

## ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ РАСТВОРОВ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

П. В. АСЛАНОВ, С. Н. МАКСЮТЕНКО, И. Л. ПОВХ,  
А. П. СИМОНЕНКО, А. Б. СТУПИН

(Донецк)

Наряду с полимерами свойством снижать гидродинамическое сопротивление при турбулентном режиме движения жидкости обладают некоторые поверхностно-активные вещества (ПАВ). С точки зрения устойчивости к механической деструкции добавки ПАВ имеют определенные преимущества перед полимерами; в частности, они способны восстанавливать свою гидродинамическую эффективность после прохождения через насосы и местные сопротивления [1].

Принципиальная возможность снижения сопротивления добавками ПАВ показана в [2-6]. Позднее было установлено, что уменьшать сопротивление жидкостей могут только мицеллообразующие ПАВ [5, 7], в растворах которых при критических концентрациях мицеллообразования  $C_{m1}$  и  $C_{m2}$  образуются сферические и пластинчатые мицеллы соответственно [8]. Величины  $C_{m1}$  и  $C_{m2}$  зависят как от особенностей молекулярного строения ПАВ, так и от внешних факторов: температуры, присутствия в растворе электролитов, полярных органических веществ и т. д. Установленная в [5, 7] связь между эффектом снижения сопротивления и значением  $C_{m2}$  позволяет сделать предположение о том, что от перечисленных выше факторов будет зависеть и снижение турбулентного трения. Таким образом, появляется возможность управлять процессами турбулентного переноса в жидкости и величиной гидродинамического эффекта. Однако этот вопрос изучен явно недостаточно.

В работах [1-7] исследовалось влияние ПАВ на сопротивление трения. Первые данные по профилям скорости в растворах ПАВ приведены в [9, 10] и являются недостаточно полными.

В предлагаемой работе проведены измерения профилей скорости и интенсивности турбулентности в растворах ПАВ, рассчитаны порождение турбулентной энергии и диссипация энергии осредненного движения. Изучено влияние электролитов и температуры на снижение гидродинамического сопротивления и приведены результаты натурных испытаний.

**1. Гидродинамическое сопротивление.** Большинство ПАВ снижают гидродинамическое сопротивление только в присутствии электролитов. Поэтому в первой серии опытов было исследовано влияние добавок электролитов на снижение сопротивления в растворах ПАВ. В качестве поверхностно-активного вещества была выбрана промышленная паста метаупон. Основная составная часть метаупона — натриевая соль олеинметилтауринной кислоты, которая хорошо растворяется в воде. Водные растворы метаупона сохраняют гидродинамическую эффективность в течение длительного времени (до 1.5—2 месяцев в ходе проведения эксперимента). Опыты проводились на установке разомкнутого цикла, описанной в [11]. Величина эффекта снижения сопротивления  $\Lambda = (1 - \lambda_1/\lambda_2) \cdot 100\%$  рассчитывалась по измеренным перепадам давления и объемному расходу жидкости ( $\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициенты гидродинамического сопротивления при течении раствора и растворителя соответственно).

На фиг. 1 приведена зависимость величины эффекта  $\Lambda$  от концентрации электролита в водном растворе метаупона концентрации  $C=0.2\%$  (1-6 — экспериментальные точки для шести различных одно-одновалентных электролитов). Из характера приведенной кривой видно, что сниже-

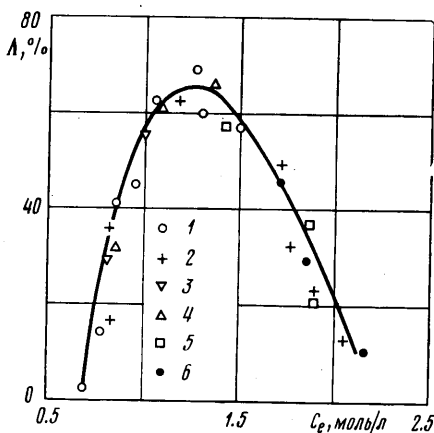
ние сопротивления начинается при вполне определенной концентрации электролита  $C_e=0.72$  моль/л независимо от природы одновалентного катиона. С ростом концентрации электролита величина эффекта возрастает и достигает максимального значения  $\Lambda=69\%$  в области концентраций  $C_e=1-1.5$  моль/л. Дальнейшее увеличение концентрации электролита приводит к уменьшению величины  $\Lambda$ , что связано с высаливанием поверхностно-активного вещества. Следовательно, величина эффекта определяется концентрацией электролитной добавки и практически не зависит от природы одно-одновалентных электролитов. Это справедливо в области хорошей растворимости натриевых, калиевых и аммониевых солей олеинметилтауриновой кислоты.

