

**ТЭХНІЧНАЯ ХІМІЯ І ХІМІЧНАЯ ТЭХНАЛОГІЯ**  
**TECHNICAL CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING**

УДК 544.77

Поступила в редакцию 28.10.2016

Received 28.10.2016

**О. Н. Опанасенко, Н. В. Яковец, Н. П. Крутько**

*Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**ФЛОКУЛЯЦИЯ И СЕДИМЕНТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ  
В ПРИСУТСТВИИ ДОБАВОК, СОДЕРЖАЩИХ АМИНО- И ФОСФАТНЫЕ ГРУППЫ**

В мире наблюдается тенденция роста добычи трудно извлекаемых тяжелых нефтей и битумов, характеризующихся высоким содержанием смолисто-асфальтеновых веществ, агрегирование которых приводит к выпадению их в осадок и потере устойчивости нефтяных дисперсных систем. Цель работы – установить закономерности влияния нефтерастворимых поверхностно-активных добавок, содержащих полярные функциональные группы различной химической природы, на процессы флокуляции и седиментации модельных нефтяных дисперсных систем. Методы исследования – ИК-спектроскопия, метод турбидиметрического титрования и дисперсионный анализ. В результате установлено, что при использовании отечественной поверхностно-активной добавки, содержащей одновременно амино- и фосфатные группы в цепи, наблюдается синергетический эффект за счет суммарного действия этих функциональных групп, который проявляется в замедлении процессов флокуляции (эффективность действия составляет 108%) и седиментации модельных нефтяных дисперсий, что подтверждается снижением в 13 раз показателей скорости и константы седиментации и уменьшением в 1,6–3,2 раза размера ассоциатов смолисто-асфальтеновых веществ, что приводит к повышению агрегативной и кинетической устойчивости коллоидной системы. Показано, что данная добавка является эффективным ингибитором флокуляции и диспергирующим агентом для нефтяных дисперсных систем, что позволяет рекомендовать ее для практического применения вместо импортных дорогостоящих аналогов.

*Ключевые слова:* флокуляция, седиментация, нефтяные дисперсные системы, поверхностно-активные вещества.

**O. N. Opanasenko, N. V. Yakavets, N. P. Krut'ko**

*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**FLOCCULATION AND SEDIMENTATION OF OIL DISPERSIVE SYSTEMS  
OVER THE ADDITIVES CONTAINING PHOSPHATE AND AMINE GROUPS**

There is a trend in the world for production growth of hardly recoverable heavy oils and bitumen with high content of resin-asphaltene substances that precipitate when aggregated, causing stability loss of oil dispersions. The goal of this work is to establish regularities for the effect of oil soluble surfactant additives containing the polar functional groups of different chemical nature on the processes of flocculation and sedimentation of model oil dispersions. Methods employed are infrared spectroscopy, turbidimetric titration and dispersion analysis. It has been found that the domestically produced surfactant additive containing both amino and phosphate groups in the chain causes synergistic effect, due to simultaneous action of these functional groups, that slows down flocculation processes (efficiency is 108%) and sedimentation of model oil dispersions, which is confirmed by 13 times reduction of rates and sedimentation constants and 1.6–3.2 times decrease of associate size for resin-asphaltene substances. This results in the increase of aggregative and kinetic stability of the colloidal system. It has been shown that the additive is an effective flocculation inhibitor and dispersing agent for oil dispersion systems, that can be recommended for practical application as a substitute for expensive imported analogues.

*Keywords:* flocculation, sedimentation, oil dispersive systems, surfactants.

В настоящее время наблюдается тенденция роста добычи трудно извлекаемых тяжелых нефтей и битумов, характеризующихся высоким содержанием асфальтенов, которые являются центрами реструктуризации системы, склонны к межмолекулярным взаимодействиям и агрегированию в объеме дисперсионной среды. Развитие процессов агрегирования асфальтенов приводит

к образованию флоккул и выпадению их в осадок, что означает потерю устойчивости лиофильных нефтяных дисперсных систем (НДС) [1].

В связи с этим очень актуальными являются исследования, касающиеся вопросов повышения устойчивости тяжелых НДС [2–4] и стабилизация асфальтенов с помощью различных химических добавок, в том числе и нефтерастворимых поверхностно-активных веществ (ПАВ), таких как алкилфенолы [5], алифатические амины и спирты, алкилбензолы [6], нафтеновые и жирные кислоты, оксиэтилированные нонилфенолы, растительные масла и их производные [7, 8], которые выполняют роль диспергирующих агентов, окружают соседние асфальтеновые молекулы, образуя стерические коллоиды, подобно природным смолам действующим в нефти как пептизаторы для асфальтеновых частиц, и могут быть использованы для контроля осаждения асфальтенов на разных стадиях [9, 10]. Следовательно, исследователям необходимо активно расширять информационную базу о химических компонентах, способствующих предотвращению образования нефтяных отложений и повышению устойчивости НДС.

Так, ранее нами было успешно проведено исследование ряда коммерческих катионных и оксиэтилированных неионогенных ПАВ [11], а в данной работе с целью импортозамещения дорогостоящих коммерческих ПАВ была предпринята попытка оценить эффективность отечественных химических добавок, в составе которых имеется большое количество полярных функциональных групп разной природы [12].

