

ничивались малыми значениями электрического тока, вызывающего быстрый нагрев жидкости и даже ее кипение. В первом приближении указанная зависимость носит линейный характер.

Проведенные эксперименты наводят на мысль, что любое, в том числе и чисто механическое, но достаточно интенсивное вихревое течение, вызывает возникновение в жидкости своеобразной «структурной прочности».

Поступило 9 X 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hartman J., Lazarus F. Hg — dynamics, II, Kgl. Danske Videnskabernes Selskab. Math. fis. medd., Copenhagen, 1937, vol. 15, No. 7.
2. Murgatroyd W. Experiments on magneto-hydrodynamic channel Flow. Phyllos. Mag., 1953, vol. 44, No. 359.
3. Брановер Г. Г., Лиелаусис О. А. Об особенностях влияния поперечного магнитного поля на турбулентные течения жидкого металла при различных числах Рейнольдса. Вопросы магнитной гидродинамики, Изд. 3, стр. 59—65.
4. Андрес У. Ц. Магнитогидродинамическая сепарация зернистых смесей. Ин-т Цветметинформация, М., 1967, стр. 72.
5. Идельчик И. Е. Гидравлические сопротивления. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954.
6. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Изд. 8, М., «Наука», 1966.
7. Leenov D., Kolin A. Theory of electromagnetohydrodynamic forcocs experienced by spherical and symmetrically oriented gyendrical particles. J. Chem. Phys., 1954, vol. 22, No. 1.
8. Андрес У. Ц., Полак Л. С., Сыроватский С. И. Электромагнитное выталкивание сферического тела из проводящей жидкости. Ж. техн. физ., 1963, т. 33, № 3.

### ОБ ЭФФЕКТЕ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ШЕРОХОВАТЫХ ТРУБАХ ВОДОРАСТВОРИМЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

И. В. ГАЗУКО, В. А. ГОРОДЦОВ

(Москва)

Работой Томса 1948 г. [1] началось исследование влияния высокомолекулярных полимерных добавок на гидродинамическое сопротивление жидкостей. Эффект снижения сопротивления был обнаружен и исследовался при турбулентном течении многих водных растворов полимеров в гладких трубах. Оказалось, что небольшие добавки таких полимеров, как полиэтиленоксид, полиакриламид и гуаровая смола, могут понизить сопротивление в 2—3 раза. Аналогичное воздействие оказывают эти полимеры на течения между вращающимися дисками и цилиндрами, на обтекание тел внешним потоком.

Такой большой эффект снижения имеет место при турбулентном режиме течения и связан с перестройкой структуры турбулентности. Эксперименты с размыванием окрашенной струйки турбулентным потоком [2, 3] наглядно продемонстрировали гашение высокочастотных, мелкомасштабных турбулентных пульсаций полимерными добавками. Гасящее действие полимеров на возмущения сказывается и в затрудненном развитии вторичных течений. В работе [4] это было показано в случае рождения тейлоровских вихрей при течении полимерных растворов между вращающимися цилиндрами.

При сдвиговых турбулентных течениях возле ограничивающих поток твердых стенок мелкомасштабная турбулентность играет наибольшую роль в непосредственной близости от стенок в вязком подслое и в буферной, переходной зоне течения, на которую приходится максимум порождения и диссипации турбулентности. Вследствие указанного гашения полимерными добавками мелкомасштабных пульсаций можно ожидать, что будет увеличиваться маловозмущенная зона течения у стенки через подавление роста возмущений, при этом такая ламинаризация должна уменьшать сопротивление. Это было действительно установлено измерениями профиля средней скорости и сопротивления течению полимерного раствора в гладких трубах [5]. Более того, в исследовании [5] весь эффект снижения сопротивления связывается с утолщением вязкого подслоя.

С этой точки зрения полимеры можно рассматривать как эффективное средство воздействия на вязкий подслей, приводящее к его утолщению. Однако существуют и другие, ставшие уже классическими средства, такие, как шероховатость, отсос и т. п. Причем, например, шероховатость приводит, наоборот, к дестабилизации течения и утоньшению вязкого подслоя (вплоть до полного его уничтожения). Представляет интерес изучение совместного действия особенно таких противоположных фак-

торов. Оно может служить целям выяснения особенностей поведения пограничного слоя, а также правильности изложенных взглядов на роль вязкого подслоя в эффекте снижения сопротивления полимерными добавками. В. Н. Калашниковым был поставлен эксперимент по исследованию течения полимерных растворов между шероховатыми дисками, в котором обнаружено резкое уменьшение эффекта снижения сопротивления при помощи достаточно большой шероховатости. В данной работе аналогичное исследование проводилось на шероховатых трубах.

