

Снижение энергопотребления циркулирующих насосов в системах местного отопления, вызываемого нитевидными мицеллами ПАВ

Reduction of energy consumption of circulating pumps in local heating systems caused by filiform micelles of surfactants

Георгий НЕСЫН

Ведущий научный сотрудник центра исследований гидравлики трубопроводного транспорта

ООО «НИИ Транснефть», д. х. н.

E-mail: NesynGV@niitnn.transneft.ru

Georgy NESYN

Leading researcher, Center for Pipeline Hydraulics Research, Research Institute Transneft, Dr. Sci. (Chem.)

E-mail: NesynGV@niitnn.transneft.ru

Федор ЗВЕРЕВ

Заведующий лаборатории химических реагентов

ООО «НИИ Транснефть», к. т. н.

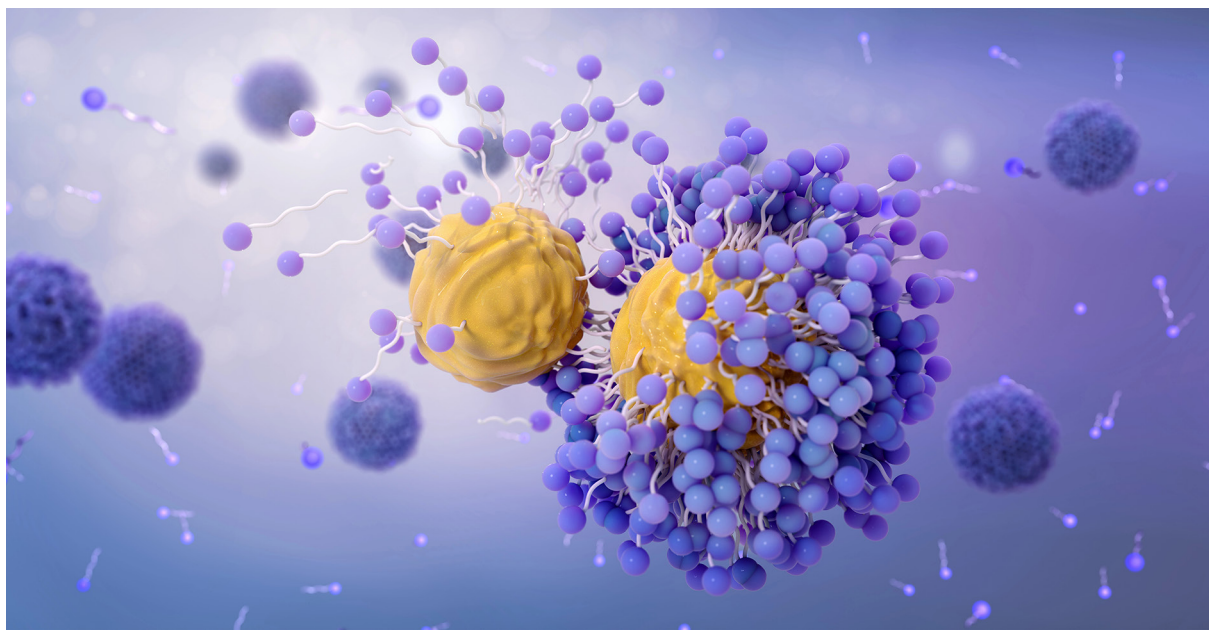
Fedor ZVEREV

Head of the Laboratory of Chemical Reagents,

Research Institute Transneft, Ph.D.

Мицелла

Источник: ScienceRF / depositphotos.com



Аннотация. Авторы статьи изучают возможность использования ПАВ в качестве присадок для снижения гидродинамического сопротивления турбулентного потока в трубопроводе. По результатам лабораторных испытаний установлены оптимальные состав и соотношение компонентов, входящих в состав ПАВ. Кроме того, выявлена зависимость эффективности использования ПАВ от чистоты воды.

Ключевые слова: гидродинамическое сопротивление турбулентного потока, растворы ПАВ, трубопровод, лабораторные испытания, стендовые испытания.

Abstract. The authors of the article study the possibility of using surfactants as additives to reduce the hydrodynamic resistance of turbulent flow in a pipeline. Based on the results of laboratory tests, the optimal composition and ratio of components included in the surfactant were established. In addition, the dependence of the efficiency of surfactant use on water purity was revealed.

Keywords: hydrodynamic resistance of turbulent flow, surfactant solutions, pipeline, laboratory tests, bench tests.



Отличием ПАВ от полимерных агентов является способность восстанавливать активную форму после разрушения на центробежном насосе

Введение

Гидродинамическое сопротивление турбулентного потока в трубопроводе можно существенно снизить с помощью противотурбулентных присадок (ПТП), вызывающих частичную ламинаризацию потока в пристенной области. Классические ПТП, где действующим веществом являются линейные полимеры большой молекулярной массы, полностью теряют свою эффективность при прохождении центробежного насоса: молекулы полимера необратимо разрушаются, когда сила воздействия превышает прочность углерод-углеродной связи. Это обстоятельство сильно ограни-



Поток воды в трубе

Источник: [photosky / depositphotos.com](https://www.depositphotos.com)

чивает применение полимеров в качестве агентов снижения гидродинамического сопротивления.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) также при определённых условиях способны снижать гидродинамическое сопротивление, но при концентрациях на порядок и более выше концентрации полимерных молекул. Ключевым отличием ПАВ от полимерных агентов снижения сопротивления является их способность восстанавливать активную форму после разрушения на центробежном насосе. Это позволяет использовать ПАВ в системах рециркуляции, например в системах местного отопления и кондиционирования.



Поток воды в трубопроводе

Источник: Gladkov / depositphotos.com

Характеристики растворов ПАВ

Молекулы ПАВ имеют амфифильное строение и состоят из гидрофобной группы (неполярный конец) и гидрофильной группы (полярный конец). Растворы ПАВ обладают сложным поведением даже в состоянии равновесия. Выше критической концентрации несколько десятков молекул объединяются в мицеллы, поскольку это состояние энергетически выгоднее, по сравнению с молекулярно-дисперсным раствором [1]. Полярные концы молекул направлены в водную фазу, а неполярные – внутрь мицеллы. Таким образом, реализуется принцип «подобное растворяется в подобном». Содержание молекул, при котором наблюдается агрегирование молекул ПАВ, называется критической концентрацией мицеллообразования (ККМ). Форма мицелл в окрестностях ККМ – сферическая или эллиптическая. Однако сферические мицеллы могут трансформироваться в цилиндрическую, либо ламеллярную формы в зависимости от температуры и концентрации ПАВ в растворе [1–3]. Объясняют это так: при увеличении концентрации ПАВ мицеллы вынуждены

приближаться друг к другу. Это увеличивает энергию системы, благодаря отталкиванию электронов. Для поддержания системы на более низком энергетическом уровне мицеллы приобретают несферические формы при концентрации ККМ_{II}.

Реологическое поведение растворов ионных ПАВ сильно зависит от концентрации ПАВ и противоиона, температуры и присутствия добавленной соли. Относительно небольшие изменения этих параметров могут изменить форму и размер мицелл и, соответственно, реологическое поведение. Поскольку мицеллы ионных ПАВ несут электростатический заряд, добавление противоиона уменьшает длину экранирования Дебая κ^{-1} , тем самым снижая межмолекулярные силы отталкивания и благоприятствуя образованию мицелл большего размера. Если сферические мицеллы предпочтительно образуются при пониженной концентрации ПАВ, то нитевидные, ламеллярные и дисковые структуры наблюдаются по мере её превышения ККМ_{II} [3–5]. Отметим, что наиболее эффективными в снижении сопротивления являются мицеллы нитевидной формы. Их называют также цилиндрическими или червеобразными.



