УДК 532.529:536.24

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Терехов В.И.[1], Халатов А.А.[2], Шишкин Н.Е.[1]

[1]*Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2]*Институт технической теплофизики НАНУ, Киев, Украина*

Работа выполнена в рамках Программы ОЭММПУ РАН (проект 2.10.2)
и гранта РФФИ-НАН Украины (проект 14-08-90405)

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена обзору методов интенсификации пленочного охлаждения рабочих поверхностей проточных каналов современных энергоустановок. Исследуются различные способы и особенности охлаждения рабочих поверхностей пристенными струями. Рассматриваются варианты закрутки газовой завесы при вдуве как по нормали к оси, так и при соосной подаче охлаждающего потока. Представлены данные по влиянию степени закрутки, соотношения плотностей обоих потоков, а также режимов течения на эффективность пристенных завес. Анализируются результаты по эффективности двухфазного газокапельного охлаждения и пределы её изменения.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие различных энергетических устройств характеризуется повышением уровня температуры рабочих процессов. Для защиты рабочей поверхности от высокоэнтальпийных потоков широко используется гидродинамическое охлаждение [1,2].

Закрученные пристенные струи, кроме защиты рабочей поверхности, играют важную роль для управления основным потоком, стабилизации течения в нем. Наглядными примерами такого воздействия, которое широко используется на практике, являются плазмотроны с вихревой стабилизацией дуги [3, 4], вихревые горелки, форсунки и камеры сгорания для устойчивого горения [5,6,7]. Перспективно использование закрученных потоков для охлаждения лопаток газовых турбин [8], в предсопловых объемах ракетных двигателей, в циклонных аппаратах и других энергетических установках.

Появляются работы [9,10], в которых завеса организуется из сферических выемок, траншей, что обеспечивает эффективную защиту. Перспективным способом может быть подача пристенных газожидкостных струй, которая приводит к существенному улучшению защитных свойств газовых завес [11-17]. Это происходит за счет дополнительного охлаждения при испарения жидких капель. Картина взаимодействия двухфазной газокапельной струи со спутным потоком и поверхностью канала весьма сложная. Процессы тепло - и массообмена между частицами и газовым потоком определяются большим числом факторов. Среди них основными являются концентрация частиц и их дисперсный состав, аэродинамическая структура течения, а также процессы коагуляции и осаждения частиц на стенку с образованием на поверхности нестационарных волновых пленок жидкой фазы.

СПОСОБЫ ЗАКРУТКИ ПРИСТЕННОЙ СТРУИ. АЭРОДИНАМИКА ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ

Из всех возможных способов, рассматривалось три варианта закрутки и подвода периферийного потока на вход исследуемого канала. В первом случае вторичный поток поступал в цилиндр по касательной к поверхности канала через прямоугольные пазы высотой 2 мм и шириной 6 мм, как это показано на рис. 1a. Степень закрутки потока, его вращательный момент, варьировались количеством пазов – 2, 6, 17.

Во втором варианте (схема организации течения и вид завихрителя приведены на рис. 1b) вдуваемый газ сначала закручивался таким же способом, как и в первом случае, но далее поступал в исследуемый канал через коаксиальное сопло. Высота кольцевого зазора на выходе составляла s = 2.0 мм, толщина кромки козырька щели ~ 0.1 мм. Завихритель был изготовлен в виде цилинд-рического кольца, на его

© Терехов В.И., Халатов А.А., Шишкин Н.Е.

плоском торце имелись косые пазы. Угол между направлением паза и радиусом составлял 70^0. Количество пазов на завихрителе в опытах изменялось (24, 12, 4), чтобы достигнуть различную степень закрутки вторичного потока в щели, их ширина составляла 0.5 мм и 1 мм.

