

3. Blottner F. G. Chemical nonequilibrium boundary layer. AIAA Journal, 1964, vol. 2, No. 2.
4. Blottner F. G. Nonequilibrium laminar boundary layer flow of ionized air. AIAA Journal, 1964, vol. 2, No. 11.
5. Fay J. A., Riddell F. R. Theory of stagnation point heat transfer in dissociated air. J. Aeronaut. Sci., 1958, vol. 25, No. 2.
6. Wilke C. R. A viscosity equation of gas mixtures. J. Chem. Phys., 1950, vol. 18, No. 4.
7. Yan K. S., Mason E. A. Collision integrals for the transport properties of dissociating air at high temperatures. Phys. Fluids, 1962, vol. 5, No. 4.
8. Mason E. A., Saxena S. C. Approximate formula for the thermal conductivity of gas mixtures. Phys. Fluids, 1958, vol. 1, No. 5.
9. Lin Sh.-Ch., Teare J. D. Rate of ionization behind shock waves in air. II. Theoretical interpretations. Phys. Fluids, 1963, vol. 6, No. 3.
10. Термодинамические свойства индивидуальных веществ, т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1962.
11. Goulard R. On catalytic recombination rates in hypersonic stagnation heat transfer. Jet Propulsion, 1958, No. 11.
12. Мурзинов И. Н. Ламинарный пограничный слой на сфере в гиперзвуковом потоке равновесно диссоциирующего газа. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 2.
13. Лунев В. В., Павлов В. Г., Синченко С. Г. Гиперзвуковое обтекание сферы равновесно диссоциирующим воздухом. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1966, т. 6, № 1.

ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФФУЗИЯ ТЕПЛА В СТРУЯХ РАЗБАВЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ

С. А. ВЛАСОВ, В. Н. КАЛАШНИКОВ

(Москва)

Воздействие снижающих турбулентное трение полимерных добавок на свободную струйную турбулентность исследовалось в работах [1-3]. Результаты Уайта [1] свидетельствуют об увеличении уровня турбулентного перемешивания в затопленной струе раствора полимера, тогда как в работе Гедда [2] отмечается уменьшение интенсивности турбулентной диффузии краски в струях тех же растворов. В работе [3] было показано, что характер влияния полимерных добавок на струйную турбулентность существенно зависит от структуры раствора. Если раствор эластичный, то наблюдается снижение турбулентного перемешивания, тогда как в струе раствора, не обладающего заметными континуальными вязко-упругими свойствами, но содержащего отдельные вязко-упругие ассоциаты, наблюдается увеличение перемешивания. Это в некоторой мере примиряет результаты Гедда и Уайта, но полной ясности нет, так как не учитывалось, что часто раствор одного и того же полимера в одном и том же растворителе может иметь различную структуру; кроме того, Уайт измерял профили скоростей тонкой трубкой Пито, а ее показания не точны из-за экранировак ассоциатами измерительного отверстия.

Ниже приводятся данные о турбулентной диффузии тепла в затопленных струях полимерных растворов. Температурные профили в струях, истекающих в жидкости с отличающейся температурой, измерялись при помощи термопары.

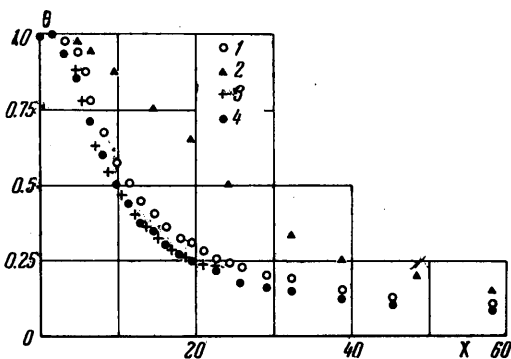
Опыты были проведены с водными растворами полиоксиэтилена (Polyox WSR-301) и гуаровой смолы. При растворении в воде первого из этих полимеров, по-видимому, образуется сплошная флуктуирующая сетка полимерных цепей, благодаря которой раствор может проявлять заметную континуальную вязко-упругость. Гуаровая смола в воде сплошную сетку не образует. В водных растворах гуаровой смолы образуются отдельные вязко-упругие ассоциаты, суспендированные в практически ньютоновском растворителе. Такую же структуру приобретают и эластичные растворы полиоксиэтилена после некоторого времени действия на них сдвиговых напряжений [3].