Силы, удерживающие молекулы ПАВ в мицеллах, гораздо более слабые, чем первичные химические связи в полимерных молекулах, однако эти связи остаются жизнеспособными даже после разрушения мицелл под действием сильного сдвига. После снятия напряжений они восстанавливают прежнюю структуру мицелл, происходит их самосборка. Полимеры в этих условиях деградируют необратимо. Поэтому в циклических установках, где необходимо снижать гидродинамическое сопротивление, применяют растворы ПАВ, где концентрация достаточна для формирования нитевидных мицелл.

Влияние микроструктуры ПАВ на ККМ и ККМII

Главными факторами, влияющими на ККМ в водной среде являются природа ПАВ и присутствие добавленной соли, т. е. это гидрофобная часть, гидрофильная группа и природа противоиона.

Желаемую эффективность можно достичь, используя синергические смеси ПАВ, например:

- смесь катионных ПАВ с разными заместителями у атома азота;

ПАВы в стиральном порошке

Источник: *Brigida_Soriano / depositphotos.com*



Анионные ПАВ, например, олеат калия, способны, как и многие другие ПАВ, восстанавливаться после разрушения, однако, они чувствительны к присутствию так называемых ионов жёсткости

- катионные плюс анионные ПАВ;
- смесь неионных ПАВ;
- неионные плюс анионные ПАВ;
- цвиттерсионные плюс анионные ПАВ.

DR-эффективность ПАВ, как мы отчасти упоминали, зависит от концентрации и молекулярного строения ПАВ, температуры, pH, присутствия соразтворителя и величины сдвига. Поскольку внутри мицеллы реализуются лишь слабые взаимодействия, все эти факторы влияют на её микроструктуру.

Анионные ПАВ, например, олеат калия, способны, как и многие другие ПАВ, восстанавливаться после разрушения, однако, они чувствительны к присутствию так называемых ионов жёсткости – Ca^{2+} и Mg^{2+} . В их присутствии ПАВ анионного типа образуют осадок, поэтому в морской и водопроводной воде их эффективность невелика. ПАВ неионного и катионного типов свободны от этого недостатка, однако неионные ПАВ эффективны лишь в узком интервале концентраций вблизи точки помутнения. Напротив, ПАВ катионного типа, в особенности четвертичные соли аммония с органическими противоионами, активны в широком интервале температур и являются наиболее популярными агентами снижения сопротивления воды. Их недостатком является умеренная токсичность и плохая биоразлагаемость. В последнее время их пытаются заменить на цвиттерсионные ПАВ, которые разлагаются в природе гораздо быстрее.

В настоящей работе представлены результаты по применению катионного ПАВ, состоящего из объёмного катиона (цетилтриметиламмоний) и объёмного аниона (салицилат) в системе теплоснабжения одной из баз производственного обслуживания ПАО «Транснефть».

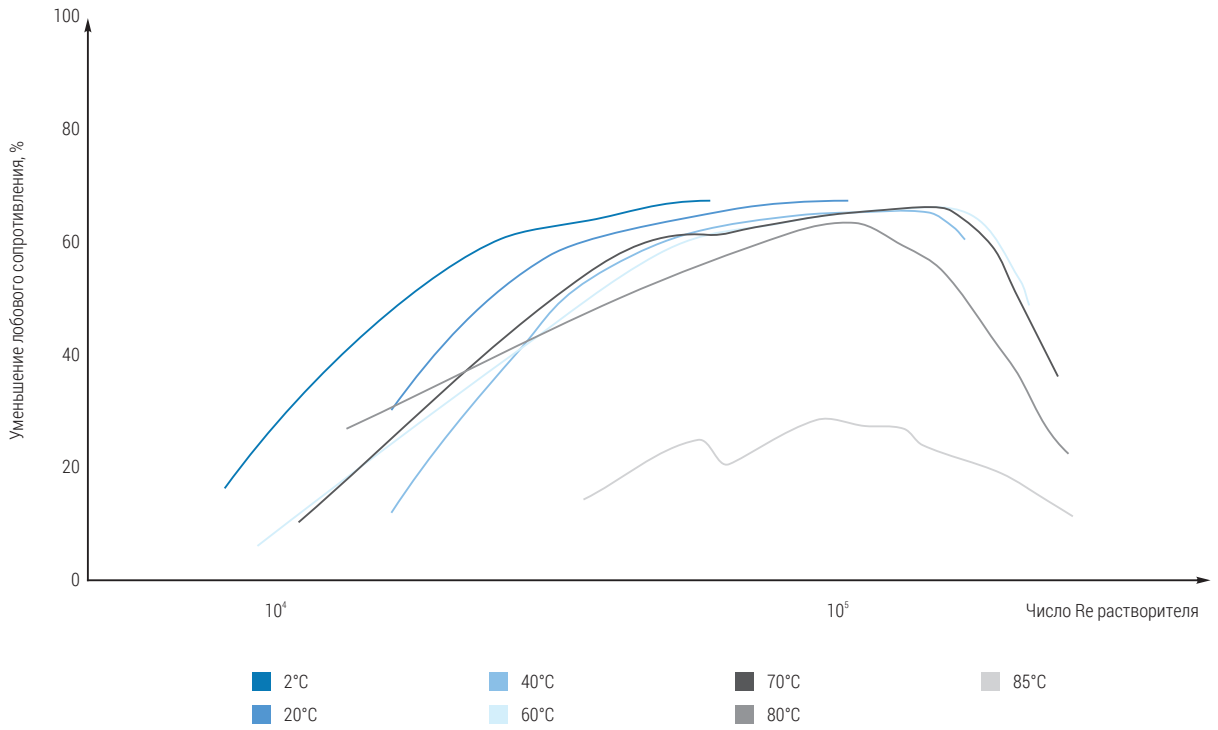


Рис. 1. Снижение сопротивления от числа Рейнольдса для 5 mM Этокада 012 + 12,5 mM NaSal в воде в трубе диаметром 6 мм [6]

