

ВИХРИ КАРМАНА В ПОТОКАХ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ, СНИЖАЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ

В. Н. КАЛАШНИКОВ, А. М. КУДИН

(Москва)

Исследуя растворы полимеров, снижающих сопротивление трения, Гэдд отметил, что при обтекании тонкой проволоки некоторыми из таких растворов срыв вихрей Кармана происходит с меньшей, чем при обтекании обычными ньютоновскими жидкостями, частотой [1]. Такое изменение частоты вихрей наблюдалось при течении водного раствора полиоксиэтилена. Добавки к воде гуаровой смолы, так же как и добавки полиоксиэтилена, снижающие сопротивление трения, по наблюдениям Гэдда не приводили к изменению частоты вихрей Кармана. Возможно, наблюдаемое различие связано с тем, что Гэдд использовал только свежеприготовленные растворы полиоксиэтилена, а их структура отличается от структуры растворов гуаровой смолы [2].

Свежеприготовленные водные растворы полиоксиэтилена обнаруживают вязкоупругие, эластические свойства. Эти растворы образуют при вытяжке длинные нити; при вращательном движении раствора можно наблюдать эффект Вейссенберга. Свежие растворы полиоксиэтилена представляют собой вязкоупругую сплошную среду; но эти растворы неоднородны, они содержат крупные частицы — ассоциации макромолекул полимера и молекул растворителя, существование которых косвенно можно обнаружить по заниженным показаниям трубок полного напора и аномальным флуктуациям выходного сигнала термоанемометра [2, 4]. Эти частицы (или капли) представляют собой вязкоупругие образования, упругость которых, по-видимому, существенно больше чем упругость окружающего раствора. По-видимому, в свежем растворе полиоксиэтилена образуется сплошная флуктуирующая трехмерная сетка полимерных молекул, густая в частицах и редкая в окружающей их жидкости. Водные растворы гуаровой смолы не обнаруживают заметных континуальных вязкоупругих свойств, но они также содержат вязкоупругие частицы.

Таким образом, свежие растворы полиоксиэтилена можно рассматривать как суспензии вязкоупругих частиц в вязкоупругой жидкости, а растворы гуаровой смолы — как суспензии вязкоупругих частиц в практически ньютоновском растворе.

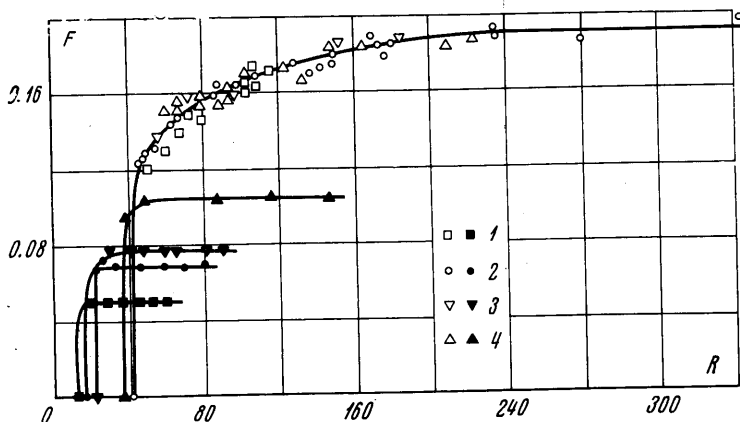
После некоторого времени выдерживания свежие растворы полиоксиэтилена постепенно теряют свои эластические свойства. Этот процесс значительно ускоряется в сдвиговом потоке. Потери всех аномальных свойств при этом не происходит; так же, как эластичные растворы полиоксиэтилена и растворы гуаровой смолы, неэластичные растворы полиоксиэтилена в потоке у гладкой поверхности обнаруживают пониженное турбулентное трение. По-видимому, утрата эластических свойств обуславливается тем, что сплошная сетка макромолекул под влиянием теплового движения или сдвига разбивается на отдельные куски сеток, так же как в растворах гуаровой смолы образующих каркас частиц-ассоциатов, присутствие которых в растворе обнаруживается косвенными методами, отмеченными выше.

