УДК 532.529:536.24

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИСТЕННОЙ ЗАВЕСЫ ПРИ ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Шишкин Н.Е.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнена в рамках Программы ОЭММПУ РАН (проект 2.10.2) и интеграционного проекта СО РАН и НАН РБ (проект 26).

АННОТАЦИЯ

Проведено аналитическое исследование эффективности газожидкостной завесы путем выражения её через энтальпии смешивающихся потоков. Показано, что с течением жидкой пленки на поверхности, изменение температуры стенки приближается к зависимостям для ламинарного режима течения. При высоких температурах капли более интенсивно испаряются, осаждение их на поверхности ослабевает. Величина эффективности охлаждения понижается и как для паровоздушной смеси может быть описана зависимостями для турбулентного течения.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие новой экономичной техники, во многом предопределяется степенью защиты рабочей поверхности от высокоэнтальпийных или химически агрессивных потоков. Одной из перспективных для этих целей может быть подача пристенных газожидкостных струй, которая приводит к существенному улучшению защитных свойств газовых завес [1-8]. Это происходит за счет дополнительного охлаждения, возникающего при испарении жидких частиц. 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 волнообразных пленок.

Эффективность тепловой защиты адиабатической поверхности принято характеризовать безразмерной температурой стенки [9, 10]

$$\theta = (T^*_{\text{ст}} - T_{cm})/(T^*_{cm} - T_{cm})_1 \ , \qquad (1)$$

где T^*_{cm} - равновесная температура стенки в текущем сечении без тепловой завесы, т.е. при изоэнергетическом подводе обоих потоков. $T_{\text{ст}}$ – температура адиабатической поверхности при наличии завесы. Индекс 1 означает, что параметры берутся в сечении среза щели или в конце пористого участка.

В общем случае при течении сжимаемого газа с химическими реакциями, смешение газов, отличающихся по своим физическим свойствам, эффективность газовой завесы выражается через энтальпии

$$\theta = (i^*_{\text{ст}} - i_{\text{ст}})/(i^*_{\text{ст}} - i_{\text{ст}})_1 \qquad (2)$$

Эффективность газожидкостного охлаждения, представленная через энтальпии может, следуя известным методикам для газовых завес [9,10], обобщать результаты экспериментальных исследований, в которых варьировались степень неизотермичности потоков, состав газов и испаряющихся жидкостей, режимы течения.

ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА, ДИАПАЗОН ИССЛЕДОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Результаты экспериментальных измерений, для проводимого здесь анализа, были получены на установке, подробно описанной в работах [1,2]. 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 смешивающиеся потоки на входе осуществлялось с помощью хромель-копелевых термопар.

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 числам Рейнольдсам $Re_o = u_o D_o/\upsilon = (1\div2)\cdot10^5$. Диапазон параметра вдува находился в пределах $m = \rho_s u_s / \rho_o u_o = 0{,}6 \div 1.6$. Весовая концентрация капелек воды в пристенной струе изменялась в пределах $K = 0 \div 0.1$.

ЗАЩИТА ГАЗОЖИДКОСТНЫМ ПОТОКОМ

Характерный вид изменения температуры поверхности канала показан на рис. 1 при различной степени нагрева центрального потока от 30 ^{0}C до 200 ^{0}C. Как видно, во всех опытах с испарением жидких капель, температура поверхности вблизи кольцевой щели заметно понижалась. Неравномерное изменение температуры стенки T_w при высоких температурах T_o далее вниз по потоку соответствует, по видимому, моментам осушения жидкой пленки и нестационарному осаждению капель на поверхность.

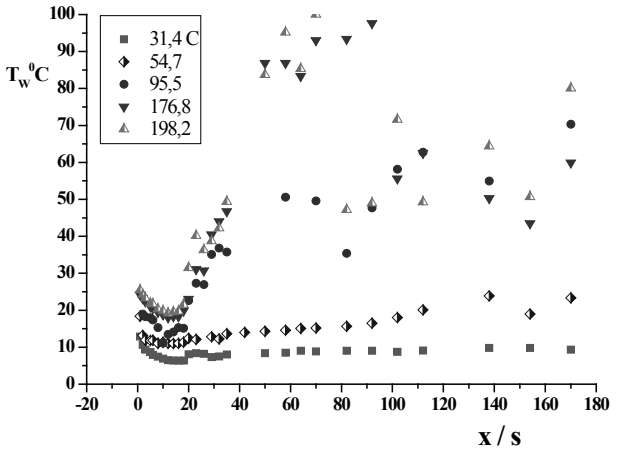

Рис.1 Температура стенки при различных тем-пературах основного потока, m = 0.6, K = 0.016.