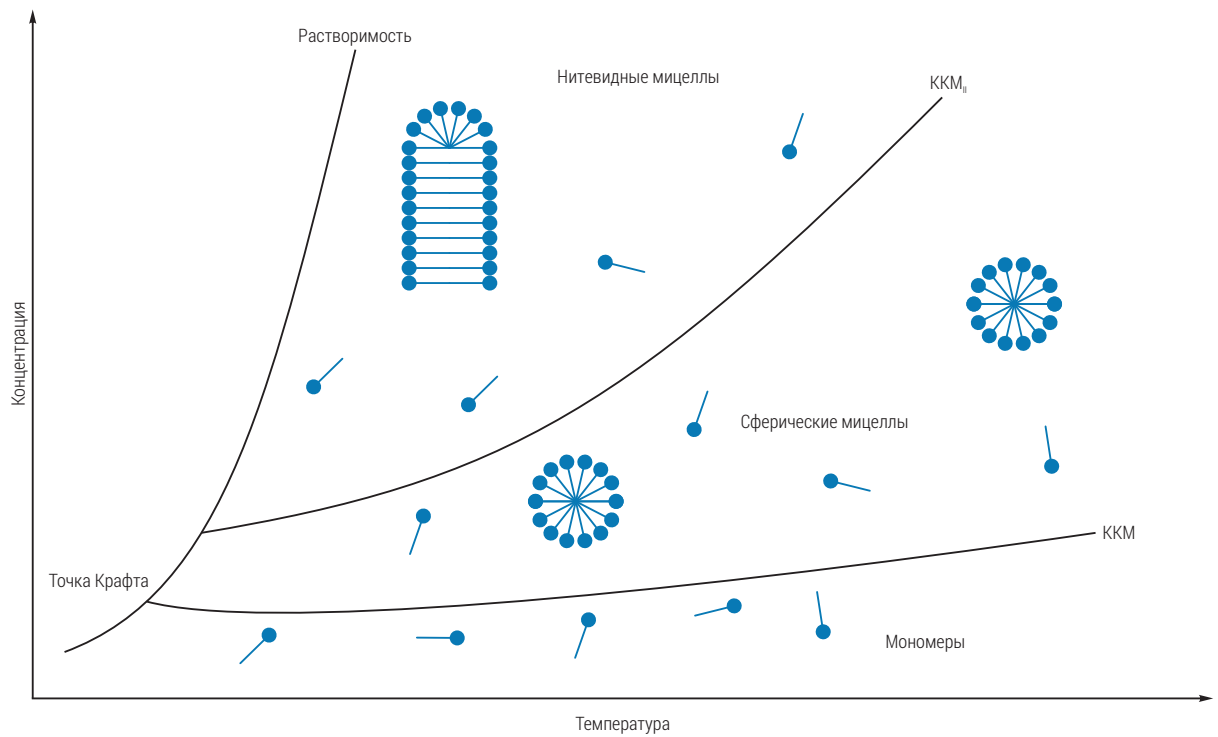


Рис. 2. Схематическая фазовая диаграмма катионного ПАВ [7]



Градирня ТЭЦ с водой

Источник: Denis Mukimov / acs-nnov.ru

Структура ПАВ и закономерности течения растворов

DR в турбулентном потоке в трубе обычно возрастает с увеличением Re , достигает максимума, затем после критического значения напряжения сдвига на стенке τ_{wc} уменьшается с дальнейшим увеличением скорости потока из-за разрушения структуры нитевидных мицелл (рис. 1).

Как видим, Этокад 012 эффективен в широком интервале температур: от +2 до +80 °С. Отметим также, что потеря эффективности с увеличением Re является обратимой: после снижения скорости потока величина DR восстанавливается. Как и у полимеров, существует длина мицелл, начиная с которой ПАВ проявляет эффективность в снижении сопротивления [7].

Зависимость микроструктуры раствора катионного ПАВ от концентрации и температуры представлена на рис. 2. Когда температура ниже точки Крафта, ПАВ находится в твёрдой или гелеобразной форме. При температуре выше точки Крафта и концентрации, превышающей ККМ, молекулы ПАВ формируют сферические мицеллы, а с дальнейшим увеличением концентрации ПАВ мицеллы преобразуются в нитевидные, которые могут иметь запутанную и разветвлённую структуру. Контурная длина нитевидных мицелл, как мы

упоминали, может достигать нескольких микрон, в то время как диаметр поперечного сечения равен примерно удвоенной величине углеводородного заместителя. Концентрацию возникновения нитевидных мицелл называют $ККМ_{II}$. В отличие от $ККМ_I$, её значение зависит от температуры.

Катионные ПАВ на основе четвертичных солей аммония с алкильными цепями $C_{16} - C_{22}$ наиболее полно изучены и широко применяются в качестве агентов снижения гидродинамического сопротивления (АСГС) вследствие их невысокой стоимости [8]. Заместители у атома азота с чётным числом углеродных атомов образуют более эффективные АСГС, чем с нечётным. Замена метильных групп у атома азота гидроксиэтильными увеличивают растворимость ПАВ при пониженной температуре. Для систем охлаждения исполь-

**По итогам испытаний
установлена возможность
экономии электроэнергии от
применения ПАВ. Отмечено
снижение энергопотребления при
циркуляции теплоносителя по
сети теплоснабжения на 17-29%**

Ethoquad 012 (E012)

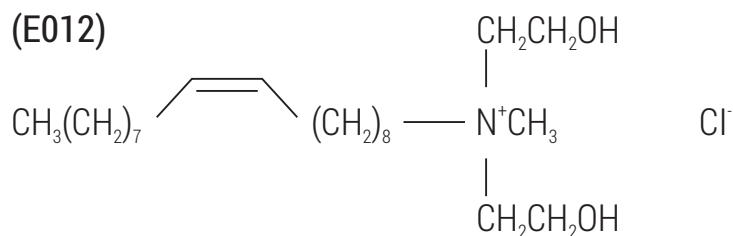


Рис. 3. Структура катион-активного ПАВ «Этокад 012»

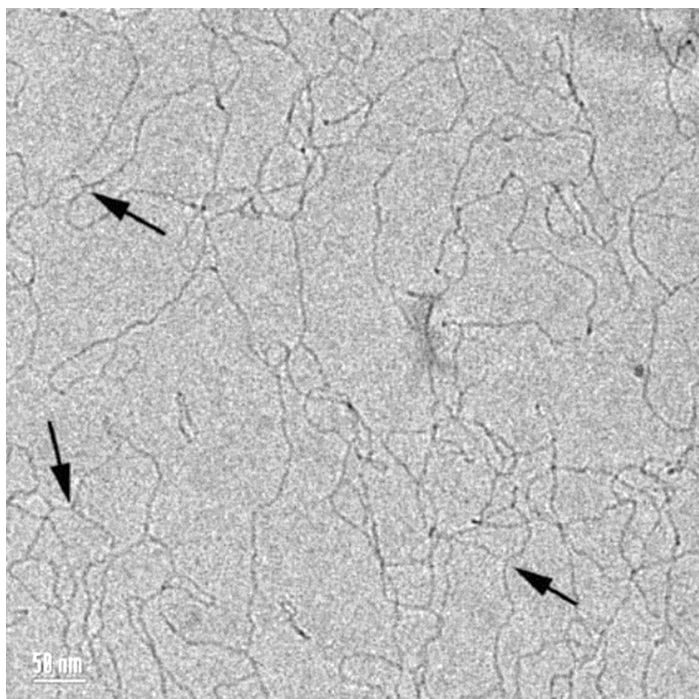
зуется катион-активный ПАВ «Этокад» в сочетании с салицилатом натрия, либо 1-нафтолом в эквимольном соотношении. На рис. 3 приведена структурная формула этокада:

В России этот ПАВ не производится, но широко представлен на рынке. Его выпускают несколько крупных химических компаний, в том числе Akzo Nobel.

Имеет значение также структура противоиона: салицилаты, тозилаты, некоторые моно- и дихлорбензоаты, а также гидроксинафтоаты – наиболее эффективные промоторы роста нитевидных мицелл. Наличие ароматического ядра – общая черта эффективных противоионов, кото-

рые, как полагают, «смягчают» действие положительного заряда на атоме азота и способствуют формированию мицелл удлинённой формы. Анионы ароматических кислот, частично нейтрализуя положительный заряд, делают возможным сближение молекул ПАВ для формирования нитевидных мицелл. Влияние салицилат-ионов на свойства мицелл цетилпиридиния было объектом тщательного изучения авторов [9] с использованием метода двулучепреломления, статического и динамического светорассеяния и малоуглового рассеяния нейтронов. Они обнаружили, что при концентрации ПАВ несколько миллимолей на литр мицеллы выросли до величины

Рис. 4. Разветвлённые мицеллы (стрелки) в водном растворе катионного ПАВ в присутствии салицилата натрия (Ethoquad+NaSal) [5]



в несколько сотен ангстрем в длину в присутствии нескольких миллимолей на литр салицилата [10].