В работе [13] было установлено, что химические добавки, содержащие как амино-, так и фосфорсодержащие группы, способны модифицировать границу поверхности раздела дисперсионной среды и дисперсной фазы в НДС и привести к положительным структурным изменениям в коллоидной системе. Так, использование добавки с фосфатными группами позволяет при модифицировании увеличить полярность и обогатить маслами дисперсионную среду окисленных битумов, поскольку происходит взаимодействие свободных кислотных групп фосфорной кислоты добавки с реакционноспособными группами смолисто-асфальтеновых веществ (САВ) и протекание реакций этерификации и нейтрализации. В результате модификации адсорбционные силы, связывающие ассоциаты асфальтенов с молекулами или ионами дисперсионной среды, преодолевают силы сцепления частиц дисперсной фазы друг с другом вследствие роста полярности мальтенов при введении молекул фосфатсодержащей добавки. Это приводит к разрушению пачечной структуры слоисто-блочных ассоциатов асфальтенов на ассоциаты меньших размеров и формированию на их поверхности адсорбционных слоев, препятствующих их сближению, и образованию более однородной структуры дисперсной фазы. В результате пептизации асфальтенов и обогащения дисперсионной среды маслами повышается степень структурированности битума. Эти результаты дают основания предположить, что данные модификаторы потенциально способны выступать и в качестве агентов для сокращения смолисто-асфальтеновых отложений.

Цель работы – установить закономерности влияния нефтерастворимых поверхностно-активных добавок, содержащих амино- и фосфатные группы, на процессы флокуляции и седиментации модельных НДС для подбора наиболее эффективного диспергирующего агента и ингибитора асфальтеновых отложений. Оценка влияния этих ПАВ была выполнена аналогично проведенным нами исследованиям с катионными и оксиэтилированными неионогенными ПАВ [11].

В качестве объектов исследования использовали поверхностно-активные химические добавки производства ОДО «Химавтодорсервис» (Беларусь): БЕЛЭМ-М – алкилмоноамидполиэтиленполиамин жирных кислот рапсового масла [14], БЕЛАД – эфиры полифосфорной кислоты и триглицеридов жирных кислот рапсового масла, КХД – комплексная химическая добавка, содержащая амино- и фосфатные группы в составе [12]. Для получения модельных НДС использовали САВ, выделенные из нефтяного битума гель-типа по методу Гольде, их состав и структура представлены в работе [11].

**Методы исследования.** Метод ИК-спектроскопии использовали для получения информации об основных функциональных группах и структуре поверхностно-активных химических добавок. Исследования проведены при  $20 \pm 1$  °С в диапазоне  $4000\text{--}450$  см<sup>-1</sup> с разрешением 4 см<sup>-1</sup>

на ИК-спектрометре М 2000 с Фурье-преобразователем FTIR SPECTROMETER (MIDAC, США). Образцы готовили путем нанесения жидкого образца тонким слоем на пластину KRS.

Для изучения процесса флокуляции было проведено моделирование потери агрегативной устойчивости ассоциатов асфальтенов в модельных НДС под действием алкана-осадителя. Метод турбидиметрического титрования применяли для определения точки начала флокуляции асфальтенов (точки онсет) – минимального количества компонента-осадителя, соответствующего началу осаждения асфальтенов из раствора неполярным растворителем *n*-алканом при 20 °С, что отмечается на основании отклонения изменений значений оптической плотности от линейного поведения. Точку онсет рассчитывали как мольную долю толуола  $\gamma$  в смеси толуол/*n*-гексан:

$$\gamma = \frac{X_T}{X_T + X_G} \quad (1)$$

где  $X_T$  и  $X_G$  – количество молей толуола и *n*-гексана в объемной фазе [1]. Для исследований использовали 0,2%-ные растворы САВ из битума в толуоле с содержанием 0,002 мас.% ПАВ.

Для определения точки онсет регистрировали изменения оптических плотностей растворов САВ на фиксированной длине волны видимой области спектра (750 нм) по мере увеличения количества *n*-гексана (х.ч.) при титровании в системе. Оптические плотности растворов измеряли с использованием колориметра фотоэлектрического концентрационного КФК-2МП (Россия) (предел допускаемого значения абсолютной погрешности 1,0%). Для работы использовали прямоугольные кюветы с рабочей длиной 5 мм и объемом 2,3 мл. Исходный объем титруемых растворов САВ в колбе составлял 10 мл.

*Седиментационный анализ* применяли для изучения влияния ПАВ на процессы седиментации в НДС. Исследования были проведены при  $20 \pm 1$  °С на приборе «Процессор-тензиометр К100 МК 2» фирмы «KRUSS» (Германия) с использованием программного обеспечения LabDesk™. Распределение частиц по размерам в НДС определяли на основании графического метода с использованием уравнений Одена и Стокса. При обработке седиментационных кривых построены интегральные и дифференциальные кривые распределения ассоциатов частиц САВ по размерам, определены скорости и константы седиментации, значения эквивалентных минимальных и максимальных радиусов ассоциатов САВ [15–17]. Для изучения применяли разбавленные суспензии САВ ( $c_{\text{мас}} = 0,5\%$ ) в бинарном растворителе (*n*-гексан/толуол с соотношением 10:1), содержащие 1 мас.% исследуемого ПАВ.

**Результаты и их обсуждение.** В результате расшифровки ИК-спектров исследуемых поверхностно-активных добавок на спектре БЕЛЭМ-М (рис. 1, а) обнаружены полосы поглощения ( $1548$  и  $1651$   $\text{см}^{-1}$ ), которые связаны с деформационными колебаниями аминогрупп, а в связи с тем, что аминогруппы склонны к ассоциациям и образованию меж- и внутримолекулярных водородных связей, полосы поглощения, соответствующие валентным колебаниям N–H, смещаются из области  $3300$ – $3500$   $\text{см}^{-1}$  в сторону низких частот, проявляясь при  $3291$   $\text{см}^{-1}$ .

