

САНАЦИЯ НЕДР ТЕРРИТОРИИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ЗАВОДОВ



**Д.Е. Быков, К.Л. Чертес, Е.Н. Петренко,
О.В. Тупицына, В.Н. Пыстин, А.А. Подъячев**

Самарский государственный технический университет

Рассмотрены особенности генезиса техногенных линз углеводородов под площадками нефтеперерабатывающих заводов. Даны рекомендации по исследованию и оценке динамики состояния и миграции накопленных углеводородов в геологической среде с помощью численного и объёмного моделирования. Представлены отличия техногенных линз от месторождений нефти природного происхождения. Показано, что исследуемый объект отрицательно воздействует на все компоненты геосреды. Для снижения техногенной нагрузки, оказываемой нефтяной линзой, предложен физико-химический метод очистки загрязнённых пород от поллютантов с использованием поверхностно-активных веществ. Данная технология позволяет провести санацию геосреды и одновременно интенсифицировать извлечение товарных углеводородов, накопленных под территориями нефтеперерабатывающих заводов.

Ключевые слова: завод нефтеперерабатывающий, линза техногенная, линза нефтяная, санация геосреды, ПАВ, интенсификация добычи нефти, моделирование

Remediation of Mineral Resources Polluted by Oil Refineries

**D.E. Bykov, K.L. Chertes, E.N. Petrenko, O.V. Tupitsyna, V.N. Pystin,
A.A. Pod'yachev**

Samara State Technical University, 443100 Samara, Russia

The features of the genesis of technogenic lens elements of hydrocarbons under the sites of oil refineries are considered. Recommendations are given for the study and assessment of the dynamics of the state and migration of accumulated hydrocarbons in the geological environment using numerical and 3D modeling. The differences of technogenic lens elements from oil fields of natural origin are presented. It is shown that the object under study adversely affects all components of the geological environment. To reduce the anthropogenic load exerted by the oil lens elements, a physicochemical method has been proposed for cleaning contaminated rocks from pollutants using surfactants. This technology allows for the rehabilitation of the geological environment and at the same time to intensify the extraction of commercial hydrocarbons accumulated under the territories of oil refineries.

Key words: oil refinery, technogenic lens elements, oil lens elements, geologic refurbishment, surfactant, oil production intensification, modeling

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-9-13

Под площадками нефтеперерабатывающих заводов (далее НПЗ) из-за утечек продукта образуются обширные линзы углеводородов. Реконструкция заводов (строительство современных парков и вынос коммуникаций на эстакады) позволяет снизить инфильтрацию нефтепродуктов в грунты. Однако накопленные поллютанты продолжают оказывать отрицательное воздействие на все компоненты геосреды.

Масштаб техногенных линз сопоставим с размерами небольших месторождений природного углеводородного сырья. Глубины проникновения токсикантов в геологическую среду составляют десятки метров. Интенсивность накопления, локализация и динамика перемещения углеводородов в пределах завода зависит от типа залегающих пород. Это обуславливает форму и структуру линзы.

На территории некоторых НПЗ и нефтехранилищ, а также в их окрестностях, создана сеть добывающих скважин [1], при помощи которых нефтепродукт извлекают для последующей реализации. Однако механически связанные углеводороды в виде капиллярной жидкости и пленок остаются в толще геологической среды, вымываются подземными водами и перемещаются в область разгрузки — поверх-

Сравнительные параметры оценки линзы для выбора метода санации
Comparative parameters for evaluation the lens to select the method of rehabilitation

Параметр	Нефтяная линза НПЗ	Пластовая нефть*
Геомеханические параметры		
Глубина залегания, м	2–100	400–3000 [4]
Вязкость в условиях пласта, мПа·с	0,720–0,750	0,3–3,5 [3]
Плотность нефти в условиях пласта, кг/м ³	720–780	790–863 [4]
Горизонт	Казанский ярус	Нижний карбон, средний девон [4]
Пластовое давление, МПа	0,1–1,03	23,6–32,1 [4]
Мощность слоя нефтепродуктов, м	0–15	До 100 [4]
Дебит, т/сут	2–15	20–30 [4]
Фильтрационные параметры		
Проницаемость пород, мкм ²	До 0,348	0,20–0,47 [3]
Пористость породы, доли ед.	0,20–0,30	0,18–0,25
Коэффициент фильтрации пород, мм/сут	Воды 23,0–86,4; нефтепродуктов 2,3–73,4	–
Температурные параметры		
Температура в пласте, °С	-5–+10	До 74 [4]
Химические параметры		
Содержание компонентов, %	Товарные углеводороды; вода до 15; механические примеси до 5	Сера 0,2–2,05; парафин 3,13–9,0; вода до 90 [4]
Минерализация воды, г/дм ³	0,5–2,3	230–270

*На примере месторождения Самарской области.