Влияние соразвителя на эффективность ПАВ. Поскольку точка замерзания водно-спиртовых систем ниже, эффективность в охлаждении у них выше, поэтому требуется меньший расход теплоносителя. Второе слабое энергоэкономия связано с применением АСГС. В водно-гликолевых смесях, содержащих 15, 20 и 28% этиленгликоля хорошо зарекомен-

телей предположили [13–14], что энергия концевой «шляпки» существенно возрастает при высокой концентрации соли, а также при образовании межмицеллярных контактов, что в результате приводит к формированию разветвлённых структур. Точка разветвления может свободно скользить вдоль нитевидной мицеллы, что приводит к более быстрой релаксации при сдвиге и снижению сдвиговой вязкости [15]. Образование сетки разветвлённых мицелл при высокой концентрации соли хорошо видно

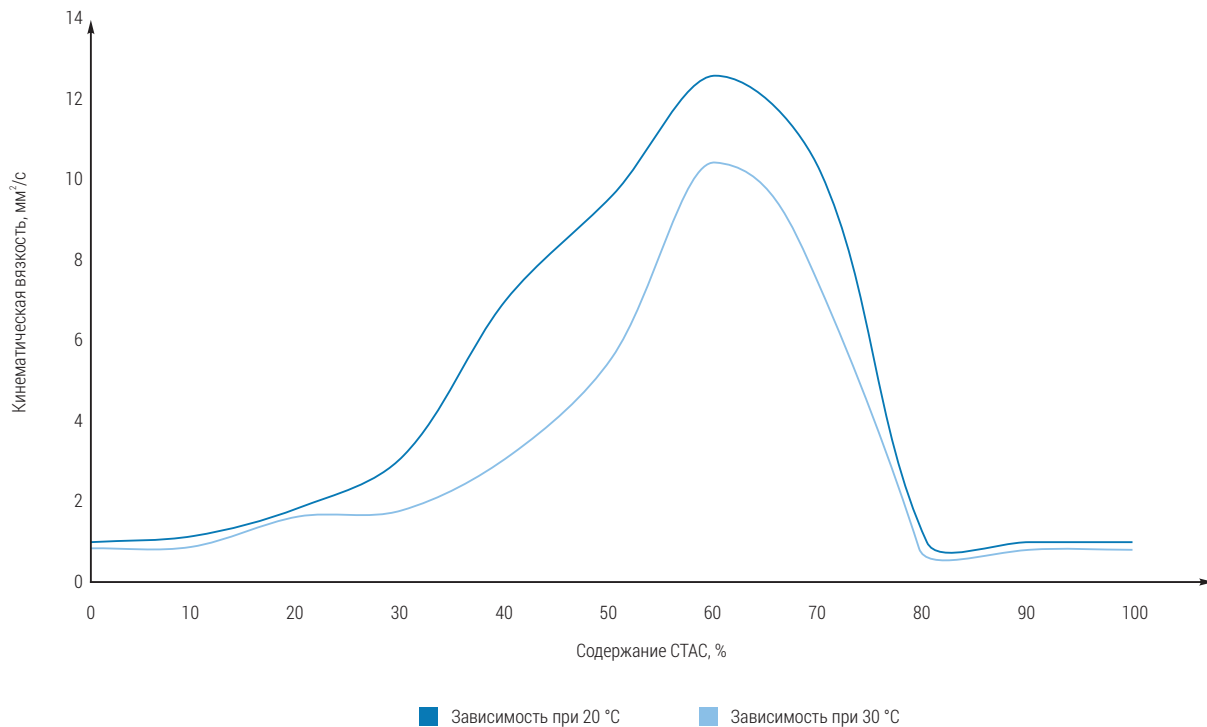


Рис. 5. Зависимость вязкости смесей СТАС и салицилата натрия в зависимости от содержания СТАС при общей концентрации компонентов 2000 ppm

довал себя «Этокад 012» (см. рис. 3) с избытком противоиона.

В процессе эксплуатации катионного ПАВ обнаружили антикоррозионное воздействие сокращающих сопротивление добавок вследствие снижения напряжения сдвига при данном Re , а также подавления образования вихрей вблизи стенки [11].

Нитевидные мицеллы могут иметь **разветвлённую структуру**. Разветвления происходят в том случае, когда формирование полусферической «шляпки» на конце мицеллы менее выгодно энергетически, чем образование разветвления, которое имеет седловидную форму [12]. Ряд исследова-

из электронных микрофотографий (рис. 4), полученных методом быстрой заморозки.

Перемещаясь вдоль тела нитевидной мицеллы, точки разветвления могут смягчать стрессовые нагрузки, делая мицеллу более гибкой и устойчивой.

Открытие способности катионных ПАВ быстро восстанавливаться после зоны разрушения привело к их широкому использованию в системах местного отопления и кондиционирования. Это второе по практической значимости применение эффекта Томса (первое – транспортировка углеводородных жидкостей по трубопроводам).