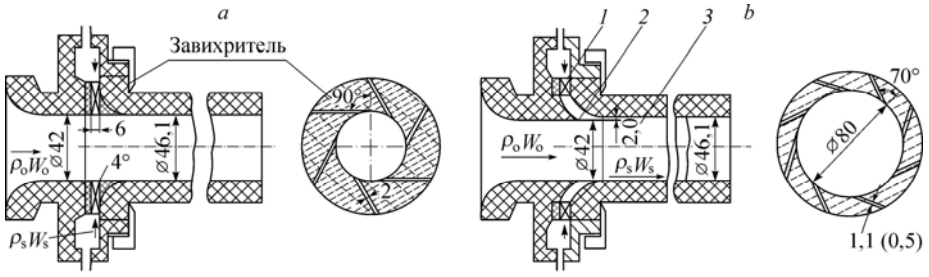

Рис. 1 Схемы подвода периферийного потока в исследуемый канал по первому а) и второму b) вариантам (размеры даны в мм).

При втором способе закрутки вдуваемого газа (рис. 1b) параметры потока на выходе из коаксиального сопла остаются неопределенными. Изучение структуры течения на выходе показало, что по окружности щели образуются вихри Гёрт-лера-Тэйлора [18]. Параметры течения изменяются, как это демонстрируется на рис. 2. В присутствии вихревой структуры течения невозможно повысить интенсивность закрутки потока, несмотря на увеличение начального момента (с уменьшением количества пазов в закручивающей вставке).

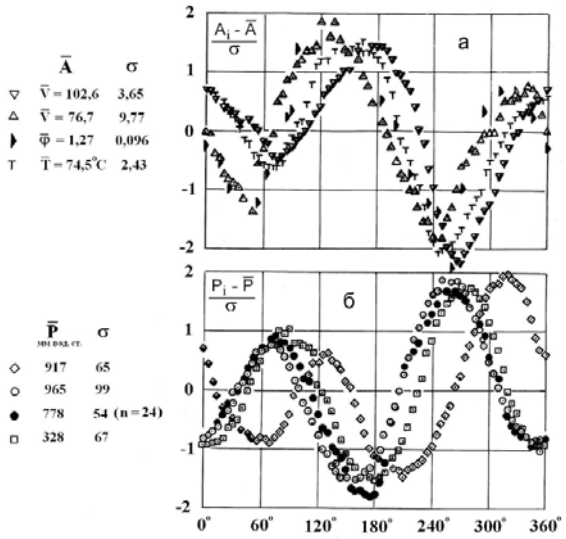

Рис. 2 Распределение параметров закрученного потока по окружности щели. а) обобщенный вид безразмерных значений скорости и температуры, б) относительное изменение давления.

Чтобы устраниться от вторичных течений и иметь возможность устанавливать произвольную степень закрутки к началу взаимодействия двух потоков, в третьем варианте закрутка осуществлялась на выходе вторичного потока в канал, как схематически изображено на рис. 3, а вид завихрителя показан на фотографии справа. Направляющие спиральные ребра при высоте щели s = 2.0 мм имели угол выхода относительно осевого направления, равный $\varphi_s = 0^0$, 58^0, 74^0 и 86^0, количество ребер, соответственно – 8, 24, 12 и 6.

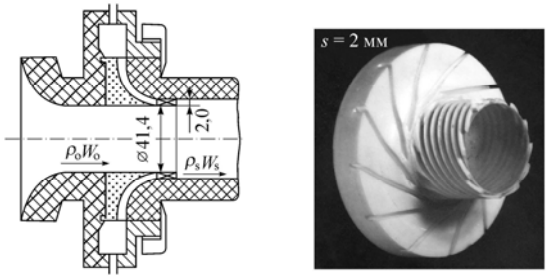

Рис. 3 Схема закрутки вдуваемого газа на выходе из тангенциальной щели (III вариант). Справа фото закручивающей вставки.

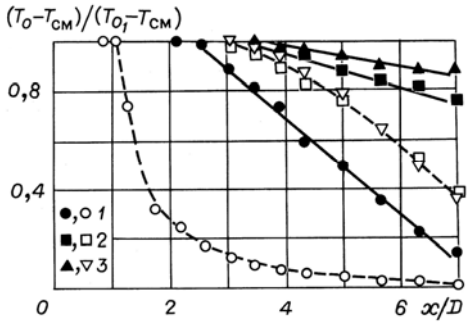

Рис. 4 Влияние закрутки периферийного потока на распределение температуры вдоль оси канала. $\varphi_s = 0^0$ (1), 58^0 (2), 74^0 (3); m = 0,5 – темные точки, m = 5 – светлые.

