

4. Фрумкин А. Н., Баготцкая И. А. Скорость падения капель ртути в вязкой среде. Докл. АН СССР, 1947, т. 55, стр. 135—140.
5. Городецкая А. В. Скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах *Re*. Ж. физ. химии, 1949, т. 23, вып. 1.
6. Козлов В. К., Мологин М. А. О скорости подъема и гидравлическом сопротивлении газоздушных пузырей в жидкости. Изд-во АН СССР, 1951, № 8.
7. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидравлика газожидкостных систем. Госэнергоиздат, 1958.
8. K r e v e l e n D. W. von H o f t i z e r P. I. Studies of gasbubble formation. Calculation of interfacial area in bubble contactors. Chem. Engng. progr., 1950, vol. 46, No. 1.
9. Лодыженский Р. М. Исследование движения воздушного пузырька в воде при высоких значениях *Re*. Ж. прикл. химии, 1954, т. 27, вып. 1.
10. Брандт Б. Б., Перазич Д. И. Режим обтекания жидкостью газовых пузырьков больших размеров. Инж.- физ. ж., 1966, т. 10, № 2.
11. Лэмб Г. Гидродинамика. М.—Л., Гостехиздат, 1947.
12. R e e b l s F. N., G a r b e r H. I. Studies on the motion of gas bubbles in liquids. Chem. Engng., 1953, vol. 49, No. 2.
13. Смирнов Н. И., Рубан В. Л. Относительная скорость движения капель в зависимости от скорости движения среды. Ж. прикл. химии, 1949, т. 22, вып. 10; Относительная скорость движения капель в переходной области. Ж. прикл. химии, 1951, т. 24, вып. 1.
14. Смирнов Н. И., Рубан В. Л. Скорость движения капель в зависимости от скорости движения среды. Ж. прикл. химии, 1949, т. 22, вып. 11.
15. Сахаров В. А. Экспериментальное определение относительной скорости движения газового пузырька в потоке жидкости. Изв. вузов, Нефть и газ, 1966, № 6.

#### СНИЖЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ МАЛОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

В. Н. Калашиников, Ю. Д. Райский, А. З. Темчин

(Москва)

Открытое Томсом [1] явление снижения турбулентного трения при течении вдоль гладкой поверхности жидкости с малыми добавками некоторых растворимых полимеров связано с уменьшением интенсивности поперечных турбулентных пульсаций в слое, непосредственно прилегающем к поверхности. Измерения профилей скорости показывают, что добавки полимеров заметно увеличивают толщину вязкого подслоя [2]. Явление это связано с возникновением в растворах крупных ассоциаций макромолекул полимера и молекул растворителя, влияющих на развитие турбулентных вихрей [3,4].

Уменьшение уровня турбулентного перемешивания вблизи обтекаемой стенки благодаря добавкам полимера должно приводить не только к уменьшению переноса импульса, но также и к уменьшению турбулентного теплообмена. В работе [5] сообщается о снижении теплоотдачи от стенки трубы при течении по ней растворов полиакриламида. В предлагаемом сообщении приведены результаты, полученные при исследовании нагрева текущих по трубе растворов гуаровой смолы.

Эксперименты были проведены на циркуляционной установке, схематически представленной на фиг. 1. В зависимости от эксперимента, вода или водные растворы гуаровой смолы поступали от насоса 4 через регулирующий расход вентиль 3 в калиброванную медную трубку 1 диаметром 7,82 мм и длиной 240 см, заключенную на некотором участке в стальной кожух 2. Температурный перепад между стенкой медной трубы и текущей по ней жидкостью поддерживался циркуляцией внутри кожуха воды, нагретой до 60—90° С. Кожух охватывал трубу на длине 165 см. Падение давления измерялось на участке длиной 182 см. Длина начального участка равнялась примерно 65 калибрам. Падение давления измерялось дифференциальным манометром 8, заполняемым в зависимости от величины перепада ртутью или четыреххлористым углеродом. Приращение температуры жидкости определялось при помощи термометров 10, установленных в начале и конце трубы в теплоизолированных вставках 9. Фиксировалась также температура воды на входе и выходе кожуха теплообменника. Теплообменник и труба с внешней стороны были теплоизолированы. Такая постановка измерений позволяла определять количество тепла, переданного в теплообменнике текущей по трубе жидкости.

Температура стенки трубы определялась медь-константановыми термопарами 11, расположенными на расстоянии 8 см от мест стыковки кожуха с трубой. ЭДС термопар измерялась потенциометром УПИИ-60М.