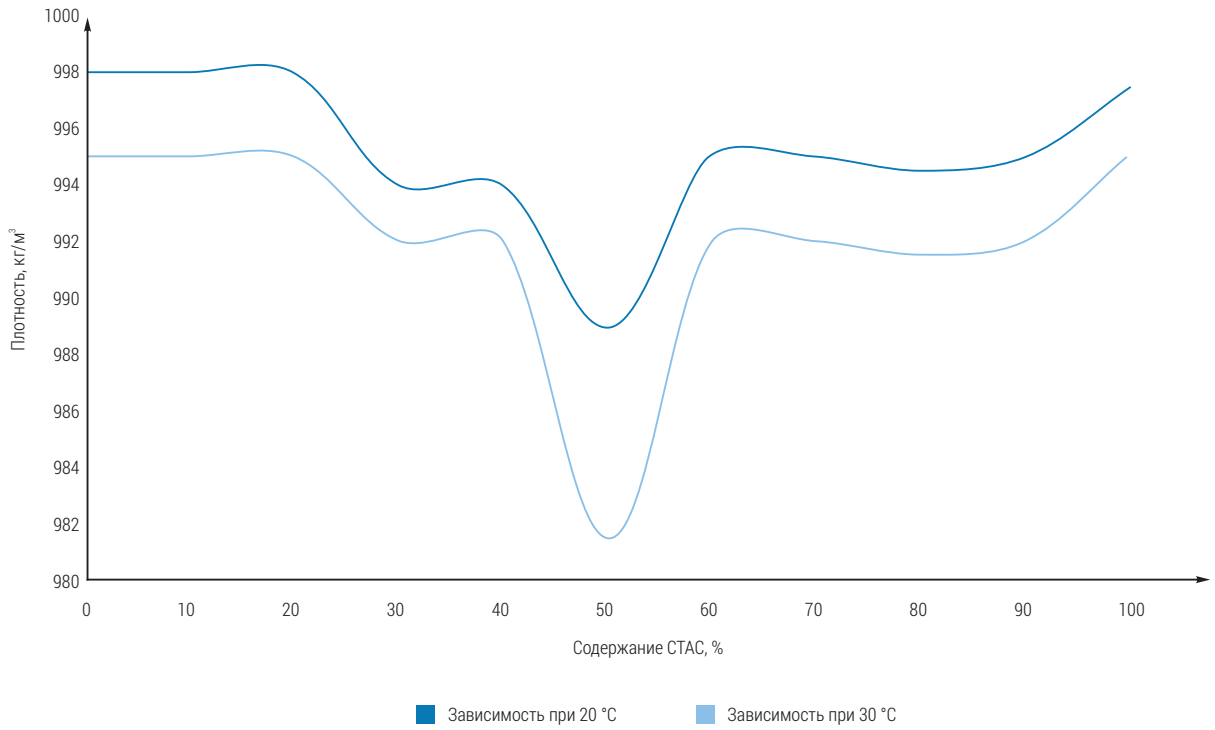


Рис. 6. Зависимость плотности растворов смесей CTAC и NaSal в зависимости от соотношения компонентов при общей концентрации 2000 ppm

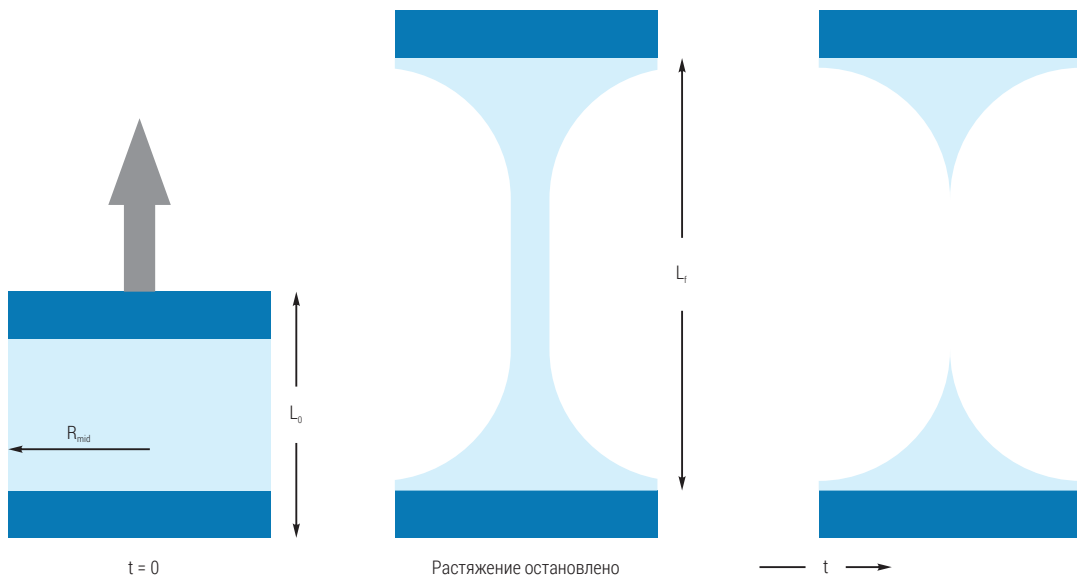


Рис. 7. Поведение раствора нитевидных мицелл в условиях течения с растяжением

Системы местного отопления и кондиционирования производят, либо отводят тепло. Затраты энергии на рециркуляцию составляют до 15% от общих затрат, а экономия энергии, потребляемой насосом, составляет 50–70%. Экономия энергии больше, когда меньше разветвлений, поворотов, кранов, когда длиннее трубопроводы. Чтобы уменьшить расходы на рециркуляцию, необходимо снизить её гидродинамическое сопротивление. Применение ПАВ позволяет сократить энергию перекачки на 50–70%, что означает 8–10% от общего энергопотребления. Эффективность зависит от типа ПАВ и разветвлённости отопительной системы. Снижение энергопотребления тем больше, чем меньше разветвлений и местных сопротивлений (краны, повороты и т. д.), и чем длиннее трубопровод [16].

Saeki опубликовал результаты об использовании катионных ПАВ в системе кондиционирования воздуха с применением суспензии льда [17]. В этом случае ПАВ не только снижают сопротивление, но и препятствуют слипанию частиц льда [18]. Такая комбинация может с успехом использоваться в улучшенных системах кондиционирования, применяющих суспензии льда в качестве теплоносителя [19].

Кроме всего прочего, одним из преимуществ ПАВ является защита от локальной коррозии, вызванной турбулентностью. ПАВ не только снижают сдвиговые напряжения на стенке трубы при данном числе Re , но также подавляют турбулентные вихри в пристенной области, чьи постоянные «удары» вызывают напряжения на стенках и механическое разрушение материала поверхности.

Экспериментальная часть

Лабораторные испытания. Для получения нитевидных мицелл в водной среде готовили смесь цетилтриметиламмония хлорида (СТАС) и салицилата натрия (NaSal) примерно в эквимолярном соотношении. В окрестностях этого соотношения наблюдали максимальное значение вязкости (рис. 5) и минимальное значение плотности (рис. 6).

Для оценки оптимального соотношения компонентов для снижения сопротивления использовали ещё одну характеристику, называемую «прядомостью» растворов. Введение нитевидных мицелл в турбулентный

поток приводит к тому, что жидкость приобретает вязкоупругие свойства и возникают вязкоупругие колебания [20]. Тогда для оценки роли DR следует воспользоваться измерениями вязкоупругих (релаксационных) свойств разбавленных растворов. Экспериментально это довольно трудно сделать в условиях сдвига, но можно оценить вязкоупругость раствора при одноосном растяжении.

Суть метода иллюстрирует рис. 7. При растяжении образуется перемычка, которая со временем истончается так, что формируется волокно, которое, в конце концов, рвется.



Компрессорная станция
Источник: market.yandex.ru

Методика измерений состоит в отслеживании с помощью лазерного толщиномера НААКЕ CaBER™1 изменения диаметра жидкой нити образца, содержащего растворенный ПАВ после его резкого растягивания.

На рис. 8 изображены кривые, отражающие динамику изменения диаметра волокна, полученные нами на приборе НААКЕ CaBER™1 в растворах ПАВ, содержащих СТАС и NaSal при различных их соотношениях.

Из рис. 8 видно, что время жизни волокна тем больше, чем ближе соотношение компонентов к величине 1:1. Срез, сделанный при толщине нити 0,38 мм иллюстрирует данное утверждение (рис. 9). Видно, что максимальная толщина волокна наблюдается при равном соотношении компонентов.

Обобщая рис. 5, 6 и 9, можно отметить, что соотношение компонентов, при котором наблюдаются особые точки на графиках (максимальное или минимальное значения), приходится на окрестности соотношения 1:1. Поэтому это соотношение приняли за стехиометрическое, и для проведения стендовых и натурных испытаний использовали именно его.

Стендовые испытания катионного ПАВ.

Испытания проводили на стенде с изменяемым профилем для исследования нестационарных процессов, возникающих в мультифазных углеводородных потоках.

ции в воде создаётся окислительная среда за счёт растворённого кислорода воздуха. В этих условиях элементы с переменной валентностью приобретают наивысшую степень окисления, например, двухвалентное железо окисляется в трёхвалентное, которое в присутствии карбонат-анионов выпадает в осадок.

В очищенном таким образом теплоносителе снижение сопротивления сохранялось длительное время (рис. 11).

