

**А.П. Симоненко, д-р техн. наук, Н.В. Быковская, канд. техн. наук,
Н.А. Дмитренко, П.В. Асланов, канд. физ.-мат. наук**

ГОУВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭФФЕКТА ТОМСА И ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ЕГО ВЕЛИЧИНУ

Приведенные результаты позволяют эффективно решать задачи практического применения полиэтиленоксида и полиакриламида в качестве гидродинамически-активных добавок, а также углубить физическое истолкование механизма их воздействия на интегральные параметры напорных потоков ньютоновских жидкостей со сниженным гидродинамическим сопротивлением турбулентного трения в трубах.

Ключевые слова: эффект Томса, активные добавки, водные растворы, синтетические полимеры, сопротивление турбулентного трения

Состояние вопроса

Важным резервом совершенствования технологий и повышения эффективности работы оборудования, которые применяются в ходе предупреждения техногенных аварий и ликвидации их последствий, является использование явления снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) жидкостей в напорных трубопроводах с добавками водорастворимых высокомолекулярных полимеров с линейной структурой макромолекул (эффект Томса).

Анализ основных причин, сдерживающих широкое применение явления снижения ГСТТ в промышленных масштабах, показал, что одной из них является отсутствие у потенциальных потребителей достаточных знаний по закономерностям эффекта Томса и влиянию различных факторов на его величину.

Современное развитие гидродинамики характеризуется поиском эффективных способов управления процессами переноса в турбулентных потоках жидкостей. В первую очередь это относится к явлению переноса импульса, т. к. его уменьшение может привести к значительному снижению ГСТТ в напорных трубопроводах, а следовательно, и к повышению эффективности работы различных гидравлических систем и машин, в т. ч. и к уменьшению количества потребляемой ими электроэнергии.

Одним из наиболее эффективных способов снижения ГСТТ является способ, в основе которого лежит введение в турбулентные потоки жидкостей гидродинамически-активных добавок (ГДАД) – высокомолекулярных полимеров, некоторых мицеллообразующих поверхностно-активных веществ и асимметричных твердых частиц.

Из известных ГДАД наибольшей эффективностью, при малых концентрациях в растворах, обладают водорастворимые высокомолекулярные синтетические и природные полимеры с линейной структурой макромолекул, например, полиэтиленоксид (ПЭО), полиакриламид (ПАА) и др. [1–5].

Многочисленными экспериментальными исследованиями однородных водных растворов ПЭО и ПАА, а также растворов из композиций на их основе показана возможность снижения гидравлических потерь в напорных трубопроводах на 50–80 %. Это открывает перспективы повышения эффективности работы различных гидравлических систем (при содержании этих полимеров в растворе $5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-2}$ вес. %) по одному из альтернативных показателей: увеличение длины прямолинейных участков трубопроводов в 2,0–5,0 раз, уменьшение внутреннего диаметра труб на 13,0–28,0 %, увеличение расхода жидкостей в 1,41–2,24 раза, уменьшение затрачиваемой насосами мощности на 50,0–80,0 %. Указанные вариации обусловлены изменением параметров, входящих в формулу Дарси-Вейсбаха.

Цель работы заключается в установлении основных закономерностей явления снижения ГСТТ (эффекта Томса) при течении в напорных трубопроводах водных растворов гидродинамически-активных синтетических полимеров (ПЭО, ПАА) и определении влияния на его величину различных факторов: температуры, концентрации различных солей и неэлектролитов, а также водородного показателя среды pH.

Основные закономерности

Наиболее полные данные о влиянии высокомолекулярных полимеров на сопротивление турбулентного трения получены путем изучения течений их однородных растворов в трубах. К основным из них следует отнести следующие:

а) при ламинарном течении в гладких и шероховатых трубах введение полимеров не оказывает влияния на сопротивление трения; полимерные растворы ведут себя подобно ньютоновской жидкости, не вызывая изменений в известных закономерностях сопротивления, при этом практически не меняется величина критического числа Рейнольдса, характеризующего переход течения из ламинарного в турбулентный режим [4];

б) в турбулентном режиме течения снижение гидродинамического сопротивления трения наступает лишь при достижении некоторого порогового числа Рейнольдса ($Re_{пор}$), при котором касательное напряжение трения на стенке трубы достигает порогового значения; это значение зависит от природы полимера и его концентрации в растворе [4, 5];