Из органического стекла были изготовлены три трубы прямоугольного поперечного сечения, близкого к квадратному. Труба 1, которую будем называть гладкой, изготовлялась следующим образом: в полосе органического стекла фрезой выбирался канал прямоугольного сечения, затем стенки канала полировались войлочным диском и сверху наклеивалась другая полоса материала. В трубе 2 на стенки наносились поперечные бороздки глубиной 0.1—0.2 мм: 1—2 на 1 мм. На трех стенках трубы 3 наклеивались песчинки, отобранные просеиванием через два сита с размерами отверстий 0.3 и 0.4 мм. Приводим остальные данные о трубах

Труба	Размеры (см)	$r$ (см)	$l/r$	$h/r$
1	0.22×0.22×43.6	0.11	400	$1/25$
2	0.224×0.211×43.8	0.11	400	$1/11-1/6$
3	0.40×0.43×91.6	0.21	450	$1/7-1/5$

Здесь  $r$  — гидравлический радиус, определенный как удвоенное отношение площади поперечного сечения к периметру сечения трубы;  $l$  — длина трубы;  $h$  — высота элементов шероховатости;  $h/r$  — относительная шероховатость.

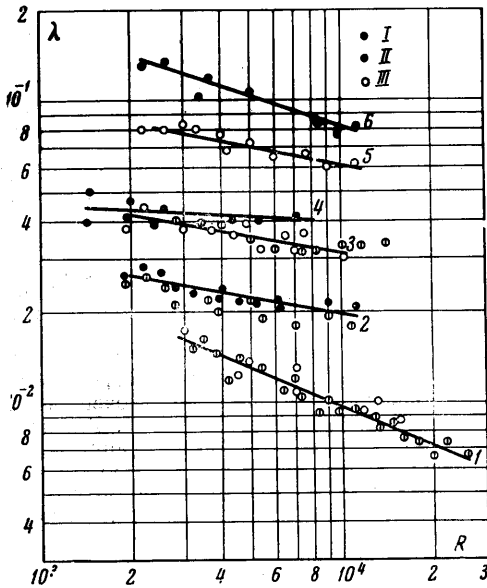
На всех трех трубах исследовалось течение воды и 0.01%-ных растворов полиэтиленоксида с молекулярным весом  $\sim 3.5 \cdot 10^6$  и полиакриламида — 40. Жидкости выдавливались из бачка объемом 4 литра. При обработке результатов экспериментов поправки на входные потери давления не вводились, поскольку они невелики и мало отражаются на относительных величинах, представляющих здесь интерес. Результаты экспериментов приведены на фигуре в виде зависимостей коэффициента сопротивления  $\lambda$  от числа Рейнольдса  $R$

$$\lambda = \frac{2r\Delta p}{lv^2} \quad R = \frac{vr}{\nu}$$

Здесь  $\Delta p$  — перепад давления,  $\rho$  — плотность,  $(\rho\nu)$  — вязкость жидкости,  $v$  — средняя скорость в трубе, равная отношению расхода в единицу времени к площади поперечного сечения трубы. Как видно из графиков, исследовалось лишь турбулентное течение в основном при числах Рейнольдса от  $2 \cdot 10^3$  до  $10^4$ . На фигуре нанесены значения сопротивления течения воды, раствора полиэтиленоксида и полиакриламида точками I, II и III соответственно. Отрезки 1 и 2 соответствуют случаю течения в гладкой трубе 1, отрезки 3 и 4 — в шероховатой трубе 2, отрезки 5 и 6 — в трубе с песочной шероховатостью 3, кроме того, точки II вдоль отрезков 3 и 2 относятся к течению раствора полиэтиленоксида в трубах 3 и 2, а кружки вдоль отрезка I — раствору полиакриламида в трубе 1.

Влияние шероховатости на течение обычных вязких жидкостей в трубах хорошо изучено. При этом классификация шероховатых труб обычно связывается с основными представлениями о пограничном слое [6, 7]. Область течения в гладких трубах вблизи стенки, где основную роль играют вязкие силы, называют вязким подслоем и часто пользуются формулой  $\delta_0 \approx 5 \nu / v_*$  для оценки его толщины ( $v_* = (\tau_w / \rho)^{1/2}$  — так называемая динамическая скорость, а  $\tau_w$  — сдвиговое напряжение на стенке трубы). Для чисел Рейнольдса  $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$  закон сопротивления гладких труб хорошо описывается формулой Блазиуса (пропорциональность  $R^{-1/4}$ ), используя которую нетрудно получить для  $\delta_0$  формулу

$$\delta_0 / r \approx 30 / R^{1/4} \quad (1)$$



Если высота элементов шероховатости  $h$  меньше толщины вязкого подслоя  $\delta_0$ , то они не создают существенных возмущений и в таком случае трубы называют динамически гладкими. Если  $\delta_0 < h \leq 10 \delta_0$ , то бугорки шероховатостей находятся в переходной зоне и наряду с вязкостью влияют на характер турбулентного течения, стенки трубы тогда называют слегка шероховатыми [6]. Наконец, при  $h \geq 15 \delta_0$  элементы шероховатости уже сами создают турбулентность, обычное понятие вязкого подслоя уже лишено смысла и трубы носят название вполне шероховатых.