Если для описания эффективности охлаждения принять безразмерную температуру стенки

$$(T_o - T_w) / (T_o - T_s), \qquad (3)$$

где $T_s = [T_{as}\cdot(1\text{-}K)c_{p,a} + T_{ls}\cdot Kc_{p,l}]/[(1\text{-}K)c_{p,a} + Kc_{p,l}]$,

то данные измерения температуры стенки (рис. 1) можно представить в виде, показанном на рис. 2. Анализ влияния неизотермичности потоков на процессы струйного взаимодействия в этих параметрах затруднен: при небольшой разности температур ~ 13^0 рассматриваемая величина в 2 раза превышает соответствующие значения при ~ 100 ÷ 200^0. Таким образом, необходим другой подход к оценке эффективности охлаждения, основанный на законах сохранения и критериальных зависимостях.

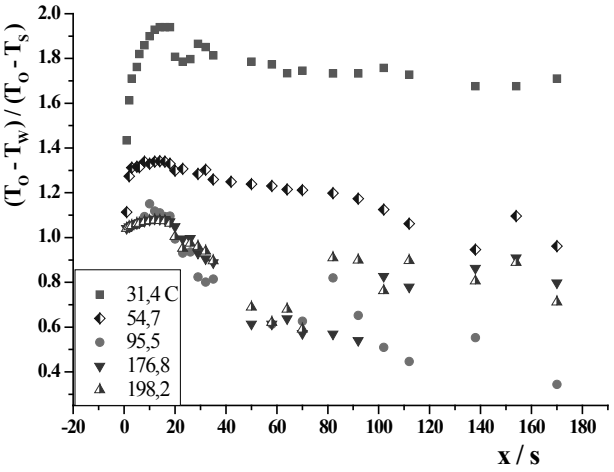

Рис.2 Распределение безразмерной температуры по результатам измерения (рис.1).

Основным параметром, характеризующим интенсивность охлаждения адиабатической поверхности пристенным потоком, является её выражение через энтальпии смешивающихся потоков (2). Для потоков с постоянными физическими свойствами из уравнения энергии эффективность завесы выражается через безразмерную температуру стенки (1). Именно в этой обработке представлена в работах эффективность заградительного охлаждения как однофазных, так и газожидкостных пристенных струй [1 - 10].

Чтобы прейти от (2) к виду θ, определяемой через температуры потоков, выразим удельные энтальпии воздуха, пара и жидкости воды следующим образом

$i_{air} = c_{p,a} T_{air} = T_{air}$; $i_l = c_l T_l = 4.19 T_l$;

$i_v = c_{p,v} T_v = 1.93 T_v$ (4)

в рассматриваемом случае теплоёмкости постоянны в интервале температур $0^0C \div 100^0C$ и равны соответственно 1; 4.19; 1.93 [кДж/кг], [11].

Энтальпия пристенной струи, поступающей на охлаждение, i_s при известных весовых концентрациях жидкости K равна

$$i_s = (1 - K)\, T_{air,s} + 4.19\, K\, T_l - r\, K \quad (5)$$

Здесь третий член указывает величину охлаждения при фазовом переходе жидкости в пар (для воды в рассматриваемом диапазоне температур r ~ 2501 [11]).

Полагая, что вблизи теплоизолированной поверхности происходит снижение температуры из-за парообразования с весовой концентрацией d_v, основной поток не оказывает влияния на процессы испарения на некотором удалении от начального сечения. Тогда доля испаренных капель воды может быть определена из соотношения, составленного из (4) и (5)

$(1 - K)\, T + 1.93\, K\, d_v\, T + 4.19\, K(1 - d_v)T - 2501\, K(1 - d_v) = (1 - K)\, T_{air,s} + 4.19 K T_l - 2501\, K$

$$d_v = \frac{(1-K)(T_{air,s} - T) + 4.19K(T_l - T)}{2501K - 2.26KT} \quad (6)$$

При равной температуре на входе щели воды и воздуха (6) упрощается

$$d_v = \frac{1/K + 3.19}{2501 - 2.26T}\,(T_s - T) \quad (7)$$

Результаты измерения температуры стенки для квазиизотермических потоков представлены на рис. 3. При течении однофазных коаксиальных струй температура стенки вблизи кольцевой щели равна температуре периферийного потока, с удалением вниз по течению приближается к температуре основного потока. В присутствии диспергированных капель жидкости температура, как видно из рисунка, значительно снижалась. Сопоставление опытов с разной концентрацией жидкости показывает их слабое отличие между собой.

