

О ПЕРСПЕКТИВАХ ЗАМЕНЫ ТЕХНОЛОГИЙ СТАТИЧЕСКОГО ОТСТАИВАНИЯ НА ВИХРЕВЫЕ ПРОТОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОКОВ

А.М. Гонопольский, С.А. Половков, Г.Г. Кутаев

Российский государственный университет нефти и газа (научно-исследовательский университет) имени И.М. Губкина, ООО "НИИ Транснефть"

Обоснованы перспективы использования проточных вихревых акустических технологий на нефтеперекачивающих станциях с целью интенсификации процессов очистки стоков по сравнению с традиционными технологиями гравитационного отстаивания и архимедовой флотации.

Ключевые слова: вихревые проточные технологии, очистка стоков, нефтеперекачивающие станции, статическое отстаивание

About Prospects of Replacement of Technologies of Static Upholding by Vortex Flowing Technologies of Cleaning of Drains

A.M. Gonopolsky, S.A. Polovkov, G.G. Kutaev

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), 119991 Moscow, Russia, LLC "The Pipeline Transport Institute", 117186 Moscow, Russia

Prospects of use of flowing vortex acoustic technologies at oil pumping stations, for the purpose of an intensification of processes of cleaning of drains in comparison with traditional technologies of gravitational upholding and Archimedean flotation are proved.

Keywords: vortex flowing technologies, cleaning of drains, oil pumping stations, technologies of static upholding

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-08-16-19



Одним из важнейших факторов, характеризующих экологическую безопасность очистных сооружений нефтеперекачивающих станций, является производительность по объему очищенного стока до природоохранных нормативов. Из данных работы [1] следует, что время пребывания сточных вод в резервуарах варьируется от 24 ч до 14 дней. В часы максимального притока (во время снеготаяния) время пребывания сточных вод в резервуарах минимально (особенно при одновременном сливе талых вод из каре резервуаров). При

этом процесс очистки стока, поступающего в резервуары статического отстаивания, ничем не управляется, ибо происходит только под действием гравитационных и архимедовых сил, поэтому существует ненулевая вероятность сброса недостаточно очищенного стока на рельеф. В то же время, в работах [2–4] были теоретически обоснованы эффекты интенсификации тепло- и массообменных процессов, основанные на возбуждении вихревых акустических течений в жидкости. В зависимости от амплитудно-частотных характеристик источников ко-

лебаний и размера частиц дисперсной фазы физико-химические процессы приводят либо к интенсификации процессов перемешивания частиц в потоке (крупномасштабные вихревые акустические течения Эккерта) [5], либо к изменению параметров турбулентного моля в потоке с частицами дисперсной фазы (средне-масштабные акустические течения Рэлея) [6], либо к возникновению вихревых течений в пограничном слое на частице (мелкомасштабные акустические течения Шлихтинга) [7]. В результате меняются интенсивность межфазного взаимодействия, скорости химических реакций на границах фаз [8], и, как следствие, эффективность сепарационных процессов в очистных сооружениях и аппаратах.

Особое значение такие методы приобретают в технологиях очистки стоков как в промышленности, так и в жилищно-коммунальном хозяйстве. В аппаратуре отстаивания вместо процессов диффузионного массопереноса реализуется управляемый вихревой массоперенос с интенсивностью на один-два порядка большей стационарного, т.е. процессы фильтрации, седиментации и флотации резко интенсифицируются, что и подтверждается экспериментом [9–12].

Однако, как показал анализ существующих конструкций аппаратов для гравитационного отстаивания на соответствие требованиям СТО-СА-03-002-2009 "Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов", вибрационные нагрузки ультразвукового и звукового диапазонов могут приводить к сверхнормативному повышению риска разрушения сварных швов и крепежных элементов. По этой причине целью наших исследований была разработка технологий и аппаратуры для

Результаты двухстадийной обработки реального нефтесодержащего стока [9] с предварительной УЗ-активацией реагентов*

The results of the two-stage treatment of real oil-containing runoff [9] with preliminary ultrasound activation of reagents *

Показатель	Состав стока		
	Усредненный исходный на НПС	После седиментации	После флотации
Содержание, мг/л:			
нефтепродуктов	28	27,2	0,92
взвешенных веществ	120	32	32
сухого остатка	744	80	75
ХПК, мгО ₂ /л	260	160	22,7
БПК ₅ , мгО ₂ /л	162,5	42,5	42,35

*T = 20 °C; pH = 7,5; f = 20 кГц; амплитуда δ = 15 мкм при интенсивности УЗ-облучения 1,7 Вт/см², t = 30 мин и концентрации реагента АКФК = 20 мг/л (по Al₂O₃).