При практическом использовании добавок ПАВ (например, в системах тепло- и холодоснабжения) необходимо знать гидродинамическую эффективность растворов в различных температурных интервалах. На

фиг. 2, а приведена зависимость величины эффекта снижения сопротивления  $\Lambda$ , % от температуры водного раствора метауона в присутствии 1.8% хлористого магния (1, 2 — концентрации метауона  $C=0.3, 0.5\%$  соответственно). Для всех исследованных концентраций ПАВ максимальный эффект наблюдается в области температур  $t=(20-80)^\circ\text{C}$ . Снижение величины гидродинамического эффекта в области температур  $t>80^\circ\text{C}$ , по-видимому, связано с усилением дезагрегирующего влияния теплового движения на процесс образования асимметричных мицелл, а его уменьшение при  $t<20^\circ\text{C}$  обусловлено понижением растворимости ПАВ и уменьшением скорости восстановления мицеллярных структур. Наличие максимумов на кривых в области  $t=(20-80)^\circ\text{C}$  объясняется тем, что наряду с натриевой солью олеинметилтаурина в состав метауона в небольшом процентном соотношении входят другие ПАВ, имеющие различную растворимость в разных температурных интервалах.

Особый интерес представляет исследование эффекта снижения сопротивления добавками поверхностно-активных веществ, принадлежащих к одному гомологическому ряду. Были исследованы на гидродинамическую эффективность натриевые соли карбоновых кислот (лаурат, мирилат, пальмитат и стеарат натрия) четырех концентраций  $C=0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01$  моль/л. С целью устранения гидролиза в растворах ПАВ водородный показатель среды pH при проведении опытов поддерживался постоянным и равным 11. В качестве растворителя использовалась дистиллированная вода.

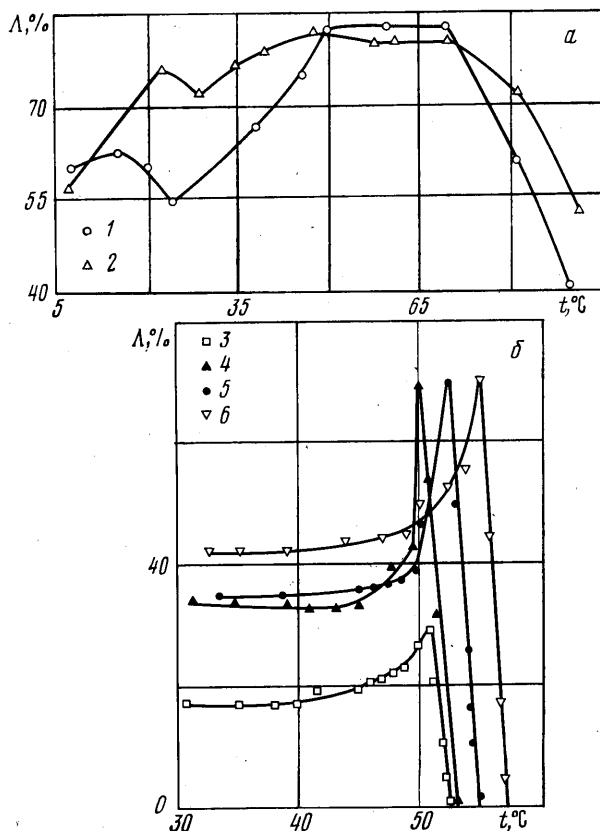
На фиг. 2, б приведена зависимость величины эффекта снижения сопротивления  $\Lambda$ , % от температуры (3—6 — концентрации пальмитата натрия  $C=0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01$  моль/л соответственно). Для каждой из концентраций можно выделить температурный диапазон нарастания эффекта снижения сопротивления. С увеличением температуры величина эффекта  $\Lambda$  возрастает и достигает максимального значения при некоторой оптимальной температуре (для каждой из концентраций ПАВ). Дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому уменьшению величины эффекта. В узком температурном интервале величина  $\Lambda$  уменьшается от