Доля испарения жидкости на расстоянии от щели x/s = 18, где наблюдалось самое низкое значение температуры, по соотношению (7) дает следующие оценки. Для K=0.05 величина $d_v = 0.174$, при K = 0.10 - $d_v = 0.099$. Отсюда общее количество испаренной жидкости в пограничном слое, определяемое как Kd_v, составляет в обоих случаях соответственно 0.0087 и 0.0099, практически близкое между собой и примерно 1 %.

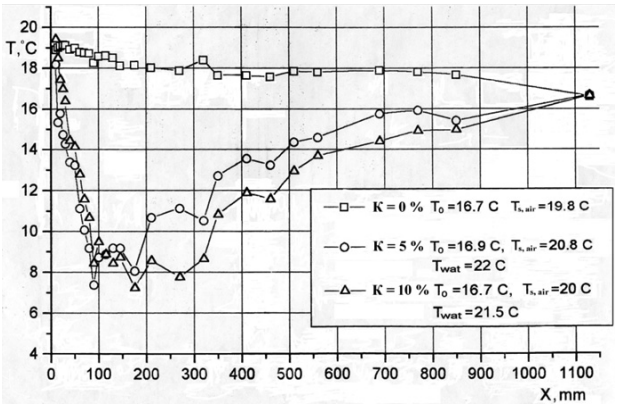

Рис.3 Влияние концентрации капель воды на температуру стенки.

Далее вниз по течению температура повышалась, вследствие перемешивания с основным потоком, выносом пара и жидкости в центральную область. Здесь энтальпия вблизи стенки выражается другими концентрациями воздуха, пара и жидкости, обозначим их как k_o, k_v и k_l, чем они были на начальном участке в пристенной струе. Тогда (2) может быть записано в следующем виде

$$\theta = \frac{T_o - T_w(k_o + 1.93k_v + 4.19k_l - 2501(K - k_v)/T_w)}{T_o - [(1-K)T_{a,s} + 4.19KT_l - 2501K]} \quad (8)$$

Для расчета θ по соотношению (10) остаются неизвестными концентрации k_o, k_v, k_l. Искомые концентрации газопарожидкостного потока связаны между собой условиями нормировки

$k_a + k_v + k_l = 1$, массосодержанием пара на линии насыщения при температуре T_w, которое может быть получено из совместного решения уравнения состояния для парового и воздушных частей потока.

Если сделать приближение, что концентрация воды вблизи стенки сохраняется, то неизвестные коэффициенты можно представить соответственно как 1- K, $K \cdot d_v$, $K \cdot (1-d_v)$, где $K \cdot d_v$ равно концентрации пара k_v. Величина k_v может быть определена

$$k_v = \frac{M_v \cdot P_v}{M_v P_v + (1 - P_v) \cdot M_a} = \frac{18.02 \cdot P_v}{18.02 \cdot P_v + (1 - P_v) \cdot 28.96}$$

здесь P_v, зависящее от температуры, парциональное давление пара, M – молекулярный вес водяного пара или воздуха. Для расчета P_v удобна приближенная формула Филоненко

$$P_v = 6.104\cdot10^{-3}\cdot10^{\frac{7.5(T-273.15)}{T-35.15}}, \quad (T\ ^0K)$$

Отсюда, используя только концентрацию пара k_v, значение θ на стенке может быть от (8) преобразовано к виду

$$\theta = \frac{c_{pa}T_o - T_w[(1-K)c_{pas} + c_{pv}k_v + (K-k_v)(c_l - r/T_w)]}{c_{pa}T_o - [(1-K)c_{pas}T_{a,s} + K(c_l - r/T_{l,s})T_l]} \quad (9)$$

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

$$\theta_v = \frac{c_{pa}T_o - T_w[(1-K)c_{pas} + c_{pv}K)]}{c_{pa}T_o - [(1-K)c_{pas}T_{a,s} + K(c_l - r/T_{l,s})T_l]} \quad (10)$$

Таким образом, представление эффективности возможно комбинированным способом: пока k_v вблизи стенки меньше K, используется формула (9), далее при полном испарении (10). В этом виде значение θ для опытов, приведенных на рис.1 и 2 нанесено на рис. 4

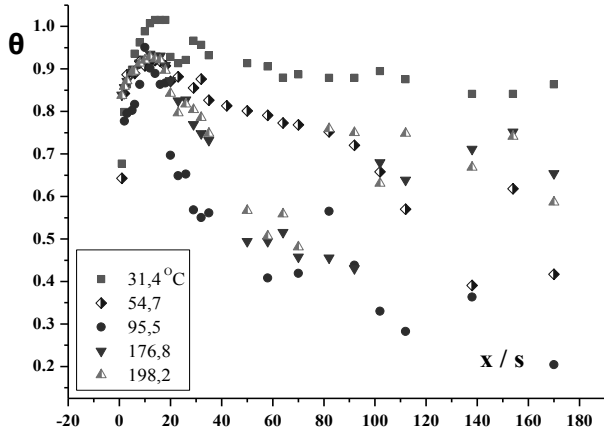

Рис.4 Эффективность охлаждения газокапельным потоком.