При проведении опытов с неэластичными растворами жидкость из термостатированного бака прокачивалась насосом термостата через сопло в кювету, также термостатированную перед опытом. В опытах с эластичными растворами необходимый напор создавался не с помощью насоса, а разностью уровней бака и кюветы. Это давало возможность снизить сдвиговые напряжения и замедлить разрушение сетки полимерных цепей во время замеров. Диаметр отверстия сопла был равен 3.1 мм. Скорость истечения через сопло во всех опытах составляла 5 м/сек. Объем кюветы был таким, что во время одного измерения температура жидкости в ней менялась не более, чем на 0.1°C. Ошибка в измерениях при этом не превосходила 1%.

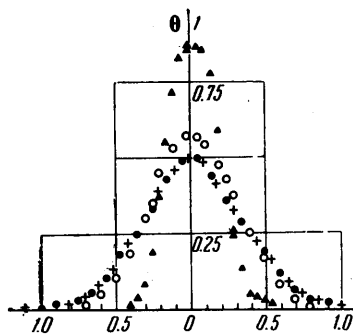
Термопара была смонтирована в теплоизолированной стальной медицинской игле диаметром 1,4 мм. Игла устанавливалась параллельно оси струи и могла перемещаться при помощи координатника как поперек, так и вдоль оси струи. Выведенная из струи термопара регистрировала температуру вернувшегося после отражения от стенки кюветы потока через 7—10 сек после пуска струи. Поэтому показания с регистрирующего прибора считывались на 4—6 сек после пуска струи.

Измеренная разность между температурой жидкости перед соплом и температурой в данной точке струи ΔT относилась к фиксированной разности температур жидкостей в баке и кювете ΔT_0 . Последняя величина в экспериментах составляла 10—20°С. На фиг. 1 представлены экспериментальные данные распределения величины $\theta = \Delta T / \Delta T_0$ по оси струи в зависимости от безразмерного расстояния до сопла $X = x/D$ (D — диаметр отверстия сопла). Точки 1 относятся к измерениям на воде, точки 2 получены при течении эластичного раствора полиоксэтилена концентрацией 10^{-4} , точки 3 — при течении того же раствора, предварительно разбитого на отдельные ассоциаты лопатками насоса термостата, точки 4 — при течении раствора гуаровой смолы концентрацией $5 \cdot 10^{-4}$. Для контроля степени деградации проба неэластичного раствора полиоксэтилена испытывалась в установке с диском в кожухе; наблюдалось снижение сопротивления вращению диска почти такое же, как и на свежем эластичном растворе.

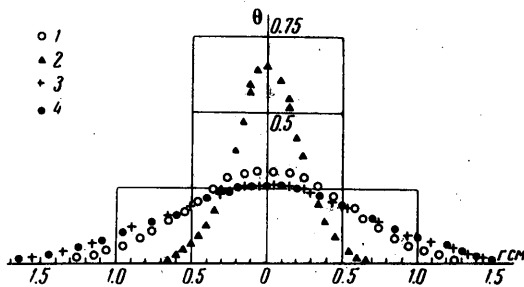
На фиг. 2 и 3 представлены температурные профили, измеренные по сечению струи на расстоянии 3 и 6 см от среза сопла, соответственно. Обозначения на этих фигурах такие же, как на фиг. 1.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Измерения, выполненные при истечении эластичного раствора полиоксэтилена в воду и воды в эластичный раствор, дали почти такие же результаты, как и при истечении раствора в раствор. Данные, полученные при истечении неэластичных растворов полиоксэтилена и гуаровой смолы в воду и, наоборот, воды в эти растворы, примерно совпадали с данными при течении неэластичного раствора в неэластичный раствор.

Проведенные опыты свидетельствуют о существенно различном поведении затопленных струй растворов полимеров в зависимости от их физико-механической структуры. При течении эластичного раствора полимера струя более дальнобойна, чем струя ньютоновской жидкости. Увеличение дальнобойности нагретой струи свидетельствует об уменьшении турбулентной диффузии тепла в ней. С другой стороны, струя неэластичного раствора полиоксэтилена, так же как и струя раствора гуаровой смолы, оказывается менее дальнобойной, а турбулентная диффузия в ней больше, чем в струе воды. Уменьшение турбулентной диффузии в струях естественно связать с континуальными вязко-упругими свойствами раствора, благодаря которым должны подавляться турбулентные пульсации, причем тем в большей степени, чем выше их частота. Увеличение турбулентной диффузии в струях неэластичных

растворов связано с наличием частиц-ассоциатов. Обращает на себя внимание аналогия с воздействием взвешенных частиц на инерционные турбулентные вихри ядра потока в трубе. Бобковичем и Говеном, исследовавшими снижение сопротивления трения при движении в трубах суспензий частиц, было показано [4], что при движении в трубах неконцентрированных суспензий найлоновых нитей в ядре потока имеется заметное увеличение турбулентного перемешивания.