Изучение параметров течения на оси канала дает наглядное представление о степени и характере перемешивания спутных потоков, в частности, о грани-

це потенциального ядра, которая, согласно рис. 4, начинается через 1 – 3 калибра. Закрутка периферийного потока (опытные точки 2 и 3) увеличивает длину начального участка и значительно замедляет снижение температуры вниз по потоку.

Визуализация картины течения в непосредственной близости от стенки показала, что при углах закрутки газовой завесы $\varphi_s = 58^0$ и 74^0 движение газа в канале является осесимметричным. По фотографиям растекания вязкой жидкости на стенке, определялись линии тока газа вблизи поверхности канала. Тангенс угла наклона касательной, проведенной к линии тока, давал отношение вращательной к осевой компонент скорости вблизи стенки. Изменение локальной степени закрутки потока по длине канала показано на рис. 5 в зависимости от относительной массовой скорости вдува и начального угла закрутки. Видно, что, чем больше параметр вдува m, а также начальный угол φ_s , тем более высокой сохраняется величина $(V_\varphi/V_x)_{ст}$ по длине канала.

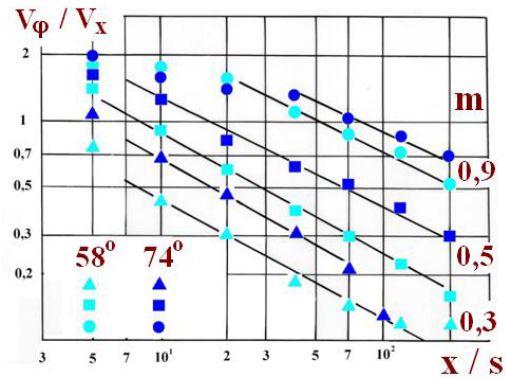

Рис. 5 Интенсивность закрутки потока вблизи поверхности канала

Вид распределения циркуляции по радиусу канала показал возможность представления результатов измерения в координатах для струйного пограничного слоя. На рис. 6а нанесены опытные точки, полученные в экспериментах с закрученным периферийным и незакрученным осевым потоком при $x / D_к$ = 0.036; 0.24; 0.85…0.9 [19, 20, 21], при течении закрученного перифе-рийного и отсутствии осевого потока [22], а также по измерениям в вихревой трубе [23]. Как следует из графика, профиль циркуляции имеет одинаковую форму в различных условиях закрученного течения.

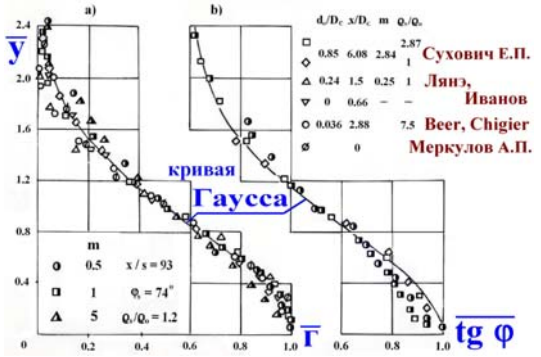

Рис. 6 Распределение циркуляции и угла закрутки в струйном пограничном слое

Интенсивность закрутки потока во многих работах определяется по локальному значению V_φ/V_x вблизи стенки канала. Так как профили tg φ имеют одинаковый вид в разных сечениях, то и локальный и интегральный параметры закрутки можно однозначно связать между собой. Для полностью закрученных потоков эмпирическая зависимость между $tg\varphi_{ст}$ и параметром закрутки Φ^* показана в работе [24].

УПРАВЛЕНИЕ ЗАЩИТОЙ ЗАКРУЧЕННЫМ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Сопоставление эффективности завесы при всех трех способах подвода закрученного потока в рабочий участок сделано следующим способом. На рис. 7 представлены данные опытов либо с одинаковым соотношением расходов $G_s/G_0 \approx 0{,}1$ и интегральной интенсивностью закрутки потока на выходе Φ_*, либо с близким углом φ_s. Эффективность охлаждения рассматривалась в зависимости от продольной координаты $x/D_к$, что имеет более наглядный вид в проводимом сопоставлении, чем в зависимости от x/s. Данные на рис. 7 соответствуют способам закрутки:1- рис. 1а, 2- рис. 1б и 3 - рис. 3, соответственно.