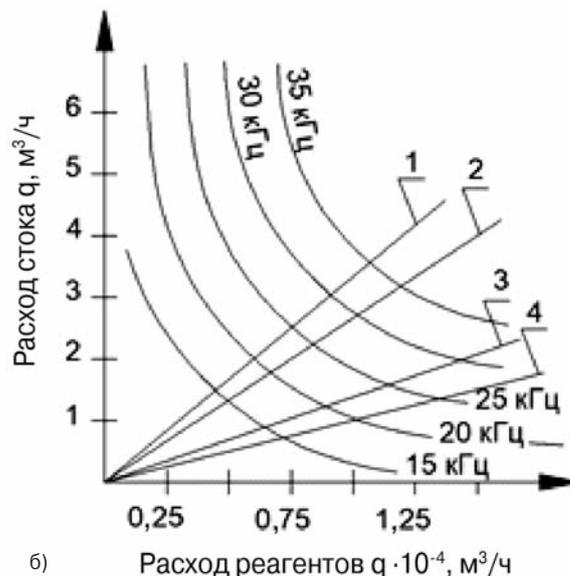
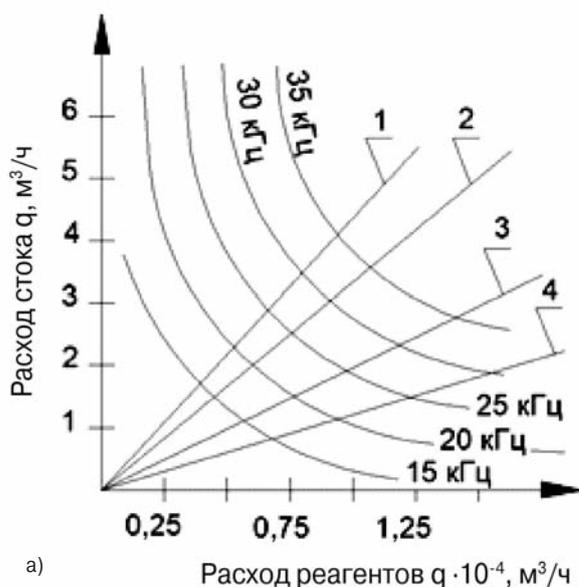
интенсификации сепарации стока вне аппаратов для гравитационного отстаивания. Как было показано в работах [9, 10], достижение указанной цели оказалось возможным при предварительной ультразвуковой активации реагентов за пределами аппаратов для гравитационного отстаивания и их смешении со стоком на входе в аппараты. Согласно теории изотропной однородной турбулентности Колмогорова-Обухова, механизм ультразвуковой активации реагентов состоит в том, что в потоке раствора реагентов, при возникновении регулярных монохромных ультразвуковых волн, формируется изотропная вихревая структура типа вихрей Рэлея. Когда этот вихревой поток реагента вводится в поток сточных вод, диффузионный межфазный массообмен вихрей со стоком (происходящий в традиционных емкостных сооружениях для отстаивания) трансформируется в вихревой массообмен. При этом коэффициенты массопереноса от вихрей реагента к очищаемому стоку соответствуют локально-турбулентному процессу, т.е. возрастают на несколько порядков [14]. Таким образом, интенсивность очистки стока резко возрастает, а время очистки столь же резко снижается. Здесь же показано, что рассеяние энергии в изотропной вихревой струк-

туре не подчиняется гипотезе Прандтля, а происходит ступенчато на протяжении длительного времени.

