

УДК 532.574.22:532.582.7+541.12

ОБ АНОМАЛЬНЫХ ПОКАЗАНИЯХ ТРУБОК ПИТО В СУСПЕНЗИЯХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ И В РАСТВОРАХ ПОЛИМЕРОВ, СНИЖАЮЩИХ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТРЕНИЕ

В. Н. КАЛАШНИКОВ, А. М. КУДИН

(Москва)

Обнаружено аномальное снижение показаний трубок Пито в потоках равноплотных суспензий твердых частиц в жидкости. Получена универсальная зависимость, связывающая дефект показаний трубок Пито с их диаметром, диаметром частиц суспензии, скоростью потока и объемной концентрацией частиц.

Приводятся новые данные об аномальных показаниях трубок Пито в растворах полимеров, снижающих турбулентное сопротивление трения. Характер этого явления аналогичен снижению показаний в суспензиях. Предполагается, что аномальные показания трубок Пито в полимерных растворах связаны с упруго-вязкими ассоциатами макромолекул полимера и молекул растворителя. По экспериментальным данным рассчитаны эффективные размеры и объемная концентрация ассоциатов в растворах.

1. В работе [1] было сообщено о том, что в потоках растворов полимеров, добавки которых способствуют снижению турбулентного трения, реализуются показания трубок Пито, заниженные по сравнению со скоростным напором. Обнаруженное явление было объяснено в этой работе континуальными упруго-вязкими свойствами растворов и возникновением в сдвиговом течении дополнительных нормальных напряжений. Подобной или незначительно видоизмененной точки зрения придерживаются авторы ряда последующих публикаций, в частности [2].

Другое объяснение этому явлению было предложено в работе [3]. Было выдвинуто предположение, что в растворах полимеров существуют крупные надмолекулярные образования — ассоциации молекул полимера и молекул растворителя, отличающиеся по своим упруго-вязким свойствам от окружающей жидкости. Явление аномальных показаний трубок Пито связывалось с неоднородностью жидкости. Предполагалось, что образования, имеющие время релаксации большее, чем время релаксации касательных напряжений в окружающей жидкости, при быстром торможении у трубки Пито проявляют себя как недеформируемые жесткие частицы, а вносимые ими возмущения приводят к изменению показаний трубки.

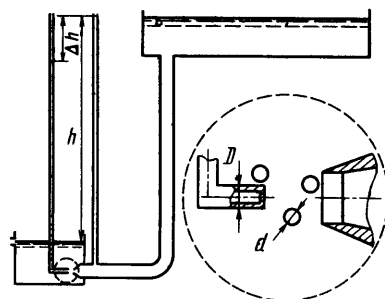
Эксперименты указывают на неоднородность растворов полимеров, снижающих сопротивление трения. Датчики термоанемометра в потоках растворов полимеров регистрируют флуктуации, не связанные с турбулентными пульсациями [4]. Флуктуации можно отождествить с возмущениями, вносимыми в окрестности критической точки датчика отдельными ассоциатами. Оценка размеров ассоциатов по продолжительности флуктуаций и скорости потока приводит для свежих растворов к величинам, близким 1 м.м.

Измерения вязкости растворов полимеров при течении их по трубкам различного внутреннего диаметра показывают, что действительная величина вязкости может быть определена при использовании трубок лишь большого диаметра, тогда как измерения с трубками внутреннего диаметра ~ 1 м.м приводят к неверным величинам [5]. Это также может свидетельствовать в пользу существования в исследуемых жидкостях образований, имеющих характерный размер ~ 1 м.м.

Если верно предположение, выдвинутое в работе [3], то снижение показаний трубок Пито тем более должно наблюдаться в потоках суспензий твердых частиц. Насколько известно авторам, о таком эффекте в литературе не сообщалось.