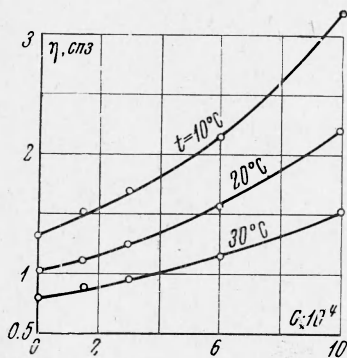
Из измерительного участка жидкость поступала в холодильник 5, который давал возможность поддерживать постоянной температуру жидкости на входе в измерительный участок. Расход жидкости измерялся при помощи диафрагмы 6, снабженной дифференциальным манометром 7. Была использована диафрагма с отверстием диаметром 14 мм, установленная в трубе, внутренний диаметр которой составлял 20 мм. Проведенная объемным способом тарировка диафрагмы показала, что падение давления на ней при течении растворов гуаровой смолы несколько ниже, чем на обычной жидкости. Это снижение при концентрации раствора  $3 \cdot 10^{-4}$  по весу составляло 6—8%. (Аналогичное снижение сопротивления диафрагмы наблюдается и при течении растворов полиоксэтилена [9]). При малых расходах жидкости расход измерялся объемным способом.

Эксперименты были проведены на воде и на водных растворах гуаровой смолы. Сухая гуаровая смола смешивалась с дистиллированной водой при комнатной температуре, после чего раствор выдерживался 2—3 суток. На фиг. 2 приведены значения динамического коэффициента вязкости  $\eta$  в зависимости от концентрации  $C$  и температуры раствора. Вязкость определялась с помощью вискозиметра Оствальда с диаметром капилляра 1.16 мм. Плотность растворов таких концентраций практически не отличается от плотности воды.

На фиг. 3 приведены значения коэффициента сопротивления  $\lambda$  для воды и растворов гуаровой смолы в зависимости от величины числа Рейнольдса  $R = wd\rho/\eta$ . Коэффициент сопротивления  $\lambda$  определялся из соотношения

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2}$$

В этих равенствах  $w$  — средняя скорость жидкости в трубе,  $d$  — диаметр трубы,  $\eta$  — динамический коэффициент вязкости,  $\rho$  — плотность жидкости,  $l$  — длина участка трубы, на котором измерялось падение давления  $\Delta p$ . На фиг. 3 точки 1 относятся к течению воды, точки 2, 3, 4 — к течению растворов гуаровой смолы концентрацией  $1.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-4}$  и  $5 \cdot 10^{-4}$  соответственно. Как следует из данных фиг. 3, в турбулентном режиме течения при низких значениях числа Рейнольдса касательные напряжения на стенке трубы для обычной жидкости и для растворов гуаровой смолы одинаковы. Они отличаются лишь при достаточно высоких числах Рейнольдса, причем

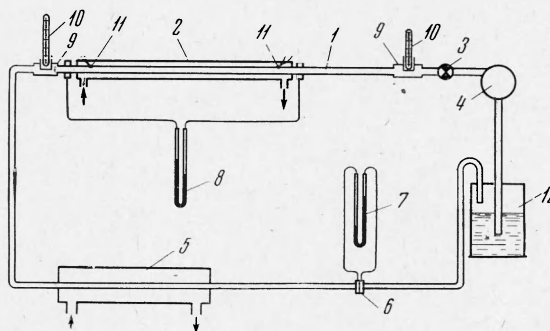


Фиг. 2

снижение сопротивления на полимерном растворе тем больше, чем выше значение этого числа. С увеличением концентрации раствора гуаровой смолы от нуля до  $3 \cdot 10^{-4}$  эффект снижения сопротивления растет, однако дальнейшее увеличение концентрации практически не изменяет эффекта. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, приводимыми в литературе.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определялся при помощи соотношения  $\alpha s \Delta t = q$ , где  $s$  — площадь нагретой поверхности трубы,  $\Delta t$  — средняя разность температур стенки трубы и жидкости, текущей по ней,  $q$  — количество тепла, переданного жидкости в единицу времени. Величина  $q$  определялась по увеличению температуры жидкости и ее расходу. Ввиду малых концентраций полимерных растворов их теплоемкость могла быть принята равной теплоемкости воды.