Фиг. 1

максимального значения до нуля. Такое поведение раствора пальмитата натрия можно объяснить сильным дезагрегирующим действием теплового движения молекул, приводящим к распаду анизотропных мицелл и соответственно к исчезновению эффекта снижения сопротивления. Аналогичные зависимости были получены и для других солей карбоновых кислот — лаурата натрия, миристана натрия и стеарата натрия.

Одной из наиболее важных характеристик растворов ПАВ является точка Крафта. Другими словами, точка Крафта — температура, при которой в растворе появляется новая мицеллярная фаза вещества. Ниже этой температуры поверхностно-активное вещество в бинарных системах



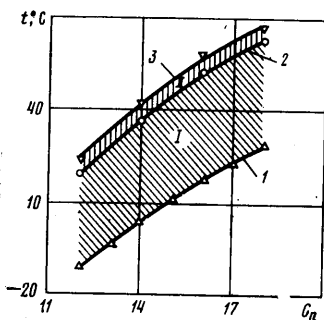
Фиг. 2

(ПАВ — растворитель) может находиться в твердой фазе или образует истинные растворы. Точка Крафта определяется пересечением кривых, описывающих зависимости растворимости и первой критической концентрации мицеллообразования от температуры. Кривая 1, построенная по точкам Крафта для ряда натриевых солей карбоновых кислот с длинами цепей  $C_{12}$ — $C_{18}$ , приведена на фиг. 3. Здесь же для концентрации  $C=0.01$  моль/л всех четырех исследованных соединений нанесены кривые 2 и 3, построенные по температурным точкам, которые соответствуют максимальному значению эффекта снижения сопротивления  $\Lambda=\Lambda_{\max}$  и исчезновению эффекта  $\Lambda=0$ .

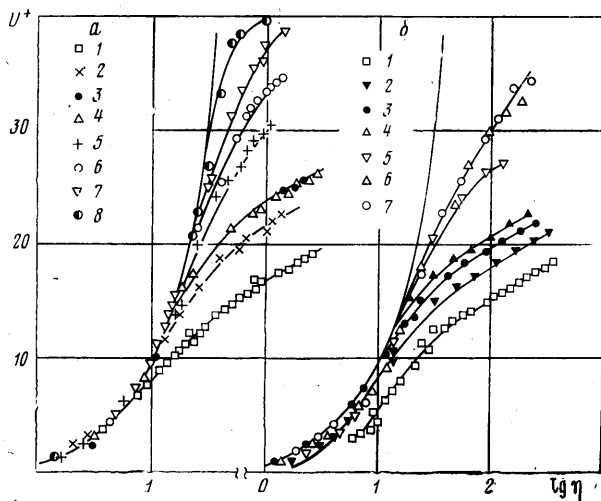
На приведенном графике можно выделить температурные области нарастания I и исчезновения II эффекта снижения сопротивления для натриевых солей карбоновых кислот. Температурные области I и II могут

быть изменены (увеличены или уменьшены) путем введения в раствор различного рода добавок (электролиты, спирты и др.), которые изменяют как основные физико-химические свойства растворов ПАВ (точки Крафта, растворимость,  $C_{m1}$ ,  $C_{m2}$  и т. д.), так и агрегативную устойчивость мицеллярных структур к повышенным температурам. Об управлении эффектом снижения гидродинамического сопротивления с помощью органических добавок (метанол) и стабилизации его в области низких температур сообщается в работе [10].

Известно, что в присутствии короткоцепочных ПАВ увеличивается растворимость длинноцепочных поверхностно-активных веществ за счет



Фиг. 3



Фиг. 4

образования смешанных мицелл. По-видимому, путем изменения процентного соотношения ПАВ с различными длинами углеводородных радикалов можно управлять температурной областью существования эффекта снижения сопротивления.