Гидромеханическое поведение эластичных и неэластичных растворов различно. Так, турбулентность в затопленных струях эластичных растворов меньше, чем в струях обычной жидкости, а в струях неэластичных, содержащих ассоциаты растворов, больше. Это проявление более общей закономерности, заключающейся в различном воздействии на инерционные турбулентные вихри: наличие континуальных вязкоупругих свойств растворов приводит к снижению интенсивности инерционных турбулентных вихрей, тогда как в растворах, содержащих ассоциаты, но не обнаруживающих континуальных вязкоупругих свойств, интенсивность инерционных турбулентных вихрей больше, чем в обычной жидкости. Кроме изменения струйной турбулентности, это общее свойство проявляется в некотором увеличении турбулентного трения при течении неэластичных ассоциатосодержащих растворов у шероховатых стенок, когда порождение турбулентности инерционно по своей природе и связано в основном со срывом турбулентных вихрей с выступов шероховатости.

Очевидно отмеченные свойства растворов должны проявиться и в таком явлении, как образование вихрей Кармана за обтекаемым телом. Вихри Кармана в первом приближении могут быть классифицированы как инерционные вихри, поскольку, возникнув при определенном числе Рейнольдса, в дальнейшем они слабо зависят от его величины. Можно ожидать изменений вихревой дорожки по сравнению с ньютоновским случаем как при течении эластичных, так и неэластичных растворов полимеров, причем изменений, различных по знаку. Поэтому, на наш взгляд, нуждаются в уточнении и проверке результаты Гэдда, относящиеся не только к растворам полиоксиэтилена, но и к растворам гуаровой смолы. Такое уточне-

ние необходимо для исследования влияния полимерных добавок на нестационарное движение жидкости и турбулентность.

В проведенных экспериментах использовалась установка, представляющая собой широкую емкость, в дне которой был укреплен короткий сходящийся насадок с выходным диаметром 1 см. Колебраванная по диаметру проволока устанавливалась в выходном сечении насадка. За проволокой, на расстоянии ее 10 диаметров, устанавливался датчик термоанемометра. Использовался термоанемометр с покрытием кварцем пленочным клиновидным датчиком фирмы DISA Elektronik. Датчик устанавливался так, что ребро клина с нагреваемой пленкой находилось в плоскости, перпендикулярной проволоке. При такой установке датчика все вихри, срывающиеся с проволоки, омывали чувствительную пленку. В зависимости от диаметра ис-



Фиг. 1

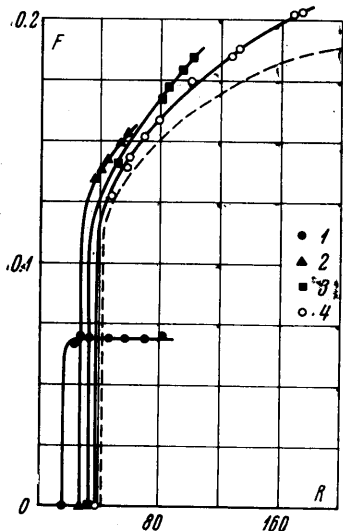
пользуемой проволоки вихревая пелена захватывала различные части длины чувствительной пленки. В экспериментах измерялась скорость обтекания проволоки как объемным способом, так и с помощью термоанемометра. Частота следования вихрей определялась путем сравнения по фигуре Лиссажу на экране осциллографа колебаний, регистрируемых термоанемометром, и колебаний с известной частотой от звукового генератора. Используемая методика позволила также проводить сравнительные измерения амплитуд пульсаций скорости в следе за проволокой. (Абсолютные измерения амплитуд были невозможны из-за значительных размеров датчика.)