Испытания ПАВ в системе местного теплоснабжения. Натурные испытания ПАВ проводились в тепловой сети

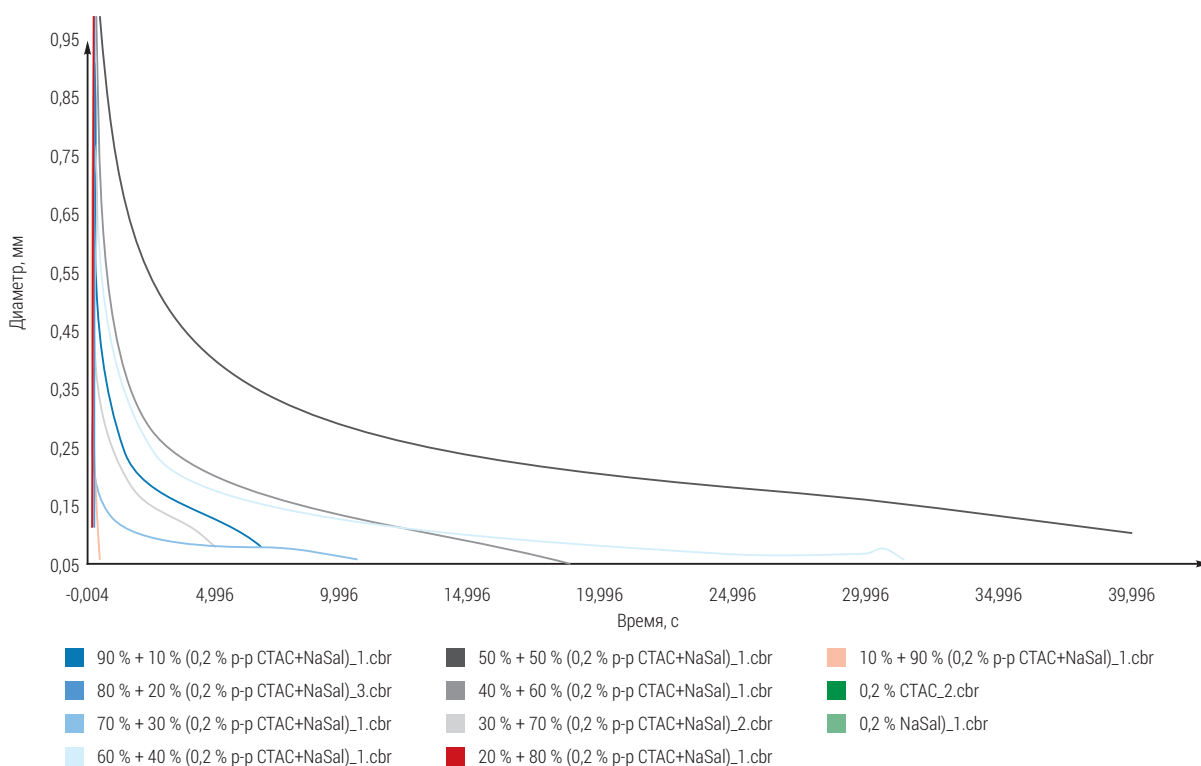


Рис. 8. Динамика изменения толщины волокна при различном соотношении CTAC и NaSal (общая концентрация компонентов 2000 ppm)

Первоначально использовали необработанную водопроводную воду, однако снижение сопротивления при внесении ПАВ быстро сходило на нет (рис. 10).

Мы связали это с тем, что присутствие вредных примесей, в частности ионов железа, в необработанной водопроводной воде отрицательно сказывается на растворимости CTAC. Применили специальную водоподготовку, состоящую из аэрации теплоносителя при температуре 60 °С с последующим отделением на фильтре выпавшего осадка коричневого цвета. При аэра-

площадочного объекта, представляющего собой замкнутый контур общей протяженностью около 0,8 км, диаметром 38–108 мм, соединяющей котельную и несколько отапливаемых зданий.

В рамках испытаний опробовался режим работы тепловой сети без ПАВ и после добавления ПАВ, при этом расход теплоносителя в тепловой сети поддерживался постоянным с помощью насосного агрегата с частотно-регулируемым приводом. По результатам испытаний фиксировалось снижение давления в тепловой сети, а также снижение энер-

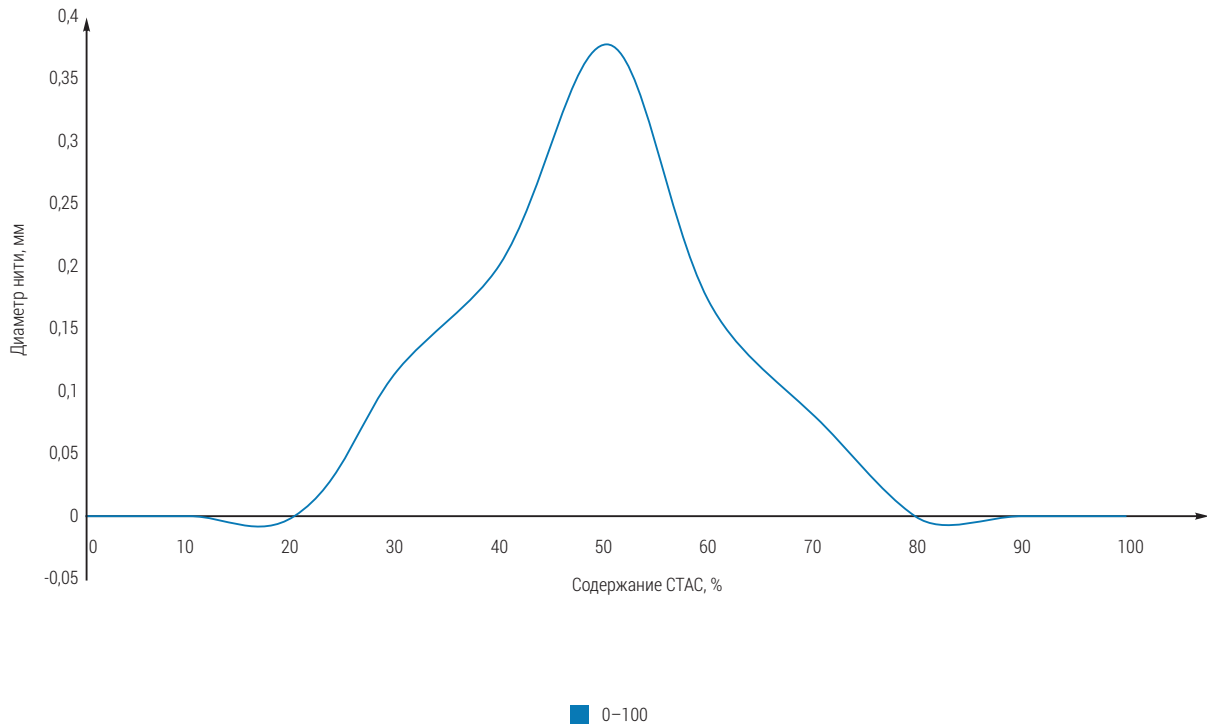


Рис. 9. Зависимость толщины нити от содержания СТАС в смеси с салицилатом натрия при общей концентрации компонентов 2000 ppm