ностные водоисточники и подземные водозаборы.

Проблема перемещения техногенной линзы усугубляется тем, что большинство НПЗ, как правило, строили поблизости от водоемов, на участках с высоким уровнем стояния подземных вод [2]. Также имеются примеры создания НПЗ на водоразделах. Такое расположение предприятия увеличивает риск загрязнения нескольких областей разгрузки и затрудняет прогнозирование поведения нефтяной линзы.

Для мониторинга состояния линз нефтепродуктов на предприятиях применяется сеть наблюдательных скважин. С их помощью проводят замеры уровней, анализ мощности слоя нефтепродуктов, а также оценивают степень нарушения геосреды из-за миграции линзы с подземными водами. Однако классические методы изысканий не обеспечивают достаточную полноту информации об объекте, поэтому необходимо использовать принципиально новый подход к техногенным линзам как к сложным многопараметрическим системам.

Исследуемая система состоит из элементов природного и техногенного происхождения, которые взаимодействуют друг с другом. К природным компонентам относят сложившиеся горные породы, поверхностные и подземные водные объекты. Техногенными составляющими являются аккумулярованные углеводородные флюиды и загрязненная ими геосреда, сеть добывающих, наблюдательных и водозаборных скважин, дренажные системы, водохранилища и другие сооружения. Таким образом, система элементов в составе геосреды, нефтяной линзы и сооружений является открытой и оценивается широким спектром параметров. Для её исследования необходимо использование методов численного и объёмного моделирования. Такое моделирование применяется на предприятиях по добыче нефти при оценке мощности пласта и дебита на месторождениях. Между тем условия существования техногенных линз под площадками нефтеперерабатывающих заводов отличаются от природных залежей углеводородного

сырья. Особенности исследуемого объекта представлены в таблице.

Как видно из таблицы, системы нефтяной линзы и природной залежи представляют собой два разных геотопа и значительно отличаются по геомеханическим, температурным и химическим параметрам. Например, химический состав техногенной линзы представляет собой лёгкие фракции углеводородов, имеющие более низкую минерализацию, обводненность по сравнению с сырой нефтью. Физические параметры, такие как температура и давление, в породах зоны аэрации ниже, чем в пластах, содержащих сырую нефть.

Исходя из значительных различий геотопов техногенного и природного происхождения, используемые методы численного моделирования нуждаются в адаптации к условиям существования нефтяной линзы под предприятием. Такая подстройка невозможна без выделенных в таблице параметрических групп, описывающих состояние техногенных линз.

Моделирование гидродинамических процессов в коллекторе на основании перечисленных параметров способствует оптимизации выбора мест заложения новых добывающих скважин с минимальными капиталозатратами. Кроме того, появилась возможность защиты водоисточников от загрязнения, а также выбора методов физико-химической санации геосреды после исчерпания полезного продукта. Таким образом, для решения проблемы воздействия на геосреду накопленных в поровом пространстве нефтепродуктов необходимо решить две задачи:

1) интенсификация добычи товарных углеводородов из техногенного образования за счёт увеличения нефтеотдачи;

2) очистка геосреды от остаточного поллютанта после исчерпания полезного продукта.

Для подбора эффективных способов интенсификации добычи полезного продукта и санации геосреды важно понимать, что нефтяная линза представляет собой многокомпонентную коллоидную систему из нефтепродуктов в жидкой форме, твердых частиц геосреды и воды. Так как одной из основных характеристик нефтепродуктов является вязкость, то очистка грунтов от товарных углеводородов может проводиться за счёт введения веществ, изменяющих реологические свойства в сторону снижения вязкости и поверхностного натяжения. К таким веществам относятся поверхностно-активные вещества. Их добавление позволяет снизить способность нефтепродуктов к образованию пространственных структур, что способствует улучшению фильтрационных характеристик в пористой геологической среде. При взаимодействии ПАВ с нефтепродуктами наблюдается снижение вязкости [5]. В то же время при контакте минерализованной воды с реагентом вязкость наоборот увеличивается, что способствует вытеснению нефтепродуктов и усиливает их приток в скважину.