Как показал анализ экспериментальных данных о q в цилиндрическом канале при турбулентном режиме течения, результаты измерения эффективности тепловой завесы могут быть обобщены с использованием комплекса

$$K_m = \mathrm{Re}_{DX} / [\mathrm{Re}_S\,(m_S / m_O)\,(1 - s/D_K)]^{1.25}.$$

А опыты наиболее эффективно описывались зависимостью Кутателадзе – Леонтьева [10]

$$q = (1 + 0.25\,K_m)^{-0.8} \quad (11)$$

На рис. 5а показаны результаты измерений (рис.1, 2, 4) в указанных координатах. Как видно, температура на стенке оказывается выше зависимости, к ней приближаются точки для воздушнопаровой завесы, при больших температурах основного потока.

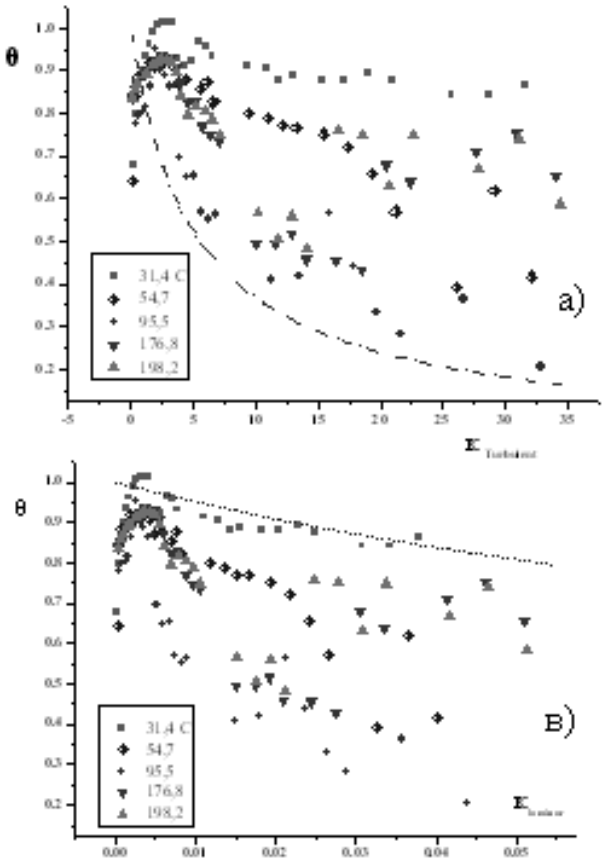

Рис.5 Представление опытов в обобщенных координатах: а) для турбулентного течения, линия расчет по формуле (11); в) для ламинарного режима, линия – зависимость (12).

В случае ламинарного течения обобщающий комплекс записывается в следующем виде

$$K_{laminar} = \mathrm{Re}_X / [\mathrm{Re}^2_S\,(m_S / m_O)^2\,(1 - s/D_K)]^2,$$

а выражение для эффективности завесы имеет вид [10]

$$\theta = (1 + 10.6\cdot K_l)^{-0.5} \quad (12)$$

Анализ обоих графиков рис. 5 а) и в) показывает, что температура на стенке сильно зависит от интенсивности осаждения капель на поверхности, толщины пленки на ней. Эффективность охлаждения для этих условий находилась в пре-

