

УДК 536.25

АНЕМОМЕТРИЯ НАПОРНЫХ ПОТОКОВ НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКИХ СУСПЕНЗИОННЫХ СРЕД

д-р техн. наук, проф. **З.П. ШУЛЬМАН**

(Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, г. Минск),
канд. техн. наук, доц. **Ю.Г. ГРОЗБЕРГ** (Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты измерений осредненных и пульсационных значений скорости напорных потоков нелинейно-вязких суспензионных сред на примере суспензий саригохского бентонита и высоковязких водоугольных суспензий посредством методов электродиффузионной анемометрии и «тепловых меток». Предложены конструкции анемометров и методики измерений.

Развитие современных технологических процессов нефтедобычи, строительной индустрии, производства керамических, порошковых, рудных, абразивных и других материалов, а также совершенствование и интенсификация традиционных технологий, таких как перекачка и гидротранспорт различного рода пульп, красок, нефтей с большим содержанием смол и парафинов, цементных и штукатурных растворов, а в последние десятилетия - водоугольных и водородных суспензий увеличивает потребность в информации об основных характеристиках потоков жидкотекучих сред. В ньютоновских жидкостях необходимые данные по гидродинамике могут быть получены с помощью хорошо зарекомендовавших себя традиционных методов исследования - термоанемометрического и лазер-доплеровского [1 - 3]. В нелинейно-вязких средах - суспензионных, полимерных и других - применение вышеперечисленных методов ограничено непрозрачностью, оптической неоднородностью, существенным изменением физических свойств среды в зависимости от температуры.

От перечисленных ограничений практически свободен электродиффузионный метод, основанный на зависимости величины диффузионного тока рабочего электрода от скорости обтекания его исследуемой средой при определенных электрохимических условиях (заданном составе раствора электролитов, электрическом напряжении и т. д.) [4]. К измеряемым параметрам потоков жидкостей данным методом относятся осредненные и пульсационные значения полей скорости, касательных напряжений трения, спектральная плотность их распределения по волновым числам в турбулентном режиме течения, интенсивность массообменных процессов и т.д. Применение электродиффузионного метода для диагностики конвективных процессов в воде или микрогомогенных водных растворах низкомолекулярных веществ освоено рядом научных школ как в странах СНГ, так и за рубежом [5, 6]. Тем не менее, использование электродиффузионной диагностики реологически сложных жидкостей типа нелинейно-вязких суспензионных сред сопряжено с необходимостью тщательного анализа и подбора конструкций датчиков, совершенствования методик их тарировки.

Объектом исследования служил клиновидный электрохимический датчик скорости с чувствительным элементом-микроэлектродом, отнесенным от передней кромки на расстояние 1,5 мм (рис. 1). Такая конструкция, как показал опыт анемометрии неньютоновских жидкостей [7], практически исключает влияние застойных и квазитвердых зон на показания датчика. В то же время малые размеры электрода и державки обеспечивают высокую пространственную разрешающую способность и малую инерционность измерителя.

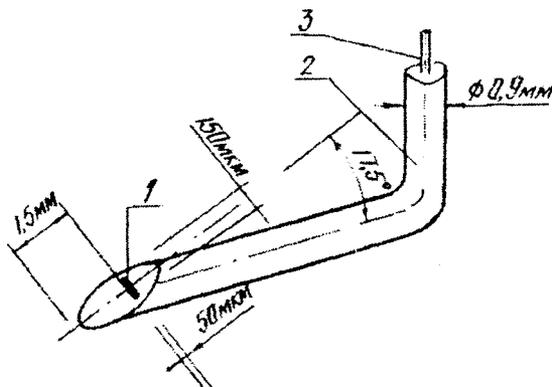


Рис. 1. Конструкция электрохимического анемометра:
1 - микроэлектрод; 2 - державка; 3 - проводник

Статическая тарировка датчика скорости проводилась в потенциальном ядре затопленной струи. Стенд (рис. 2) состоял из напорного бака 1, ванны 2 и емкости 3 для измерения расхода.

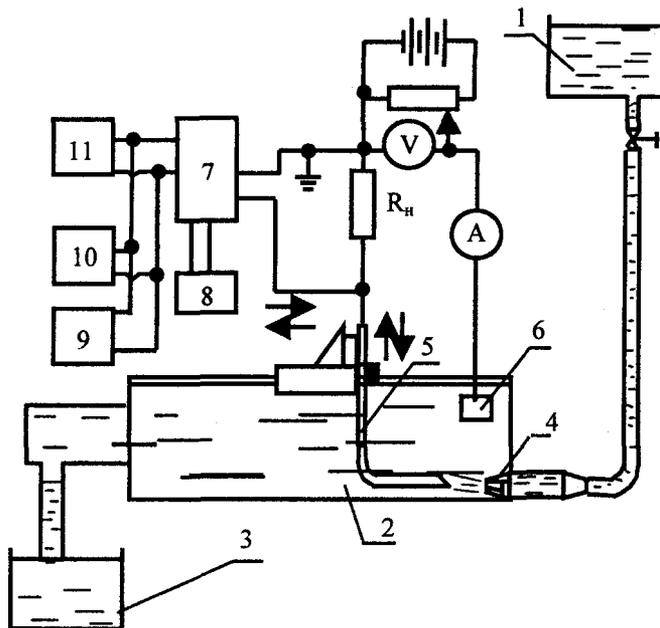


Рис. 2. Схема стенда для статической тарировки электрохимического анемометра: 1 - напорный бак; 2 - ванна; 3 - мерная емкость; 4 - насадок; 5 - анемометр; 6 - анод; 7 - усилитель электрохимический; 8 - регистрирующее устройство; 9 - осциллограф; 10 - вольтметр среднеквадратичных значений; 11 - спектроанализатор

