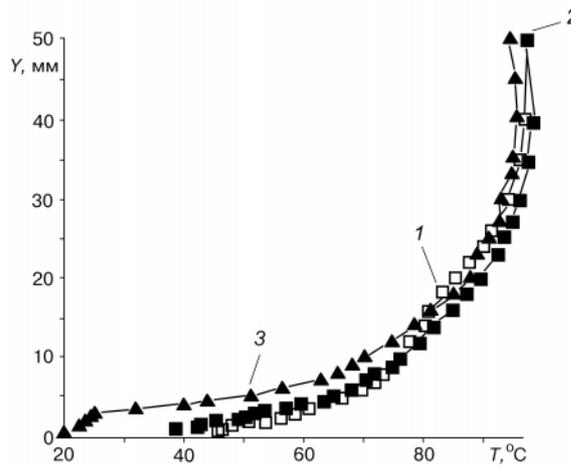


Рис. 8. Профили температур газа в пограничном слое при различной концентрации жидкой фазы.

$L = 440$ мм, $T_0 = 100$ °С, $K_{ж} = 0$ (1), 0,05 (2), 0,1 (3).

ности воздуха при $K_{ж} = 0,1$ и расстоянии от входа $L = 40$ мм. В этом случае влажность воздуха по толщине пограничного слоя изменялась от нуля в ядре потока до 100 % в окрестности стенки.

Влияние концентрации жидкой фазы в пристенной струе на распределение температуры газа в слое смешения демонстрируется на рис. 8. Как видно, наибольшее отличие в профилях температур имеет место в пристенной области течения. Существенно отличаются при этом и температуры на стенке, причем с ростом концентрации капель их значения снижаются. Как следует из рис. 8, наличие жидкой фазы практически не сказывается на распределении температур во внешней части пограничного слоя. Последнее обусловлено отсутствием в данной области слоя смешения жидких частиц и соответственно малым содержанием паровой фазы. Подтверждением этому служат результаты измерений относительной влажности парогазовой смеси в пограничном слое (рис. 9, *a*). Центральную часть канала занимает течение практически сухого воздуха. В пристенной же его части ($Y < 7$ мм) происходит достаточно быстрое нарастание влажности воздуха вплоть до насыщения на поверхности канала.

Следует отметить, что по мере развития пограничного слоя по течению толщина слоя повышенной влажности уменьшается. Это обусловлено интенсивными процессами испарения во внешней части пограничного слоя, где уровень температур достаточно высок, и расширением высокотемпературной зоны вниз по потоку.