На спектре БЕЛАДА (рис. 1, б) наблюдается наличие характеристических полос с волновыми числами  $1022$  и  $1168$   $\text{см}^{-1}$ , отвечающих за валентные колебания связей –P=O и P–O–H, и полос поглощения, связанных с колебаниями –C=O группы ( $1745$   $\text{см}^{-1}$ ).

Взаимодействия между БЕЛЭМ-М и БЕЛАД приводят к образованию соединения КХД (рис. 1, в). Сравнительный анализ ИК-спектров исследуемых соединений показал, что на спектре КХД присутствуют как характеристические полосы деформационных и валентных колебаний аминогрупп ( $1545$ ,  $1635$  и  $3310$   $\text{см}^{-1}$ ), так и полосы фосфорсодержащих групп ( $958$  и  $1063$   $\text{см}^{-1}$ ).

Наличие свободных кислотных групп фосфорной кислоты может инициировать амидирование сложноэфирных групп БЕЛАДА, что приводит к уменьшению интенсивности полосы поглощения в области  $1745$   $\text{см}^{-1}$ , характерной для сложной эфирной группы –C=O, и увеличению интенсивности полосы поглощения валентных колебаний в области  $1650$   $\text{см}^{-1}$ , характерных для N-замещенных аминов.

Таким образом, в результате изучения исследуемых добавок методом ИК-спектроскопии установлено, что КХД обладает одновременно амино- и фосфорсодержащими функциональными группами в составе, поэтому может оказывать дополнительное модифицирующее действие на

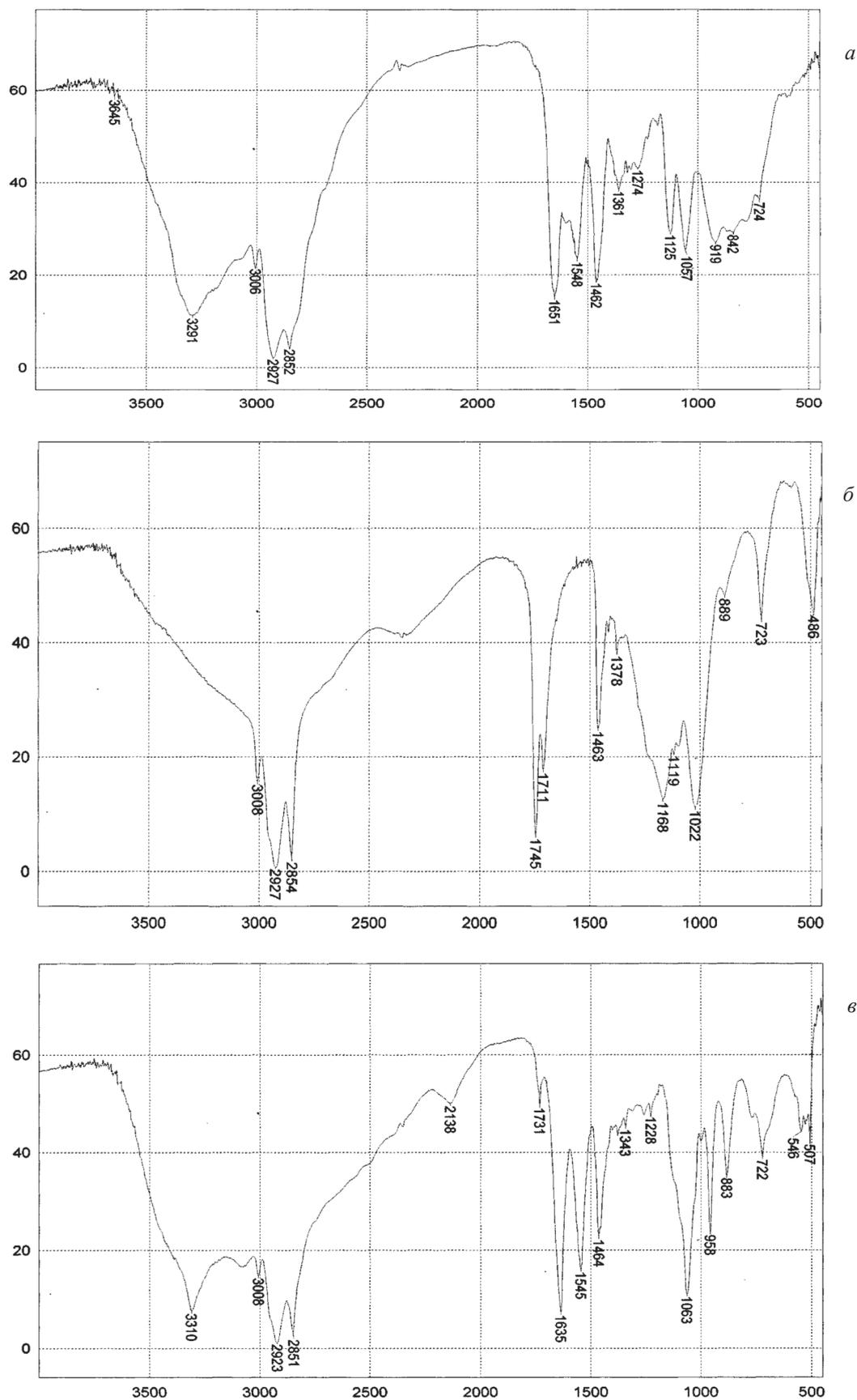


Рис 1. ИК-спектры поверхностно-активных добавок: БЕЛЭМ-М (а); БЕЛАД (б); КХД (в)  
 Fig. 1. Infrared spectra of surfactant additives: BELEM-M (a); BELAD (b), CChA (c)