Как видно из приведенного графика (рис. 7), наилучшие качества защиты проявляет вторичный поток, поступающий через тангенциальную кольцевую щель, если закрутку завесы осуществлять на выходе из сопла. Несколько ниже, на 5 ÷ 10 %, эффективность завесы в случае, когда завихритель вынесен вовнутрь подводящей системы, однако темп снижения θ в обоих случаях практически одинаков.

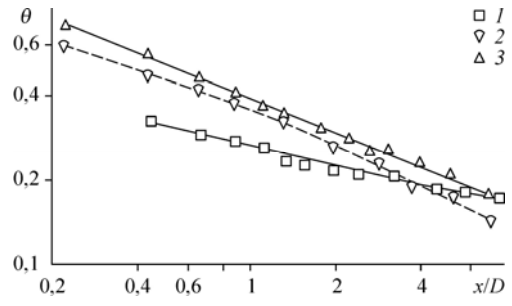

Рис. 7 Охлаждение поверхности канала закрученным потоком воздухом при различных способах его организации.

Что касается вдува в цилиндрический канал через касательные к боковой поверхности отверстия, то эффективность такой завесы вблизи начального сечения была примерно на 40 % ниже относительно θ при тангенциальном вдуве. Однако вниз по течению изменение температуры стенки замедляется, значение θ при всех способах выравнивается. По-видимому, за местом вдува движение в канале быстро стабилизируется, течение по характеру становится близким к полностью установившемуся закрученному потоку в трубе.

Эффективность тепловой завесы при неболь-ших параметрах вдува m < 1 и углах её закрутки φ_s = 58 ÷ 74° уменьшалась на близких расстояниях от щели (рис. 8, m = 0,5). При удалении от щели вниз по потоку, температуры стенки при закрученных и незакрученных завесах сближаются.

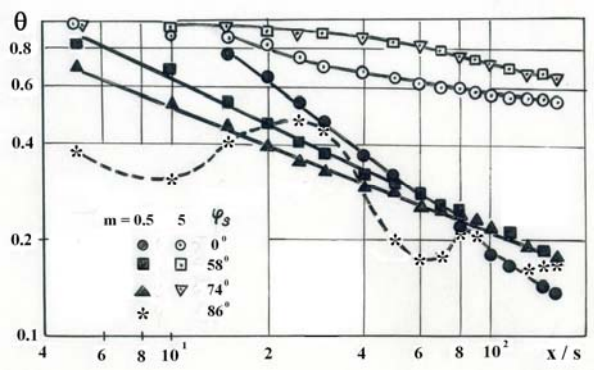

Рис. 8 Влияние угла закрутки потока и параметра вдува на эффективность завесы.

При больших расходах вторичного потока, в опытах это было *(m* > 2), закрутка периферийного газа способствовала увеличению эффективности тепловой защиты на всех расстояниях от входа (рис. 8, m = 5). Следует отметить, что изменение угла закрутки от 58^0 до 74^0 практически не изменяло распределение θ по длине канала. По-видимому, в указанном диапазоне значений φ_s организуется оптимальный режим закрученного течения, когда достигается наибольшая эффективность тепловой завесы.

При наиболее интенсивной закрутке периферийного потока ($\varphi_s = 86^0$) были выявлены следующие особенности аэродинамики и тепло-массообмена в рабочем участке.

Осуществляется волнообразное изменение безразмерной температуры стенки (рис. 8) и концентрации инородного вдуваемого газа по длине канала.

Визуализация пристенного течения (рис. 9) показала несимметричную картину распределения линий тока у стенки и слабую степень закрутки газа, движущегося вблизи поверхности. Скорость растекания вязкой жидкости, а значит и скорость газового потока вблизи поверхности канала была намного ниже, чем при меньших значениях φ_s.