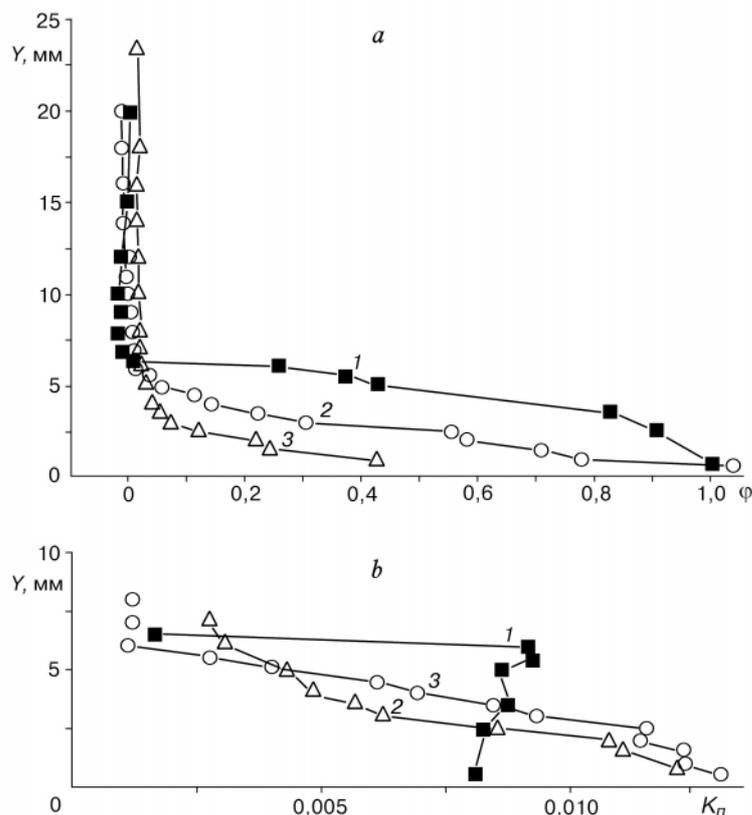


Рис. 9. Распределение относительной влажности по сечению канала (*a*) и массовых концентраций пара в пристенной области (*b*).

$K_{ж} = 0,05$, $T_0 = 100$ °C, $L = 40$ (1), 240 (2), 440 мм (3).

По данным рис. 9, *a* и профилям температур в экспериментах оценивалось распределение массовой концентрации пара в пограничном слое. Опытные данные о массовых концентрациях в слое смешения демонстрируются на рис. 9, *b* для различных расстояний от входа. В начальных сечениях распределение K_{II} подобно ударному профилю, что обусловлено высоким содержанием жидкой фазы в этой зоне. В последующих сечениях профили принимают струйный характер, но толщина концентрационного слоя при этом меньше температурного (см. рис. 8). Отмеченное несоответствие масштабов пограничных слоев требует более детального изучения совместно с измерением концентрации жидкой фазы.

Обобщение опытных данных по температурным профилям парогазовой фазы демонстрируется на рис. 10. Профили температур при различных концентрациях жидкой фазы и температуры в ядре потока, а также на различных

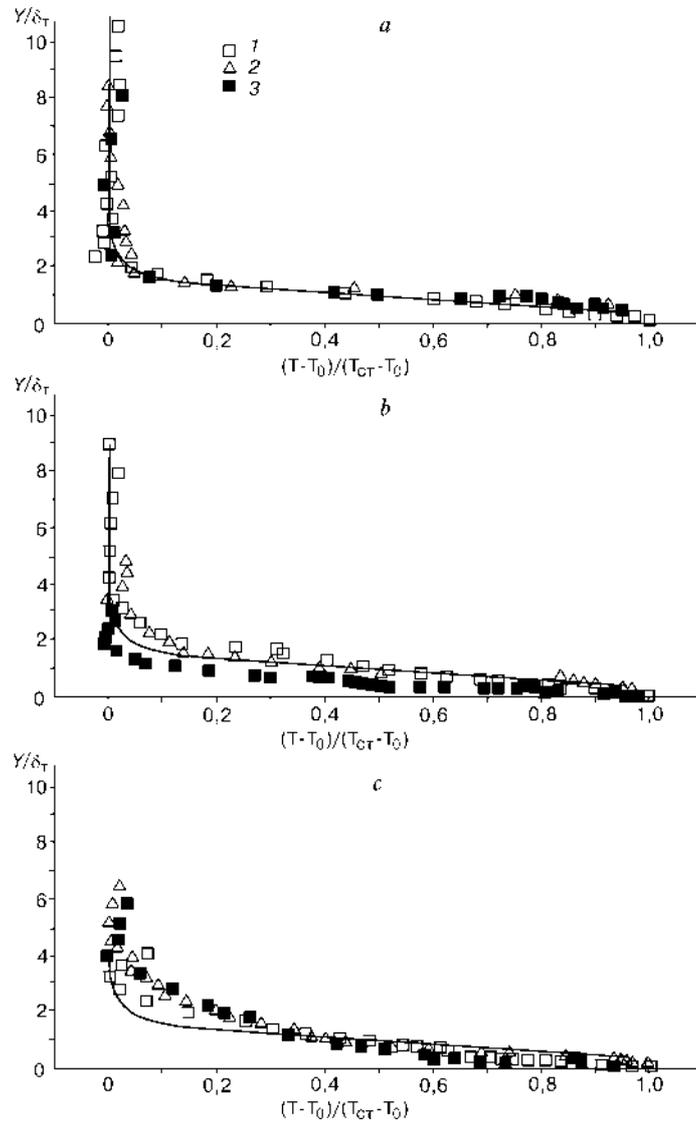


Рис. 10. Обработка опытных данных профилей температур при расстояниях $L = 40$ мм (*a*), 240 мм (*b*), 440 мм (*c*).