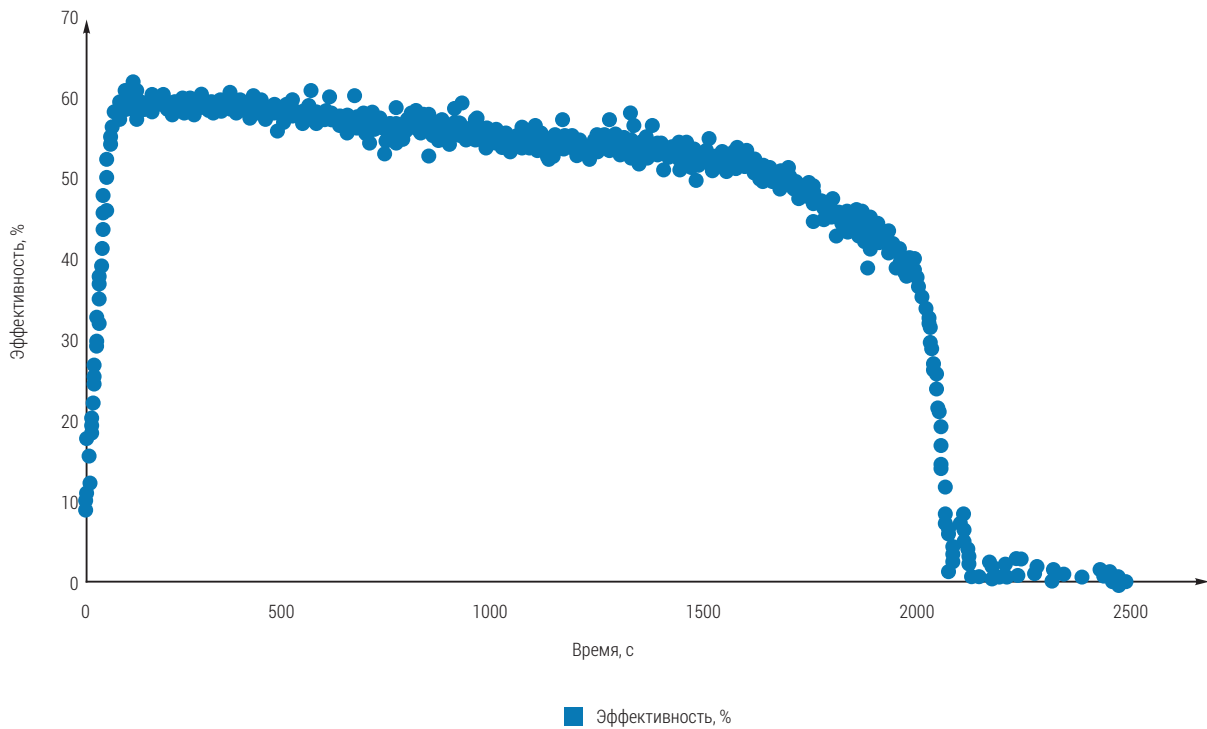


Рис. 10. Эффективность ПАВ при стеновых испытаниях на необработанной воде

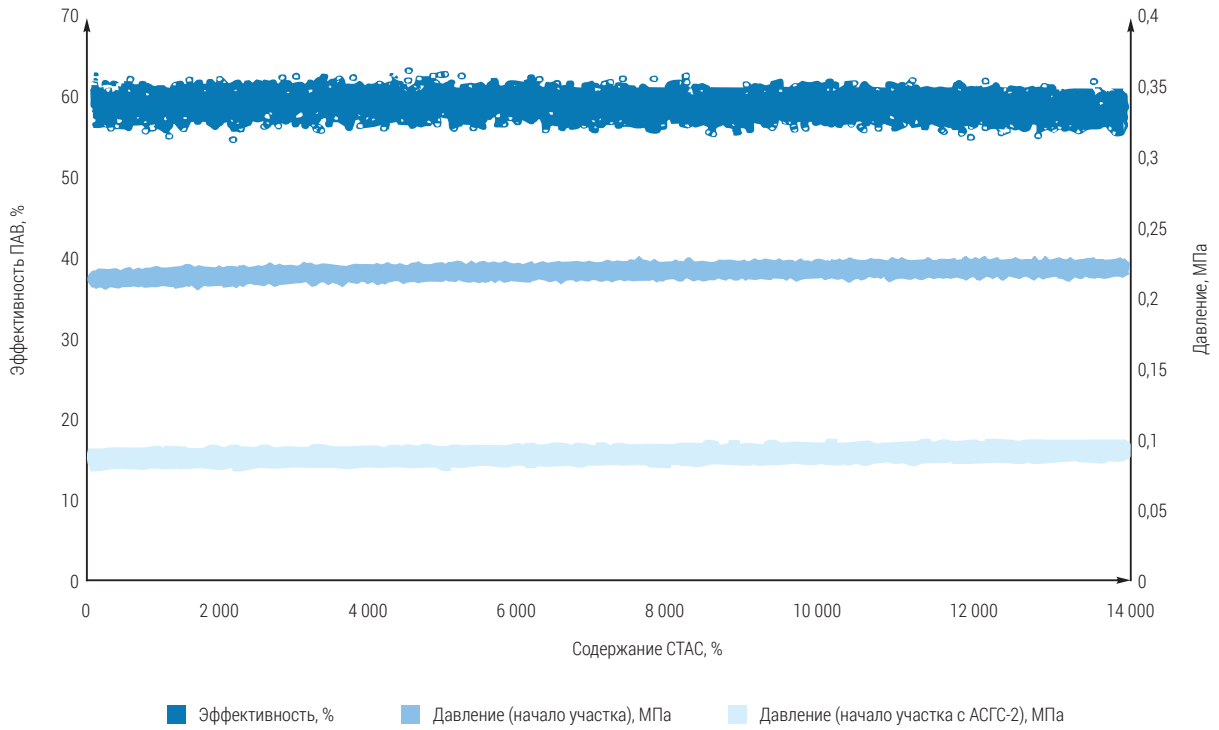


Рис. 11. Эффективность ПАВ при стендовых испытаниях после аэрации воды

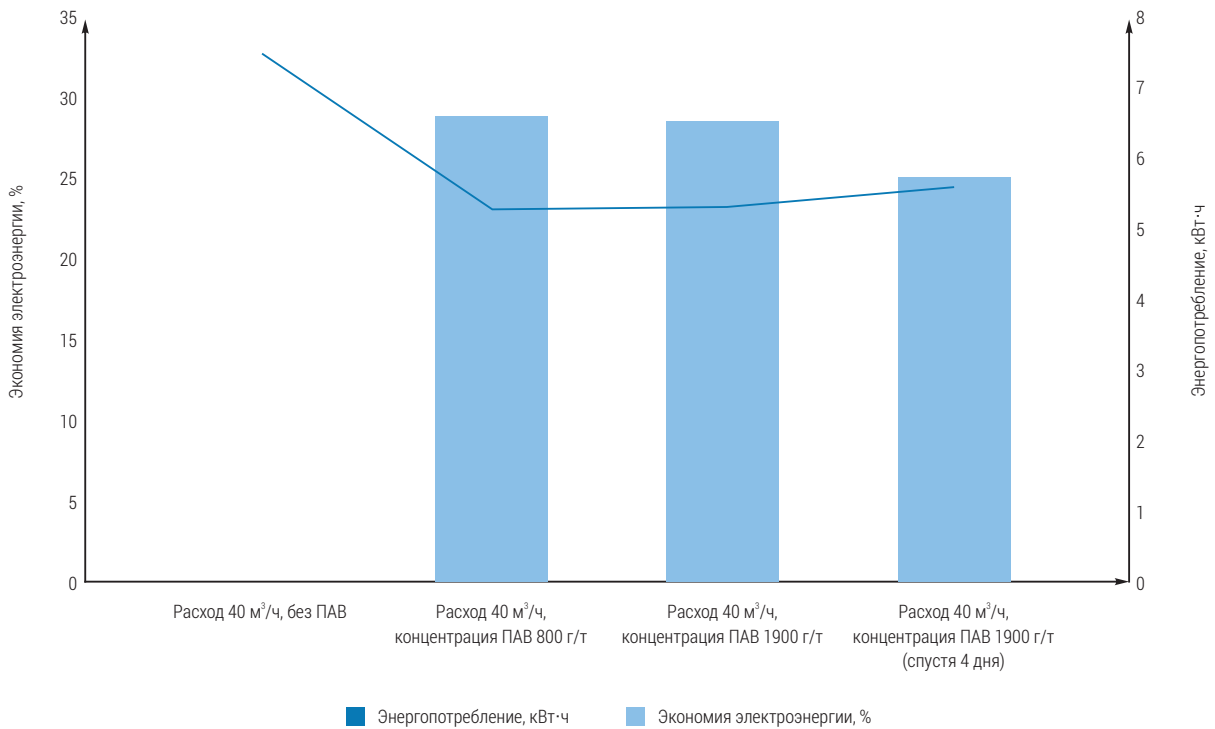


Рис. 12. Энергопотребление и экономия электроэнергии при применении ПАВ в тепловой сети на режиме обычной производительности (40 м³/ч)

гопотребления циркуляционного насосного агрегата при данном расходе (рис. 12).

По результатам испытаний установлена возможность экономии электроэнергии от применения ПАВ. Зафиксировано снижение энергопотребления при циркуляции теплоносителя (воды) по промышленной сети теплоснабжения на 17–29%.

При натуральных испытаниях также контролировались температуры радиаторных батарей в зданиях, обогреваемых тепловой сетью, а также температуры теплоносителя. Разница между температурой теплоносителя и температурой поверхности батареи была аналогична как до ввода ПАВ, так и после ввода ПАВ.

Однако при этом стоит отметить, что для оценки возможности промышленного применения требуется дальнейшая апробация ПАВ на натурном объекте с целью оценки продолжительности эффекта от введения ПАВ, оценки возможных сложностей с применением ПАВ (оценка вероятности повышенного пенообразования, появления дополнительных отложений, физико-химическое изменение состояния теплоносителя с ПАВ).

Заключение

По результатам лабораторных испытаний установлены состав и соотношение компонентов, входящих в состав ПАВ, позволяющих снижать гидродинамическое сопротивление воды – смесь СТАС и NaSal в соотношении 1 к 1 по массе.

По результатам стендовых испытаний эффективность ПАВ составила 50–60%. Установлено, что наличие и продолжительность снижения гидравлического сопротивления зависят от чистоты используемой воды. Полагаем, что важной составляющей водоподготовки является очистка от железа.

По результатам натуральных испытаний ПАВ в местной изолированной тепловой сети площадочного объекта установлена возможность экономии электроэнергии на циркуляцию теплоносителя за счет применения ПАВ. Зафиксировано снижение энергопотребления при циркуляции теплоносителя (воды) в конкретной тепловой сети на 17–29%, в зависимости от режима циркуляции.

Использованные источники

1. Myers D. «Surfactant science and technology», published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006, pp. 30–77.
2. Vasudevan M., Shen A., Khomami B., Sureshkumar R. «Self-similar shear-thickening behavior in CTAB/NaSal surfactant solutions», *Physics.flu-dyn*, 20 Jun 2007, pp. 1–41.
3. Hamley I. W. «Introduction to soft matter», *Polymers, Colloids, Amphiphiles and Liquid Crystals* (Wiley, England, 2000).
4. Yi Wang, Bo Yu, Jacques L. Zakin, and Haifeng Shi «Review on Drag Reduction and Its Heat Transfer by Additives», *Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering*, 2011, pp. 1–17.