Определяя по расходу среднюю скорость струи, получены тарировочные кривые зависимости тока датчика от скорости $i = f(U_0)$. На рис. 3 представлены такие зависимости для датчика скорости в потоках электролита, 4 %-ной и 6 %-ной суспензиях бентонита в воде с добавками ферроферрицианидов и сульфата калия.

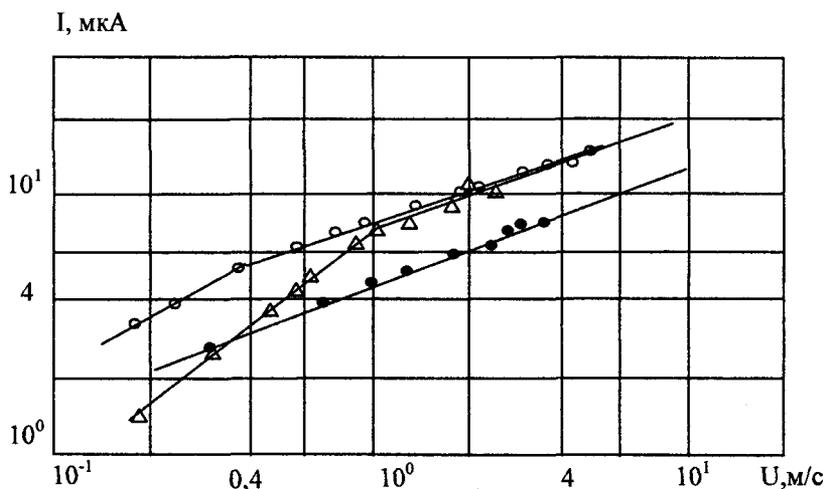


Рис. 3. Тарировочные характеристики электродиффузионного анемометра: о – 4 %-ная суспензия бентонита; Δ – 6 %-ная суспензия бентонита; ● – ньютоновская жидкость (электродит)

Особенностью тарировочных характеристик датчика при измерениях в глинистых суспензиях является наличие двух явно выраженных участков с различными показателями степени m в степенной зависимости тока от скорости набегающего потока $I \sim U^m$ и более высокие значения токов (при $U > 0,4$ м/с) по сравнению с результатами измерений в растворе электролита без добавок глины.

Полученные данные качественно можно объяснить проявлением сильной псевдопластичности среды в пограничном слое вблизи поверхности измерительного электрода, ток которого $I \sim U^{1+n}$, где n – показатель неньютоновского поведения. С увеличением скорости набегающего потока (а следовательно, и скорости сдвига вблизи поверхности датчика) показатель степени n приближается к значениям, характерным для ньютоновских жидкостей. Более высокие значения тока, вероятно, обусловлены пристенными эффектами, свойственными сдвиговым течениям плотных суспензий.

При измерении не только средних, но и пульсационных значений скоростей необходимо учитывать инерционность анемометра в области высоких частот, так как процесс массопереноса более инерционен, нежели перенос импульса. Поэтому исследовались амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) анемометра, то есть проводилась его динамическая тарировка. АЧХ измерялась на стенде (рис. 4), представляющем собой специальную вибросистему. Электрохимическому датчику 1, помещенному в струю, вытекающую из сопла 2, сообщались гармонические колебания системой из двух динамических головок 3 и 4, звуковые катушки которых жестко связывались друг с другом штангой 5. В нижней части штанги устанавливался датчик 1. Система приводилась в движение подачей синусоидального напряжения регулируемой амплитуды и частоты на катушку динамической головки 3. ЭДС индукции, наводимая в динамической головке 4, пропорциональна скорости перемещения датчика и являлась контролируемым параметром с помощью милливольтметра 8. При варьировании частоты колебаний датчика f генератором низкой частоты 6 и усилителем 7 и при установленной средней скорости среды U_0 на срезе сопла соответственно изменялось напряжение, возникающее в катушке динамической головки 4 так, чтобы сохранялась неизменной колебательная скорость $U = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$. Переменная составляющая диффузионного тока датчика с электрохимического усилителя 9 регистрировалась вольтметром среднеквадратичных значений 10. Зависимость отношения I'/I_0 от f и является АЧХ анемометра. За характерную величину I_0 брали значение тока I' , соответствующее условию безынерционной работы датчика (при $f \rightarrow 0$).