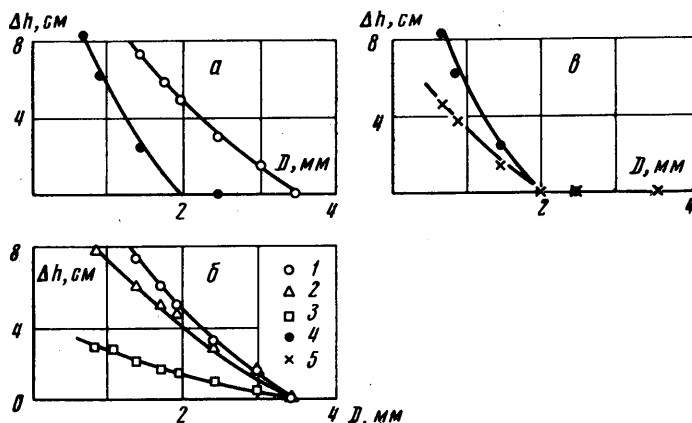
В этой работе приведены данные экспериментов, показывающие, что в потоках суспензий твердых частиц, так же как в потоках разбавленных растворов полимеров, снижающих сопротивление трения, наблюдаются аномалии в показаниях трубок Пито. Установлено, что характер аномалий в суспензиях и в растворах полимеров одинаков. На основе полученных данных возникает возможность провести расчет размеров ассоциатов и их объемной концентрации в растворах. Расчет дает величины, согласующиеся с данными, полученными из экспериментов с термоанемометром и капиллярными трубками.

2. Экспериментальная установка представляла собой широкую емкость, из которой жидкость по трубе большого внутреннего диаметра (43 мм) поступала через насадку в кювету (фиг. 1). В потенциальном ядре струи, истекающей из насадки с внутренним диаметром 6 мм, устанавливались соединенные с пьезометрами трубки Пито. В экспериментах использовались трубки различных наружных диаметров (от 0.68 до 4.5 мм). Кроме того, был использован набор трубок Пито одного наружного диаметра, равного 2.0 мм, но с приемными отверстиями различного диаметра, изменяющегося от 0.29 до 1.30 мм. Конфигурация всех трубок была одинаковой — тупые цилиндры с нескругленными на срезе кромками. Скоростной напор контролировался по пьезометру, соединенному с отверстием в подводящей трубе непосредственно перед насадкой. Изменение скорости истекающей струи осуществлялось увеличением или уменьшением высоты напорной емкости над кюветой.



Фиг. 1

Для приготовления суспензий использовались почти шарообразные зерна рапса и клевера со средними диаметрами 2.0 и 1.1 мм. Зерна суспендировались в водном растворе хлористого кальция, концентрация которого выбиралась такой, чтобы плотности раствора и зерен были одинаковыми. С помощью денсиметра и капиллярного вискозиметра контролировались плотность и вязкость раствора. Объемная концентрация суспензии определялась измерением объема жидкости, содержащейся в известном объеме суспензии.



Фиг. 2

В экспериментах с растворами полимеров были исследованы водные растворы двух различных полиоксэтиленов — Polyox WSR—301, с молекулярным весом $4 \cdot 10^6$ и Polyox Coagulant 701 с большим молекулярным весом, а также водные растворы гуаровой смолы Guar Gum J2—FP.

Сухой полимер смешивался с водой непосредственно в напорной емкости. После некоторого выдерживания в емкости раствор проливался через установку и определялись показания трубок Пито, поочередно вводимых в потенциальное ядро струи, истекающей из насадка.

3. Измерения, выполненные в потоках суспензий твердых частиц в жидкости, показали, что высота столба жидкости в пьезометре трубки Пито меньше значения динамического напора, если внешний диаметр трубки соизмерим с размерами частиц. Дефект показаний трубок Пито — разность между скоростным напором и высотой столба жидкости в пьезометре — в определенных пределах не зависит от диаметра приемного отверстия. Это было установлено в эксперименте с трубками одного наружного диаметра, но с различными по величине приемными отверстиями.

На фиг. 2 приведены зависимости дефекта Δh , зарегистрированного трубками различного наружного диаметра D при различных скоростных напорах h потока суспензии частиц разного диаметра d и разной объемной концентрации c . Было проведено несколько серий экспериментов. Условия в этих сериях следующие (номера соответствуют номерам обозначений на фиг. 2):

№	d , мм	c , %	h , см
1	2,0	8,0	60,5
2	2,0	6,6	59,5
3	2,0	2,3	61,0
4	1,1	8,0	63,5
5	1,1	8,0	33,0

На фиг. 2, *a*, *b* и *c* приведены данные, относящиеся к частицам разного диаметра, разным объемным концентрациям и разным скоростным напорам.