На фиг. 1 приведена безразмерная частота вихрей Кармана (обратное число Струхалия) $F = fd/v$ в зависимости от числа Рейнольдса $R = vd/\nu$ (f — частота вихрей, d — диаметр проволоки, v — скорость жидкости, ν — кинематический коэффициент вязкости). Экспериментальные результаты, отмеченные на фиг. 1 незалитыми точками, получены при обтекании проволок различного диаметра водой. Точки 1, 2, 3, 4 соответствуют диаметрам проволок 0,17, 0,25, 0,31, 0,57 мм. До числа Рейнольдса, примерно равного 41, наблюдается стационарное обтекание. Вихри Кармана возникают при числах Рейнольдса, превышающих это значение. Безразмерная частота слабо зависит от числа Рейнольдса, особенно при больших его значениях. В интервале чисел Рейнольдса от 41 примерно до 170 в большинстве случаев наблюдаются устойчивые синусоидальные колебания. Иногда на эти колебания накладываются синусоидальные колебания с существенно меньшей частотой, по-видимому, соответствующие вторичным возмущениям, отмеченным в [3]. При больших числах Рейнольдса устойчивая гармоника начинает чередоваться с нерегулярными пульсациями, но вплоть до числа Рейнольдса, равного примерно 300, еще удается уверенно измерять частоту этой гармоника.

Результаты, получаемые при течении растворов полимеров, существенно зависят от способа приготовления раствора. Даже для одинаково, но в разное время, приготовленных растворов не удавалось получить точно повторяющихся данных. Однако качественный характер кривых оставался при этом неизменным. Залитыми значками на фиг. 1 отмечены данные, полученные при течении эластичного раствора поллюксэтилена (Polyox WSR 301), весовой концентрацией 10^{-4} . После перемешивания сухого полимера с водой раствор выдерживался около четырех суток. Этот раствор сохранил способность к образованию при вытяжке довольно длинных нитей. Как видно из фиг. 1, безразмерная частота F для эластичных растворов уже не будет функцией только числа Рейнольдса. Для различных диаметров проволок

получаются различные кривые. С уменьшением диаметра уменьшается значение числа Рейнольдса, при котором возникает периодическое движение в следе и снижается безразмерная частота срывов вихрей. Это говорит о неьютоновских свойствах таких растворов, связанных с появлением нового параметра, так же как и число Рейнольдса, определяющего процесс кармановского вихреобразования. Добавочным параметром может быть число $\theta v / d^2$ (θ — время релаксации), определить численное значение которого не представлялось возможным из-за трудностей экспериментального измерения θ .

Интенсивность вихрей Кармана, измеренная при обтекании проволоки эластичным раствором полиоксидиэтилена, оказалась существенно ниже интенсивности вихрей, возникающих при обтекании проволоки водой. Это можно видеть по уменьшению амплитуды выходного сигнала, которая даже после введения поправки на менее крутую тарировочную кривую термоанемометра в потоке раствора полиоксидиэтилена оставалась ниже амплитуды на воде. Появление беспорядочных пульсаций наступало при меньших числах Рейнольдса, причем тем меньших, чем меньше диаметр проволоки.



Фиг. 2

их частоты в ньютоновской жидкости (пунктирная кривая). Наблюдается значительное увеличение амплитуды колебаний, соответствующих вихрям Кармана, по сравнению с ньютоновским случаем. По мере дальнейшего измельчения ассоциатов амплитуда и частота колебаний уменьшаются, стремясь к их значениям на воде. Увеличение амплитуды и частоты колебаний наблюдается также и при обтекании проволоки раствором гуаровой смолы. Данные о безразмерной частоте представлены на фиг. 2 для раствора гуаровой смолы концентрацией $5 \cdot 10^{-4}$ и проволоки диаметром 0.25 мм (пустые значки 4).

Полученные данные согласуются с представлением о том, что в неэластичных ассоциатосодержащих растворах интенсивность инерционных вихрей увеличивается, тогда как в эластичных растворах она уменьшается.

В заключение авторы благодарят Г. И. Баренблатта за обсуждение результатов и Л. А. Родионову за помощь в проведении экспериментов.

Поступило 4 VI 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Gadd G. E. Reduction of turbulent friction in liquids by dissolved additives. Nature, 1966, vol. 212, No. 5065.
2. Баренблатт Г. И., Калашников В. Н. О влиянии надмолекулярных образований в разбавленных растворах полимера на турбулентность. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 3.
3. Zdravkovich M. M. Note on transition to turbulence in Vortex-Street Wakes. J. Roy. Aeronaut. Soc., 1967, vol. 71, No. 684.
4. Баренблатт Г. И., Калашников В. Н., Кудин А. М. Об исследовании структуры полимерных растворов с помощью термоанемометра. ПМТФ, 1968, № 4.