Авторы благодарят Г. И. Баренблатта за внимание к работе, В. В. Тихомирова за помощь при изготовлении установки.

Поступило 9 VIII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. White D. A. Velocity measurements in axisymmetric jets of dilute polymer solutions, J. Fluid Mech., 1967, vol. 28, pt. 1.
2. Gadd G. E. Reduction of turbulent friction in liquids by dissolved additives. Nature, 1966, vol. 212, No. 5065.
3. Баренблатт Г. И., Калашников В. Н. О влиянии надмолекулярных образований в разбавленных растворах полимеров на турбулентность. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 3.
4. Bobkovicz A. J., Gauvin W. H. The effects of turbulence on the flow characteristics of model fibre suspensions. Chem. Engng. Sci., 1967, vol. 22, No. 2.

О ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ КОМПОНЕНТ В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

Ю. Т. БОРЩЕВСКИЙ, А. М. КОЛОДИН

(Винница)

Пусть в равномерном турбулентном потоке имеется источник твердых частиц шарообразной формы, которые поступают в поток со скоростью, меньшей продольной скорости течения. Очевидно, что из-за торможения частицами потока ниже источника образуется своеобразный турбулентный двухфазный след. Поставим задачу оценить корреляционные моменты $\langle v_{ik} s_i' \rangle$ (где s_i' — пульсация объемной концентрации, а v_{ik} — пульсационная скорость вдоль оси x_k), символизирующие диффузию частиц l -й компоненты (при $l = 1$ — жидкой, при $l = 2$ — твердой), основываясь на теории движения двухфазных потоков [1]. При этом за исходные примем уравнения энергии турбулентных пульсаций компонент двухфазного потока, приведенные в работе [2].

Пусть двухфазный турбулентный след имеет ось симметрии x_1 ; жидкость несжимаема; массовые силы, действующие на жидкость, малы; турбулентность однородна.

Если пренебречь членами, включающими поперечные скорости, и производными $\partial(\dots)/\partial x_1$ от осредненных величин, то баланс энергии, например, турбулентных пульсаций жидкой компоненты такого потока v_3' , направленных вдоль поперечной оси x_3 (индекс 1 опускаем), опишется уравнением

$$s \left\langle p' \frac{\partial v_3'}{\partial x_3} \right\rangle - \mu s \left[\left\langle \left(\frac{\partial v_3'}{\partial x_1} \right)^2 \right\rangle + \left\langle \left(\frac{\partial v_3'}{\partial x_1} \right)' \right\rangle^2 \right] + p \left\langle s' \frac{\partial v_3'}{\partial x_3} \right\rangle - \\ - \frac{\partial}{\partial x_3} \left[s \langle v_3' p' \rangle - \mu s \frac{\partial e_3}{\partial x_3} + \rho s \langle e' v_3' \rangle \right] + \rho \langle s' v_3' \rangle \frac{\partial e_3}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_3} \langle s' v_3' \rangle p = \Phi_3 \\ \left(e_3 = \left\langle \frac{v_3'^2}{2} \right\rangle \right) \quad (1)$$

Здесь s — объемная концентрация жидкости, ρ — массовая плотность, p — статическое давление, μ — вязкость жидкости, Φ_3 — работа сил взаимодействия, возникающих из-за отставания тяжелых частиц от жидких при перемешивании компонент. Штрихами в (1) отмечены пульсации соответствующих величин, а скоба является знаком осреднения.

В соответствии с работами [3, 4] в (1) можно сделать замену, позволяющую ввести величины, которые могут быть получены непосредственными измерениями

$$\left\langle p' \frac{\partial v_i'}{\partial x_i} \right\rangle = - \text{const} (4e_i - 2q) \quad (2)$$

$$\left\langle \left(\frac{\partial v_i'}{\partial x_k} \right)^2 \right\rangle = \text{const} \left[\frac{e_i}{L^2} + \frac{\text{const}}{3\mu L} q^{3/2} \right] = c_i^* e_i \quad (3)$$

$$(q = e_1 + e_2 + e_3, \quad j = 1, 2, 3)$$