

А.П. Симоненко¹, П.В. Асланов¹, Н.А. Дмитренко¹, В.Е. Силенко²
(¹Донецкий национальный университет; ²Государственный гуманитарно-технологический университет; e-mail: zan.nikita@gmail.com)

ПРЕДЕЛЬНОЕ УМЕНЬШЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕНИЯ ВОДЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ-АКТИВНЫМИ ДОБАВКАМИ В НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Установлены пределы уменьшения турбулентного трения воды гидродинамически-активными добавками в напорных трубопроводах. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности систем водяного пожаротушения и аварийной откачки воды при чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, полимерные композиции.

A.P. Simonenko, P.V. Aslanov, N.A. Dmitrenko, V.E. Silenko
**THE MAXIMUM REDUCTION OF TURBULENT FRICTION
IN WATER BY HYDRODYNAMIC-ACTIVE ADDITIVES
IN THE PRESSURE PIPELINES**

The limiting to reduce the turbulent friction in water hydrodynamic-active additives in the pressure pipelines are established. The received results are recommended to implement to increase the efficiency of the fire extinguishing systems and emergency pumping of water in emergencies.

Key words: micelle-forming surfactants, polymer compositions

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 16 декабря 2016 г.

Современное развитие гидродинамики характеризуется поиском новых и совершенствованием существующих способов управления процессами турбулентного переноса в потоках жидкостей. Особый интерес представляют исследования, которые направлены на изучение процессов переноса импульса, так как, например, его уменьшение приводит к снижению *гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ)*. Анализ литературных источников и патентов на изобретения по данной проблеме показывает, что среди работ этого направления особое место занимает способ, в основу которого положено ведение в турбулентные потоки жидкостей *гидродинамически-активных добавок (ГДАД) – высокомолекулярных полимеров (ВП)* с линейной структурой макромолекул (эффект Томса), некоторых *мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (МПАВ)*, асимметричных твёрдых частиц.

Так, например, ведение в перекачиваемую жидкость микродобавок с концентрацией $5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-2}$ вес. % водорастворимых ВП (например, полиэтиленоксида – ПЭО, полиакриламида – ПАА с молекулярной массой 2,5...6,0 млн), при величине уменьшения гидродинамического сопротивления на 50...80 % позволяет либо увеличить расход жидкости по трубопроводу в 1,41...2,24 раза, либо уменьшить затрачиваемую при перекачке жидкости насосами мощность на 50...80 %, либо увеличить прямолинейные участки трубопровода в 2,0...5,0 раз, либо уменьшить внутренний диаметр труб на 13...28 % [1].

Высокую гидродинамическую эффективность при транспортировке жидкостей по трубопроводу в турбулентном режиме проявляют также МПАВ, которые, в отличие от ВП в растворах, обладают обратимой механической деструкцией, что позволяет использовать этот класс добавок в замкнутых гидравлических системах [2-4].

Анализ результатов работы оперативных подразделений МЧС России показал, что используемые в процессе ликвидации последствий техногенных аварий и природных бедствий технологии и оборудование недостаточно эффективны. В первую очередь, это относится к тушению крупномасштабных пожаров, аварийной откачке за малые промежутки времени сточных вод из затопленных территорий и т.д. Кроме этого возникает необходимость создания нормальных условий жизни людям, которые проживают в районах бедствия, а также обеспечения соответствующих служб технологическими и техническими средствами, характеризующимися малым потреблением электроэнергии. Очевидно, что сохранившиеся в ходе стихийного бедствия или техногенной аварии системы и оборудование, например, тепло- и холодоснабжения, канализации, водоотведения, водоподготовки и др. будут эксплуатироваться с максимальной нагрузкой, то есть в так называемом "пиковом режиме".

В связи с вышеизложенным, явление снижения ГСТТ, за счёт введения добавок ВП, МПАВ и композиций на их основе, представляет большой практический интерес. В первую очередь, это следует отнести к его использованию в чрезвычайных ситуациях. При этом потребителям необходимо знать особенности снижения ГСТТ добавками, влияние различных факторов на его величину, в том числе и величину предельного уменьшения турбулентного трения.