Вернемся теперь к исследуемым трубам<sup>1</sup>. Из-за их прямоугольных поперечных сечений некоторые понятия в прежнем виде, строго говоря, не применимы. Например, уже нет единого напряжения на стенках. Однако, обрабатывая результаты при помощи введенного выше гидравлического радиуса, равного истинному радиусу для круглой трубы, и понимая такие характеристики как напряжение на стенке в среднем, можно пользоваться для оценок формулами для круглых труб [7]. Согласно формуле (1), при числе Рейнольдса  $R \approx 2 \cdot 10^3$  относительная толщина вязкого подслоя  $\delta_0/r$  составляет  $\sim 1/30$ , в то время как шероховатость в трубах 2 и 3 в несколько раз выше этого значения во всей исследованной области чисел Рейнольдса от  $2 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^4$ . Поэтому в обоих случаях шероховатость больше толщины вязкого подслоя. Более того, трубу 2 при числе Рейнольдса, больших  $8 \cdot 10^3 - 1.5 \cdot 10^4$ , а трубу 3 уже при числах Рейнольдса, больших  $7 \cdot 10^3 - 9 \cdot 10^3$ , следует считать, согласно приведенной выше классификации<sup>2</sup>, вполне шероховатыми.

Таким образом, исследованная область чисел Рейнольдса охватывает случаи, в которых размеры бугорков шероховатости и переходной зоны течения могут быть сравнимы по величине. Более того, при числах Рейнольдса  $R \sim 10^4$  глубина переходной зоны меньше высоты бугорков шероховатости. В этих случаях вязкий подслоя сильно меняется и вовсе исчезает. Поэтому, согласно концепции «утолщения вязкого подслоя» [8], можно было ожидать исчезновения эффекта снижения сопротивления в шероховатых трубах. Резкое уменьшение эффекта снижения сопротивления действительно наблюдалось для одного из испытанных полимеров: раствора полиакриламида-40. Если в «гладкой» трубе 1 эффект снижения сопротивления этим раствором при  $R \approx 10^4$  достигал 50% (точки III на фигуре располагаются вдоль отрезка 1 на несколько процентов выше), то в шероховатых трубах он составлял около 20%. Следовательно, здесь изменение вязкого подслоя существенно сказывается на сопротивлении. Совершенно иначе обстоит дело с другим полимерным раствором — раствором полиэтиленоксида. Хотя характер снижения сопротивления в шероховатой трубе несколько иной (поведение кривой сопротивления полимерного раствора в этом случае приблизительно эквивалентно поведению воды в менее шероховатой трубе), в процентном отношении оно не уменьшается: в трубе 2 снижение сопротивления составляет те же 50%, что и в трубе 1, а в трубе 3 даже увеличивается до 60%. Очевидно, что в этом снижении сопротивления вязкий подслоя никакой роли играть не может, а необходима существенная перестройка, по крайней мере, вихрей переходной (буферной) зоны.

Сделаем еще несколько замечаний относительно результатов, представленных на фигуре.

На фигуре нанесены точки в основном в области чисел Рейнольдса  $2 \cdot 10^3 - 10^4$  и в этой области по экспериментальным точкам проведены отрезки прямых; точки из области несколько больших и меньших чисел Рейнольдса не указаны, поскольку недостатки экспериментальной установки сильно сказываются на загибах соответствующих им кривых. Подчеркнем еще раз, что целью этого исследования было получение относительных данных о действии шероховатости; для получения количественных, абсолютных данных необходимы более точные и подробные исследования (особенно при больших числах Рейнольдса).

Отрезок прямой 2 на фигуре, который соответствует зависимости от  $R$  сопротивления течению воды в гладкой трубе 1, лежит несколько выше и с несколько меньшим наклоном, чем требуется законом Блазиуса. Это, по-видимому, связано с недостаточной гладкостью трубы 1: во-первых труба обрабатывалась фрезой и потому могла образоваться волнистость стенок, во-вторых, после обработки войлочным диском все еще должна остаться большая шероховатость (можно лишь быть уверенным, что относительная шероховатость меньше  $1/25$ ).