Подобные подходы используют в технологиях повышения нефтеотдачи пластов. К ним относят ПАВ-заводнение [6], щелочь-ПАВ-полимерное заводнение [7], мицеллярно-полимерное заводнение [8]. В качестве реагентов применяют ионогенные и неионогенные ПАВ, а также их смеси. Реагенты позволяют эффективно снизить межфазное натяжение с одновременным ростом коэффициента вытеснения нефти и снижением адсорбции.

Для проведения комплексного исследования техногенной линзы и санации недр, загрязненных в процессе деятельности нефтеперерабатывающих заводов, предложены следующие мероприятия:

- обследование геосреды под площадкой НПЗ на глуби-

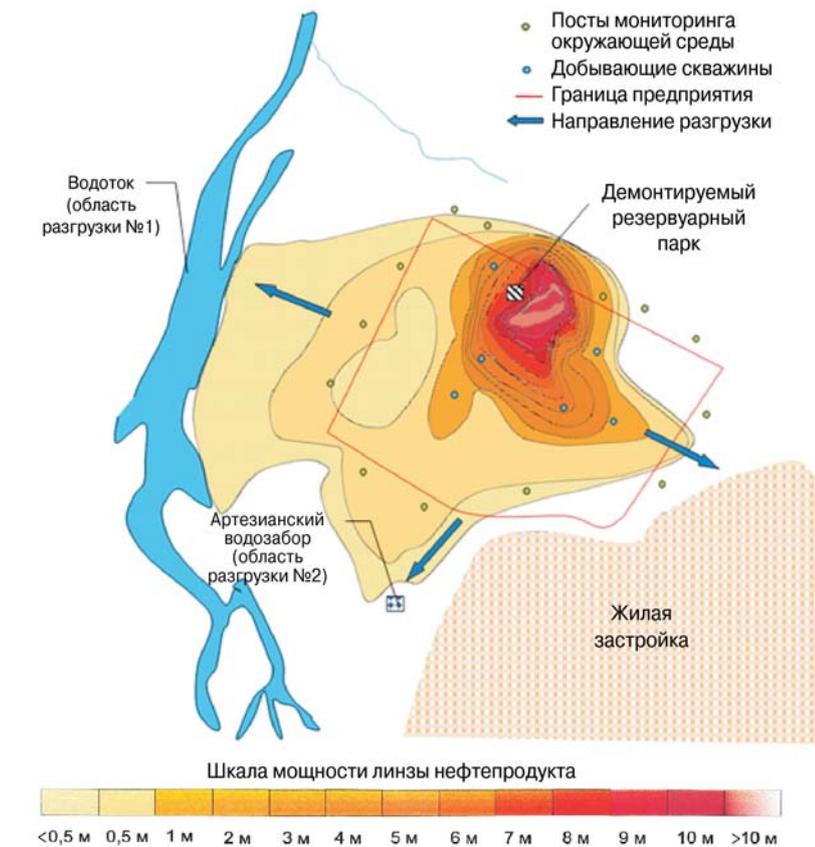


Рис. 1. План распространения линзы углеводородов

Fig. 1. Hydrocarbon lens distribution plan

не до 70 м для установления современной конфигурации "линзы", её продуктивной мощности, прогнозирования её изменения на перспективу;

- разработка методов и технологий интенсификации извлечения товарных нефтепродуктов с одновременной реагентной очисткой геосреды от остаточных загрязнений;

- технико-экономическое обоснование и геоэкологическая оценка методов санации.

Обследование геосреды территории промплощадки нефтезавода с установлением современной конфигурации "линзы" включало набор полевых, лабораторных и камеральных работ. При этом использовались как существующая сеть мониторинга на одном из заводов Самарской области, так и бурение новых проходок в диапазоне глубин залежи с расчетом их шага и отбором образцов нефтезагрязненного грунта. Анализ проб проводился по набору механических и физико-химических характеристик

с последующей камеральной обработкой для получения исходных данных к моделированию состояния геосреды.

В результате обработки материалов изысканий с оценкой запасов линзы на одном из НПЗ Самарской области были построены план распространения (рис. 1) и объемный абрис (рис. 2) углеводородов.