**2. Профили скорости и интенсивность турбулентности.** Измерения профилей средней скорости и интенсивности продольной компоненты пульсационной составляющей при течении растворов ПАВ были проведены при помощи оптического доплеровского измерителя (лазерного анемометра), описанного в [9].

Эксперименты были проведены на установке замкнутого цикла. Измерения проводились в канале прямоугольного сечения  $(2 \times 5) \cdot 10^{-2}$  м из прозрачного оргстекла на расстоянии 100 калибров от конфузора. Первый канал имел гладкие стенки, на верхнюю и нижнюю стенки второго канала была нанесена шероховатость (поперечные прорезы со средней высотой выступов  $\delta = 0.27 \cdot 10^{-3}$  м). Перепад давления определялся жидкостным манометром на участке длиной 0.8 м. Циркуляция растворов ПАВ и растворителя осуществлялась с помощью центробежного насоса.

На фиг. 4, а в универсальных координатах приведены профили скорости при течении водного раствора метаупона в канале с гладкими стенками (безразмерная координата  $\eta$  рассчитывалась по вязкости раствора). Измерения проведены для трех концентраций метаупона  $C = 0.2\%$  (точки 2-4),  $0.3\%$  (точки 5-7),  $0.4\%$  (8) и трех перепадов давления  $\Delta p = 49$  н/м<sup>2</sup> (2, 5),  $98$  н/м<sup>2</sup> (3, 6),  $147$  н/м<sup>2</sup> (4, 7, 8). Добавки метаупона приводят к существенному изменению в распределении профиля скорости

по сечению потока. Профили скорости в растворах ПАВ изменяются значительно круче, чем универсальный профиль в воде (1). При этом с увеличением концентрации метаупона (для неизменного перепада давления) наблюдается более сильная тенденция к ламинаризации течения. Для постоянной концентрации ПАВ с увеличением перепада давления, а следовательно, и числа Рейнольдса происходит более значительное смещение профилей скорости относительно универсального профиля.

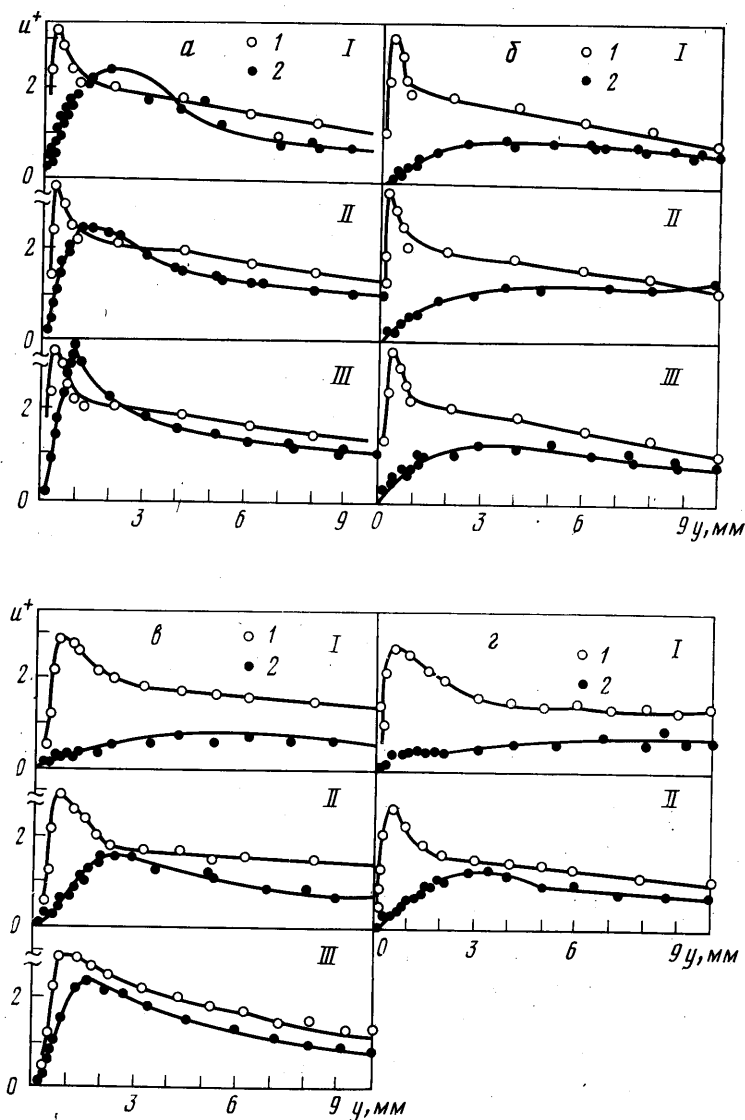
Результаты измерения в канале с шероховатыми стенками представлены на фиг. 4, б: 2-4 — концентрация метаупона  $C=0.4\%$ , 5-7 —  $0.6\%$ , перепады давления  $\Delta p=49$  н/м<sup>2</sup> (точки 5), 98 н/м<sup>2</sup> (4, 6), 147 н/м<sup>2</sup> (3, 7), 196 н/м<sup>2</sup> (2). При концентрации метаупона  $C=0.4\%$  наибольшее смещение по сравнению с водой имеет место для профиля скорости, измеренного при перепаде давления  $\Delta p=98$  н/м<sup>2</sup>. Для перепадов  $\Delta p=147, 196$  н/м<sup>2</sup> профили скорости располагаются ниже. Такое распределение профилей скорости для данной концентрации метаупона можно объяснить уменьшением гидродинамической эффективности добавок при возрастании перепада давления. При концентрации метаупона  $C=0.6\%$  с увеличением перепада давления происходит большее смещение профиля скорости относительно профиля для воды. Такое поведение раствора можно объяснить «локальной» деструкцией раствора ПАВ на шероховатостях стенки при концентрации  $C=0.4\%$ . Для концентрации метаупона  $C=0.6\%$  «локальная» деструкция не наблюдается и распределение профилей скорости становится подобным распределению для гладких труб.