$$K_{ж} = 0 (1), 0,05 (2), 0,1 (3); \text{ линия: } (T - T_0)/(T_{CT} - T_0) = \exp[-0,768 (y/\delta_T^*)^{13/6}].$$

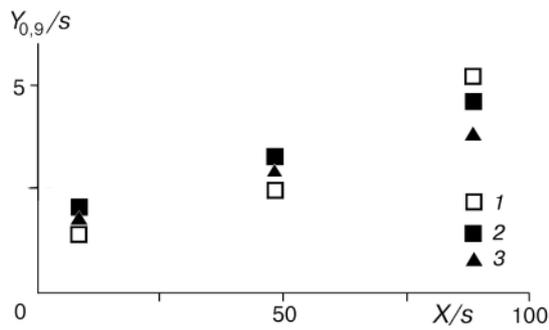


Рис. 11. Закон расширения струй по длине канала при $K_{ж} = 0$ (1), 0,05 (2), 0,1 (3).

удалениях от входа представлены в типичной струйной обработке подобно рис. 7. Линия на этом графике соответствует кривой Вигхардта (2). Несмотря на имеющийся разброс опытных данных, для описания распределения температур в двухфазном пограничном слое

можно в первом приближении воспользоваться струйными закономерностями.

Одним из важных параметров, характеризующих процесс смешения струйных потоков, является закон расширения струй по длине. Картина влияния концентрации жидкой фазы на поперечный масштаб слоя смешения приводится на рис. 11. В качестве условного масштаба здесь принята координата $Y_{0,9}$, где температура равна $T = 0,9(T_0 - T_w)$.

Расширение однофазной струи, как это следует из рис. 11, близко к линейному. Наличие второй фазы в начальных сечениях канала практически не сказывается на ширине слоя смешения. Однако по мере удаления от входа просматривается тенденция к сокращению поперечного масштаба струи, что в целом согласуется с выводами теории турбулентных двухфазных струй [7].

Таким образом, экспериментальное исследование смешения потока с двухфазной газочапельной спутной струей в цилиндрическом канале показало существенное влияние концентрации жидкости на температуру адиабатической поверхности и распределение температур и концентраций пара в пограничном слое. При этом эффективность двухфазной завесы значительно выше таковой при однофазном течении и на начальных участках канала за счет интенсивных испарительных процессов может превышать единицу ($\Theta > 1$). Наличие жидкой фазы в распределениях температур по сечению струи сказывается лишь в пристенной области, а профили температур в первом приближении обобщаются известными струйными закономерностями. В то же время дисперсная фаза вызывает сокращение толщины слоя смешения. К настоящему времени остается открытым вопрос о подобии процессов теплообмена слоев. Для его решения необходимо раздельное измерение температур и концентраций жидкой, паровой и газовой фаз.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 98-02-17898).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Terekhov V.I., Sharov K.A., Shishkin N.E., Lebedev V.P. Transpiration cooling of surface by near-wall two-phase co-current jet // Proc. Intern. Symp. on the Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation. — Moscow, 1997. — P. 387 – 390.
3. Репухов В.М., Недужко А.И. Тепловая защита стенки вдувом двухфазного газожидкостного охладителя // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1988. — № 8.
4. Репухов В.М., Недужко А.И. Защитные свойства многокомпонентных газопарожидкостных тепловых завес // Тр. I Российской национальной конф. по теплообмену. Т. VI. — М.: МЭИ, 1994. — С. 195 – 201.
5. Беспалов Д.П., Козлов В.Н., Матвеев Л.Т. Психрометрические таблицы. Л.: Гидрометеоздат, 1972. — 120 с.
6. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. — 240 с.
7. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А. и др. Теория турбулентных струй. — М.: Наука, 1984. — 718 с.

Статья поступила в редакцию 22 октября 1998 г.