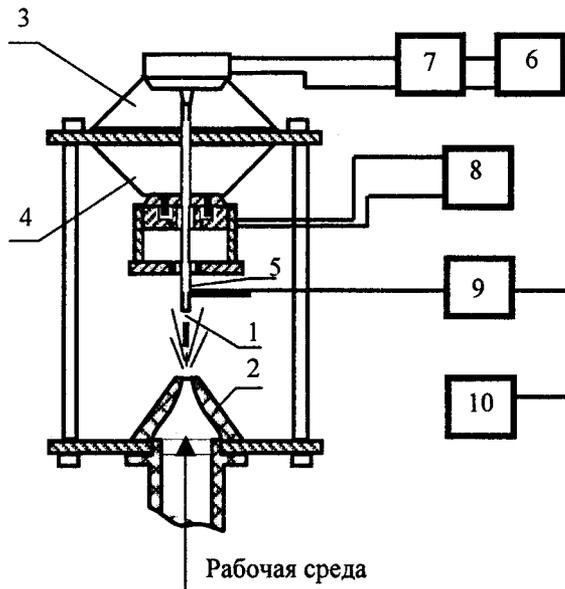


Рис. 4. Схема стенда для динамической тарировки электрохимического анемометра:
 1 - анемометр; 2 - сопло; 3, 4 - динамические головки; 5 - штанга; 6 - звуковой генератор;
 7 - усилитель низкой частоты; 8 - милливольтметр; 9 - усилитель электрохимический;
 10 - вольтметр среднеквадратичных значений

В результате определен частотный диапазон работы датчика без необходимости проведения корректировки его показаний: в растворе электролита без добавок глины - до 800 Гц, в глинистых суспензиях - до 400 Гц. На рис. 5 а, б представлены АЧХ датчика при различных скоростях U_0 течения электролита и 4 %-ной суспензии бентонита.

Анализ результатов показал, что «завал» АЧХ существенно зависит от величины U_0 . С увеличением U_0 частота начала снижения амплитуд увеличивается, причем для глинистых суспензий при тех же скоростях U_0 частоты «завала» АЧХ почти вдвое меньше, нежели для электролита.

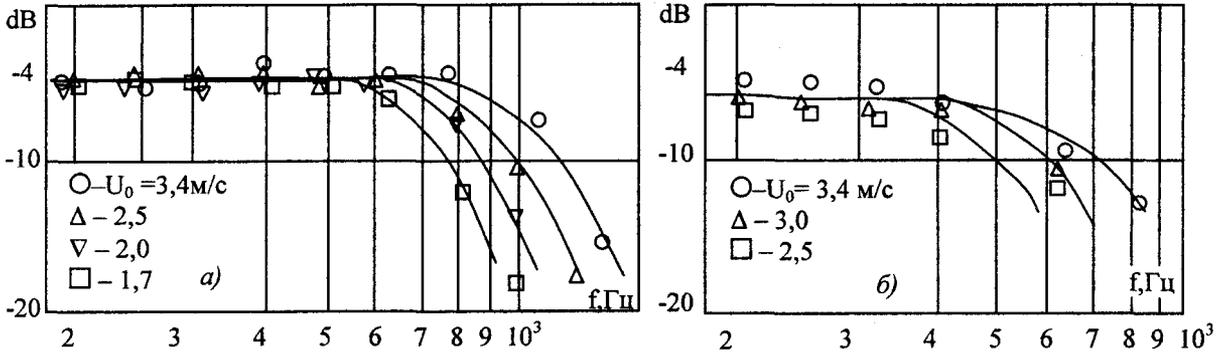


Рис. 5. АЧХ датчика скорости для различных скоростей течения:
а – электролита; б – глинистой суспензии

Примечательной особенностью АЧХ является возможность обобщения данных, соответствующих разным скоростям потока, единой кривой (рис. 6 а, б). Это позволяет определить значение безразмерного комплекса $\omega \cdot L/U_0$, соответствующего снижению амплитуды не более 1,5 дБ. Так, для электролита и глинистой суспензии концентрации 4% эти значения соответствуют $\omega_3^* = \omega L/U_0 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ и $\omega_1^* = 9,5 \cdot 10^{-2}$ (L – размер датчика в направлении течения, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота). Отсюда легко определяется область частот безынерционной работы датчика.

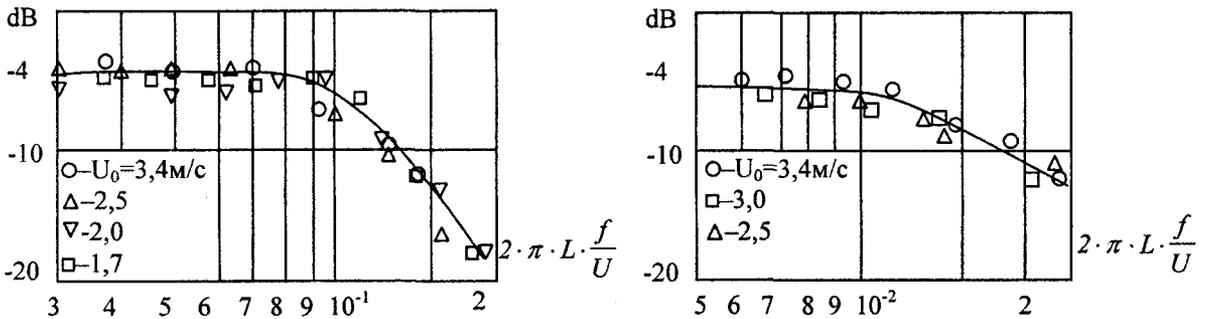


Рис. 6. Автоподобность АЧХ датчика скорости для различных скоростей течения:
а - электролита; б - глинистой суспензии

Измерения гидродинамических характеристик напорного течения глинистых суспензий проводились на экспериментальном стенде, представляющим замкнутый трубопровод диаметром 56,8 мм с длиной рабочей секции 4 м. Описание экспериментального стенда приведено в [8]. Для ламинарного режима течения глинистых суспензий опытные данные представлены на рис. 7. Заметим, что профиль скорости, рассчитанный по соотношению [9]

$$U = U_{cp} \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n + 1} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \tag{1}$$

хорошо согласуется с профилем, измеренным с помощью электродиффузионного датчика на расстоянии от входа 3170 мм (56d). Оценки длины стабилизированного участка при ламинарном течении неньютоновской жидкости [9] и наши опытные данные подтверждают, что профиль скорости на измеряемом участке был полностью установившимся.