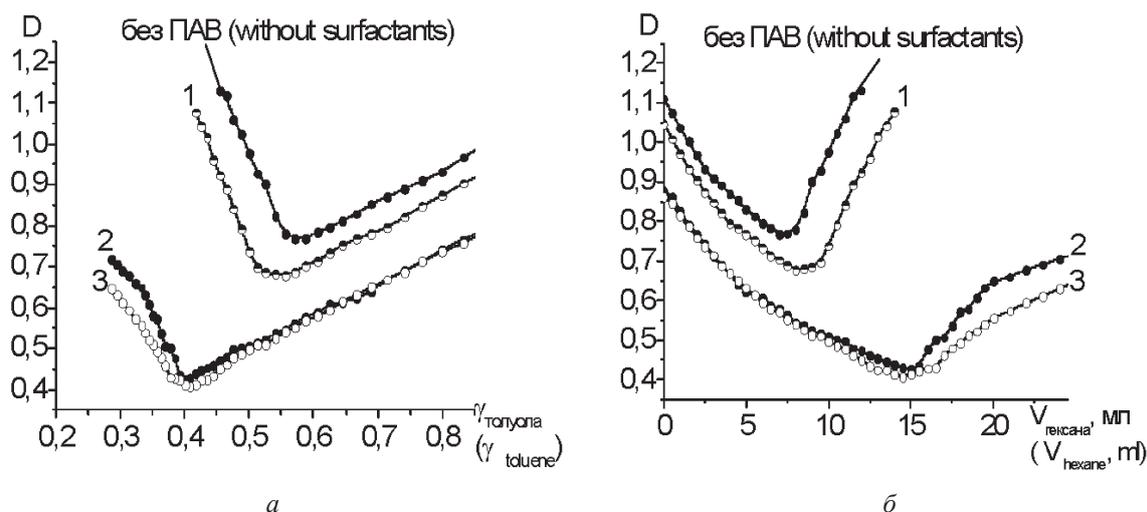


Рис. 2. Определение точки онсет по кривым оптической плотности растворов САВ на длине волны 750 нм от мольной доли толуола (а); от объема *n*-гексана (б) в смесях растворителей толуол/*n*-гексан: 1 – САВ + БЕЛЭМ-М; 2 – САВ + БЕЛАД; 3 – САВ + КХД

Fig. 2. Determination point onset in the curves of transmission density of RAS solutions under wave-length 750 nm against mole fraction of toluene (a); volume of hexane (б) in the blends of solvents toluene/hexane: 1 – RAS + BELEM-M; 2 – RAS + BELAD; 3 – RAS + CChA

изменения в коллоидной структуре НДС за счет увеличения полярности дисперсионной среды и формирования на поверхности частиц дисперсной фазы защитных структурированных слоев, характеризующихся большей упругостью и механической прочностью, по сравнению с использованием индивидуальных компонентов, что необходимо для повышения устойчивости дисперсной системы [18].

На рис. 2 и в табл. 1 приведены результаты исследований по определению точки онсет в НДС, модифицированных добавками, содержащими amino- и фосфатные функциональные группы.

Приведенные на рис. 2 значения оптической плотности исследуемых НДС являются результатом совокупности эффектов поглощения и рассеяния света. Так, по мере добавления осадителя оптическая плотность НДС падает из-за разбавления, а по мере достижения точки онсет она начинает увеличиваться за счет рассеяния света на вновь образованных дисперсных частицах вследствие генерации частиц САВ. По мере введения осадителя происходит изменение сольватных оболочек агрегатов асфальтенов, а последовательный рост этих агрегатов приводит к формированию кластеров с пониженной устойчивостью и флокуляции асфальтенов в растворе.

Таблица 1. Влияние добавок на процесс флокуляции растворов САВ

Объекты исследования	Оптическая плотность в точке онсет	Мольная доля растворителя в смеси в точке онсет		Объем осадителя в точке онсет, мл
		толуол	<i>n</i> -гексан	
САВ	0,77	0,59	0,41	7,03
САВ + БЕЛЭМ-М	0,68	0,55	0,45	8,01
САВ + БЕЛАД	0,42	0,40	0,60	14,57
САВ + КХД	0,41	0,40	0,60	14,63

Как видно из анализа данных табл. 1, фосфат-содержащие ПАВ (БЕЛАД и КХД) по сравнению с БЕЛЭМ-М (аминогруппы) и изученными ранее ПАВ, содержащими amino- и ОЭ-группы [11], сильнее снижают значения оптической плотности при титровании модельных НДС *n*-гексаном, при их использовании увеличивается в 2 раза количество необходимого для начала флокуляции агента-осадителя асфальтенов.

Оценка чувствительности САВ по отношению к введению добавок-ингибиторов флокуляции была проведена с помощью определения их эффективности *E* (рис. 3) к повышению стабильности НДС, согласно следующему уравнению:

$$E = \frac{V_{\text{onset}}^{\text{in}} - V_{\text{onset}}^{\text{blank}}}{V_{\text{onset}}^{\text{blank}}} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $V_{\text{onset}}^{\text{in}}$  и  $V_{\text{onset}}^{\text{blank}}$  – объем осадителя в точке начала флокуляции 0,2%-ного раствора САВ в присутствии и отсутствие добавки ПАВ, мл [19].