в) максимальное снижение сопротивления турбулентного трения наблюдается при достижении некоторой оптимальной концентрации полимера в растворе; дальнейшее ее увеличение приводит к снижению величины эффекта [6, 7];

г) для каждого числа Re в гладких и шероховатых трубах существуют предельные значения местных коэффициентов сопротивления турбулентного трения, с уменьшением которых в полимерных растворах не удастся снизить гидродинамическое сопротивление. Этим предельным значениям соответствует «асимптотический» профиль распределения скоростей с протяженной переходной областью. Предельно-допустимое минимальное гидродинамическое сопротивление турбулентного трения в трубах, за счет введения микродобавок высокомолекулярных полимеров, описывается асимптотой Вирка:

$$\frac{1}{\lambda} = 9,21g Re\sqrt{\lambda} - 19,6,$$

где λ – коэффициент гидродинамического сопротивления трения;

g – ускорение свободного падения [4];

д) в шероховатых трубах значительное снижение величины ГСТТ в растворах полимеров наблюдается лишь в ограниченной области чисел Re ; при дальнейшем их увеличении эффективность воздействия полимерных добавок уменьшается [8];

е) под действием больших гидродинамических напряжений макромолекулы полимера в потоке склонны к деструкции (разрушению), что первоначально приводит к уменьшению величины эффекта снижения сопротивления, а в дальнейшем и к его полному исчезновению [9, 10];

ж) в турбулентных потоках жидкости макромолекулы гидродинамически-активных полимеров, наряду с механической деструкцией, подвергаются окислительной деструкции, которая снижает величину эффекта снижения турбулентного трения;

з) зависимость величины эффекта Томса от концентрации полимера носит экстремальный характер; при этом максимальный эффект достигается при некоторой оптимальной его концентрации в растворе C_{opt} . При $C < C_{opt}$ вязкость полимерного раствора равна или незначительно превышает вязкость растворителя. При $C > C_{opt}$ величина гидродинамического эффекта уменьшается за счет увеличения вязкости раствора [5, 10];

и) при заданной величине перепада давления ΔP (т.е. при фиксированном значении динамической скорости $V = \sqrt{\tau_w/\rho}$, где τ_w – касательное напряжение трения на стенке, ρ – плотность раствора) величина эффекта снижения зависит не только от концентрации полимера, но и от его средней молекулярной массы;

к) большей эффективностью снижать ГСТТ обладают полимеры, макромолекулы которых имеют повышенную гибкость в растворах. Так, например, более гибкие макромолекулы ПЭО эффективнее жестких макромолекул ПАА при их равных молекулярных массах [4, 5, 11].

Для понимания физической природы явления снижения ГСТТ и построения рациональных схем расчета турбулентных потоков жидкостей с добавками гидродинамически-активных ВП необходимо знать особенности их влияния на структуру турбулентности вблизи омываемой стенки, где в основном сосредоточены турбулентная энергия и ее диссипация.

Основное влияние добавок полимеров заключается в утолщении пристенной области течения, которая включает вязкий подслой и переходную зону, а также в уменьшении относительных размеров турбулентного ядра. Кроме этого, происходит уменьшение (по сравнению с течением воды) интенсивности пульсационных составляющих скорости.

При течении полимерных растворов происходит уменьшение диссипации турбулентной энергии и увеличение колмогоровского масштаба турбулентности. Плотность потока кинетической энергии по сечению трубы при этом уменьшается, что является причиной уменьшения количества переданной энергии от осредненного движения к пульсационному.

Влияние различных факторов

При практическом использовании эффекта Томса часто приходится сталкиваться с фактами проявления различной гидродинамической активности одними и теми же полимерами в различных физико-химических условиях. Причиной этому, как показали исследования, является изменение молекулярных характеристик полимеров в растворах в зависимости от внешних условий и состава жидкостей, в которых они растворены. Знание этих особенностей позволяет сделать правильный выбор полимеров для достижения максимального гидродинамического эффекта в заданных условиях.

Одной из основных характеристик состояния высокомолекулярного полимера в растворе является его характеристическая вязкость. Для предельно разбавленных растворов (в которых и наблюдается снижение ГСТТ) характеристическая вязкость η определяется соотношением [12]:

$$\eta = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C},$$

где η, η_0 – вязкость раствора и растворителя;

C – концентрация исследуемого полимера в растворе.