Эти теоретические результаты были экспериментально подтверждены в работах [9–13], где системно исследована комплексная технология интенсификации процессов сепарации многокомпонентных стоков, поступающих на нефтеперекачивающие станции (НПС).

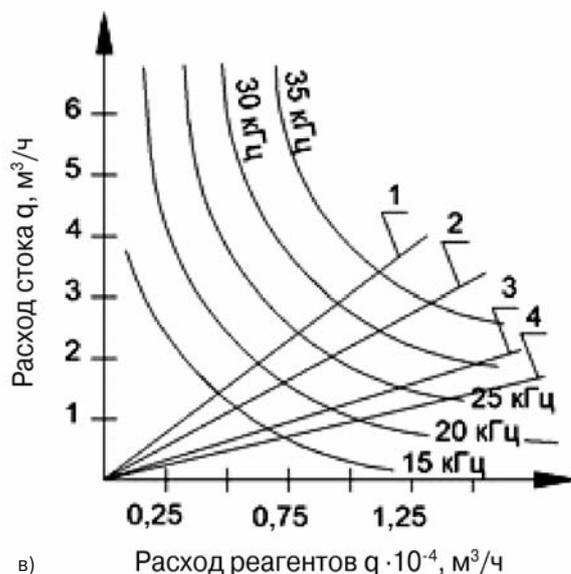
Технология включает в себя обработку нефтесодержащего стока флокулянтами и коагулянтами, прошедшими предварительную ультразвуковую (далее — УЗ) активацию. Как видно из таблицы, УЗ-активация реагентов существенно влияет на концентрации тех загрязнителей, которые представлены в стоке взвешями, органическими агломератами и микробиологическими субстанциями. Размеры частиц и агломератов составляют в среднем десятки микрон, что согласно теории Рэлея [6] приводит к их взаимодействию с вихрями реагентов тех же размеров, генерируемых на частотах порядка десятков килогерц.

Концентрации остальных загрязнителей реального стока [9], представленных в ионно-молекулярной форме, при обработке УЗ-активированными реагентами не изменились, что согласно теории Рэлея [6] может свидетельство-



а)

б)



в)

Технологические характеристики проточной установки сепарации нефтесодержащего стока при эффективности сепарации 99,5 % (а), 97 % (б) и 95 % (в) при амплитуде ультразвуковых волн $\delta = 5$ (а), 10 (б) и 15 (в) мкм для различных наборов и концентраций активируемых реагентов:

- 1 – Аква-аурат 30 – 5 мг/л и Праестол 852 – 5 мг/л;
- 2 – Аква-аурат 30 – 10 мг/л и Праестол 852 – 6 мг/л;
- 3 – Аква-аурат 30 – 20 мг/л и Праестол 852 – 8 мг/л;
- 4 – Аква-аурат 30 – 30 мг/л и Праестол 852 – 10 мг/л

Technological characteristics of the flow-through unit for separation of oil-containing runoff with separation efficiency of 99.5 % (a), 97 % (b) and 95 % (c) with the amplitude of ultrasonic waves $\delta = 5$ (a), 10 (b) and 15 (c) μm for different kits and concentrations of activated reagents:

- 1 – Aqua Aurate 30 – 5 mg/l and Praestol 852 – 5 mg/l;
- 2 – Aqua Aurate 30 – 10 mg/l and Praestol 852 – 6 mg/l;
- 3 – Aqua Aurate 30 – 20 mg/l and Praestol 852 – 8 mg/l;
- 4 – Aqua Aurate 30 – 30 mg/l and Praestol 852 – 10 mg/l

вать об отсутствии взаимодействия вихрей Рэля со столь малыми субстанциями в стоке. Возможно, что такое взаимодействие может быть обнаружено при более высоких частотах [2], но тогда следует анализировать их взаимодействия с вихрями Шлихтинга.

С целью построения технологической схемы в развитие исследований [9, 15] были экспериментально определены расходные характеристики предлагаемой технологии. Эксперименты проводились на той же лабораторной

установке, что и в работе [9]. При седиментации для определения расхода осадок отбирали гидроэлеватором из придонной области емкости со стоком. Пробу осадка, объемом 100 мл взвешивали, высушивали при температуре 60 °С в течение 24 ч и повторно взвешивали вместе с пробоотборной емкостью. При флотации для определения расхода осадок отбирали поверхностным скребком из емкости со стоком и подвергали тем же операциям. Результаты экспериментов при тех же значениях частот, ам-

плитуд и наборах реагентов представлены на рисунке.