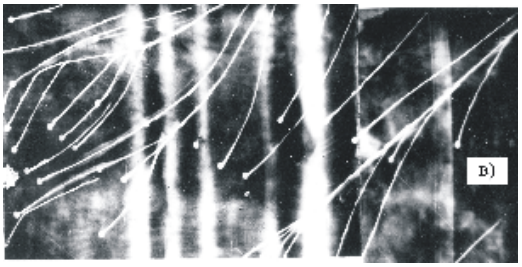

Рис. 9 Картина линий тока вблизи поверхности канала, $\varphi_s = 86^0$.

Аналогичное волнообразное изменение температуры стенки (рис. 8) наблюдалось и при наиболее интенсивной закрутке по схеме рис. 1а, когда вторичный поток поступал в канал через 2 прямоугольных паза.

На основании изложенных особенностей течения в канале при наиболее интенсивной закрутке пристенной струи можно предположить следующее. Закрученный поток на входе рабочего участка «отходил» от ограничивающей поверхности с образованием коаксиального вихревого цилиндра. Вихревое движение обладало некоторой прецессией вокруг оси, что определяло несимметрию в распределении параметров вдоль окружности в сечении канала.

Как известно [1,2], в отсутствии закрутки потоков неизотермичность течения и инородный вдув слабо влияют на эффективность газовой завесы в адиабатических условиях. Однако, при организации закрученного заградительного охлаждения неизотермичность потоков может играть важную роль. Влияние соотношения ρ_s / ρ_o на эффективность закрученной завесы исследовалось в опытах при вдуве в основной поток воздуха аргона (ρ_s / ρ_o = 1,36) и гелия (ρ_s / ρ_o = 0,13), а также при вдуве воздуха в основной поток гелия (ρ_s / ρ_o = 7,5).

Распределение весовой концентрации инородных газов на стенке трубы при $W_s / W_o < 1$ показано на рис. 10. Здесь сопоставляются эксперименты при близких значениях относительной скорости вдува, а также нанесены опытные данные об эффективности тепловой завесы. Как видно из графика, закрутка периферийного потока уменьшает эффективность завесы при вдуве как более легкого (ρ_s / ρ_o = 0.13), так и более тяжелого (ρ_s / ρ_o = 1.2 и 1.36) газа.

Однако при большем отношении плотностей ρ_s / ρ_o = 7.5 влияние закрутки исчезает, смешение коаксиальных потоков существенно замедляется.

Исследование вдува воздуха в гелиевый основной поток показало ламинарный характер процесса. Поэтому распределение весовой концентрации воздуха представлено на рис. 11 в зависимости от комплекса для ламинарного режима течения, который имеет вид:

$$K_{lam.} = \mathrm{Re}_X / [\mathrm{Re}^2_S\,(\mu_S / \mu_O)^2\,(1 - s / D_K)]^2 .$$

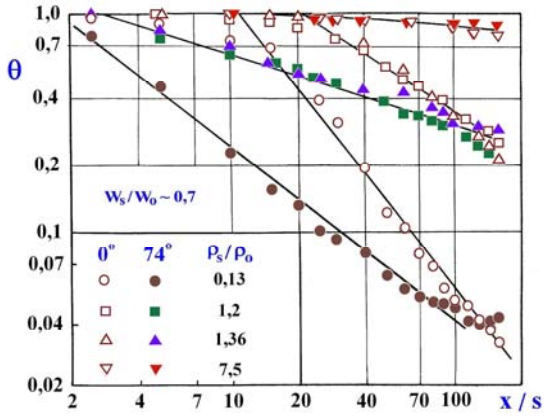

Рис. 10 Распределение весовой концентрации на стенке цилиндрического канала при вдуве газов различной плотности.

Здесь же нанесена расчетная кривая для эффективности ламинарной газовой завесы [1]

$$\theta = (\,1 + 10.6\,K_l\,)^{-0.5} \qquad (1)$$

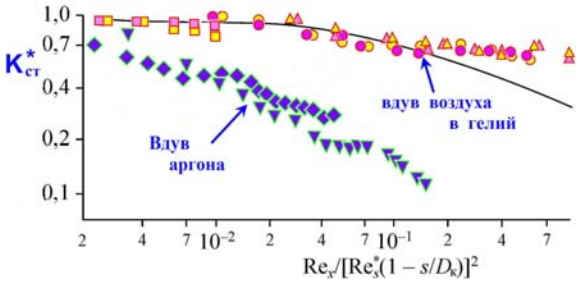

Рис. 11 Распределение весовой концентра-ции воздуха и аргона на стенке канала в обобщен-ных координатах для лами-нарного режима течения. струйного смешения.