Как видно из рис. 3, эффективность фосфатсодержащих ПАВ в качестве ингибиторов флокуляции значительно выше (вплоть до 108%), чем у ПАВ, характеризующихся другими функциональными группами, как, например, неионогенное ПАВ – этилендиамин тетрабис-(этоксилат-блок-пропоксилат)-тетрол, содержащий 2 амино- и 64 оксиэтиленовых группы, проявляет эффективность действия 57% [11]. Проведенные исследования показывают способность фосфатсодержащих ПАВ поддерживать асфальтеновые частицы в диспергированном состоянии, уменьшать их агрегирование и повышать агрегативную устойчивость НДС. Причем КХД разветвленного химического строения, в состав которого, помимо фосфатных функциональных групп, входит еще и 5 аминогрупп, проявляет наибольшую эффективность. Это подтверждается результатами по изучению процессов седиментации частиц дисперсной фазы в гравитационном поле в режиме свободного (нестесненного) осаждения в присутствии амино- и фосфорсодержащих ПАВ, представленными на рис. 4, 5 и в табл. 2.

Экспериментальные седиментационные кривые (рис. 4) иллюстрируют влияние исследуемых ПАВ на кинетическую устойчивость модельных НДС и имеют плавный ход, характерный для полидисперсных систем. Причем кинетическая кривая для КХД показывает наиболее незначительное изменение массы частиц на зонде, помещенном в НДС, во всем временном измерительном диапазоне, тогда как при добавлении БЕЛЭМ-М и БЕЛАД в НДС на кривой можно выделить два участка: первый – на котором скорость седиментации меньше, чем для исходной НДС, не содержащей ПАВ, и второй – где ситуация в системе ухудшается, наблюдается увеличение массы частиц, их более быстрое укрупнение и оседание под действием силы тяжести.

Тем не менее использование ПАВ способствует образованию адсорбционно-сольватного слоя у частиц дисперсной фазы НДС, что приводит к формированию структурно-механического барьера, препятствующего асфальтеновой ассоциации. Это подтверждается уменьшением седиментационных и дисперсионных характеристик (эквивалентных  $r_{\text{max}}$  и  $r_{\text{min}}$  радиусов ассоциатов квазисферических частиц САВ, скорости  $U_{\text{сед}}$  и констант седиментации  $S_{\text{сед}}$ ), приведенных в табл. 2.

В табл. 2 показано, что БЕЛАД слабо снижает скорость и константу седиментации (только в 1,4 раза), а БЕЛЭМ-М – в 2,8 раза, а КХД проявляет себя лучше всех исследуемых ПАВ, снижая  $U_{\text{сед}}$  и  $S_{\text{сед}}$  в ~13 раз. КХД также оказывается наиболее эффективным из исследуемых ПАВ диспергирующим агентом, так как для системы, содержащей КХД, характерно наиболее узкое

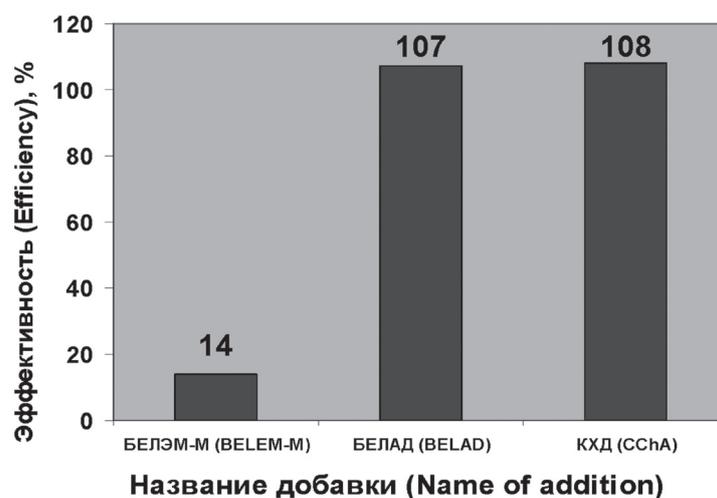


Рис. 3. Эффективность поверхностно-активных добавок в качестве ингибиторов флокуляции

Fig. 3. Efficiency of surfactant additives as the inhibitors of flocculation

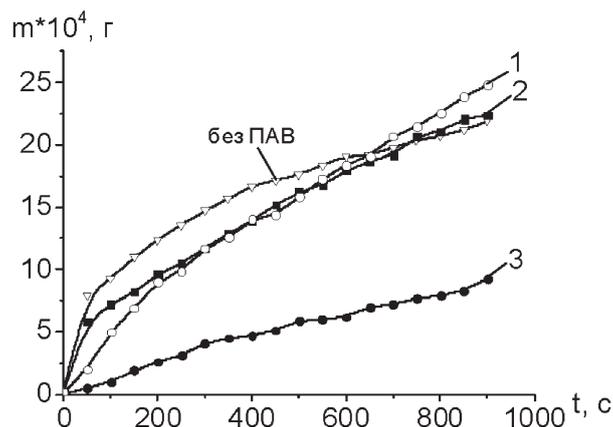


Рис. 4. Кинетические кривые седиментации суспензий САВ в смеси *n*-гексан/толуол в присутствии ПАВ: 1 – БЕЛЭМ-М; 2 – БЕЛАД, 3 – КХД

Fig. 4. Kinetic curves of sedimentation of RAS suspensions in the blend of hexane/toluene over surfactants: 1 – BELEM-M; 2 – BELAD; 3 – CChA