Как видно из представленных данных, начиная с некоторого достаточно большого наружного диаметра, показания трубок Пито не отличаются от динамического напора, т. е. существует «порог» в явлении аномальных показаний. Величина порогового диаметра зависит только от размера частиц суспензии и не зависит от объемной концентрации и скорости набегающего потока.

Наблюдаемые аномальные эффекты связаны с возмущениями, вносимыми частицами в области течения, близкой к приемному отверстию трубки Пито. Следуя работе [3], можно предположить, что при торможении недеформируемой частицы у критической точки трубки Пито реализуется ситуация, когда измерительное отверстие оказывается за кормой обтекаемой жидкостью частицы в зоне пониженного давления. Происходит своего рода экранирование частицей измерительного отверстия трубки от набегающего потока. Такие ситуации все время повторяются, а вносимые возмущения интегрально регистрируются трубкой Пито, приводя к снижению ее показаний по сравнению со скоростным напором. Важная особенность происходящего воздействия частиц состоит в отклонении их траекторий от искривленных линий тока и встрече частиц с трубкой Пито. Недеформируемость частиц приводит к инерционным эффектам даже при равенстве их плотности и плотности окружающей жидкости. В проведенных опытах аномальные показания трубок Пито сопровождались слышимыми ударами частиц о трубку. Звуки ударов пропадали при использовании трубок большого диаметра, показания которых совпадали со скоростным напором¹.

Перечислим величины, от которых зависит дефект показаний трубок Пито Δh : h — полный напор, D — наружный диаметр трубок Пито, d — диаметр частиц и c — объемная концентрация частиц. При резком тормо-

¹ Явление экранирования родственно явлению инерционного осаждения суспендированных в жидкости частиц на обтекаемое препятствие, по которому имеется обширная литература. Известен результат Ленгмюра для тяжелых частиц: встреча частиц с препятствием возможна, только когда размер препятствия не слишком велик по сравнению с размером частиц.

жении частиц у критической точки трубки Пито силы инерции во много раз превышают вязкие силы, поэтому можно предположить независимость процесса экранирования от вязкости. Таким образом, можно ожидать, что имеет место следующая безразмерная зависимость:

$$\frac{\Delta h}{h} = f\left(c, \frac{d}{D}\right)$$

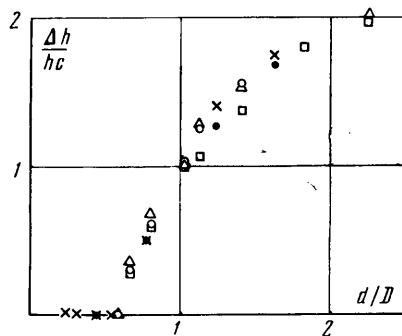
Интегральный эффект экранирования трубки Пито складывается из возмущений поля скорости в окрестности критической точки отдельными частицами. При небольших концентрациях эти возмущения не будут накладываться друг на друга. Поэтому можно ожидать, что дефект показаний трубок Пито будет линейной функцией концентрации, если последняя невелика, т. е. можно предполагать в этом случае существование зависимости

$$\frac{\Delta h}{hc} = \varphi\left(\frac{d}{D}\right)$$

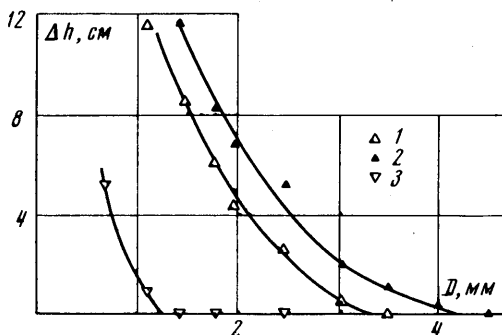
которая и наблюдается в действительности.

На фиг. 3 данные фиг. 2 перестроены с теми же обозначениями в координатах d/D , $\Delta h/hc$. Видно, что до $c = 0.08$ экспериментальные точки группируются вокруг одной кривой. Величина $\Delta h/hc$ равна единице, при $d = D$, обращается в нуль, когда $d/D \leq 0.55$, отлична от нуля только при больших d/D и увеличивается с увеличением относительного диаметра частиц.

В проведенных экспериментах число Рейнольдса, подсчитанное по диаметру частиц и скорости в потенциальном ядре струи, менялось с изменением скорости, вязкости жидкости и размера частиц от 1800 до 7000. Как видно из данных фиг. 3, влияния числа Рейнольдса в этих пределах не обнаруживается.