Цель работы – определение применимости асимптоты Вирка [5] для растворов ранее неизвестных гидродинамически-активных природных полимеров – микробных экзополисахаридов (МЭПС), а также созданных водорастворимых жидких и твёрдых полимерных композиций на основе высокомолекулярных ПЭО и ПАА. Кроме этого в ходе проведения исследований необходимо установить предельные асимптоты уменьшения ГСТТ добавками МПАВ. Вышеуказанная цель должна быть обоснована путём проведения комплексных исследований особенностей снижения ГСТТ воды добавками ВП и МПАВ, а также влияния различных факторов на его величину.

Характеристика использованных добавок

Высокомолекулярные полимеры

В процессе проведения исследований были использованы следующие синтетические полимеры: два образца ПЭО (производство США) – WSR-301 и WSR-"коагулянт" с молекулярной массой $2,5 \cdot 10^6$ и $3,8 \cdot 10^6$ соответственно, три образца ПЭО, синтезированных в НИИ химической технологии (г. Новосибирск, Россия) с молекулярной массой $2,6 \cdot 10^6$; $4,0 \cdot 10^6$ и $6,0 \cdot 10^6$, а также один образец полиакриламида (ПАА) производства НИФХИ им. Л.Я. Карпова (г. Москва, Россия) с молекулярной массой $3,2 \cdot 10^6$.

В работе [6] показана возможность применения в качестве гидродинамически-активных добавок полимеров природного происхождения – *микробных экзополисахаридов (МЭПС)*, молекулярная масса которых, по данным предприятий изготовителей, лежит в пределах $6,4 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^6$. Установлено, что для достижения равных величин снижения ГСТТ оптимальная концентрация таких полимеров должна быть на порядок выше, чем у синтетических полимеров – ПЭО и ПАА. В то же время МЭПС имеют ряд преимуществ, к основным из которых следует отнести: простоту и дешевизну получения, повышенную устойчивость их макромолекул к механической деструкции, а также сохранение растворами гидродинамической эффективности при длительном хранении.

Мицеллообразующие поверхностные вещества

Особое место среди снижающих ГСТТ добавок занимают некоторые МПАВ, которые, в отличие от ВП, являются низкомолекулярными веществами. При *второй критической концентрации мицеллообразования (ККМ₂)* эти вещества образуют анизометрические мицеллы, которые (подобно макромолекулам ВП) проявляют гидродинамическую активность в турбулентных потоках жидкости. Анализ многочисленных исследований, выполненных авторами, указывает на однозначную связь ККМ₂ с началом проявления эффекта снижения ГСТТ. Поэтому не вызывает сомнения тот факт, что гидродинамической эффективностью обладают только полноценные МПАВ – анионоактивные, катионоактивные и амфолитные.

В табл. 1, в качестве примера, приведены составы гидродинамически-активных композиций на основе МПАВ и *способствующих мицеллообразованию веществ (СМВ)* для снижения ГСТТ воды.

Таблица 1

Составы гидродинамически-активных композиций на основе МПАВ и содействующих мицеллообразованию веществ (СМВ) для снижения ГСТТ воды

Состав композиции (МПАВ + СМВ)	Оптимальные концентрации, % вес.			Величина эффекта снижения ГСТТ при $C_{opt.}, \%$	Температурный диапазон проявления эффекта, °С
	МПАВ	СМВ	Суммарная		
Цетилпиридиний хлористый + α -нафтол	0,065	0,025	0,09	75-79	10-50
Цетилпиридиний бромид + α -нафтол	0,060	0,022	0,082	72-78	25-90
Метаупон + NaCl	(0,30-2,4)	(7,5-8,3)	(7,8-11,9)	78-80	3,5-95
Диталан OTS + NaCl	(0,6-2,4)	3,0	3,6-5,4	67-79	9,5-55
Тетрадецилсульфат натрия + NaCl	0,08	1,75	1,83	60-80	40-65
Олеат натрия + KCl	0,2	6,0	6,2	65-80	20-50