Необходимо отметить общую особенность турбулентных течений растворов полимеров и ПАВ: основное влияние добавок сводится к утолщению пристенной области течения, включающей вязкий слой и переходную зону.

На фиг. 5 приведены профили интенсивности продольной компоненты пульсационной составляющей скорости  $\sqrt{\langle U'^2 \rangle}$ , отнесенной к динамической скорости в воде (1) и водных растворах метаупона (2)  $u^+ = \sqrt{\langle U'^2 \rangle} / U_*$ , а — г — концентрация метаупона  $C=0.2, 0.4, 0.45, 0.6\%$  соответственно, I, II, III — перепады давления 49, 98, 147 н/м<sup>2</sup>, а, б — экспериментальные данные для гладкого канала, в, г — для шероховатого. Видно, что с увеличением концентрации метаупона происходит более значительное снижение интенсивности продольных пульсаций. Для постоянной концентрации ПАВ с возрастанием перепада давления максимум в распределении интенсивности турбулентности приближается к стенке, т. е. к максимуму распределения в воде. Это говорит о том, что добавки метаупона при меньших скоростях течения оказывают более сильное ламинаризирующее воздействие на поток в целом.

В растворах высокополимеров значения продольной пульсации, отнесенные к величине динамической скорости на стенке, мало отличаются по величине от аналогичных данных для воды. Как видно из фиг. 5, в растворах метаупона в отличие от полимерных происходит значительное снижение интенсивности продольной пульсации скорости в пристенной области течения (по сравнению с водой).

Очень сильное воздействие добавки ПАВ оказывают на интенсивность турбулентности при концентрации  $C=0.4\%$  (гладкий канал) и  $C=0.45, 0.6\%$  (шероховатый канал). Для данных концентраций интенсивность  $u^+$  по всему сечению потока меньше соответствующих величин для воды, а для концентраций  $C=0.4, 0.6\%$  максимум в распределении  $u^+$  практически отсутствует. Таким образом, в отличие от высокополимеров добавки ПАВ приводят к существенному снижению интенсивности продольной компоненты пульсационной составляющей скорости.