Наконец, поперечное сечение трубы 3 промерено до наклейки песка и потому истинная площадь сечения трубы меньше, а следовательно, отрезки прямых 6, 5 и точ-

<sup>1</sup> При течениях жидкостей в прямоугольных трубах не последнюю роль играют вторичные течения в углах труб и действие полимера должно сказаться и на них, однако, по-видимому, изменения этих вихрей не играют определяющую роль в описываемых здесь явлениях.

<sup>2</sup> Строго говоря, к трубе 2 указанную классификацию применять нельзя, поскольку она касается песчаной шероховатости, а эквивалентная песчаная шероховатость этой трубы не выяснялась.

ки II вдоль отрезка 3 на фигуре лежат с завышением на 10—20%, однако на относительном положении этих отрезков это слабо сказывается.

В заключение отметим, что обнаруженное различие между двумя полимерами в отношении снижения сопротивления в шероховатых трубах (полимерами, которые в гладких трубах дают примерно одинаковое снижение сопротивления) коррелируется с многочисленными уже известными различиями их гидродинамического поведения [8]. Подчеркнем различие, имеющее непосредственное отношение к влиянию шероховатости: добавление полиэтиленоксида в поток приводит к понижению частоты схода вихрей с цилиндрической проволоки малого диаметра [8], в то время как полиакриламид (несколько отличный от использованного в данной работе) действует весьма слабо.

Авторы благодарят Г. И. Баренблата и В. Н. Калашникова за обсуждение, И. Г. Булину — за любезное содействие в проведении эксперимента.

Поступило 21 XII 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Toms V. A. Some observations. on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. Proc. Internat. Congress on Rheolog. Holland, 1948, Amsterdam, North-Holland, Publ. Co., 1949, p. 135.
2. Баренблатт Г. И., Булина И. Г., Мясников В. П., Шоломович Г. И. О влиянии малых добавок растворимых высокомолекулярных соединений на режим движения жидкости. ПМТФ, 1965, № 4.
3. Gadd G. E. Turbulence damping and drag reduction produced by certain additives in water. Nature, 1965, vol. 206, No. 4983.
4. Rubin H., Elata C. Stability of couette flow of dilute polymer solutions. Phys. Fluids, 1966, vol. 9, No. 10.
5. Elata C., Lehrer J., Kahanovitz A. Turbulent shear flow of polymer solutions. Israel J. Technol., 1966, vol. 4, No. 1—2.
6. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика, ч. 1. М., «Наука», 1965.
7. Шиллер Л. Движение жидкости в трубах. М.—Л., ОНТИ, 1936.
8. Gadd G. E. Reduction of turbulent friction in liquids by dissolved additives. Nature, 1966, vol. 212, No. 5065.
9. Gadd G. E. Effects of long — chain molecule additives in water on vortex streets. Nature, 1966, vol. 211, No. 5045.

#### СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЗАТУХАНИЕ СЛАБЫХ СКАЧКОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ДАВЛЕНИЯ В НАСЫЩЕННОЙ, ПРОИЗВОЛЬНО СЦЕМЕНТИРОВАННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Ф. ГИМАЛИТИДИНОВ (Ташкент)

Для системы линеаризованных уравнений динамики упругих насыщенных пористых сред выписывается система характеристических уравнений в нормальном виде. Проведен расчет скорости распространения и коэффициентов затухания для слабых разрывов при произвольной цементации среды.

Линеаризованная система динамических уравнений насыщенной жидкостью пористой среды может быть сведена к следующей системе для одномерных плоских волн [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \rho_1(1 - m_0) \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_2(1 - m_0) \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\mu}{a_0} m_0(1 - m_0)(w - u) &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} + \rho_2 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\mu}{a_0} m_0(1 - m_0)(w - u) &= 0 \\ (1 - m_0)(1 - \alpha_1 K) \frac{\partial u}{\partial x} + m_0 \frac{\partial w}{\partial x} + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} = 0, & \quad \frac{1 - m_0}{\beta} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} + (1 - m_0) \alpha_1 K \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \\ \beta = \frac{1}{\lambda_1 + 2\lambda_2}, & \quad \alpha = \alpha_2 m_0 + \alpha_1(1 - m_0)(1 - \alpha_1 K) \end{aligned}$$

Здесь  $\sigma$  — напряжение в твердой фазе,  $p$  — давление в жидкости,  $u$ ,  $w$  — скорости движения твердой и жидкой фаз,  $m_0$  — пористость,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  — плотности,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — коэф-