5. Cates M. E., Candau S. J. «Statics and dynamics of worm-like surfactant micelles», *J. Phys. – Condens. Mat.* 2, 6869–6892 (1990).
6. Zhang Y. Ph.D. dissertation 2005, *The Ohio State University, Columbus, Ohio*.
7. Chou L. C. Ph.D dissertation 1991, *The Ohio State University, Columbus, OH*.
8. Chou L. C., Christensen R. N., Zakin J. L. «Drag Reduction in Fluid Flows», Sellin, R. H. J., Moses, J. T., Eds., *Ellis Horwood Ltd., Chichester, England*, 1989, p. 141.
9. Hofmann S., Hoffmann H. «Shear-induced micellar structures in ternary surfactant mixtures: the influence of the structure of the micellar interface», *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 102, no. 29, pp. 5614–5624, 1998.
10. Bewersdorff H. W., Ohlendorf D. «The behavior of drag-reducing cationic surfactant solutions», *Colloid & Polymer Science*, vol. 266, no. 10, 1988, pp. 941–953.
11. Deslouis, C. «Microscopic aspects of surfactants action on flow induced corrosion», *Electrochim. Acta*, vol. 48, 2003, pp. 3279–3288.
12. May S., Bohbot Y., Ben-Shaul A. *J. Phys. Chem. B* 1997, 101, 8648.
13. Porte G., Gomati R., El Haitamy O., Appell J., Marignan J. *J. Phys. Chem.* 1986, 90, 5746.
14. Hassan P. A., et al., 2002: Hassan P. A., Candau S. J., Kern F., Manohar C., *Langmuir* 1998, 14, 6025.
15. Ali A. A., Makhloufi R. *Colloid Polym. Sci.* 1999, 277, 270.
16. Zakin J. L., Zhang Y., Ge W., 2007: «Drag reduction by surfactant giant micelles in Giant Micelles: Properties and Applications», R. Zana and E. W. Kaler, Eds., *Surfactant Science Series*, CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, pp. 140–489.
17. Saeki T., Tokuhara K., Matsumura T., Yamamoto S., 2002: «Application of surfactant drag reduction for practical air conditioning systems», *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen*, vol. 68, no. 669, pp. 1482–1488.
18. Modak P. R., Usui H., Suzuki H., 2002: «Agglomeration control of ice particles in ice-water slurry system using surfactant additives», *HVAC & R Research*, vol. 8, no. 4, pp. 453–466.
19. Inaba H., Inada T., Horibe A., Suzuki H., Usui H., 2005: «Preventing agglomeration and growth of ice particles in water with suitable additives», *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, no. 1, pp. 20–26.
20. Базилевский А., Воронков С., Ентов В., Рожков А. Ориентационные эффекты при разрыве струй и волокон разбавленных растворов полимеров // Доклады академии наук СССР, 1981. 257(2): 336–339.



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА



Оформить подписку на журнал «Энергетическая политика» на 2024 год можно через филиалы агентства «Урал-пресс», либо в ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. По вопросам подписки звонить по телефону +7-910-463-53-57. Стоимость подписки на полугодие (6 номеров) составит 13 200 рублей. В каждом номере – аналитические обзоры, авторские колонки, материалы научного и научно-прикладного характера. Будь в курсе основных направлений развития ТЭК!

energypolicy.ru