Кроме опытов с гелиевым основным потоком на рис. 11 нанесены эксперименты с вдувом аргона. Как видно, здесь влияние центробежных сил оказалось недостаточным, чтобы осуществить ламинаризацию процессов смешения, когда эффективность газовой завесы описывается кривой (1).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ ЖИДКИХ КАПЕЛЬ

Результаты экспериментальных измерений, для проводимого здесь анализа, были получены на установке, подробно описанной в работах [10,11]. Рабочий участок из стеклотекстолита представлял собой цилиндрический канал диаметром D = 100 мм и длиной L ~ 1000 мм. Высота кольцевой щели, через которую подавался охлажающий газо-жидкостный поток, составляла 5 мм. Измерения температуры стенки и температуры смешения потоков на входе осуществлялось с помощью хромель-копелевых термопар диаметром 0.2 мм.

Температура основного потока была в диапазоне до 200 ^{0}C, в охлаждающей струе воздуха и водяных капель ~ 18 ^{0}C. Скорость основного потока на входе рабочего участка составляла u_o = 30–65м/с, что соответствовало числу Рейнольдсам $\mathrm{Re}_o = u_o D_o/\upsilon = (1\div2)\cdot10^5$. Диапазон параметра вдува находился в пределах $m = \rho_s u_s / \rho_o u_o$ = 0,6 ÷ 1.6. Весовая концентрация капелек воды в пристенной струе изменялась в пределах K = 0 ÷ 0.14.

Осаждение жидких капель на стенке канала, вызвано высокой концентрацией капель в обтекающем поверхность потоке. Количество осажденной в виде пленки жидкости можно проанализировать по рис. 12, где опытные данные приведены в относительном виде g/g_s – доля от всего удельного расхода жидкой фазы, подаваемой в распыленном виде через кольцевую щель на входе в канал ($g = G_ж / \rho_ж \pi D_к$ – плотность орошения).

Результаты рис. 12 получены в квазиизотермических условиях $T_s \approx T_o$. Очевидно, что при иных температурных условиях из-за различных условий испарения капельной фазы количество осажденной жидкости будет отличаться, но основные тенденции поведения жидкой пленки будут аналогичными.

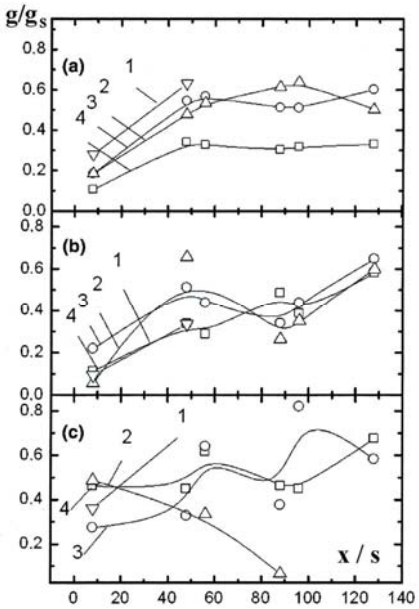

Рис. 12 Относительная скорость орошения пленки, осаждаемой на стенке канала.

Параметр вдува: (a) – m = 1,8; (b) – 1,0; (c) – 0,6; $T_o \approx T_s \approx 20^oC$; точки:1 – $K_ж$ = 1,6; 2 – 2,6;3 – 5; 4 – 10%.

Как следует из рис. 12, количество осаждаемой жидкой фазы может изменяться в широких пределах $g / g_s = 0 \div 0.6$, при этом на образование жидкой пленки влияет как параметр вдува, так и концентрация жидкости.

Результаты исследований показали, что на стенке осаждается большая доля капель и образование жидкой пленки может существенно изменить процессы тепломассопереноса вблизи поверхности.

Опыты по эффективности газокапельной струи проводились при различной концентрации жидких капель в пристенной струе, разном количестве жидкости, осажденной на поверхности.