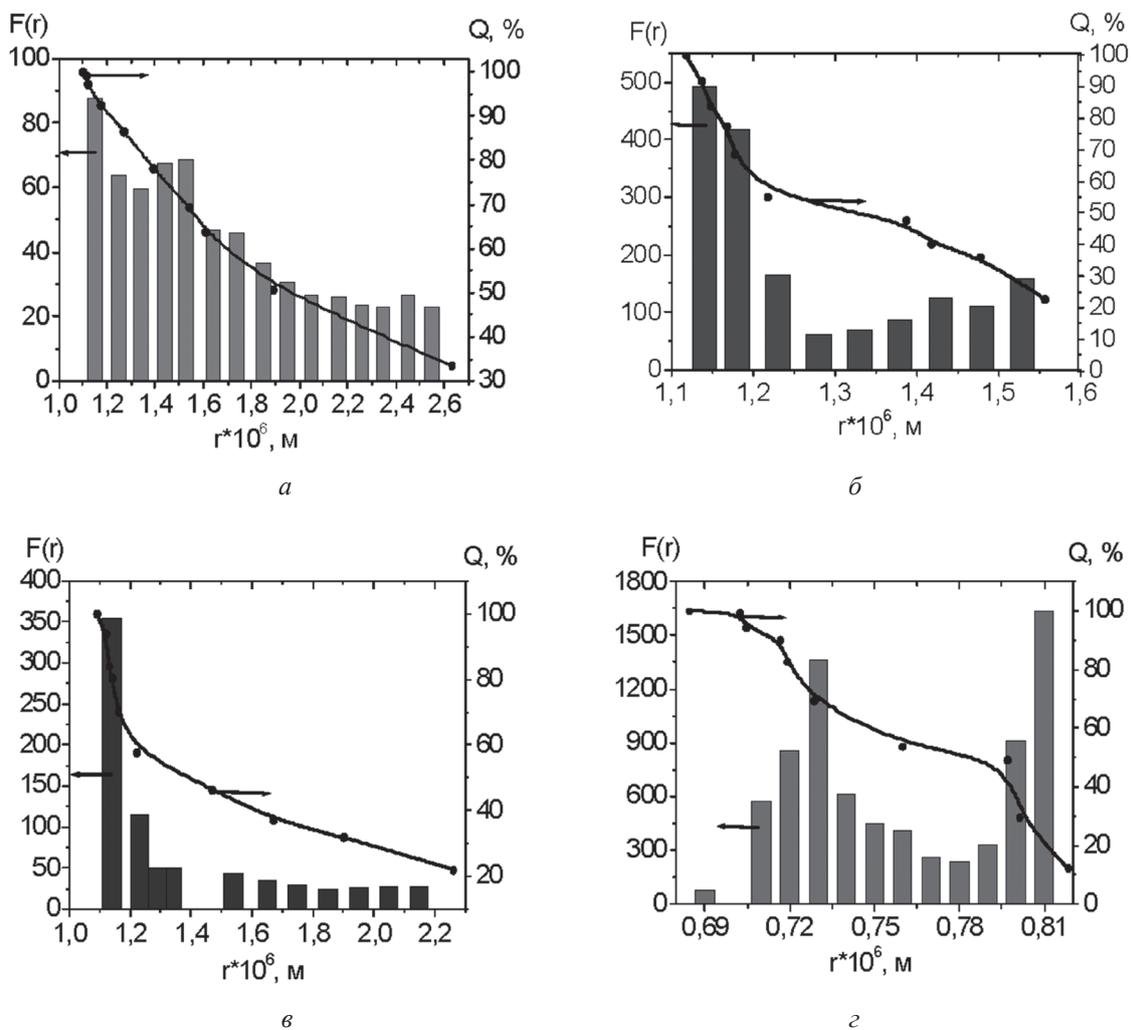


Рис. 5. Интегральное и дифференциальное распределение ассоциатов частиц САВ в суспензиях: без ПАВ (а); в присутствии БЕЛЭМ-М (б); БЕЛАД (в); КХД (г)

Fig. 5. Integral and differential distribution of associates of RAS particles in suspensions: without surfactants (a); in the presence of BELEM-M (б); BELAD (в); CChA (г)

Таблица 2. Седиментационные и дисперсионные характеристики модельных НДС в присутствии ПАВ, содержащих amino- и фосфатные группы

Объекты исследования	$U_{\text{сед}} \cdot 10^6$ , м/с	$S_{\text{сед}} \cdot 10^7$ , с	$r_{\text{max}} \cdot 10^6$ , м	$r_{\text{min}} \cdot 10^6$ , м
САВ (без ПАВ)	13,80	14,00	2,63	1,10
САВ + БЕЛЭМ-М	4,87	4,97	1,56	1,12
САВ + БЕЛАД	10,22	10,43	2,26	1,09
САВ + КХД	1,03	1,05	0,82	0,68

распределение ассоциатов частиц САВ по размерам  $r \approx 0,68 \div 0,82 \cdot 10^{-6}$  м (рис. 5, з), что свидетельствует о большей седиментационной устойчивости НДС в его присутствии.

В результате проведенных исследований выявлено, что при модифицировании поверхности САВ amino- и фосфатсодержащими ПАВ облегчается процесс диспергирования, происходит пептизация частиц САВ за счет электростатического отталкивания и стерической стабилизации. Причем при использовании КХД наблюдается суммарное действие amino- и фосфатных функциональных групп, входящих в состав этого ПАВ, которое превышает воздействие каждой из них по отдельности (по сравнению с БЕЛЭМ-М (аминогруппы) и БЕЛАД (фосфатные группы), т. е. наблюдается синергетический эффект, который проявляется в замедлении процессов флокуляции (эффективность действия составляет 108%, для начала флокуляции требуется в 2 раза больший объем осадителя по сравнению с НДС, не содержащей ПАВ) и седиментации НДС. Это подтверждается снижением в 13 раз показателей скорости и константы седиментации и уменьшением в 1,6–3,2 раза размера ассоциатов САВ, что приводит к повышению агрегативной и кинетической устойчивости НДС.