Фиг. 3



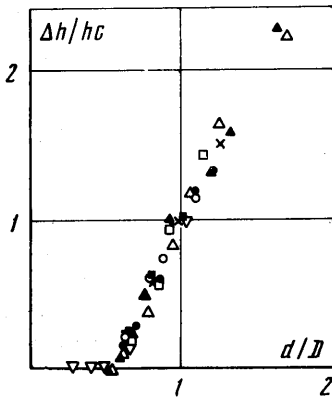
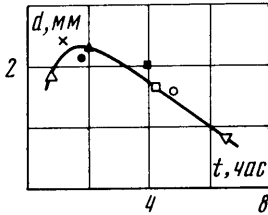
Фиг. 4

4. Экспериментальные результаты, полученные с растворами полимеров, аналогичны результатам с суспензиями твердых частиц в жидкости. Дефект показаний трубок Пито в потоках растворов полимеров, как и в потоках суспензий, не зависит от диаметра приемных отверстий. Снижение показаний наблюдается только на трубках малого наружного диаметра, тогда как показания трубок большого диаметра совпадают со значением скоростного напора, т. е. также существует «порог».

Отношение дефекта показаний трубок к скоростному напору $\Delta h/h$ не зависит при достаточно большом скоростном напоре от величины последнего. В экспериментах при изменении скоростного напора в два раза (от 33 до 66 см) не наблюдалось изменения относительного дефекта при неиз-

менных прочих условиях. Это совпадает с результатами работы [6], в которой показано, что относительный дефект остается неизменным для скоростных напоров, больших ~ 35 см.

Дефект показаний трубок Пито в растворах полиоксиэтилена существенно зависит от времени выдерживания раствора после его приготовления. На фиг. 4 представлены кривые, полученные при исследовании раствора



Фиг. 5

(фиг. 3). Пороговый характер этой зависимости дает возможность определить средний размер ассоциатов по минимальному (пороговому) значению диаметра D^* трубки Пито, при котором еще реализуются нормальные показания. Этот размер составляет $d = 0.55 D^*$. Вычисленный характерный размер ассоциатов достигает 1.9, 2.35 и 0.7 мм для кривых 1, 2 и 3 (фиг. 4) соответственно. В случае справедливости предложенной интерпретации это говорит о том, что размер ассоциатов в растворе не является постоянной величиной, а изменяется во времени.

Если полученные данные перестроить, используя в качестве горизонтальной координаты безразмерную величину d/D с найденным размером ассоциатов d , то экспериментальные точки будут группироваться около одной кривой. Это свидетельствует о том, что объемная концентрация ассоциатов не изменяется по крайней мере в течение нескольких часов старения раствора. Полученная таким образом кривая подбором делителя при вертикальной координате может быть удовлетворительно совмещена с автомоделной кривой фиг. 3. Найденный делитель может быть отождествлен с величиной объемной концентрации ассоциатов. На фиг. 5 приведены экспериментальные данные в координатах $\Delta h/hc$, d/D для раствора полиоксиэтилена WSR-301 весовой концентрацией $2.5 \cdot 10^{-5}$ и зависимость рассчитанного диаметра ассоциатов d (мм) от времени выдерживания раствора t (час). Найденная величина объемной концентрации ассоциатов для этого раствора $c = 8\%$. Как следует из приведенных на фиг. 5 данных,

полиоксиэтилена WSR-301 весовой концентрацией $2.5 \cdot 10^{-5}$. Для удобства рассмотрения приведены лишь некоторые кривые. Остальные данные приводятся ниже. Все кривые фиг. 4 получены при одном и том же скоростном напоре, составляющем 64.5 см. Параметром кривых является время выдерживания раствора. Точки 1, 2 и 3 соответствуют 47, 120 и 390 мин выдерживания после смешения. Из данных фиг. 4 видно, что относительный дефект, начиная с некоторого достаточно большого диаметра трубок, обращается в нуль, но значение этого диаметра различно для различных кривых.