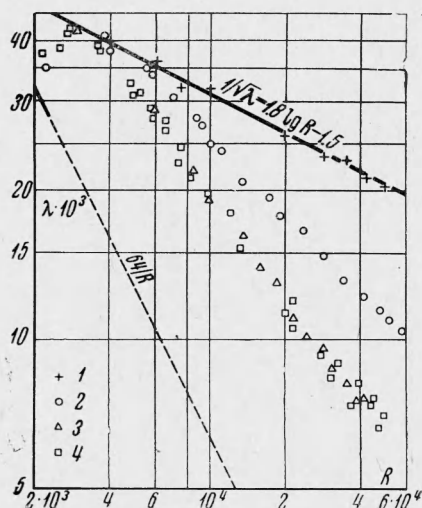
В экспериментах наблюдалось снижение коэффициента теплоотдачи, аналогичное снижению коэффициента сопротивления. Так же как и гидродинамическое сопротивление, теплоотдача воде и растворам гуаровой смолы в турбулентном режиме течения при малых числах Рейнольдса одинакова. Это, в частности, свидетельствует о практическом совпадении значений коэффициента теплопроводности  $\mu$  разбавленных растворов гуаровой смолы и воды.



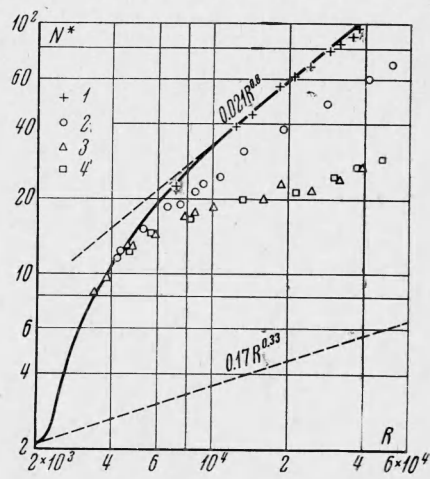
Фиг. 1

На фиг. 4 представлены в безразмерных координатах данные о теплоотдаче, причем сохранены обозначения, использованные на фиг. 3. По оси абсцисс отложено число Рейнольдса, по оси ординат — комплекс  $N^* = NR^{-0.43} (P/P_1)^{-0.25}$ , где  $N = \alpha d/\mu$  — число Нуссельта, а  $P = \eta c_p/\mu$  — число Прандтля; индекс 1 означает, что число Прандтля вычислено по средней температуре стенки. Коэффициент теплопроводности  $\mu$  при вычислении числа  $N$ , как и величины, входящие в число Прандтля без индекса, взяты при средней температуре жидкости [7].

Как и гидродинамическое сопротивление, турбулентная теплоотдача при растворении в воде полимера уменьшается. С ростом концентрации раствора от нуля до  $3 \cdot 10^{-4}$  теплоотдача понижается. Дальнейшее увеличение концентрации практически не влияет на передачу тепла. Данные об этом предельном значении теплоотдачи при



Фиг. 3



Фиг. 4

течении растворов гуаровой смолы ложатся примерно на прямую, параллельную прямой  $0.17 R^{0.33}$ , которая соответствует теплоотдаче при полностью ламинарном течении жидкости. Наблюдается примерно такое же относительное снижение теплоотдачи, как и гидродинамического сопротивления. При  $R = 5 \cdot 10^4$  и концентрации раствора  $3 \cdot 10^{-4}$  и выше происходит четырехкратное снижение теплоотдачи.

В заключение авторы приносят благодарность Г. И. Баренблатту за внимание к работе.

Поступила 15 VIII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tom s B. A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds number. Proc. 1st Internat. Rheolog. Congress, Holland, 1948.
2. Elata S., Lehrer I., Kahanovitz A. Turbulent shear flow of polymer solutions. Israel J. Technol., 1966, vol. 4, No. 1—2.
3. Баренблатт Г. И., Булина И. Г., Зельдович Я. Б., Калашников В. Н., Шоломович Г. И. Об одном возможном механизме влияния малых добавок высокомолекулярных соединений на турбулентность. ПМТФ. 1965, № 5.
4. Баренблатт Г. И., Калашников В. Н. О влиянии надмолекулярных образований в разбавленных растворах полимеров на турбулентность Изв. АН СССР. МЖГ, 1968, № 3.
5. Gupta M. K., Metzner A. B., Hartnett J. P. Turbulent heat-transfer characteristics of viscoelastic fluids. Int. J. Heat Mass Trans., 1967, vol. 10, No. 9.
6. Bate H. G. Orifice plate calibration in a dilute polymer solution. Nature, 1967, vol. 216.
7. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.— Л., Госэнергоиздат, 1956.