Примечание. В таблице приведены значения величины эффекта снижения ГСТТ в диапазоне чисел Рейнольдса $2,3 \cdot 10^2 \dots 2,0 \cdot 10^6$, рассчитанных по вязкости воды

Водорастворимые полимерные композиции

Многочисленные попытки использования заранее приготовленных растворов ВП на практике не дали желаемого результата. Причиной этому стали: длительность процесса приготовления растворов во времени и необходимость применения для этих целей громоздкого оборудования, а также потеря полимерными растворами гидродинамической эффективности в результате механической и окислительной деструкции.

В связи с вышеизложенным возникла необходимость создания на основе высокоэффективных полимеров различных полимерных композиций и генераторов приготовления из них растворов, применение которых за малые промежутки времени (до 5 секунд) обеспечивают приготовление однородных растворов с максимальным сохранением полимера исходной молекулярной массы.

В табл. 2 приведён перечень известных, разработанных и уточнённых в *Донецком национальном университете (ДонНУ)* различных полимерных композиций на основе высокомолекулярных ПЭО и ПАА, которые могут быть успешно использоваться на практике в виде: ***жидких водорастворимых полимерных композиций – ЖВПК*** (равноплотных тонкодисперсных суспензий, тонкодисперсных паст, жидких композиций с повышенным полимеросодержанием); ***твёрдых водорастворимых полимерных композиций – ТВПК*** (ультраслабых полимерных покрытий, флоковых покрытий, полимерных брикетов).

Таблица 2

Полимерные композиции для снижения ГСТТ воды

Наименование полимерной композиции	Условное обозначение	Содержание полимера, вес. %	Величина эффекта снижения ГСТТ в однородном растворе, %
Жидкие водорастворимые полимерные композиции (ЖВПК)			
Равноплотные тонкодисперсные полимерные суспензии	РТПС	до 25	76,5
Тонкодисперсные полимерные пасты	ТПП	до 34	76,0
Жидкие композиции с повышенным полимеросодержанием	ЖКПП	35,0-60,0	74,0
Твёрдые водорастворимые композиции (ТВПК)			
Полимерные покрытия			
Ультраслабые полимерные покрытия	УПП	30,0-65,0	69,5
Флоковые покрытия с водорастворимыми полимерными наполнителями	ФПП (ВН)	25,0-30,0	71,5
Полимерные брикеты			
ТВПК – брикеты, приготовленные путём холодного прессования тонкодисперсного полимерного порошка и наполнителя	ТВПБ	90-95	69,0

Примечание. Величина эффекта снижения ГСТТ в однородных растворах ЖВПК и ТВПК определялась на турбулентном реометре с диаметром капилляра 1,2 мм и длиной 0,5 м, а также на спецстенде с диаметром трубы рабочего участка 50 мм. В основу таблицы положены экспериментальные данные, полученные авторами в работах [6-8].

Особенности течений растворов ГДАД в трубах

Для получения предельного уменьшения ГСТТ необходимо знать при каких условиях выбранная ГДАД обеспечивает максимальное снижение гидродинамического сопротивления. Для растворов ВП и МПАВ важно определить в каких диапазонах температур и чисел Рейнольдса, при каких значениях солёности растворителя и его водородном показателе среды pH , концентрации ГДАД проявляется максимальный эффект снижения ГСТТ. При использовании МПАВ также необходимо определить оптимальную концентрацию *содействующих мицеллообразованию веществ (СМВ)*.

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 показывают исследования, является изменение молекулярных характеристик полимеров в растворе в зависимости от внешних условий и состава жидкостей, в которых они растворены. Знание этих закономерностей позволит сделать правильный выбор полимеров для достижения максимального эффекта в заданных условиях.