В турбулентном режиме течения опытные данные, как известно [9, 10], удобно обобщать в виде зависимости дефекта скорости от безразмерного расстояния до стенки

$$\frac{U_m - U}{U_*} = -A \cdot \ln \left(\frac{r}{R} \right) + C', \tag{2}$$

где U , U_m – текущее и максимальное значения скорости на оси трубы; U_* – динамическая скорость $\left[U_* = \sqrt{\tau_w / \rho} \right]$, определяемая по измерению перепада давления ΔP на длине L ; A и C' – константы; r и R – текущее значение радиуса и радиус трубы соответственно.

Применительно к ньютоновским жидкостям замечено, что константы A и особенно C' логарифмического закона дефекта скорости (2) могут несколько меняться в зависимости от числа Рейнольдса и интенсивности турбулентности потока [11, 12].

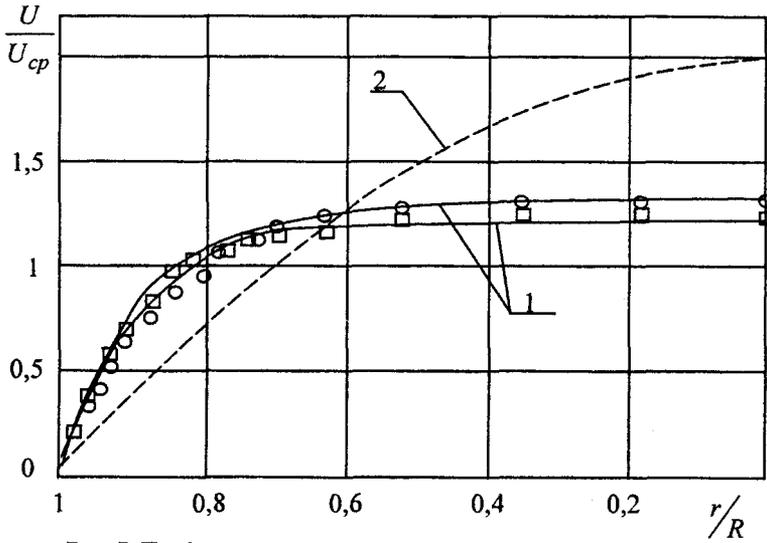


Рис. 7. Профиль средней скорости при ламинарном течении:
 ○ – 4 %-ная суспензия бентонита при $Re' = 6,5 \cdot 10^2$;
 □ – 6 %-ная суспензия бентонита при $Re' = 1,34 \cdot 10^3$;
 1 – расчет по формуле (1); 2 – профиль Пуазейля

Для неньютоновских жидкостей степенного типа известно влияние индекса течения n на величину константы A [9]:

$$A \sim \frac{1}{n}. \quad (3)$$

Результаты измерений дефекта скорости для трех жидкостей - раствора электролита ($n = 1$) и двух глинистых суспензий ($n = 0,178$ и $n = 0,115$) - приведены на рис. 8. Видно, что логарифмический закон хорошо аппроксимирует опытные данные, причем для ньютоновской жидкости значение величины A составляет 5,2, а для глинистых суспензий оно существенно возрастает, что качественно согласуется с выражением (3).

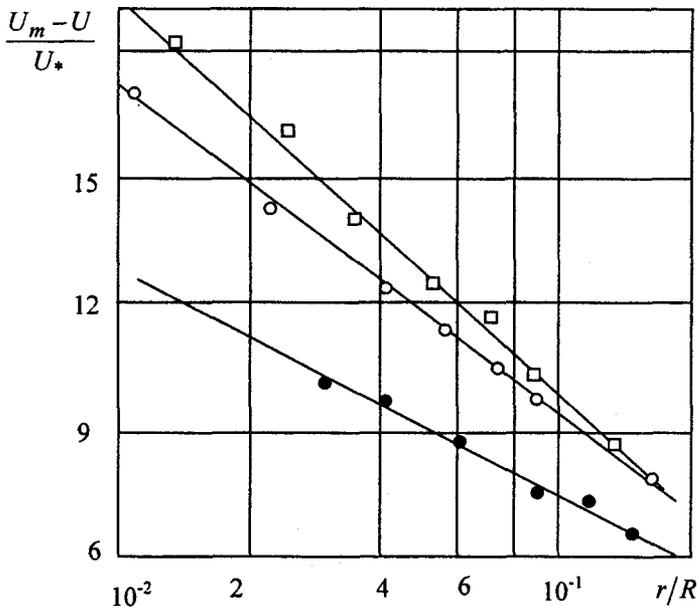


Рис. 8. Зависимости дефекта средней скорости от безразмерного расстояния до стенки:
 ○ – 4 %-ная суспензия бентонита при $Re' = 7,87 \cdot 10^3$; □ – 6 %-ная суспензия бентонита при $Re' = 6,35 \cdot 10^3$;
 ● – раствор электролита при $Re = 1,415 \cdot 10^4$