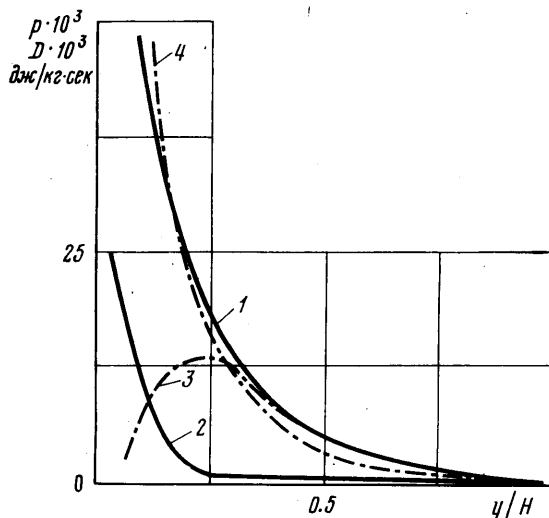
Фиг. 5

**3. Порождение и диссипация энергии.** Путем графического дифференцирования измеренных профилей скорости была рассчитана безразмерная турбулентная вязкость  $\varepsilon/(U_*H)$  по сечению потока. При этом использовались соотношения  $\tau = \rho(\nu + \varepsilon)(d\langle U \rangle/dy)$ ,  $\tau = \tau_w(1 - y/H)$ , где  $\tau$  — локальное касательное напряжение,  $\tau_w$  — напряжение трения на стенке,  $H$  — полувысота канала,  $y$  — координата по нормали к стенке,  $\rho$  — плотность жидкости,  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $\langle U \rangle$  — локальная осредненная скорость.

Результаты расчета показали, что добавки ПАВ приводят к уменьшению турбулентной вязкости по сравнению с растворителем (водой). Если для концентрации метаупона  $C = 0.2\%$  в гладком канале турбулентная вязкость меньше аналогичной величины для воды в области  $y/H < 0.5$ , то при увеличении концентрации ПАВ происходит снижение  $\varepsilon/(U_*H)$  по всему

сечению потока. Для концентрации  $C=0.4\%$  турбулентная вязкость становится даже меньше кинематической по всему сечению потока.

Известно, что турбулентная вязкость определяет скорость выделения турбулентной энергии и рассеяние этой энергии осредненным движением. Механическая энергия переходит во внутреннюю через непосредственное рассеяние энергии, обусловленное молекулярной вязкостью, и путем возникновения и затухания турбулентных возмущений. На фиг. 6 представ-



Фиг. 6

лены распределения порождения турбулентной энергии  $P=\varepsilon(d\langle U \rangle/dy)^2$  и диссипации энергии осредненного движения  $D=v(d\langle U \rangle/dy)^2$  по сечению потока в гладком канале для воды (1, 2) и раствора метаупона (3, 4) концентрации  $C=0.3\%$ . Видно, что добавки метаупона существенно сказываются на соотношении между  $P$  и  $D$  и изменяют распределение этих величин по глубине потока. В растворах ПАВ уменьшается порождение турбулентной энергии и возрастает диссипация энергии осредненного движения (по сравнению с водой).

**4. Предполагаемый механизм эффекта.** По сравнению с гидродинамически эффективными полимерами (полиэтиленоксид, полиакриламид и др.) поверхностно-активные вещества являются низкомолекулярными веществами. Однако в растворах коллоидных ПАВ при концентрации вблизи  $C_{m1}$  возникают мицеллы сферической формы, постулированные Гартли, а при концентрациях вблизи  $C_{m2}$  в растворе образуются пластинчатые мицеллы, предсказанные Мак — Беном. Степень агрегации зависит от длины углеводородной цепи, концентрации электролитов в растворе и т. д.

Методами светорассеяния и диффузии были определены размеры мицелл. Оказалось, что мицеллярная масса в зависимости от типа поверхностно-активного вещества колеблется от нескольких тысяч до сотен тысяч. Таким образом, по своей мицеллярной массе ПАВ приближаются к массе гидродинамически эффективных полимеров. Кроме того, пластинчатые мицеллы обладают предельно высокой асимметричностью строения.

В турбулентном потоке со сдвигом под действием градиента скорости асимметричные мицеллы ориентируются большей осью в направлении течения. В свою очередь среда, содержащая частицы в частично или полностью ориентированном состоянии, является анизотропной по отноше-

нию к вязкости. Следовательно, можно предположить, что механизм снижения сопротивления в потоках с добавками ПАВ аналогичен предложенному в [12] механизму для растворов высокополимеров.