Геологическая модель пород зоны аэрации была впервые построена в программном комплексе, предназначенном для моделирования пластов-коллекторов на месторождениях нефти и газа. Комплекс включает в себя программное обеспечение для геологического моделирования Petrel и гидродинамический симулятор Eclipse компании Schlumberger [9]. Такая связка программных комплексов позволила определить направление и интенсивность миграции флюида в геологической среде как в результате искусственно созданного воздействия (отбор флюида), так и в естественных условиях

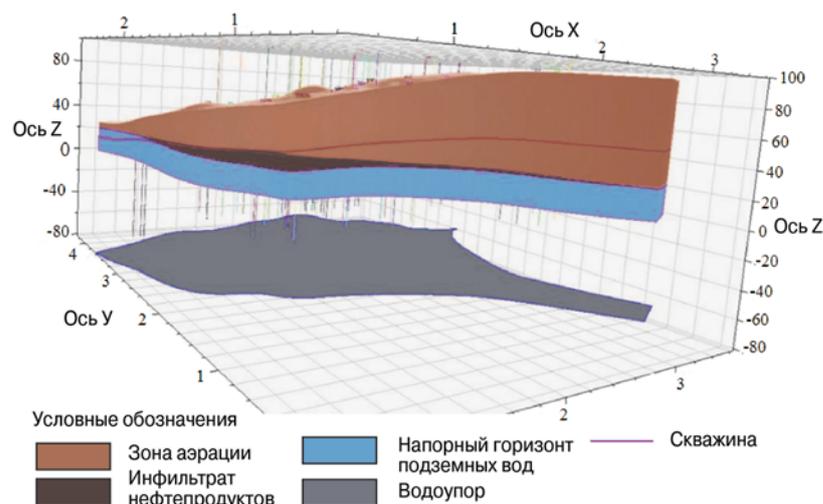


Рис. 2. Объемный абрис линзы углеводородов

Fig. 2. Bulk outline of hydrocarbon lenses

(изменение уровня грунтовых вод в течение года). В геологической модели задавались параметры слоя нефтепродуктов, включая совокупность представленных выше значений. Они позволили просчитать гидродинамику двухфазной фильтрации и построить свойства пласта, такие как пористость, проницаемость, насыщение и зоны водонефтяного контакта (ВНК). Заданные свойства также позволили построить плоскости распределения нефтяного флюида при его отборе из добывающих скважин.

На основании результатов обследования геосреды и определения состояния линзы исследовали влияние реагентов на вязкость нефти и водную фазу. Были использованы тройные смеси типа анионный-цвиттер-ионный-неионогенный ПАВ (например лаурилсульфат-кокоамидопропилбетаин-неонол) [10], а также флокулянты для очистки сточных вод, такие как: раствор низкозамещенной (5–25 %) карбоксиметилцеллюлозы (при концентрации нефтепродуктов до 2000 мг/л с эффективностью 98 %) [11], Праестол 853 (при концентрации загрязнителя 20–100 мг/л с эффективностью 92–94%) [12], Nalco 4757 и Флокатор 200 (эффективность 68–83 %) [13]. Данный комплекс реагентов предназначен

для снижения потенциала на границе раздела "грунт — нефтяная пленка" с переводом связанных форм углеводородов в свободное состояние и их последующим извлечением при откачке.

Эффективность действия разрабатываемых составов оценивалась как на отобранных (натурных), так и модельных образцах загрязненного грунта. Изучение реагентной "отмывки" геосреды от углеводородов в лабораторных условиях проводили на фильтрационной установке по методике [10]. По результатам экспериментальных исследований предложены мицеллярные водные составы биоразлагаемых ПАВ, обеспечивающих глубокий отмыв породы от нефтепродуктов с эффективностью до 90 %. Разрабатываемые составы легко оптимизируются под условия работы заводских очистных сооружений с целью минимизации затрат на совместную очистку подземных вод с производственным стоком.

Для проведения санации геосреды, загрязненной нефтепродуктами, предусматривалось использование трассеров (маркеров), которые вводили в скважины выше по потоку с целью оценки скорости движения жидкости в пористой среде. Трассерное исследование проводили по методике РД 39-3-1291-85 с применением кар-

бамида и флуорсциена натрия. Сбор трассированного флюида позволил установить гидродинамическую связь между скважинами и дренажной системой. Отслеживание скорости перемещения маркирующих веществ в геосреде способствовало уточнению цифровой модели пласта и разработке мероприятий по изменению фильтрационных потоков и обеспечению воздействия на объект испытания в целом.