Так, например, автором работы [9] проведены комплексные исследования по определению влияния температуры, добавок солей различной природы, а также неэлектролитов на характеристическую вязкость и величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления в водных растворах ПЭО различных молекулярных масс. При этом, в процессе проведения исследований, особое внимание было уделено выяснению влияния качества растворителя полимера на конформационное состояние его макромолекул в растворе. Главная задача исследований сводилась к выяснению влияния температуры, добавок солей и неэлектролитов на структуру воды, которая определяет величины характеристической вязкости и гидродинамического сопротивления приготовленных на её основе растворов.

Автор делает вывод, что достичь наиболее высокой гидродинамической эффективности добавками ПЭО можно путём выбора оптимальных условий, способствующих наибольшему разворачиванию полимерного клубка. При отсутствии возможности реализовать этот путь следует заняться подбором другого полимера, для которого данные условия будут наиболее благоприятными. Так, например, при высоких температурах гидродинамическая эффективность ПЭО падает, в то же время для ПАА она сохраняется на достаточно высоком уровне, благодаря другому типу гидратации мономерных звеньев.

Следовательно, можно констатировать, что при выборе полимера для снижения ГСТТ и достижения при этом максимального эффекта необходимо учитывать особенности конформации и сольватации макромолекул в данной среде и в данных условиях.

Выполнению настоящей работы предшествовало установление основных закономерностей эффекта Томса (снижение ГСТТ добавками ВП) и влияние различных факторов на его величину. Результаты исследований приведены в работе [10].

Характерной особенностью гидродинамически-активных МПАВ является образование в растворе при $ККМ_2$ анизометрических мицелл, восстановление добавками гидродинамической активности после временной потери в области повышенных температур и больших сдвиговых напряжений. Это, как уже отмечалось ранее, открывает перспективы их практического применения в замкнутых гидравлических системах. Так, например, растворы МПАВ могут успешно использоваться в качестве хладоносителей систем умеренного холода, а также в качестве рабочих жидкостей водокольцевых насосов при откачке метана в угольных шахтах. При этом необходимо, чтобы в процессе использования в теплообменных аппаратах и в насосах эффект снижения ГСТТ не проявлялся.

Результаты экспериментальных исследований зависимости величин коэффициента гидродинамического сопротивления от **числа Рейнольдса (Re)** показывают, что для каждой концентрации МПАВ в растворах существует свой диапазон чисел Re , в котором проявляется эффект снижения гидродинамического сопротивления. При этом следует отметить, что увеличение концентрации МПАВ в растворах расширяет этот диапазон и сдвигает его в сторону больших чисел Re . В качестве примера на рис. 1 приведены кривые зависимости чисел Рейнольдса, которые соответствуют числам Re , с которых начинает проявляться эффект снижения ГСТТ ($Re_{nop.}$), достигает максимума (Re_{max}) и исчезает ($Re_{пер.}$) в результате разрушения анизометрических мицелл, от концентрации метаупона C , % *вес.* в 5 %-м водном растворе хлористого натрия.