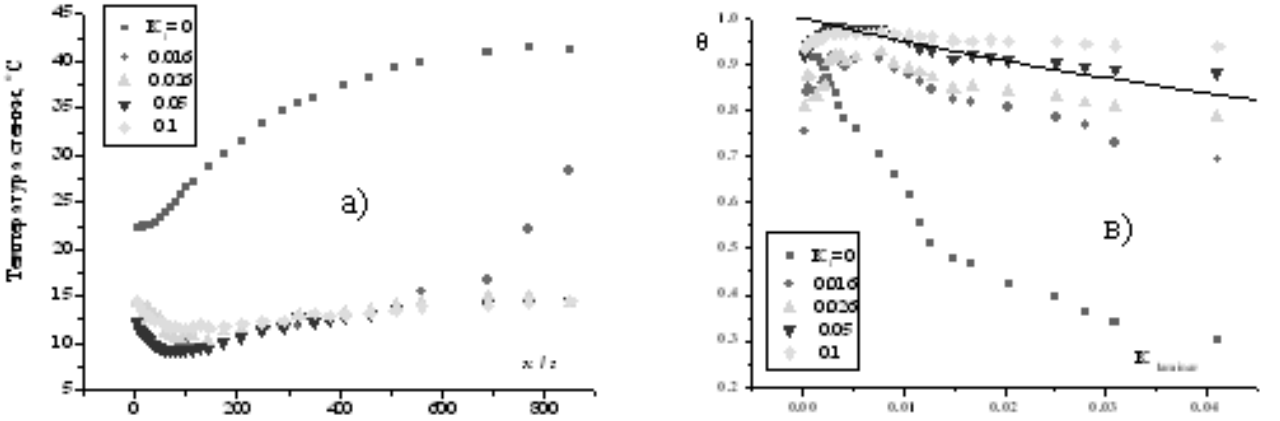

Рис.6 Влияние концентрации капель в струе, m = 0.8, T_o = 50 °C, T_s ≈ 20 °C, а) температура стенки, в) эффективность в обобщенных координатах для ламинарного режима течения, линия – расчет по (12).

делах между зависимостями для турбулентного и ламинарного режимов течения.

Исследование влияния концентрации жидкости в пристенной струе показано по измерениям температуры стенки ниже на рис. 6а. По характеру изменения T_w можно представить наличие осаждаемой и испаряющейся жидкой пленки на поверхности. Полностью она испарялась только при малой концентрации K = 0.016 на удаленном расстоянии от щели (на графике рис. 6а температура поднимается вверх). Нижний рис.6в показывает, что с увеличением концентрации капель к 5 % охлаждение поверхности увеличивается и достигает пределов, характерных для ламинарных режимов течения.

ВЫВОДЫ

- Анализ проведенного исследования показал необходимость представления эффективности газожидкостной завесы через энтальпии смешивающихся потоков. В этом случае возможно сопоставление с результатами, использование методик обобщения и расчетов, полученных для газовых завес.

ЛИТЕРАТУРА

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. - 1992. - Вып. 1. - С. 28 – 32. E.P. Volchkov, V.P. Lebedev, V.I. Terekhov, N.E. Shishkin. Experimental study of the effect of concentration of dispersed liquid drops on the thermal efficiency of gas screen // Siberian Phys.-Techn. J. – 1992. Vyp. 1, - P.28 – 32.
2. 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. Terehkov V.I., Sharov K.A., Shishkin N.E. Heat Shielding Characteristics of Gas-Droplets Screens in a Vertical Channel // Trans. of the Russian Academy of Sciences. Series Power Engineering. – 2003. – No. 6. – P. 135 – 143.
3. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. - М.: Энергия, 1976. - 392 с. Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B. Thermal protection. - Energia, Moscow, 1976. - 392 pp.
4. Репухов В.М., Недужко А.И. Тепловая защита стенки вдувом двухфазного газожидкостного охладителя // Докл. АН УССР. Сер. А. -1988. - № 8. – С. 77 – 80. V.M. Repukhov and A.I. Neduzhko, Thermal protection of wall through blowing a two-phase gas-liquid coolant // Dokl.

Akad. Nauk Ukr. SSR. – 1988. ser.A., - No. 8. – P. 77 – 80.

5. Talmor E., Weber N. Foreign-gas film cooling noncovering and covering walls at various free-stream turbulence levels // IV Intern. Heat Transfer Conf., Paris. – 1970. Paper FC-8.7. - P. 1 – 11. Talmor E., Weber N. Foreign-gas film cooling noncovering and covering walls at various free-stream turbulence levels // IV Intern. Heat Transfer Conf., Paris. – 1970. Paper FC-8.7. - P. 1 – 11.
6. 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. 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.
7. 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. 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.
8. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках / В.И. Терехов, М.А. Пахомов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2009. – 284 с. (серия «Монографии НГТУ»). Flow dynamics and heat and mass transfer in a gas-droplets flows / V.I. Terekhov, M.A. Pakhomov. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2009. – 284 pp. (“NSTU Monographs” series).
9. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с. Volchkov E.P. Film Cooling. - Nauka, Novosibirsk. 1983, p. 259.
10. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 343 с. Kutateladze S.S., Leontiev A.I., Heat Transfer, Mass Transfer and Friction in Turbulent Boundary Layer, Hemisphere, New York, 1989, p. 305.
11. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Наука, 1979. Kirillin V.A., Sychev V.V., Shaindlin A.E. Engineering thermodynamic. Nauka, Moscow, 1979.

© Шишкин Н.Е.