Создание цифровой модели и уточнение конфигурации и поведения нефтяной линзы позволяет разработать мероприятия по мониторингу и санации геосреды. Например, уточнение точек ввода saniрующих реагентов снижает негативную нагрузку при восстановлении нарушенной экосистемы. Исследование модели для создания новых скважин может увеличить дебит полезного флюида в 1,4 раза.

Авторами были использованы методы численного и объемного моделирования, учитывающие различия условий залегания техногенных линз и месторождений природного углеводородного сырья. Указанный комплекс исследований позволил оценить взаимодействие накопленных под предприятиями нефтепродуктов с элементами окружающей среды, предложить способы извлечения товарных углеводородов и обеспечить последующую очистку геосреды. Кроме того, разработаны методологические основы ликвидации такого рода техногенного воздействия с использованием физико-химической очистки геосреды от поллютантов нефтяного происхождения с применением поверхностно-активных веществ. Предлагаемая технология дает возможность эффективно провести санацию загрязненной породы и интенсифицировать извлечение товарных нефтепродуктов, накопленных в форме линзы под территориями нефтеперерабатывающих заводов.

Литература

1. **Ахмадова Х.Х., Махмудова Л.Ш., Мусаева М.А.** Грозненские техногенные залежи углеводородов: история, добыча, переработка, экологические проблемы. В мире научных открытий. Красноярск. Научно-инновационный центр. 2013. № 1.1 (37). С. 258–283.
2. **Суханов В.П.** Переработка нефти: Учебник для средних проф.-техн. учеб. заведений. М., Высш. школа, 1979. 335 с.
3. **Требинг Г.Ф., Чарыгин Н.В., Обухова Т.М.** Нефти месторождений Советского Союза. Справочник. М., Недра, 1980. 583 с.
4. **Горная энциклопедия: В 5 т. Гл. ред. Е.А. Козловский. М., Сов. энцикл., 1984–1991.**
5. **Бабицкая К.И., Царьков И.В., Коновалов В.В.** Мицеллярный раствор селективного действия для интенсификации добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока. Нефтепромысловое дело. 2016. № 8. С. 31–34.
6. **Kwan K., Hyun C. Bo, Jang S.B., Jang H.Y.** Surfactant flooding characteristics of dodecylalkylsulfate for enhanced oil recovery. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. Vol. 20. P. 228–233.
7. **Wang Zh., Pang R., Le X., Peng Zh., Hu Zh., Wang X.** Survey on injection-production status and optimized surface process of ASP flooding in industrial pilot area. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2013. Vol. 111. P. 178–183.
8. **Сургучев М.Л.** Опытнo-промышлeнныe эксперимeнты мицeллeрнo-полимернoгo заводнения с целью увеличения нефтeотдачи пластов на месторождениях США. Нефтепромысловое дело. М., ВНИИОЭНГ. 1983. 48 с.
9. **Программная платформа Petrel [Электронный ресурс] URL: <http://sis.slb.ru/products/petrel/> (дата обращения 20.11.2018).**
10. **Бабицкая К.И.** Интенсификация добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока мицеллярными растворами селективного действия. Дис. ... канд. техн. наук. Татар. науч.-исслед. и проек. ин-т нефти ПАО "Татнефть" им. В.Д. Шашина, Бугульма, 2017. 124 с.
11. **Pat. 2535858 РФ.** Коагулянт для очистки воды преимущественно от нефтепродуктов. МПК C02 F 1/52 B01D 21/01 C02F 101/32. А.А. Елагин, М.А. Миронов, В.С. Пономарев, И.Д. Шулeпов; заявитель и патентообладатель ООО "НПО БиоМикроГели". №2013123536/05; заявл. 22.05.2013; опубл. 20.12.2014. Бюл. 35.
12. **Пахоль Ю.О.** Очистка сточных вод с использованием высокомолекулярных реагентов. VIII Междунар. науч. конф. аспирантов и студентов "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов". Донецк, ДонНТУ, 2009. Т. 1. С. 121–122.
13. **Аксенов В.И., Аникин Ю.В., Галкин Ю.А., Ничкова И.И., Ушакова Л.И., Царев Н.С.** Применение флокулянтов в системах водного хозяйства: учебное пособие. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2008. 92 с.