На практике характеристическую вязкость определяют экстраполяцией величины $\eta - \eta_0 / \eta_0 C$ на нулевую концентрацию, используя полученные экспериментальным путем значения η и η_0 .

Согласно [13] характеристическая вязкость связана с размерами макромолекулярного клубка следующим соотношением:

$$\eta = \Phi_0 \frac{\bar{h}^2}{M}^{3/2},$$

где Φ_0 – константа Флори;

\bar{h}^2 – среднеквадратичное расстояние между концами полимерной цепи;

M – молекулярная масса полимера.

В соответствии с приведенным уравнением можно сделать вывод, что об изменении размеров макромолекулярных клубков можно судить по характеристической вязкости полимерных растворов, которая, в свою очередь, будет определять величину эффекта снижения ГСТТ.

В ходе проведения физико-химических и гидродинамических исследований водных растворов ПЭО шести различных молекулярных масс была установлена зависимость величины эффекта снижения ГСТТ ($\Delta\lambda/\lambda$, %) от их характеристической вязкости η . Результаты эксперимента показали, что в диапазоне величин η от 4 дл/г до 10 дл/г величина $\Delta\lambda/\lambda$ возрастает от 0 до 80 %.

В [14] приведены результаты исследований по влиянию качества растворителя на конформационное состояние макромолекул ПЭО в растворах и величину эффекта снижения в них ГСТТ. При этом основное внимание было уделено выяснению влияния температуры, а также добавок различных солей и других химических веществ (неэлектролитов) на структуру воды, которая определяет величины характеристической вязкости и ГСТТ приготовленных на ее основе растворов.

Влияние температуры

В [14] приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию температуры на величину эффекта снижения ГСТТ в водных растворах ПЭО. Анализ представленных зависимостей величины коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ от числа Рейнольдса для водных растворов ПЭО показал, что с понижением температуры эффективность воздействия добавок возрастает.

Такое влияние температуры на величину коэффициента λ можно объяснить следующим образом. Макромолекулярная цепь ПЭО содержит эфирные кислороды, между которыми образуются мостики из трех молекул воды, стабилизирующие конформацию макромолекулярной цепи в растворе. Повышение температуры приводит к разрыву водородных связей, мостики разрушаются и макромолекула сжимается, что приводит к уменьшению размеров полимерного клубка. Проверка описанного механизма действия структуры растворителя на конформацию макромолекулы была проведена в [14] с использованием численного моделирования методом Монте-Карло и было установлено, что водородно-связанные мостики стабилизируют максимально развернутую конформацию макромолекулярной цепи ПЭО в водном растворе.

Влияние добавок солей

Результаты экспериментальных исследований по влиянию концентрации различных солей на величину эффекта снижения ГСТТ приведены в таблице 1.

Из приведенных в таблице данных видно, что на величину эффекта снижения ГСТТ влияние оказывает не только концентрация, но и природа соли.

Электролиты оказывают деструктурирующие действия на воду, т. к. их растворение приводит к разрушению сетки водородных связей в воде точно так же, как и повышение температуры. Поэтому растворение солей и увеличение их содержания в растворе приводит к свертыванию макромолекулярных цепей ПЭО в водных растворах. Этим и объясняется уменьшение величины $\Delta\lambda/\lambda$, %, особенно для сильных электролитов K_2SO_4 и K_2CO_3 (см. данные в строке 3 и 4 таблицы) по сравнению со слабым электролитом KJ (строка 1).

Таблица – 1. Влияние природы солей и их концентрации на величину эффекта снижения ГСТТ ($\Delta\lambda/\lambda$, %) в водном растворе ПЭО, с молекулярной массой 10^6 . Содержание ПЭО в растворе – 0,0002 % вес. Температура исследуемых растворов – 20 °С [14].

№ п/п	Наименование соли (структурная формула)	Концентрация соли в растворе, моль/л						
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
		Величина эффекта снижения ГСТТ, %						
1	Калий йодистый (KI)	59	59	59	59	58	58	57
2	Едкий калий (KOH)	59	58	57	54	52	50	48
3	Калий серноокислый (K_2SO_4)	59	57	56	52	48	40	30
4	Калий углекислый (K_2CO_3)	59	55	51	40	32	0	–

При решении вопроса практического применения снижающих гидродинамическое сопротивление полимерных добавок в обязательном порядке необходимо учитывать какие электролиты и в каком количестве находятся в стоках, подлежащих аварийной откачке. Из приведенных в таблице 1 данных следует, что чем сильнее электролит разрушает структуру воды, тем сильнее уменьшается характеристическая вязкость растворов ПЭО, а следовательно, в них пропорционально уменьшается и величина эффекта снижения ГСТТ.