Изменение интенсивности турбулентности $\frac{[(\bar{U}')^2]^{0.5}}{\bar{U}}$ продольной составляющей пульсационной скорости в направлении, перпендикулярном стенке, показано на рис. 9. Можно заметить, что в центральной части трубы течение 6 %-ной глинистой суспензии характеризуется снижением уровня пульсаций по сравнению с ньютоновской жидкостью (электролит). По мере приближения к стенке уровень пульсаций заметно повышается, причем глинистой суспензии соответствует более высокие значения $\frac{[(\bar{U}')^2]^{0.5}}{\bar{U}}$, чем для ньютоновской жидкости.

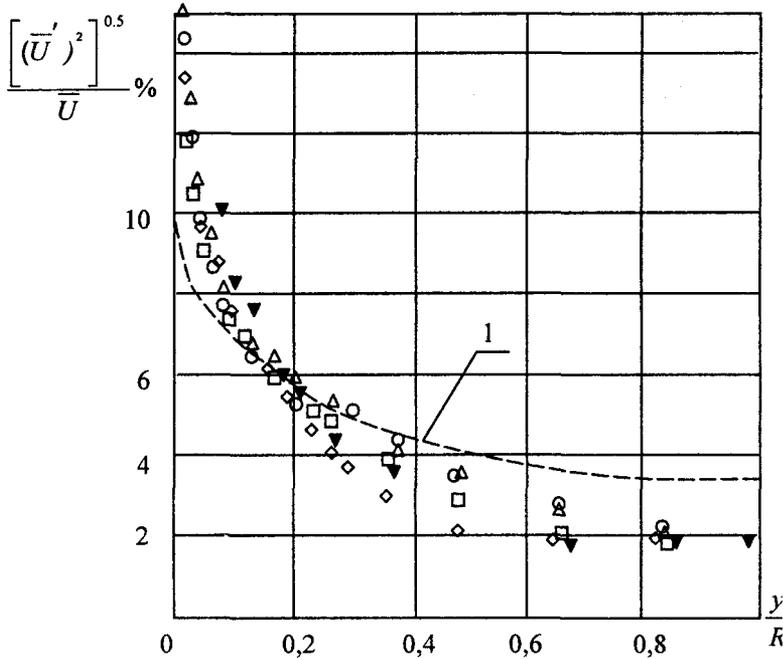


Рис. 9. Интенсивность турбулентности на различных расстояниях от стенки:

○ — 4 %-ная суспензия бентонита при $Re' = 7,03 \cdot 10^3$; Δ — 4 %-ная суспензия бентонита при $Re' = 6,13 \cdot 10^3$;

□ — 6 %-ная суспензия бентонита при $Re' = 6,35 \cdot 10^3$; — 6 %-ная суспензия бентонита при $Re' = 4,23 \cdot 10^3$;

1 — ньютоновская жидкость (электролит) при $Re = 1,415 \cdot 10^4$; ▼ — данные измерений пьезодатчиком давления

Рассмотрим распределение энергии турбулентных пульсаций продольной составляющей скорости по волновым числам $k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{U}$, где f — частота, U — средняя локальная скорость течения.

На рис. 10, а, б спектры турбулентных пульсаций скорости представлены в нормированном виде. Они получены путем деления составляющей спектральной энергии на осредненное значение квадрата пульсационной скорости и умножения волнового числа на диаметр трубы. При этом функция безразмерной энергии определяется соотношением

$$E_H(kd) = \frac{\Delta (\bar{U}')^2}{\Delta k} \cdot \frac{1}{(\bar{U}')^2 \cdot d}, \quad (4)$$

где $\Delta (\bar{U}')^2$ — составляющая пульсационной энергии в узкой полосе волновых чисел Δk . Следствием такого представления спектра является:

$$\int_0^{\infty} E(kd) \cdot d(kd) = 1 \quad (5)$$

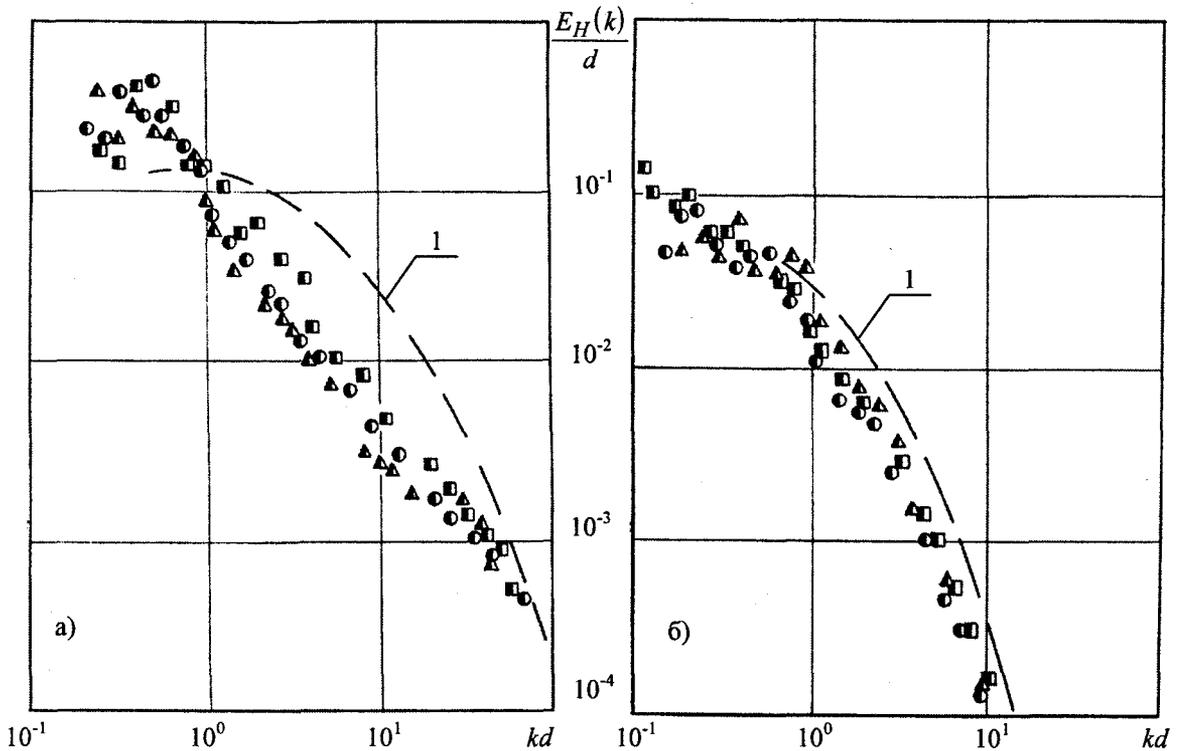


Рис. 10. Нормированный спектр энергии турбулентных пульсаций продольной составляющей скорости: а – на оси трубы; б – вблизи стенки при $y/R = 0,0157$ в 6 %-ной суспензии бентонита:

▲ – при $Re' = 3,248 \cdot 10^3$; ● – при $Re' = 4,28 \cdot 10^3$; ■ – при $Re' = 6,35 \cdot 10^3$;
 ▲ 1 – данные Уэллса [13] для воды при $Re = 1,4 \cdot 10^4$

Из рис. 10 а, б видно существенное влияние глинистой суспензии на спектр турбулентных пульсаций скорости. В приосевой области трубы сильно подавляются мелкомасштабные движения, а доля крупномасштабных возрастает. При этом на кривой спектральной плотности можно выделить область волновых чисел с явными признаками когерентности, что свидетельствует о подавлении турбулентности и ламинаризации течения в приосевой зоне (рис. 10, а). Вблизи стенки влияние глинистых частиц проявляется в меньшей степени, чем на оси трубы (рис. 10, б).

Таким образом проведенные эксперименты подтвердили возможность использования электродиффузионной анемометрии для исследования гидродинамики потоков мелкодисперсных нелинейновязких сред [14].

Однако, попытки использования электродиффузионной диагностики для измерения реодинамических характеристик потоков высококонцентрированных суспензий, в частности высоковязких водугольных, представляющих собой стабильную дисперсию мелкоизмельченного угля (60 - 70 % по весу) в воде [15], вызвали серьезные затруднения при интерпретации результатов. Выявлены anomальные сигналы при измерении скорости, вызываемые соотношением размеров датчика и структурных неоднородностей среды, сложностью установления режима диффузионной кинетики вследствие высокой электропроводности самой суспензии, блокировкой чувствительного элемента датчика агрегатами частиц по причине возникновения нормальных напряжений, обусловленных сдвиговым течением набегающего на датчик потока, сложностью контроля концентрации компонентов электрохимического растворителя и т.д.

Во многом лишено вышеперечисленных недостатков устройство для определения скорости движения частиц неоднородной дисперсной среды [16], схема которого представлена на рис. 11. Движущийся неоднородный дисперсный поток вызывает изменение условий теплообмена на поверхностях термометров сопротивления ТС1 и ТС2. Температура термометров сопротивления изменяется в соответствии с изменением условий теплообмена, что приводит к изменению выходных сигналов мостовых схем 3 и 4, которые усиливаются операционными усилителями 5 и 6 и регистрируются устройством 7.

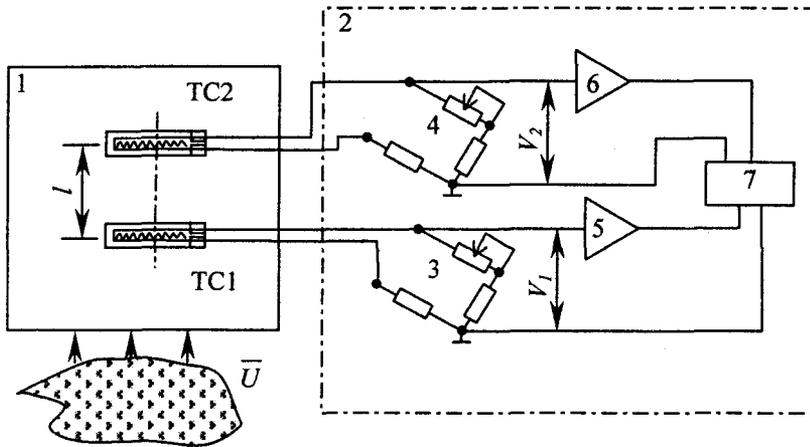


Рис. 11. Схема устройства для определения скорости движения частиц неоднородной дисперсной среды:
 1 - пластина; TC1, TC2 - термометры сопротивления; 2 - измерительное устройство;
 3, 4 - мостовые схемы; 5, 6 - операционные усилители; 7 - регистрирующее устройство