**Выводы.** Таким образом, изучено влияние amino- и фосфатсодержащих отечественных ПАВ на агрегативную и кинетическую устойчивость тяжелых НДС. Следует отметить, что эффективность отечественных добавок не только не уступает, но в некоторых случаях превосходит эффективность зарубежных аналогов. Так, установлено, что КХД является эффективным ингибитором флокуляции и диспергирующим агентом НДС и его можно использовать на практике для повышения агрегативной и кинетической устойчивости НДС вместо импортных дорогостоящих ПАВ.

#### Список использованных источников

1. Сафиева, Д. О. Адсорбция асфальтенов на твердых поверхностях и их агрегация в нефтяных дисперсных системах : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.04, 05.17.07. / Д. О. Сафиева ; Ин-т биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН. – М., 2011. – 137 с.
2. Abdel-Moghny, Th. Effect of surfactant on the growth of onset aggregation of some Egyptian crude oils / Th. Abdel-Moghny, S. M. Desouky, M. Ramzi // J. of Dispersion Science and Technology. – 2008. – Vol. 29. – P. 397–405.
3. Asphaltene flocculation and collapse from petroleum fluids / V. A. M. Branco [et al.] // J. of Petroleum Science and Engineering. – 2001. – Vol. 32. – P. 217–230.
4. Measurement and prediction of the rate of deposition of flocculated asphaltene particles from oil / M. Jamialahmadi [et al.] // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52. – P. 4624–4634.
5. Leon, O. Amphiphile adsorption on asphaltene particles: adsorption isotherms and asphaltene stabilization / O. Leon, E. Contreras, E. Rogel // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2001. – Vol. 189. – P. 123–130.
6. Gonzalez, G. Peptization of asphaltene by various oil soluble amphiphiles / G. Gonzalez, A. Middea // Colloids and Surfaces. – 1991. – Vol. 52. – P. 207–217.
7. Rocha Junior, L. C. Inhibition of asphaltene precipitation in Brazilian crude oils using new oil soluble amphiphiles / L. C. Rocha Junior, M. S. Ferreira, A. C. da Silva Ramos // J. of Petroleum Science and Engineering. – 2006. – Vol. 51, no. 1–2. – P. 26–36.
8. Zaki, N. Rheology, particle size distribution, and asphaltene deposition of viscous asphaltic crude oil-in-water emulsions for pipeline transportation / N. Zaki, T. Butz, D. Kessel // Petroleum Science and Technology. – 2001. – Vol. 19, no. 3–4. – P. 425–435.
9. Mansoori, G. A. Remediation of asphaltene and other heavy organic deposits in oil wells and in pipelines / G. A. Mansoori // Socar proceedings. – 2010. – No. 4. – P. 12–23.
10. Асфальтены : проблемы и перспективы / К. Акбарзаде [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2007. – Т. 19, № 2. – С. 28–53.
11. Яковец, Н. В. Влияние поверхностно-активных веществ на агрегативную и кинетическую устойчивость нефтяных дисперсных систем / Н. В. Яковец, Н. П. Крутько, О. Н. Опанасенко // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2013. – № 3. – С. 36–45.

12. СТБ 1463-2011. Присадки адгезионные для дорожных битумов. Общие технические условия. – Госстандарт Респ. Беларусь, 2011. – 12 с.
13. Влияние природы функциональных групп химических модификаторов на термическую стабильность нефтяного битума / О. Н. Опанасенко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2015. – № 1. – С. 101–106.
14. ТУ ВУ 190512898.001-2012. Эмульгаторы «БЕЛЭМ». Технические условия.– 2012. – ОДО «Химавтодорсервис». – 12 с.
15. Фролов, Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю. Г. Фролов. – М. : Химия, 1988. – 464 с.
16. Абрамзон, А. А. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение / А. А. Абрамзон, Л. П. Зайченко, С. И. Файнгольд. – Л. : Химия, 1988. – 200 с.
17. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / под ред. Ю. Г. Фролова и А. С. Гродского. – М. : Химия, 1986. – 216 с.
18. Опанасенко, О. Н. Свойства и применение битумных дисперсий и битумно-эмульсионных материалов / О. Н. Опанасенко, Н. П. Крутько. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 270 с.
19. Петрухина, Н. Н. Регулирование превращений компонентов высоковязких нефтей при их подготовке к транспорту и переработке : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07. / Н. Н. Петрухина ; РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. – М., 2014. – 205 с.