На рис. 13 показано, как растет эффективность на стенке с увеличением концентрации жидкой фазы. Как видно, при значениях концентрации жидких капель $K_ж \geq 6$ % величина тепловой эффективности близка к единице ($\theta \rightarrow 1$) на достаточно больших расстояниях от входа в канал и дальнейшее увеличение концентрации жидкости во вдуваемом потоке не дает заметного изменения эффективности.

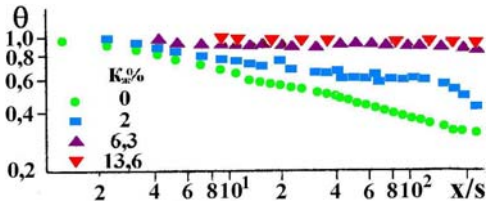

Рис. 13 Эффективность газокапельной завесы

Ранее в [25], с использованием значения концентрацию пара k_v, было получено выражение для θ на стенке в виде

$$\theta = \frac{c_{pa}T_o - T_w[(1-K)c_{pas} + c_{pv}k_v + (K-k_v)(c_l - r/T_w)]}{c_{pa}T_o - [(1-K)c_{pas}T_{a,s} + K(c_l - r/T_{l,s})T_l]} \qquad (2)$$

При полном испарении жидкости величина k_v достигает известного предела K, тогда выражение для эффективности воздухопаровой завесы записывается как

$$\theta_v = \frac{c_{pa}T_o - T_w[(1-K)c_{pas} + c_{pv}K)]}{c_{pa}T_o - [(1-K)c_{pas}T_{a,s} + K(c_l - r/T_{l,s})T_l]} \qquad (3)$$

Таким образом, представление эффективности возможно комбинированным способом: пока k_v вблизи стенки меньше K, используется формула (2), а далее при полном испарении – уравнение (3).

Как показал анализ экспериментальных данных о величине θ в цилиндрическом канале, результаты измерения эффективности тепловой завесы могут быть обобщены с использованием комплексов для турбулентного либо ламинарного режимов течения.

Опыты, в которых рассматривалось влияние концентрации жидкости в пристенной струе в обобщенных координатах для ламинарного режима течения, демонстрируются на рис. 14. Как видно из рисунка, при осаждении капель на стенке с образованием жидкой пленки, подтверждается эффект ламинаризации процессов смешения с двухфазным потоком. Наибольший эффект охлаж- дения приближенно описывается зависимостью (1).

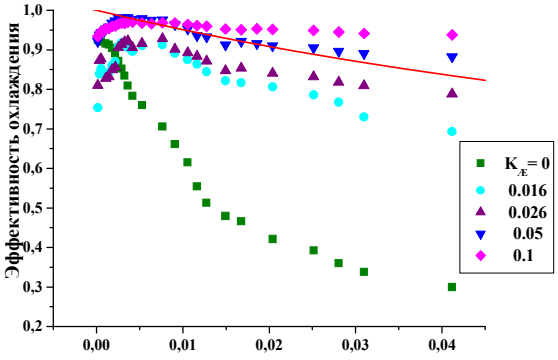

Рис. 14 Эффективность газокапельной завесы в обобщенных координатах для ламинарного режима течения, линия – расчет по формуле (1)