По временному запаздыванию сигнала с TC2 относительно TC1 (рис. 12) определяется скорость движения частиц неоднородной дисперсной среды по формуле:

$$U = \frac{l}{\Delta t}, \quad (6)$$

где U – скорость движения частиц; l – расстояние между центрами термометров сопротивления; Δt – временное запаздывание сигнала с TC2 относительно TC1. В качестве нагревателя использовалась массивная пластина 1 с установленными на ней соосно термометрами сопротивления.

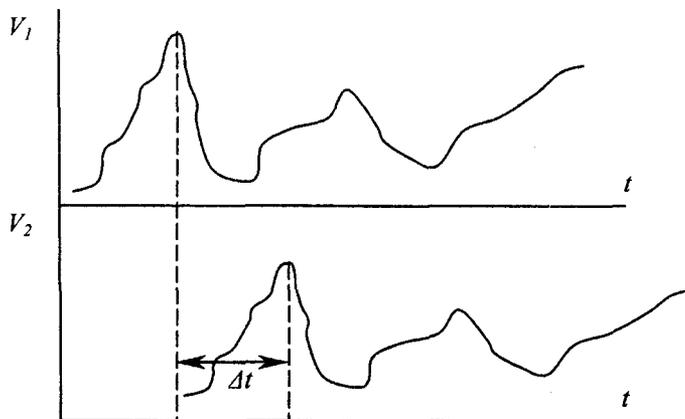


Рис. 12. Временная диаграмма, поясняющая работу устройства

Однако существенным недостатком этого устройства является ограниченность его применения преимущественно маловязкими крупнодисперсными средами. Использование его в высоковязких концентрированных мелкодисперсных системах приводит к увеличению погрешностей измерения вследствие образования на поверхности нагревательной пластины при обтекании значительного по толщине пограничного слоя, искажающего реальный профиль скорости.

Кроме того, при обработке выходных сигналов электронного блока трудоемким является процесс точного определения экстремумов функций $V_1 = f(t)$ $V_2 = f(t)$, что также снижает точность измерений. С учетом вышеизложенного была разработана конструкция устройства для определения скорости потоков высококонцентрированных электропроводных суспензий, лишенная перечисленных недостатков (рис. 13).

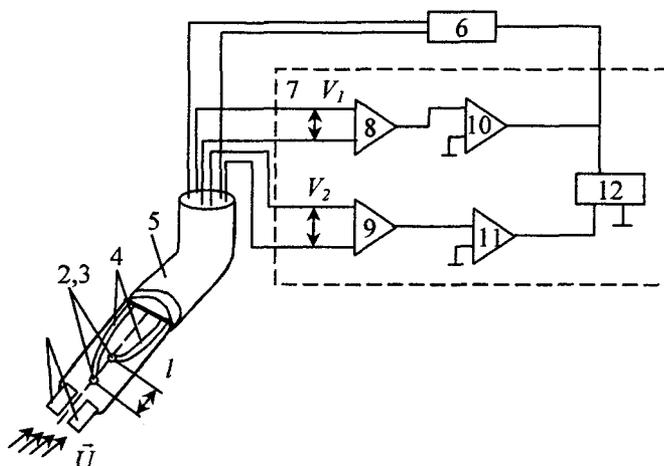


Рис. 13. Схема устройства для определения скорости потоков высококонцентрированных электропроводных суспензий:

- 1 - электроды; 2, 3 - микротермопары; 4 - державки; 5 - корпус;
- 6 - генератор; 7 - блок обработки; 8, 9 - усилители-формирователи;
- 10, 11 - компараторы напряжения; 12 - измеритель интервала времени

Устройство состоит из двух электродов 1, двух микротермопар 2 и 3, помещенных в специальные державки 4 и расположенных соосно на расстоянии l друг относительно друга в корпусе 5. Конструкция обеспечивает свободное обтекание электродов и микротермопар потоком исследуемой среды. Устройство работает следующим образом: генератор 6 подает на электроды 1 импульсы переменного напряжения (50 Гц) с регулируемой скважностью и мощностью, вызывая локальный нагрев среды, находящейся в межэлектродном пространстве, формируя «тепловую метку». Обтекая последовательно микротермопары 2 и 3 «тепловая метка» вызывает изменение термо-ЭДС термопар. Сигналы микротермопар поступают на электронный блок обработки 7, где усиливаются усилителями-формирователями 8 и 9 и преобразуются в короткие прямоугольные импульсы посредством компараторов напряжения 10 и 11 (рис. 14).