**5. Натурные испытания** метода снижения сопротивления добавками ПАВ были проведены на трубопроводе шахтной установки кондиционирования воздуха с двумя составами хладоносителя на основе промышленных паст: диталан OTS и метаупон.

Первый опыт был проведен на части системы трубопроводов основного хладоносителя длиной 6,5 км и диаметром 0,1—0,3 м. В качестве добавки поверхностно-активного вещества использовался диталан OTS, в состав которого входят аммонийные соли сульфозэфиров. С целью устранения из шахтной воды ионов жесткости вводили карбонат натрия. Подобранный состав хладоносителя (диталан OTS, хлористый натрий, карбонат натрия, шахтная вода) позволил снизить гидродинамическое сопротивление хладоносителя на 47% (по сравнению с используемой в качестве хладоносителя шахтной водой).

Во втором опыте хладоносителем на основе метаупона была заполнена вся система трубопроводов шахтной холодильной установки длиной 13,5 км. В течение полутора месяцев эксплуатации подобранный состав хладоносителя давал стабильное снижение сопротивления на 50%.

Коррозийные испытания стали Ст. 3 показали, что в хладоносителях с добавками диталана OTS и метаупона глубинный показатель коррозии уменьшается в 3—4 раза.

Таким образом, проведенные исследования показали, что добавки мицеллообразующих ПАВ могут быть использованы для управления процессами турбулентного переноса в жидкости.

Поступила 24 II 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Повз И. Л., Ступин А. Б.* Снижение гидродинамического сопротивления добавками. В сб.: Физическая гидродинамика. Киев — Донецк, «Вища школа», 1977.
2. *Savins J. G.* A stress-controlled drag-reduction phenomenon. *Rheologica Acta*, 1967, vol. 6, No. 4.
3. *Patterson G. K., Zakin J. L., Rodriguez J. M.* Drag reduction. Polymer solutions, soap solutions and solid particle suspensions in pipe flow. *Indus. and Engng Chem.*, 1969, vol. 61, No. 1.
4. *Zakin J. L., Poreh M., Brosh A., Warshavsky M.* Exploratory study of friction reduction in slurry flows. *Chem. Eng. Progr. Sympos.*, 1971, vol. 67, No. 111.
5. *Повз И. Л., Ступин А. Б., Добрыченко В. М., Максютенко С. Н.* Снижение гидродинамического сопротивления добавками поверхностно-активных веществ. *Инж.-физ. ж.*, 1974, т. 27, № 4.
6. *Повз И. Л., Ступин А. Б., Добрыченко В. М., Максютенко С. Н.* Снижение гидродинамического сопротивления взвешенных потоков добавками полимеров и поверхностно-активных веществ. *Изв. вузов. Энергетика*, 1975, № 4.
7. *Повз И. Л., Ступин А. Б., Максютенко С. Н., Асланов П. В., Симоненко А. П., Мусиенко А. И.* Турбулентный теплообмен в слабых растворах полимеров и поверхностно-активных веществ. В сб.: Теплообмен-V, т. 7. Минск, Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1976.
8. *Рибиндер П. А.* Взаимосвязь поверхностных и объемных свойств растворов поверхностно-активных веществ. В сб.: Успехи коллоидной химии. М., «Наука», 1973.
9. *Повз И. Л., Ступин А. Б., Максютенко С. Н., Асланов П. В., Роцин Е. А., Тур А. Н.* Исследование турбулентного течения растворов поверхностно-активных веществ лазерным анемометром. *Инж.-физ. ж.*, 1975, т. 29, № 5.
10. *Ступин А. Б., Максютенко С. Н., Асланов П. В., Симоненко А. П.* Пристеночное турбулентное течение жидкости с добавками поверхностно-активных веществ. В сб.: Физическая гидродинамика. Киев — Донецк, «Вища школа», 1977.
11. *Повз И. Л., Ступин А. Б.* Экспериментальное исследование турбулентного течения водных растворов полимеров в трубе. *Инж.-физ. ж.*, 1972, т. 22, № 1.
12. *Повз И. Л., Ступин А. Б.* О влиянии упругости растворов полимеров на снижение сопротивления. *ПМТФ*, 1972, № 1.