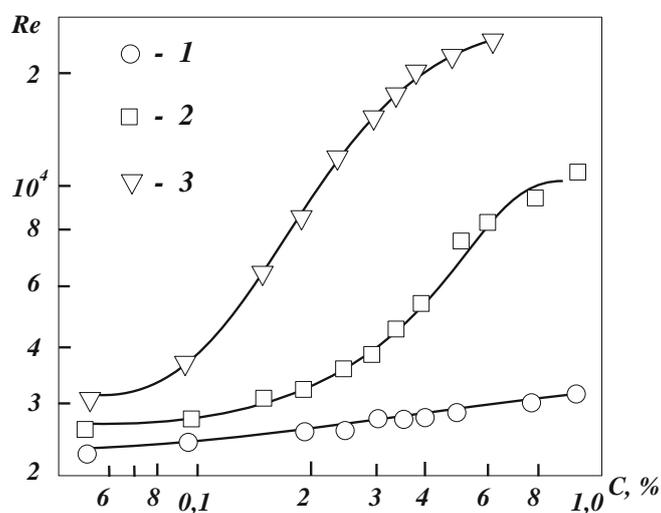


Рис. 1. Зависимости значений Re_{nop} (1), Re_{max} (2) и $Re_{пер}$ (3) от концентрации метаупона C , % *вес.* в водных растворах. Содержание хлористого натрия в растворах – 5 % *вес.* Числа Re_{nop} , Re_{max} и $Re_{пер}$ рассчитаны по вязкости воды

Для получения асимптот предельного снижения коэффициента гидродинамического сопротивления трения от числа Рейнольдса в растворах МПАВ необходимо знать влияние и других факторов на его величину.

В ходе выполнения настоящей работы были учтены результаты экспериментальных исследований, выполненных в ДонНУ, по влиянию температуры, концентраций МПАВ и СМВ, водородного показателя среды pH и др. на величину гидродинамического эффекта, которые изложены в публикациях [2-4]

Предельное снижение сопротивления

Экспериментальные исследования по определению предельного уменьшения ГСТТ в растворах ГДАД – ВП, МПАВ и композиций на их основе проводились с применением капиллярных турбулентных реометров и трубных гидродинамических спецстендов. При этом были использованы гладкостенные капилляры с внутренним диаметром 1,2 и 2,5 мм и трубы диаметром 50 и 95 мм соответственно. Относительная погрешность на капиллярном вискозиметре составляла не более 2 %, на трубном стенде – не более 2,5 %. В качестве исследуемых ГДАД были испытаны композиции на основе МПАВ и СМВ (табл. 1), ЖВПК и ТВПК на основе ПЭО и ПАА (табл. 2), а также наиболее эффективные МЭПС.

Асимптота Вирка

С момента опубликования статьи Вирка о предельном снижении ГСТТ добавками ВП [5] прошло свыше сорока лет. За истекший период были определены десятки новых гидродинамически-активных высокомолекулярных соединений, а также созданы высокоэффективные полимерные композиции, которые могут успешно использоваться на практике для решения проблем энергосбережения и повышения эффективности работы различных гидравлических систем.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость уточнения или подтверждения применимости асимптоты Вирка для ранее неизвестных гидродинамически-активных ВП, а также созданных на основе ПЭО и ПАА жидких и твёрдых водорастворимых полимерных композиций.

Согласно Вирку, связь между коэффициентом гидродинамического сопротивления турбулентного трения λ и числом Рейнольдса, при максимальном уменьшении ГСТТ добавками ВП, описывается асимптотой

$$1/\sqrt{\lambda} = 9,6 \cdot \lg(\text{Re}\sqrt{\lambda}) - 19,2.$$

В настоящей работе были проведены комплексные исследования по определению предельного снижения ГСТТ в однородных растворах наиболее эффективных природных полимеров – МЭПС, а также в растворах жидких и твёрдых полимерных композиций, которые совместно с генераторами приготовления из них растворов могут успешно использоваться для повышения эффективности систем водяного пожаротушения и аварийной откачки воды при чрезвычайных ситуациях [6-8].

Проведённые исследования показали, что в растворах гидродинамически-активных МЭПС и полимерных композиций достигается существенное уменьшение ГСТТ. Однако, снизить величину коэффициента гидродинамического сопротивления больше, чем в асимптоте Вирка, не удалось. Следовательно, эту асимптоту на сегодняшний день можно считать предельной при уменьшении турбулентного трения воды гидродинамически-активными добавками высокомолекулярных полимеров.

Предельные асимптоты в растворах МПАВ

К первым работам, посвящённым определению максимального снижения ГСТТ добавками МПАВ в цилиндрических трубах, относятся публикации [2, 3]. В этих работах показано, что с использованием в качестве ГДАД промышленных паст *метаупон* и *диталан OTS*, в сочетании с сопутствующим мицеллообразованию веществ – хлористым натрием, можно достичь максимального уменьшения ГСТТ ($\approx 80\%$) в широких диапазонах температур и чисел Рейнольдса.