Влияние соли возрастает с увеличением молекулярной массы ПЭО, т. е. высокомолекулярные полимеры оказываются более чувствительными к действию солей. Следует отметить, что аналогичный вывод следует и из сравнения температурных зависимостей характеристической вязкости водных растворов ПЭО различных молекулярных масс. Это является вполне естественным, т. к. одинаковое изменение конформационного состояния цепи приводит к большим абсолютным изменениям размеров макромолекулярных клубков ПЭО при увеличении длины цепи, т. е. молекулярной массы.

Полученные результаты указывают на необходимость учитывать для каждого конкретного случая влияния солей на характеристическую вязкость растворов ПЭО для каждого конкретного случая, а следовательно, и на их гидродинамическое сопротивление.

Влияние добавок неэлектролитов [14]

Особый интерес представляют результаты исследований по влиянию на гидродинамическую эффективность неэлектролитов, т. к. в зависимости от своей природы они могут оказывать как структурирующее, так и деструктурирующее действие на воду.

Экспериментальные исследования проводились с использованием водных растворов ПЭО с молекулярной массой $M = 3 \cdot 10^6$ при температуре 20 °С. В качестве добавок неэлектролитов были выбраны два химических соединения – мочевины и ацетон, которые по-разному воздействуют на структуру воды. При этом мочевины оказывают деструктурирующее действие на воду, а ацетон, наоборот, ее структурирует. Полученные экспериментальные данные показали, что с ростом концентрации мочевины в растворе величина эффекта снижения ГСТТ постоянно падает, а при добавлении ацетона к раствору ПЭО – растет.

На основании проведенного анализа по влиянию температуры, добавок солей и неэлектролитов можно сделать вывод, что молекулярные аспекты снижения гидродинамического сопротивления заключаются в том, что величина достигаемого гидродинамического эффекта определяется не только молекулярной массой полимера, но и состоянием макромолекулярного клубка, его размерами, которые являются следствием конформации макромолекулярной цепи, зависящей от внешних условий и состава растворителя.

Влияние водородного показателя среды pH

При аварийной откатке сточных вод химических предприятий важно знать, какое влияние на величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления $\Delta\lambda/\lambda$, % оказывает их водородный показатель (pH).

В [15] приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию pH на величину $\Delta\lambda/\lambda$, % для четырех концентраций водных растворов ПАА. Изменение pH в растворах проводили путем введения небольших количеств соляной кислоты и едкого натрия. Установлено (рисунок 1), что наибольший гидродинамический эффект проявляется в области значений pH = (5–10). При этом величина $\Delta\lambda/\lambda$, % для растворов, содержащих 10^{-4} ; $2 \cdot 10^{-4}$; $2,5 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ ПАА лежит в диапазоне 52,5–63,0 %. Уменьшение величины pH ниже 5 и увеличение больше 10 приводит к резкой потере растворами гидродинамической эффективности [15].

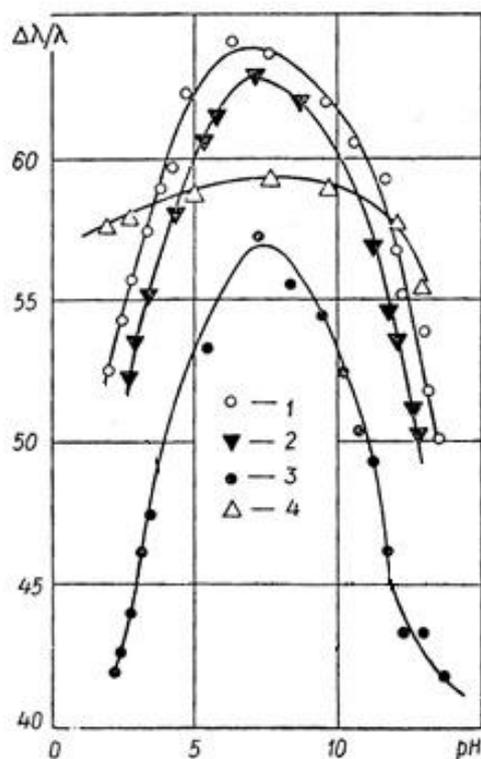


Рисунок 1 – Зависимость величины эффекта ГСТТ $\Delta\lambda/\lambda$, % от водородного показателя среды pH в водных растворах ПАА. Концентрация ПАА в растворах равна: 10^{-4} ; $2 \cdot 10^{-4}$; $2,5 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-4}$ г/см³ (кривые 1, 2, 3, 4) [15]

В связи с вышеизложенным, при практическом использовании явления снижения ГСТТ добавками ВП необходимо учитывать каким значением водородного показателя характеризуется жидкая среда, в которой будет растворяться гидродинамически-активный полимер.

Достичь наиболее высокой гидродинамической эффективности полимера можно выбором оптимальных условий, способствующих наибольшему разворачиванию полимерного клубка. При отсутствии возможности реализовать этот путь следует заняться поиском другого полимера, для которого данные условия будут наиболее благоприятными. Так, например, при высоких температурах гидродинамическая эффективность ПЭО падает, в то же время для полиакриламида она сохраняется на достаточно высоком уровне благодаря другому типу гидратации мономерных звеньев.

Выводы

На основе обзора литературных источников, посвященных явлению снижения ГСТТ жидкостей в напорных трубопроводах добавками высокомолекулярных полимеров с линейной структурой макромолекул, а также полученных авторами результатов экспериментальных исследований, систематизированы основные закономерности эффекта Томса и определено влияние различных факторов на его величину. Полученные результаты позволяют эффективно использовать гидродинамически-активные полимеры на практике и углубляют физическое истолкование механизма их воздействия на интегральные параметры напорных потоков ньютоновских жидкостей со сниженным ГСТТ в трубах.

Список литературы

1. Liberatore, M. W. Shear-Induced Structure Formation in Solutions of Drag Reducing Polymers / M. W. Liberatore, E. J. Pollauf, A. J. J. McHugh // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2003. – Vol. 113, No. 2–3. – P. 193–208.
2. Characteristic Scales of Two-Dimensional Turbulence in Polymer Solutions / R. Hidema [and others] // *AIChE Journal*. – 2014. – Vol. 60. – P. 1854–1862.
3. Time-Series and Extended Karhunen-Loeve Analysis of Turbulent Drag Reduction in Polymer Solutions / S. N. Wang [and others] // *AIChE Journal*. – 2014. – Vol. 60. – P. 1460–1475.
4. Пилипенко, В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения / В. Н. Пилипенко // *Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа*. – М : ВИНТИ, 1980. – Т. 15. – С. 156–257.
5. О снижении гидродинамического сопротивления добавками полимеров / Л. И. Седов [и др.] // *Механика турбулентных потоков: сборник*. – М. : Наука, 1980. – С. 7–28.
6. Повх, И. Л. Снижение гидродинамического сопротивления добавками / И. Л. Повх, А. Б. Ступин // *Физическая гидродинамика*. – Киев; Донецк : Вища школа, 1977. – С. 7–19.
7. Хойт, Д. У. Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости / Д. У. Хойт // *Труды американского общества инженеров-механиков. Серия D. Теоретические основы инженерных расчетов*. – 1971. – № 2. – С. 1–31.
8. Иванюта, Ю. Ф. Турбулентные трения растворов полиокса в трубе с большой шероховатостью / Ю. Ф. Иванюта, Л. А. Чекалова // *Инженерно-физический журнал*. – 1976. – Т. 31, № 2.
9. Неронова, И. А. Деструкция полиэксетиленов и ее связь со снижением сопротивления трения в турбулентном потоке / И. А. Неронова // *Механика турбулентных потоков: сборник*. – М. : Наука, 1980. – С. 364–368.
10. Анисимов, И. А. Зависимость деструкции водного раствора полиэтиленоксида от работы сил трения / И. А. Анисимов, Б. П. Миронов // *Турбулентные сдвиговые течения неньютоновских жидкостей : сборник*. – Новосибирск, 1981. – С. 14–38.
11. Иванюта, Ю. Ф. Экспериментальное исследование турбулентного течения слабых растворов полимеров в трубах различных диаметров / Ю. Ф. Иванюта, Л. А. Чекалова // *Инженерно-физический журнал*. – 1971. – Т. 21, № 1.
12. Химический энциклопедический словарь ; гл. ред. И. Л. Кнунянц. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – 792 с.
13. Николаев, А. Ф. Водорастворимые полимеры / А. Ф. Николаев, Г. И. Охрименко. – Л. : Химия, 1979. – 145 с.
14. Торяник, А. И. Молекулярные аспекты снижения гидродинамического сопротивления добавками полимеров / А. И. Торяник // *Физическая гидродинамика : сборник*. – Донецк : ДонГУ, 1990. – С. 26–32.
15. Влияние водородного показателя среды pH на снижение сопротивления слабых растворов полимеров / И. Л. Повх [и др.] // *Бионика : республиканский сборник*. – К. : Наукова думка, 1975. – № 9. – С. 74–78.