References

1. **Akhmadova Kh.Kh., Makhmudova L.Sh., Musaeva M.A.** Groznenskie tekhnogennye zalezhi uglevodorodov: istoriya, dobycha, pererabotka, ekologicheskie problemy. V mire nauchnykh otkrytii. Krasnoyarsk. Nauchno-innovatsionnyi tsentr. 2013. № 1.1 (37). S. 258–283.
2. **Sukhanov V.P.** Pererabotka nefiti: Uchebnik dlya srednikh prof.-tekhn. ucheb. zavedenii. M., Vyssh. shkola, 1979. 335 s.
3. **Trebing G.F., Charygin N.V., Obukhova T.M.** Nefti mestorozhdenii Sovetskogo Soyuz. Spravochnik. M., Nedra, 1980. 583 s.
4. **Gornaya entsiklopediya: V 5 t. Gl. red. E.A. Kozlovskii. M., Sov. entsikl., 1984–1991.**
5. **Babitskaya K.I., Tsar'kov I.V., Konovalov V.V.** Mitsellyarnyi rastvor selektivnogo deistviya dlya intensifikatsii dobychi vysokovyazkoi nefiti i ogranicheniya vodopritoka. Neftpromyslovoe delo. 2016. № 8. S. 31–34.
6. **Kwan K., Hyun C. Bo, Jang S.B., Jang H.Y.** Surfactant flooding characteristics of dodecylalkylsulfate for enhanced oil recovery. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. Vol. 20. P. 228–233.
7. **Wang Zh., Pang R., Le X., Peng Zh., Hu Zh., Wang X.** Survey on injection-production status and optimized surface process of ASP flooding in industrial pilot area. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2013. Vol. 111. P. 178–183.
8. **Surguchev M.L.** Opytno-promyshlennye eksperimenty mitsellyarnopolimernogo zavodneniya s tsel'yu uvelicheniya nefteotdachi plastov na mestorozhdeniyakh SShA. Neftpromyslovoe delo. M., VNIIO-ENG. 1983. 48 s.
9. **Programmная платформа Petrel [Elektronnyi resurs] URL: <http://sis.slb.ru/products/petrel/> (data obrashcheniya 20.11.2018).**
10. **Babitskaya K.I.** Intensifikatsiya dobychi vysokovyazkoi nefiti i ogranicheniya vodopritoka mitsellyarnymi rastvorami selektivnogo deistviya. Dis. ... kand. tekhn. nauk. Tatar. nauch.-issled. i proek. in-t nefiti PAO "Tatneft" im. V.D. Shashina, Bugul'ma, 2017. 124 s.
11. **Pat. 2535858 RF.** Koagulyant dlya ochestki vody preimushchestvenno ot nefteproduktov. MPK C02 F 1/52 B01D 21/01 C02F 101/32. A.A. Elagin, M.A. Mironov, V.S. Ponomarev, I.D. Shulepov; zayavitel' i patentoobladatel' ООО "NPO BioMikroGeli". №2013123536/05; zayavl. 22.05.2013; opubl. 20.12.2014. Byul. 35.
12. **Pakhol' Yu.O.** Ochestka stochnykh vod s ispol'zovaniem vysokomolekulyarnykh reagentov. VIII Mezhdunar. nauch. konf. aspirantov i studentov "Okhrana okruzhayushchei sredy i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov". Donetsk, DonNTU, 2009. T. 1. S. 121–122.
13. **Aksenov V.I., Anikin Yu.V., Galkin Yu.A., Nychkova I.I., Ushakova L.I., Tsarev N.S.** Primenenie flokulyantov v sistemakh vodnogo khozyaistva: uchebnoe posobie. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2008. 92 s.

Д.Е. Быков – д-р техн. наук, ректор, Самарский государственный технический университет, 443100 Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244 • К.Л. Чертес – д-р техн. наук, профессор, e-mail: chertes2007@yandex.ru • Е.Н. Петренко – аспирант, e-mail: shn.007@mail.ru • О.В. Тупицына – д-р техн. наук, профессор • В.Н. Пыстин – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник • А.А. Подьячев – канд. техн. наук, доцент

D.E. Bykov – Dr. Sci. (Eng.), Rector, Samara State Technical University, 443100 Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Str. 244 • K.L. Chertes – Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: chertes2007@yandex.ru • E.N. Petrenko – Post-graduate Student, e-mail: shn.007@mail.ru • O.V. Tupitsyna – Dr. Sci. (Eng.), Professor • V.N. Pystin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow • A.A. Pod'yachev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor