

Описанный подход к учету влияния шероховатости свободен от недостатков [3, 8] и обладает большей универсальностью, чем [2], поскольку расчетные формулы получены непосредственно из полуэмпирической модели турбулентности с минимальным привлечением эмпирической информации. Разработанные модель и метод расчета могут быть использованы для расчетов более сложных гидродинамических течений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротта И. К. Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости.— Л.: Судостроение, 1967.
2. Себечи Т., Ченг К. Расчет характеристик пограничного слоя несжимаемой жидкости на шероховатых поверхностях.— Ракетн. техника и космонавтика, 1978, т. 16, № 7.
3. Сивых Г. Ф. Турбулентная вязкость для расчета несжимаемого пограничного слоя на шероховатой поверхности.— ПМТФ, 1984, № 2.
4. Шубауэр Г. Б., Чен К. М. Турбулентные течения.— В кн.: Турбулентные течения и теплопередача. М.: ИЛ, 1963.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: ИЛ, 1956.
6. Фомина И. И., Федяевский К. К. Исследование влияния шероховатости на сопротивление.— В кн.: Избранные труды К. К. Федяевского. Л.: Судостроение, 1975.
7. Никитин И. К. Сложные турбулентные течения и процессы массопереноса.— Киев: Наук. думка, 1980.
8. Пилипенко В. Н. О строении турбулентной вязкости при течении вблизи шероховатой поверхности.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1976, № 2.
9. Мовчан В. Т. Приближенно-аналитическое исследование турбулентного градиентного пограничного слоя.— ПМТФ, 1982, № 3.
10. Щец, Нерни. Исследование турбулентного пограничного слоя на шероховатой поверхности при наличии вдува.— Ракетн. техника и космонавтика, 1977, т. 15, № 9.
11. Долгов В. Н., Шулемович В. М. Турбулентная вязкость для несжимаемых градиентных течений в предотрывных областях и на шероховатой поверхности.— ПМТФ, 1977, № 3.
12. Кристоф Дж. Г., Плетчер Р. Г. Расчет трения и теплообмена при обтекании шероховатой стенки.— Аэрокосмическая техника, 1983, т. 1, № 12.
13. Сивых Г. Ф. О расчете трения и теплообмене на шероховатых и осесимметричных телах.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 5.
14. Хинце И. О. Турбулентность.— М.: Физматгиз, 1963.
15. Мовчан В. Т. Приближенный метод вычисления профилей напряжения трения и скорости в турбулентном потоке с положительным градиентом давления.— В кн.: Гидромеханика, 1975, вып. 31.
16. Миллионщиков М. Д., Субботин В. И. и др. Гидравлическое сопротивление и поля скорости в трубах с искусственной шероховатостью стенок.— В кн.: Атомная энергия, 1973, т. 34, вып. 4.

Поступила 23/X 1985 г.

УДК 532.529 : 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОГО КОМПОНЕНТА НА ХАРАКТЕР ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБТЕКАНИИ ПРЕГРАДЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУЕЙ

Г. Ф. Горшков

(Ленинград)

Течение в турбулентной неизотермической гетерогенной струе характеризуется значительной скоростной [1, 2] и температурной [3] неравновесностью ($u_s \neq u$ и $T_s \neq T$, где u_s , T_s и u , T — скорость и температура дисперсного и газового компонентов). При этом, как показано в [4], примесь не пассивная, а приводит к подавлению струйной турбулентности (результат межфазного обмена импульсом и теплом).

Тем не менее при взаимодействии гетерогенной струи с преградой, ориентированной по нормали к набегающему потоку, наблюдается значительное увеличение характеристик теплоотдачи в окрестности точки торможения [5] (для однофазной струи увеличение теплообмена характерно при росте интенсивности турбулентности [6]).