А.П. Симоненко, Н.В. Быковская, Н.А. Дмитренко, П.В. Асланов
ГОУВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк

Основные закономерности эффекта Томса и влияние различных факторов на его величину

Важным резервом повышения эффективности работы оборудования, которое применяется в процессах предупреждения техногенных аварий и ликвидации их последствий, является использование явления снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) жидкостей в напорных трубопроводах добавками высокомолекулярных полимеров с линейной структурой макромолекул (эффект Томса).

Анализ причин, сдерживающих широкое применение явления снижения ГСТТ в промышленных масштабах показал, что одной из них является отсутствие у потенциальных потребителей достаточных знаний по закономерностям эффекта Томса и влиянию различных факторов на его величину.

В настоящей статье на основе обзора литературных источников, посвященных проблеме снижения ГСТТ полимерными добавками (полиэтиленоксидом и полиакриламидом) в воде, а также полученных авторами результатов экспериментальных исследований, систематизированы закономерности снижения гидравлических потерь жидкостей в напорных трубопроводах, а также определено влияние на величину эффекта Томса температуры, водородного показателя среды pH, добавок солей и неэлектролитов различной природы.

ЭФФЕКТ ТОМСА, АКТИВНЫЕ ДОБАВКИ, ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ, СИНТЕТИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ, СОПРОТИВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТОГО ТРЕНИЯ

A.P. Simonenko, N.V. Bykovskaya, N.A. Dmitrenko, P.V. Aslanov
Statutes of the State Educational Institution of Higher Professional Education
«Donetsk National Technical University», Donetsk

Main Regularities of Toms's Effect and Influence of Various Factors on its Size

Important reserve of increase of overall performance of the equipment which is applied in processes of the prevention of technogenic accidents and elimination of their consequences is use of the phenomenon of decrease in the hydrodynamic resistance of turbulent friction (HRTF) of liquids in pressure head pipelines additives of the high-molecular polymers with linear structure of macromolecules (Toms's effect).

The analysis of the reasons constraining broad application of the phenomenon of decrease in HRTF in industrial scale showed that one of them is absence at potential consumers of sufficient knowledge of regularities of Toms's effect and to influence of various factors on its size.

In the present article on the basis of the review of the references devoted to a problem of decrease in HRTF by polymeric additives (polyethylene oxide and polyacrylamide) in water, and also the results of pilot studies received by authors systematized regularities of decrease in hydraulic losses of liquids in pressure head pipelines, and also influence on the size of effect of Toms of temperature, a hydrogen indicator of the pH environment, additives of salts and nonelectrolytes of various nature is defined.

TOMS'S EFFECT, ACTIVE ADMIXTURES, WATER SOLUTIONS, SYNTHETIC POLYMERS, TURBULENT FRICTION RESISTANCE

Сведения об авторах:

А.П. Симоненко

SPIN-код: 9231-8452
 Телефон: +380 (50) 667-34-61
 Эл. почта: sap2012@rambler.ru

Н.А. Дмитренко

SPIN-код: 7670-5770
 Телефон: +380 (93) 796-79-69
 +380 (71) 796-79-69
 Эл. почта: zan.nikita@gmail.com

П.В. Асланов

Телефон: +380 (50) 954-62-57
 Эл. почта: aslanov.fnpme@gmail.com

Н.В. Быковская

SPIN-код: 9657-4554
 Телефон: +38(099)-765-2002
 Эл. почта: nataliya_bykovskaya@mail.ru

Статья поступила 20.02.2016

© А.П. Симоненко, Н.В. Быковская, Н.А. Дмитренко, П.В. Асланов, 2016
Рецензент: С.П. Высоцкий, д-р техн. наук, проф., АДИ ГОУВПО «ДонНТУ»