В настоящей работе, с целью получения асимптот максимального снижения ГСТТ, кроме метаупона и диталана *OTS* были использованы цетилпиридинии хлорида и бромиды (СМВ – α -нафтол), а также тетрасульфат натрия и олеат натрия, в качестве СМВ у которых применяли хлориды натрия и калия, соответственно.

При выполнении исследований учитывались основные закономерности снижения ГСТТ в растворах МПАВ, которые изложены в работе [4].

На рис. 2 представлены зависимости величины коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ при течении воды и водных растворов гидродинамически-активных МПАВ от числа Рейнольдса.

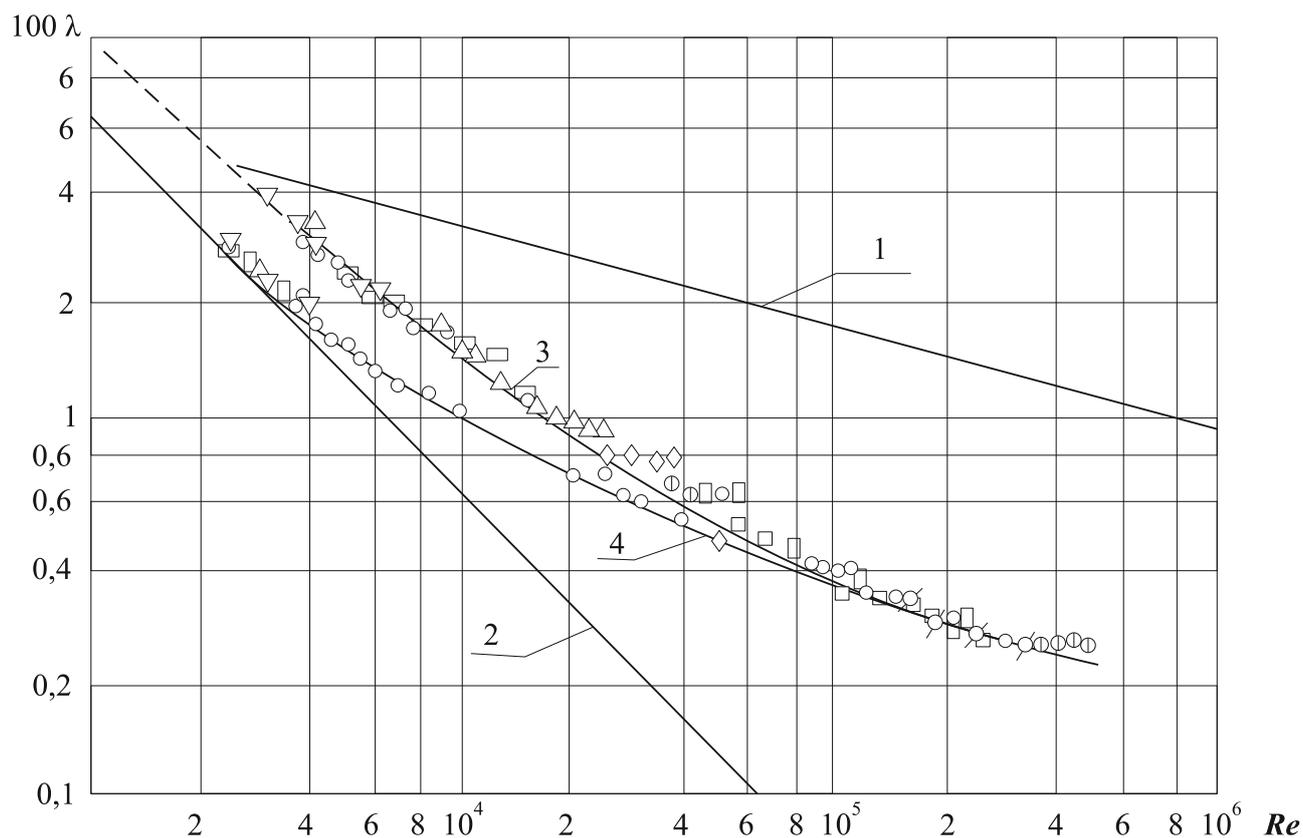


Рис. 2. Зависимость максимального снижения коэффициента гидродинамического сопротивления трения в водных растворах МПАВ от чисел Рейнольдса, рассчитанных по вязкости воды (кривая 3) и соответствующей сдвиговым напряжениям вязкости растворов (кривая 4). Экспериментальные данные получены для растворов композиций, составы которых приведены в табл. 1. Кривые 1, 2 – зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ от числа Re для турбулентного и ламинарного режима течения воды в гладкостенных трубах

Приведённые на рис. 2 зависимости 1 и 2 соответствуют турбулентному $1/\sqrt{\lambda} = 2 \cdot \lg(\text{Re}\sqrt{\lambda}) - 0,8$ и ламинарному ($\lambda = 64/\text{Re}$) режимам течения воды в гладкостенных цилиндрических трубах. Здесь же приведены кривые 3 и 4 – предельные асимптоты уменьшения ГСТТ в водных растворах МПАВ. При этом следует отметить, что эти зависимости получены для случаев, когда числа Рейнольдса рассчитаны по вязкости воды (кривая 3) и величинам вязкости, измеренным при сдвиговых напряжениях, соответствующих реализуемым числам Рейнольдса (кривая 4).

Расчёт числа Рейнольдса по вязкости воды ($\text{Re}_в$) обусловлен необходимостью определения величины действительного (технического) эффекта снижения ГСТТ. Установлено, что эффект начинает проявляться с чисел Рейнольдса $\text{Re}_в \approx 3 \cdot 10^3$ и с его ростом увеличивается. При числе $\text{Re}_в = 8 \cdot 10^4$ величина эффекта снижения ГСТТ достигает максимального значения ($\approx 80\%$).

Расчёт величины эффекта снижения ГСТТ ($\Delta\lambda/\lambda, \%$) проводился по формуле $\Delta\lambda/\lambda, \% = (\lambda_в - \lambda_p / \lambda_в) \cdot 100\%$, при равных числах Re , где $\lambda_в$ и λ_p – коэффициенты гидродинамического сопротивления для воды и раствора МПАВ соответственно.

Растворы гидродинамически-активных МПАВ (при концентрациях выше второй критической концентрации мицеллообразования $ККМ_2$) являются неньютоновскими жидкостями. Другими словами, вязкость таких растворов зависит от величины реализуемых в потоке сдвиговых напряжений, уменьшаясь с их увеличением. В связи с вышеизложенным, с точки зрения понимания механизма эффекта снижения ГСТТ в растворах МПАВ, представляют интерес зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от чисел Рейнольдса, рассчитанных по вязкости раствора $\text{Re}_р$. При этом при расчёте необходимо использовать величины вязкости, которые соответствуют реализуемым для выбранных чисел Рейнольдса сдвиговым напряжениям.

Из приведённых на рис. 2 результатов экспериментальных исследований видно (кривая 4), что эффект снижения ГСТТ начинает проявляться при числе $\text{Re} = 2,3 \cdot 10^3$. При этом следует отметить, что до числа $\text{Re} = 3,8 \cdot 10^3$ коэффициент гидродинамического сопротивления λ в растворах МПАВ совпадает с кривой зависимости λ от числа Re для ламинарного режима течения воды, то есть достигает своего максимально-возможного уменьшения ГСТТ.

Дальнейшее увеличение числа Re приводит к уменьшению коэффициента λ , и он достигает своего минимального значения ($\Delta\lambda/\lambda \approx 80\%$) при числе $\text{Re} = 8 \cdot 10^4$.