Интенсивность изменения теплопередачи в этом случае — следствие скоростной и температурной неравновесности течения в струях и зависит от ряда факторов (тем-

пературы, концентрации, фазового состояния дисперсной примеси и т. д.), а также от характера взаимодействия дисперсного компонента с поверхностью преграды [7].

Имеются весьма немногочисленные экспериментальные данные в этом направлении. Кроме работ [5, 7], следует указать [8], где также отмечается увеличение теплового потока (до 1,4 раза) в точке торможения плоского цилиндрического торца и полусферы.

Цель настоящей работы — исследование влияния дисперсного компонента на теплообмен при струйном обтекании преграды.

Методика проведения эксперимента и обработки данных. Исследование проведено на экспериментальной установке, состоящей из электротермического источника, координатного устройства преграды, предохранительной заслонки перед ней с механизмом удержания в верхнем положении, а также системы автоматики для включения аппаратуры и отключения источника питания.

Высокотемпературные струи создавались с помощью электродугового подогревателя с частично фиксированной длиной дуги. Использовалось сопло следующей геометрии: диаметр выходного сечения $d_a = 9 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр «критического» сечения $d_{*} = (5,5-6) \cdot 10^{-3}$ м. Ввод дисперсной примеси в струю осуществлялся в разрядный промежуток непосредственно за «критическим» сечением. Для подачи частиц применялся поршковый дозатор вибрационного типа.

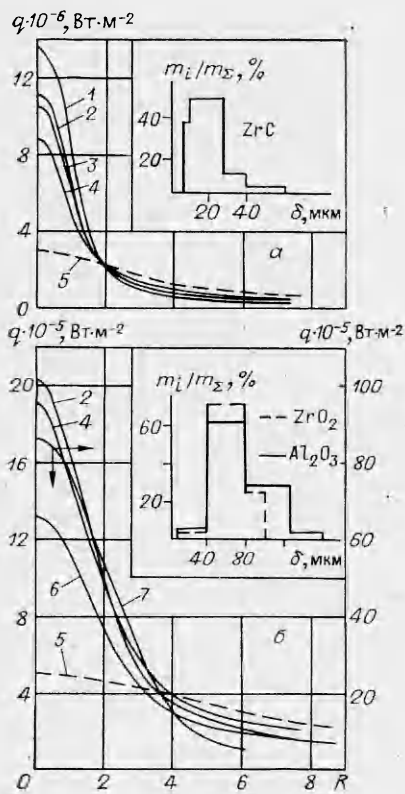
Конвективные потоки тепла при воздействии струи на плоскую безграничную преграду, расположенную перпендикулярно набегающему потоку, определялись экспоненциальным методом [9] по измерениям температуры датчиков теплового потока во времени, представляющих собой изолированные друг от друга слюдой медные кубические калориметры с длиной ребра $3 \cdot 10^{-3}$ м, к внутренней поверхности которых зачеканены термпары хромель-капель. 20 калориметров заделаны в один ряд в медную плиту толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м, закрепленную на теплоизолированной подложке. Оптимальная высота калориметра выбиралась исходя из величины заданного теплового потока, минимального интервала времени нагрева, после которого наблюдается равенство прироста температуры во времени на обеих поверхностях калориметра (пластины), а также максимального интервала времени линейного участка для медного датчика [9].

Измерение температуры тела калориметра T осуществлялось следующим способом. После выхода сопла на режим освобождалась предохранительная заслонка перед преградой и происходила запись T от τ . По истечении заданного времени воздействия τ питание отключалось, а запись прекращалась.

При воздействии гетерогенной струи на преграду происходило некоторое налипание частиц. При этом тонкий слой нанесенного материала вследствие низкой теплопроводности используемых в эксперименте частиц служил тепловым экраном для приходящего на преграду потока тепла q . В этом случае корректность измерений контролировалась по отклонению кривых $T = f(\tau)$ от линейной зависимости, так как в отсутствие дисперсного компонента показания всех калориметров имели строгую линейную зависимость от времени (линейность выходного сигнала, как было указано ранее, обеспечивалась выбором оптимальной высоты датчиков теплового потока). Время воздействия струи на преграду выбиралось так, чтобы частицы не оказывали влияния на замер теплового потока (для определения его величины использовался линейный участок T от τ). В условиях эксперимента τ варьировалось от 0,5 до 5 с. Ошибка в определении q не превышала 10%.

Энергетические параметры подогревателя: подводимая мощность P , потери в электроды Q , среднемассовая энтальпия и температура среза сопла (без учета дисперсного компонента) h_a , T_a — определялись по методике [9].

Экспериментальное исследование проводилось в следующем диапазоне изменения параметров: ток дуги $I_g = 400$ А; массовый расход газа



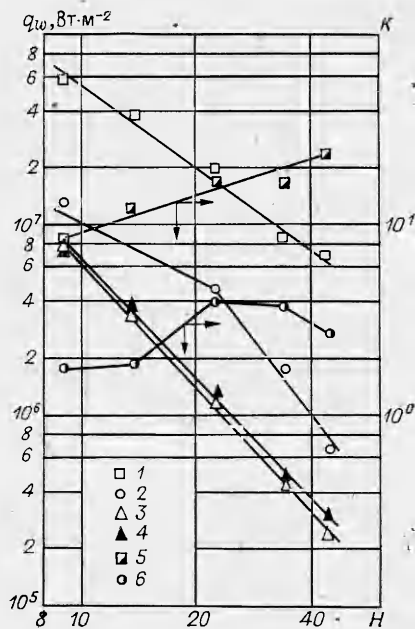
Р и с. 1

начальные массовые расходные концентрации $\kappa_a = G_s/G_\Sigma = 0,41-1,85; 1,23; 1,36; 1,3$; расстояние от среза сопла до преграды $H = X/r_a = 8,9-44,5$. Используемые порошки частиц представляют собой полидисперсную механическую смесь гранулометрического состава, указанного на рис. 1, где m_i — масса i -й фракции, m_Σ — суммарная масса частиц всех фракций.

2. Результаты исследования и обсуждения. В табл. 1 приводятся сводка энергетических параметров сопла при различных значениях начальной расходной массовой концентрации. Анализ табличных данных показывает, что потери мощности в электроды не зависят от κ_a и равны потерям при отсутствии в струе дисперсного компонента. С ростом κ_a происходит некоторое увеличение напряжения на дуге, сопровождающееся увеличением P . Таким образом, введение в сопло примеси практически не изменяет энергетические параметры подогревателя.

На рис. 1 представлены некоторые результаты распределения тепловых потоков по поверхности преграды вдоль радиуса $R = r/r_a$ при воздействии на нее гетерогенных струй, содержащих дисперсную примесь ZrO_2, Al_2O_3 и ZrC , для $H = 13,3$ (рис. 1, а, струя с частицами ZrO_2) и $33,3$ (рис. 1, б, ZrO_2 — кривая 4, Al_2O_3 — 6, ZrC — 7) для условий истечения, указанных в табл. 1. Позиции 1—7 соответствуют $\kappa_a = 1,23; 1,3; 1,85; 1,3; 0,89; 0,41; 0$. Здесь и далее все линейные размеры отнесены к радиусу среза сопла r_a . Как следует из данных, распределение q по радиусу носит неравномерный характер, и эта неравномерность тем больше, чем ближе преграда расположена к срезу сопла. Характер изменения q вдоль преграды монотонно убывающий с максимумом в точке торможения и отвечает характеру изменения q для однофазной газовой струи ($\kappa_a = 0$).

Присутствие в струе дисперсного компонента резко увеличивает тепловой поток в окрестности точки торможения даже при небольшой ($\kappa_a = 0,41$) начальной расходной массовой концентрации примеси (кривая 4, 5 ПМТФ № 6, 1986 г.



Р и с. 2

(азота) через сопло $\bar{G}_\Sigma = (1,14-3) \cdot 10^{-3}$ кг/с; массовые расходы частиц двуокиси циркония ZrO_2 $G_s = (1,1-5) \cdot 10^{-3}$ кг/с, карбида циркония ZrC $G_s = 3,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с, окиси алюминия Al_2O_3 $G_s = 1,55 \cdot 10^{-3}, 3,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с;

Т а б л и ц а 1

Условия истечения струи	κ_a	$P \cdot 10^{-3}$, Вт	$(P-Q) \cdot 10^{-3}$, Вт
$h_a = 9,44 \cdot 10^6$ Дж/кг $T_a = 5660$ К ZrO ₂	0	33,4	25,5
$G_\Sigma = 2,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с	0,41	33,6	25,7
$d_* = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м	0,89	34,2	26,3
	1,30	34,2	26,3
	1,85	34,4	26,5
$h_a = 8,83 \cdot 10^6$ Дж/кг $T_a = 5520$ К ZrC	0	34,4	26,5
$G_\Sigma = 3 \cdot 10^{-3}$ кг/с	1,23	37,1	29,2
$d_* = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м			
$h_a = 15,5 \cdot 10^6$ Дж/кг $T_a = 6350$ К Al ₂ O ₃	0	25,6	17,7
$G_\Sigma = 1,14 \cdot 10^{-3}$ кг/с	1,36	27,0	19,1
$d_* = 6 \cdot 10^{-3}$ м			
$h_a = 9,5 \cdot 10^6$ Дж/кг $T_a = 5680$ К Al ₂ O ₃	0	33,6	25,7
$G_\Sigma = 2,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с	1,3	34,8	26,9
$d_* = 6 \cdot 10^{-3}$ м			

рис. 1а, б). В [5, 8] получены результаты, качественно согласующиеся с настоящим исследованием. Так, в [5] отмечено усиление коэффициента теплоотдачи еще при меньших значениях концентраций: $\kappa_a = 0,11$ (оно составляет 1,75 раза для взаимодействия изотермической с $T_a = 293$ К турбулентной струи азота, несущей дисперсную примесь графита $d_p = 10 \cdot 10^{-6}$ м, с плоской перпендикулярной подогреваемой электрическим током преградой при удалении $H = 8$). Дальнейшее увеличение κ_a приводит к росту теплового потока в точке торможения. Однако это увеличение нелинейное (с ростом κ_a) и при $\kappa_a > 1$ замедляется.

При удалении от точки торможения в радиальном направлении тепловой поток от однофазной струи (кривая 5) превышает тепловой поток от двухфазной (кривые 1—4, 6, 7). Указанный характер изменения теплового потока вдоль преграды на периферии качественно согласуется с данными [5] и наблюдается для всех расстояний, реализуемых в эксперименте.

Необходимо отметить, что величина теплового потока (при прочих равных условиях истечения) в значительной мере определяется родом материала примеси, введенной в струю. Так, тепловой поток в точке торможения q_w от струи с частицами ZrO₂ больше, чем q_w для частиц Al₂O₃, а q_w от струи с частицами ZrC больше, чем q_w для частиц ZrO₂ (рис. 1, б, кривые 2, 6, 7), т.е. при неизменной энергетике сопла для κ_a и $H = \text{const}$ тепловой поток в преграду тем больше, чем выше температура дисперсного компонента (табл. 2). В эксперименте температура дисперсного компонента определялась косвенно по измерениям температуры поверхности T_w плоских образцов пирометром ФЭП-4М и была близка к температуре плавления $T_{\text{пл}}$ названных материалов (см. табл. 2, где для T_w указан диапазон температур для интервала расстояний по H от 8,9 до 33,3).

Таблица 2

Компонент	ρ_p , кг/м ³	$T_{рпл}$, К	κ_a	T_w , К	$q_w \cdot 10^{-5}$, Вт/м ²
Al ₂ O ₃	3980	2273	1,3	2500—2000	13,2
ZrO ₂	5560	3048	1,3	3200—2900	20,3
ZrC	6700	3803	1,23	4000—3650	86,0

На рис. 2 приводится изменение теплового потока в точке торможения в зависимости от удаления среза сопла до преграды H для гетерогенных струй, содержащих примесь ZrC ($1 - \kappa_a = 1,23$) и Al₂O₃ ($2 - \kappa_a = 1,36$). Из рис. 2 следует, что для $\kappa_a = \text{const}$, как и в случае однофазного взаимодействия ($3, 4 - \kappa_a = 0$), тепловой поток q_w растет с приближением преграды к срезу сопла. При этом на всех удалениях H q_w от двухфазной струи значительно больше, чем от однофазной.

Отмеченное увеличение теплообмена на преграде при введении в струю дисперсной примеси можно характеризовать коэффициентом усиления теплообмена для точки торможения, представляющего собой отношение теплового потока от струи в присутствии дисперсного компонента q_w к тепловому потоку q_{w0} от струи чистого газа при $H = \text{const}$: $K = q_w/q_{w0}$ (рис. 2, 5 — ZrC, $\kappa_a = 1,23$, 6 — Al₂O₃, $\kappa_a = 1,36$; рис. 3, а, б — ZrO₂, $\kappa_a = 0,41-1,85$). Позиции 1—5 рис. 3, а отвечают $H = 8,9; 13,3; 22,2; 33,3; 44,5$, а 6—9 рис. 3, б — $\kappa_a = 0,41; 0,89; 1,3; 1,85$. Как следует из представленных данных, при $H = \text{const}$ (рис. 3, а) для струй, содержащих дисперсную примесь ZrO₂, с ростом начальной расходной массовой концентрации происходит монотонное возрастание коэффициента K вплоть до значений $\kappa_a \approx 1$. При дальнейшем увеличении κ_a ($1 < \kappa_a \leq 1,85$) K практически постоянен. С другой стороны, для $\kappa_a = \text{const}$ (рис. 3, б) с увеличением расстояния среза сопла до преграды K увеличивается и при $H \approx 22,2$ достигает своего максимального значения $\sim 4-6$ для струй, содержащих примесь Al₂O₃ и ZrO₂ соответственно. Дальнейшее увеличение H приводит к снижению коэффициента K или к его постоянству для некоторых величин κ_a . Снижение K при $H > 22,2$ связано в большей мере с падением температуры дисперсного компонента, что и приводит, в свою очередь, к уменьшению доли теплового потока, поступающего в преграду от дисперсной фазы. Уменьшение температуры дисперсного компонента подтверждается измерениями T_w (при $H > 22,2$ T_w падает; см. табл. 2).

Для взаимодействующих струй, содержащих примесь ZrC (рис. 2, 5, $\kappa_a = 1,23 = \text{const}$), наблюдается монотонное возрастание K с ростом H . Максимальное увеличение теплообмена (в ~ 25 раз) в этом случае происходит при $H = 44,5$. Значительные величины коэффициентов усиления в определенной степени обусловлены подъемом температуры газового компонента вследствие горения частиц карбида циркония, наблюдавшегося в эксперименте при расстояниях $H > 9$. При этом подъем темпера-

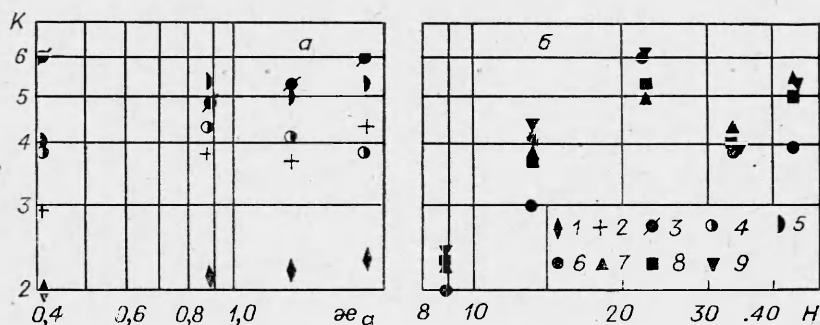


Рис. 3

туры газового компонента в диапазоне расстояний $H = 10-20$ по данным [3] (высокотемпературная струя аргона, несущая примесь титана) может быть дву- и трехкратным (по сравнению с однофазной струей). Горение дисперсной примеси возможно благодаря интенсивной эжекции воздуха в струю из затопленного пространства. Расчеты, выполненные по методике [10], показывают, что при $H = 10$ для условий настоящего эксперимента содержание воздуха на оси однофазной струи переменного состава достигает 75—80%.

Таким образом, присутствие в высокотемпературной струе дисперсного компонента существенно увеличивает теплообмен в окрестности точки торможения даже при малых значениях начальной массовой расходной концентрации примеси. При этом коэффициент усиления теплообмена для точки торможения может достигать значительных величин и зависит (в рамках проведенного исследования) от κ_a , рода материала частиц, удаления среза сопла от преграды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиршович Т. А., Картушинский А. И. и др. Экспериментальное исследование турбулентной струи, несущей тяжелые примеси.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 5.
2. Мельников В. К., Бете В. В. Экспериментальное исследование миграций частиц в высокотемпературном струйном потоке.— Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук, 1981, № 5.
3. Мельников В. К. Теплообмен в гетерогенных высокотемпературных струях.— Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук, 1977, № 3.
4. Лаатс М. К. Некоторые задачи и проблемы расчета струи с тяжелыми частицами.— В кн.: Турбулентные двухфазные течения/Под ред. М. К. Лаатса. Таллин: Изд-во АН ЭССР, 1982.
5. Shimizu A., Echigo R., Hasegawa S. Нихон кикай гаккай ромбунсю.— Trans. Jap. Soc. Mech. Engng, 1980, В 46, N 409.
6. Горшков Г. Ф. К расчету теплообмена в окрестности точки торможения при обтекании преграды плазменными потоками.— Физика и химия обработки материалов, 1982, № 6.
7. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками/Под ред. В. С. Зуева.— М.: Машиностроение, 1975.
8. Абалтусов В. Е., Дементьев В. Ф., Мамонтов Г. Я., Немова Т. Н. Исследование теплообмена на поверхности тел при обтекании двухфазной струей плазмы.— В кн.: Тепломассообмен-VII. Минск: ИТМО АН БССР, 1984, т. 3.
9. Тепло- и массообмен в потоке нагретого газа/Под ред. А. Г. Шашкова.— Минск: Наука и техника, 1974.
10. Теория турбулентных струй/Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П. 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. Г. Н. Абрамовича.— М.: Наука, 1984.

Поступила 31/X 1985 г.

УДК 532.517.4 : 536.242

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА МАССООБМЕНА МЕЖДУ ТВЕРДОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЕЙ И ТУРБУЛИЗОВАННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

М. С. Искаков, О. Н. Кашицкий, В. Е. Накоряков
(Новосибирск)

Для интенсификации процесса массообмена на границе раздела жидкой и твердой фаз, как правило, создают такие условия, чтобы жидкость находилась в турбулентном режиме. Выявление закономерностей переноса массы в этих условиях дает возможность для выбора наиболее оптимального режима работы химического аппарата, т. е. получение максимальных коэффициентов массоотдачи при малых затратах энергии. В промышленности в качестве рабочих аппаратов используются сосуды, в которых перемешивание жидкости осуществляется с помощью мешалок турбинного или лопастного типа. По этой причине многие исследователи, занимающиеся изучением массообменных процессов в системе жидкость — твердое тело, полностью моделировали реальные условия [1—4]. К другой группе относятся работы, в которых изучение