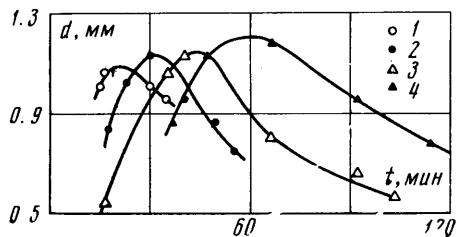
Наблюдаемое сходство в характере аномальных показаний трубок Пито в потоках полимерных растворов и суспензий твердых частиц свидетельствует в пользу существования в растворах полимеров ассоциатов, практически не деформирующихся при быстром торможении у трубки Пито. Приняв такую точку зрения и считая, что форма ассоциатов в покоящейся жидкости и в потоке со слабым сдвигом близка к сферической, проведем расчет размеров ассоциатов и их объемной концентрации в растворе, используя полученную автомоделную зависимость

диаметр ассоциатов в растворе полиоксиэтилена вначале растет, затем начинает убывать.

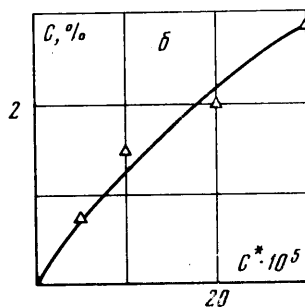
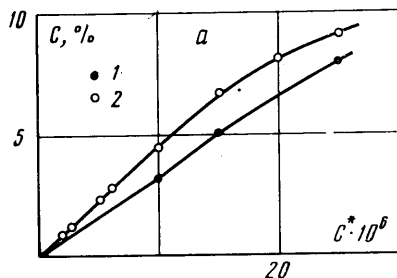
С увеличением весовой концентрации полимера в растворе динамика изменения размеров ассоциатов замедляется. Это видно из данных фиг. 6, на которой собраны кривые для различных по весовой концентрации растворов полиоксиэтилена 701. Точки 1, 2, 3 и 4 соответствуют весовым концентрациям $2 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$, $5 \cdot 10^{-6}$ и $6 \cdot 10^{-6}$.

Исследование водных растворов гуаровой смолы показало, что размер ассоциатов в этих растворах слабо зависит от времени старения, весовой концентрации и в среднем составляет 0.7 мкм.

На фиг. 7, а приведены зависимости объемной концентрации ассоциатов c от весовой концентрации поли-



Фиг. 6



Фиг. 7

мера c^* в растворах полиоксиэтилена 301 (точки 1) и 701 (точки 2), а на фиг. 7, б — в растворах гуаровой смолы.

Чтобы ассоциаты при торможении у критической точки трубки Пито возмущали поток как недеформируемые частицы, необходимо достаточно малое время торможения. Если считать, что зона возмущения распространяется вверх по потоку на расстояние одного диаметра трубки, то порядок времени торможения в проведенных экспериментах не превышает 10^{-3} сек. Естественно, что при увеличении этого времени должен наступить момент, когда ассоциаты при торможении будут успевать заметно деформироваться, и, наконец, станут вести себя как жидкие частицы. При этом безразмерный дефект $\Delta h/h$ должен начать уменьшаться с уменьшением скорости и скоростного напора, а затем обратиться в нуль. Такой характер зависимости безразмерного дефекта от скорости наблюдается в экспериментах Бреннена и Гэдда [6].

В заключение авторы благодарят Г. И. Баренблатта за обсуждение, В. В. Тихомирова и Л. А. Князеву за помощь в проведении экспериментов.

Поступило 26 II 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith K. A., Merrill E. W., Mickley H. S., Virk P. S. Anomalous Pitot tube and not-film measurements in dilute polymer solutions. Chem. Engng. Sci., 1967, vol. 22, No. 4.
2. Алексеев Ю. Н., Желтухин И. Д. Влияние полимерных добавок на показания трубки полного напора. ПМТФ, 1968, № 5.

3. Баренблатт Г. И., Калашников В. Н. О влиянии надмолекулярных образований в разбавленных растворах полимеров на турбулентность. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 2.
 4. Баренблатт Г. И., Калашников В. Н., Кудин А. М. Об исследовании структуры полимерных растворов при помощи термоанемометра. ПМТФ, 1968, № 5.
 5. Белокопьев В. С., Власов С. А., Калашников В. Н. О влиянии на вихри Тейлора полимерных добавок, снижающих сопротивление трения. Инж.-физ. ж., 1971, т. 21, № 5.
 6. Brennen C., Gadd G. E. Aging and degradation in dilute polymer solutions. Nature, 1967, vol. 215, No. 5108.
-