Обработка результатов экспериментальных исследований позволяет получить уравнения зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления λ от числа Re при максимальном снижении ГСТТ добавками гидродинамически-активных МПАВ. При этом для случая, когда число Рейнольдса рассчитано по вязкости растворов ($\text{Re}_р$), уравнение имеет вид $1/\sqrt{\lambda} = 8,5 \cdot \lg(\text{Re}_р\sqrt{\lambda}) - 15,3$. Если число Re рассчитать по вязкости воды ($\text{Re}_в$), то вышеуказанная зависимость принимает вид $1/\sqrt{\lambda} = 9,85 \cdot \lg(\text{Re}_в\sqrt{\lambda}) - 22,1$.

Выводы

На основе обзора литературных источников, посвящённых явлению снижения ГСТТ жидкостей в напорных трубопроводах добавками ВП с линейной структурой макромолекул и некоторых МПАВ, а также полученных авторами результатов экспериментальных исследований, систематизированы данные по максимально-возможному снижению гидродинамического сопротивления турбулентного трения. В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения, описывающие зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса для водных растворов гидродинамически-активных МПАВ при максимальном снижении турбулентного трения.

Подтверждена применимость асимптоты Вирка для водных растворов природных полимеров – микробных экзополисахаридов, а также созданных авторами жидких и твёрдых полимерных композиций на основе высокомолекулярных ПЭО и ПАА.

На сегодняшний день высокомолекулярные ПЭО и ПАА являются самыми эффективными добавками, снижающими ГСТТ. Поэтому, создание на их основе полимерных композиций можно считать вполне обоснованным и возможным.

Полученные результаты позволяют эффективно использовать явление снижения ГСТТ на практике и углубляют физическое истолкование механизма воздействия добавок на интегральные параметры напорных потоков жидкостей со сниженным турбулентным трением в трубах.

Литература

1. **Корнилов В.И.** Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. Т. 12. № 2. 2005. С. 183-208.
2. **Асланов П.В., Максютенко С.И., Повх И.Л. и др.** Турбулентные течения растворов поверхностно-активных веществ // Механика жидкости и газа, № 1. 1980. С. 36-43.
3. **Повх И.Л., Ступин А.Б., Симоненко А.П.** Применение поверхностно-активных веществ для уменьшения турбулентного трения жидкостей в технологических аппаратах // Аэродинамика в технологических процессах. М.: Наука. 1981. С. 230-240.
4. **Повх И.Л., Ступин А.Б., Максютенко С.И. и др.** Особенности турбулентных течений растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ // Механика турбулентных потоков. М.: Наука. 1980. С. 44-69.
5. **Virk P.S.** Drag reduction fundamentals // AIChE J. Vol. 21. No. 4. 1975. Pp. 625-656.
6. **Симоненко А.П.** Гидродинамически-активные композиции на основе полимеров и поверхностно-активных веществ для решения проблем экологической безопасности и энергосбережения: дисс. ... д-ра техн. наук. 21.06.01. Донецк. 2012. 397 с.
7. **Ступин А.Б., Симоненко А.П., Асланов П.В., Быковская Н.В.** Гидродинамически-активные композиции в пожаротушении: монография. Донецк: ДонГУ, 1999. 240 с.
8. **Ступин А.Б., Симоненко А.П., Асланов П.В.** Гидродинамически-активные композиции в энергосбережении и экологии: монография. Донецк: ДонГУ, 2001. 173 с.
9. **Торяник А.И.** Молекулярные аспекты снижения гидродинамического сопротивления добавками полимеров // в сб. Физическая гидродинамика. Донецк: ДонГУ. 1990. С. 26-32.
10. **Симоненко А.П., Дмитренко Н.А., Асланов П.В.** Основные закономерности эффекта Томса и влияние различных факторов на его величину // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. Донецьк: ДНВЗ "Донецький національний технічний університет" Автомобільно-дорожній інститут. 2016. № 2 (19). С. 66-73.