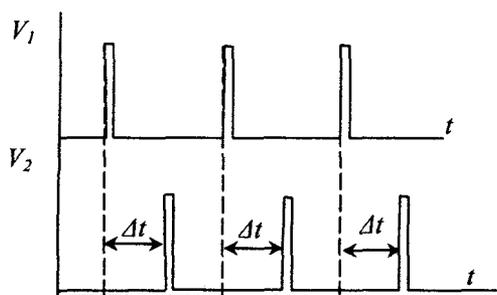


Рис. 14. Временная диаграмма, поясняющая работу устройства

Эти импульсы запускают цифровой измеритель интервалов времени 12. Скорость потока U определяется соотношением:

$$U = \frac{l}{\Delta t}, \tag{7}$$

где l – расстояние между микротермопарами; Δt – временной сдвиг сигналов микротермопар.

В состав измерителя интервалов времени входят: блок опорных частот, устройство управления; счетчик импульсов; трехразрядный блок цифровой индикации; параллельный интерфейс вывода данных на ЭВМ.

Блок опорных частот формирует частоты: 100 кГц, 10 кГц, 1 кГц и 0,1 кГц. Частоты выбираются в зависимости от диапазона измеряемых скоростей, что необходимо для обеспечения большей точности измерения. Большим скоростям соответствует и большая частота заполнения счетчика.

Устройство управления вырабатывает импульс регулируемой длительности для управления генератором 6; сбрасывает триггер счета и счетчик импульсов в нулевое состояние, обнуляя цифровой индикатор; гасит цифровой индикатор во время счета.

Счетчик импульсов обеспечивает подсчет количества импульсов пропорционально времени прохождения «тепловой метки» между микротермопарами. Блок цифровой индикации отображает это время в миллисекундах.

Устройство может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. При автоматическом режиме время цикла одного измерения выбрано равным 5 с с целью обеспечения возможности записи показаний индикатора. При выводе данных на ЭВМ это время может быть уменьшено.

Апробация данного устройства для измерения скорости потока высококонцентрированных дисперсных электропроводных сред показало хорошие результаты при измерении скорости напорных потоков высококонцентрированных водоугольных суспензий в лаборатории реофизики Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ и в ВНИИПИ гидротрубопровода РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности измерения термоанемометром осредненных и пульсационных характеристик потока в непосредственной близости у стенки / Б.С. Петухов, А.Ф. Поляков, Ю.В. Цыкулев, С.А. Шиндин // Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности: Сб. науч. тр. - Новосибирск: Наука, 1976. - С. 71.
2. Леонтьев А.И., Шишов Е.В., Белов В.М. Использование линеаризованного сигнала термоанемометра для диагностики неизотермического турбулентного пограничного слоя // Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности. - Новосибирск: Наука, 1977. - С. 143.
3. Некоторые результаты исследования реологических потоков оптическими методами / Е.М. Хабахпашева, В.И. Попов и др. // Геодинамика и тепломассообмен. - Новосибирск: Наука, 1980. - С. 63
4. Покрывайло Н.А., Вайн О., Ковалевская Н.Д. Электродиффузионная диагностики течений в суспензиях и полимерных растворах / Под. ред. Р.И. Солоухина. - Мн.: Наука и техника, 1988. - 230 с.
5. Электрохимические преобразователи информации / В.С. Боровков, Б.М. Графов, А.А. Новиков и др. - М.: Наука, 1966. - 430 с.
6. Electrochemical diagnostics of slip effects in polymer solutions / V.V. Tovchegrachko, N.D. Kovalevskaya, N. A. Pokryvaylo, O. Wein // 8th Intemat. Congress CHISA: Praha, 1984. - P.73 - 79.
7. Покрывайло Н.А., Грозберг Ю.Г., Карпеченко А.В. Исследование характеристик электрохимических датчиков скорости потока неньютоновских жидкостей // Процессы переноса в структурирующихся жидкостях. - Мн.: Наука и техника, 1985. - С. 73 - 79 .
8. Грозберг Ю.Г. Гидродинамический канал для исследования гидродинамики и массообмена глинистых суспензий // Реофизика полимерных и дисперсных жидкостей. - Мн.: Наука и техника, 1986. - С. 119-125.
9. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. - М.: Мир, 1964. - 611 с.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. - 711 с.
11. Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками. - М.: Мир, 1968. - 176 с.
12. Повх И.Л., Болонов Н.И., Эйдельман А.Е. Возникновение и развитие турбулентности при движении дисперсной системы в круглой трубе // Инженерно-физический журнал. - 1974, Т. 26. - № 5.
13. Уэллс Х., Харкнесс М., Мейер И. Измерение турбулентности при течении в трубе неньютоновской жидкости, вызывающей снижение сопротивления // Ракетная техника и космонавтика. - 1968. - Т. 2. - С. 70.
14. Шульман З.П., Покрывайло Н.А., Грозберг Ю.Г. Реодинамические особенности течения и массообмен водных дисперсий глины в трубе // Транспортные процессы в полимерных и суспензионных жидкостях. - Мн.: Наука и техника, 1986. - С. 3 - 16.
15. Трубопроводный транспорт твердых материалов: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - М.: ВНИИПИ гидротрубопровод, 1986. - 432 с.
16. А.с. СССР № 1282012, G01 P5/18, 5/12. Устройство для определения скорости движения частиц неоднородной дисперсной среды / Н.В. Пилипенко, В.М. Ключев, В.П. Ходунков. Оpubл. // БИ № 1. - 1987.-С. 126-127.