ВЫВОДЫ

- Организация закрученного течения внутри кольцевого сопла создает условия для образования вихрей Гёртлера-Тэйлора. Они нарушают симметрию течения на выходе, не допускают достигать наиболее интенсивных степеней закрутки потока.
- Закрутка потока на выходе с помощью спиральных ребер позволяет создать любую интенсивность вращения потока. При подаче струи под углом 86o ($V\varphi/Vx \sim 14,3$) происходит оттеснение её от стенки с образованием прецессирующего вихревого цилиндра.
- Неизотермичность потоков вызывает ламинаризацию процессов смешения, при этом эффективность завесы описывается закономерностями для ламинарного режима течения.
- Осаждение капель на поверхности с образованием жидкой пленки увеличивает эффективность охлаждения, но ограничена её значением при ламинарном течении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. 2-е изд. перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 320 с.
2. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. – Новосибирск: Наука, - 1983. – 240 с.
3. Добринский Э.К., Урюков Б.А., Фридберг А.Э. Исследование стабилизации плазменной струи газовым вихрем. // Изв. СО АН СССР. – 1979. - № 8, сер. техн. наук. Вып. 2. – С. 42 – 49.
4. Леонтьев А.И., Волчков Э.П. Проблемы пленочного охлаждения в плазмотронах. // Экспериментальные исследования плазмотронов / Под ред. М.Ф. Жукова. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 36 – 62.
5. Алексеенко С.В., Окулов В.Л. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. – 1996. – Т. 3, № 2. – С.101 - 138.
6. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. – Ново-сибирск: Изд-во ИТФ СО АН. 1987. - 282 с.
7. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. / Закру-ченные потоки. – М.: Мир, 1987. – 590 с.
8. Халатов А. А. Теплообмен и гидродина-мика в полях центробежных массовых сил. /А.А. Халатов,В.В. Романов, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский, С.Д. Северин. Киев: Изд. Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 2010. Т. 9: Тепломассообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин. - 2010. - 317 с.
9. Щукин А.В., Буланов И.Ю., Ильинков А.В., Козлов А.П., Халатов А.А. Особен-ности тепловой завесы вдувом воздуха из сферической выемки // Изв. ВУЗ. Авиационная техника. – 2003. - № 4. – С. 28 – 31.
10. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Пахомов М.А., Терехов В.И. Пленочное охлаждение с помощью однорядных систем наклонных отверстий в углублениях // Доповіді НАН України.- 2015.- № 6. - С. 74-83.
11. Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. Теплозащитные свойства двухфазных газокапельных завес в вертикальном цилиндрическом канале // Изв. РАН Энергетика. - 2003. - № 6. – С. 135 – 143.
12. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. - М.: Энергия, 1976. - 392 с.
13. Репухов В.М., Недужко А.И. Тепловая защита стенки вдувом двухфазного газожидкостного охладителя // Докл. АН УССР. Сер. А. -1988. - № 8. – С. 77 – 80.
14. Talmor E., Weber N. Foreign-gas film cooling non-covering and covering walls at various free-stream turbulence levels // IV Intern. Heat Transfer Conf., Paris. – 1970. Paper FC-8.7. - P. 1 – 11.
15. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. Film-cooling enhancement of the mist vertical wall jet on the cylindrical channel surface with heat transfer // Trans. ASME J. Heat Transfer. – 2009. – V. 131. No. 6. Paper 062201. 10 p.
16. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. The thermal efficiency of near wall gas-drops screens. Part 1. Numerical modelling // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48, No. 9. – P. 1747 - 1759.
17. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках / В.И. Терехов, М.А. Пахомов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2009. – 284 с. (серия «Монографии НГТУ»).
18. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М. Наука. 1974. – 711с.
19. Beer J.M., Chigier N.A., Davies I.W. Bassindale K. Laminarization of Turbulent Flames in Rotating Environments // Combustion and Flame. 1971. Vol. 16, No. 1. P. 39 – 45.
20. Лянэ Р., Иванов Ю. Развитие и перемешивание сосной струи в осесимметричном закрученном потоке // Изв. АН ЭстССР. Физика. Математика. 1971. Т.20, № 1. С. 58 – 65.
21. Сухович Е.П. Экспериментальное исследо-вание локальных характеристик закручен-ного турбулентного течения в цилиндри-ческом канале // Изв. СО АН СССР. - 1978. - № 8. Сер. техн. наук. Вып. 2. - С. 91 – 100.
22. Лянэ Р., Иванов Ю. О развитии закручен-ного потока в цилиндрической камере с недиафрагмированным выходным сечением // Изв. АН ЭстССР. Физика. Математика. 1970. Т.19, № 4. С. 456 – 462.
23. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машино-строение, 1969. - 182 с.
24. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
25. Шишкин Н.Е. Эффективность пристенной завесы при газокапельном охлаждении // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Вып. 1(12). – Киев: «НПВК Триакон», 2013. - С. 340 – 345.

© Терехов В.И., Халатов А.А., Шишкин Н.Е.