### References

1. Safieva D. O., "The adsorption of asphaltenes on hard surfaces and their aggregation in oil disperse systems", Ph.D. Thesis, physical chemistry, chemical technology of fuel and high-energy substances, Institute of Biochemical Physics. NM Emanuel RAS, Moscow, RU.
2. Abdel-Moghny Th., Desouky S.M. and Ramzi M., "Effect of surfactant on the growth of onset aggregation of some Egyptian crude oils", *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2008, vol. 29, pp. 397–405.
3. Branco V.A.M., Mansoori G.A., De Almeida Xavier L.C., Park S.J. and Manafi H., "Asphaltene flocculation and collapse from petroleum fluids", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2001, vol. 32, pp. 217–230.
4. Jamialahmadi M., Soltani B., Müller-Steinhagen H., Rashtchian D., "Measurement and prediction of the rate of deposition of flocculated asphaltene particles from oil", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, pp. 4624–4634.
5. Leon O., Contreras E. and Rogel E., "Amphiphile adsorption on asphaltene particles: adsorption isotherms and asphaltene stabilization", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, vol. 189, pp. 123–130.
6. Gonzalez G. and Middea A., "Peptization of asphaltene by various oil soluble amphiphiles", *Colloids and Surfaces*, 1991, vol. 52, pp. 207–217.
7. Rocha Junior L.C., Ferreira M.S. and Da Silva Ramos A.C., "Inhibition of asphaltene precipitation in Brazilian crude oils using new oil soluble amphiphiles", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, vol. 51, no. 1–2, pp. 26–36.
8. Zaki N., Butz T. and Kessel D., "Rheology, particle size distribution, and asphaltene deposition of viscous asphaltic crude oil-in-water emulsions for pipeline transportation", *Petroleum Science and Technology*, 2001, vol. 19, no. 3–4, pp. 425–435.
9. Mansoori G.A., "Remediation of asphaltene and other heavy organic deposits in oil wells and in pipelines", *Socar proceedings*, 2010, no. 4, pp. 12–23.
10. Akbarzade K., Khammami A., Kharrat A., Chzhan D., Allenson S., Krik D., Kabir Sh., Dzhamaluddin A., Marshal A. Dzh., Rodzhers R.P., Mallins O.K. and Solbakken T., "Asphaltenes: problems and prospects", *Neftegazovoe obozrenie [Oilfield Review]*, 2007, vol. 19, no. 2, pp. 28–53.
11. Yakovets N.V., Krut'ko N.P. and Opanasenko O.N., "Effect of surfactants on the aggregative and kinetic stability of oil disperse systems", *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy [Bulletin of the Foundation for Fundamental Research]*, 2013, no. 3, pp. 36–45.
12. State Standard of the Republic of Belarus, *STB 1463-2011: Prasadki adgezionnye dlya dorozhnykh bitumov. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [STB 1463-2011: adhesive additives for road bitumen. General specifications], Gosstandart, Minsk, BY, 2011.
13. Opanasenko O.N., Luksha O.V., Zhigalova O.L., Krut'ko N.P., Chernetskaya V.M. and Kozinets T.A., "Vliyanie prirody funktsional'nykh grupp khimicheskikh modifikatorov na termicheskuyu stabil'nost' neftyanogo bituma", *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series], 2015, no. 1, pp. 101–106.
14. ODO "Himavtodorservis", *TY BY 190512898.001-2012: Emul'gatory "Belem". Tekhnicheskie usloviya* [TY BY 190512898.001-2012: Emulsifiers "Belem". Specifications], Minsk, BY, 2012.
15. Frolov, Yu.G., *Kurs kolloidnoi khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy* [Colloid Chemistry. Surface phenomena and disperse systems], Chemistry, Moscow, RU, 1988.
16. Abramzon A.A., Zaichenko L.P. and Faingol'd S.I., *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva. Sintez, analiz, svoistva, primeneniye* [Surfactants. Synthesis, analysis, properties and application], Chemistry, Leningrad, RU, 1988.
17. Frolov Yu.G., Grodskii A.S. (ed.), *Laboratornye raboty i zadachi po kolloidnoi khimii* [Laboratory assignments and problems on colloidal chemistry], Chemistry, Moscow, RU, 1986.
18. Opanasenko O.N., Krut'ko N.P., *Svoistva i primeneniye bitumnykh dispersii i bitumno-emul'sionnykh materialov* [Properties and application of bitumen dispersions and bitumen emulsion materials], Belarusian science, Minsk, BY, 2014.
19. Petrukhnina N.N., "Regulation of high-viscosity oil components transformations during their preparation for transport and processing", Ph.D. Thesis, chemical technology of fuel and high-energy substances, Russian State University of Oil and Gas. Gubkin, Moscow, RU, 2014.

### Информация об авторах

*Опанасенко Ольга Николаевна* – канд. хим. наук, доцент, зав. лаб. нефтяных и органо-минеральных дисперсий, Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [ionch@igic.bas-net.by](mailto:ionch@igic.bas-net.by).

*Яковец Наталья Вячеславовна* – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории нефтяных и органо-минеральных дисперсий, Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [yakov25@tut.by](mailto:yakov25@tut.by).

*Крут'ко Николай Павлович* – академик, д-р хим. наук, зав. отделом композиционных материалов, Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [krutko@igic.bas-net.by](mailto:krutko@igic.bas-net.by).

### Для цитирования

Опанасенко, О. Н. Флокуляция и седиментация нефтяных дисперсных систем в присутствии добавок, содержащих амино- и фосфатные группы / О. Н. Опанасенко, Н. В. Яковец, Н. П. Крут'ко // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хім. навук. – 2017. – № 1. – С. 99–108.

### Information about the authors

*Opanasenko Olga Nikolaevna* – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of laboratory of oil and organomineral dispersions, Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [ionch@igic.bas-net.by](mailto:ionch@igic.bas-net.by).

*Yakovets Natallia Vyacheslavovna* – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher in the laboratory of oil and organomineral dispersions, Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [yakov25@tut.by](mailto:yakov25@tut.by).

*Krut'ko Nikolai Pavlovich* – academician, D. Sc. (Chemistry), Head of Department of composition materials, Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [krutko@igic.bas-net.by](mailto:krutko@igic.bas-net.by).

### For citation

Opanasenko O. N., Yakavets N. V., Krut'ko N. P. Flocculation and sedimentation of oil dispersive systems over the additives containing phosphate and amine groups. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, chemical series, 2017, no. 1, pp. 99–108.