Представленные в настоящей работе результаты показывают, что предварительная УЗ-активация химических реагентов позволяет существенным образом повысить скорость сепарации нефтезагрязненных стоков, снизить затраты при строительстве и эксплуатации очистных сооружений благодаря снижению расхода химического реагента и рабочих объемов технологического оборудования, создать новые технологические схемы очистки стоков.

Литература

1. **Половков С.А.** Интенсификация процессов сепарации стоков на нефтеперекачивающих станциях. Дисс. ... канд. техн. наук: 03.02.08. М., 2018. 224 с.
2. **Накоряков В.Е. и др.** Тепло- и массообмен в звуковом поле. Под ред. С.С. Кутателадзе. Новосибирск, ИТФ СО АН СССР, 1970. 253 с.
3. **Кутепов А.М., Полянин А.Д., Запryanov З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А.** Химическая гидродинамика. Справочное пособие. М., Квантум, 1996. 336 с.
4. **Муллагаев М.С., Бутков В.В., Чепура И.В., Андреев Е.Ф.** Методы физико-химической гидродинамики в процессах и аппаратах химической технологии. Калуга, изд. ООО Ноосфера, 2010. 331 с.
5. **Руденко О.В.** Теоретические основы нелинейной акустики. М., Наука, 1975. 287 с.
6. **Стретт Дж. В.** (лорд Рэлей). Теория звука. М., ГИТТЛ, 1955. Т. 1. 503 с. Т. 2. 474 с.
7. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М., Наука, 1974. 711 с.
8. **Гупало Ю.П., Полянин А.Д., Рязанцев Ю.С.** Массотеплообмен реагирующих частиц с потоком. М., Наука, 1985. 336 с.
9. **Мещеряков С.В., Гонопольский А.М., Муллакаев М.С., Половков С.А., Николаева А.В.** Реагентно-ультразвуковая интенсификация процесса седиментации поверхностных стоков на нефтеперекачивающих станциях. Экология и промышленность России. Т. 22. № 2. 2018. С. 8–12.
10. **Гонопольский А.М., Стомпель С.И., Ладьгин К.В.** Критериальное обобщение результатов экспериментальных исследований процесса ультразвуковой очистки обратноосмотических мембран. Экология и промышленность России. 2014. № 8. С. 28–31.
11. **Мурадов А.В., Мещеряков С.В., Половков С.А., Николаева А.В., Гонопольский А.А.** Сравнительный анализ технологических схем флотационной очистки сточных вод на нефтеперекачивающих станциях. Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 4. С. 8–12.
12. **Половков С.А., Мещеряков С.В., Гонопольский А.М., Иванов М.В.** Интенсификация реагентной очистки нефтесодержащих сточных вод методом виброакустического воздействия. Безопасность в техносфере. 2018. Т. 6. № 6. С. 25–32.
13. **Половков С.А. и др.** Технология виброакустической интенсификации очистки нефтесодержащих стоков. Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Т. 8. № 3. С. 352–359.
14. **Колмогоров А.Н.** Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности. ДАН СССР. 1941. 32. № 1. С. 19–21.
15. **Половков С.А.** Обеспечение промышленной безопасности, охраны труда и экологии в организации системы "Транснефть". Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 2(22). С. 28–31.

References

1. **Polovkov S.A.** Intensifikatsiya protsessov separatsii stokov na nefteperekachivayushchikh stantsiyakh. Diss. ... kand. tekhn. nauk: 03.02.08. M., 2018. 224 s.
2. **Nakoryakov V.E. i dr.** Teplo- i massoobmen v zvukovom pole. Pod red. S.S. Kutateladze. Novosibirsk, ITF SO AN SSSR, 1970. 253 s.
3. **Kutepov A.M., Polyaniin A.D., Zapryanov Z.D., Vyaz'min A.V., Kazenin D.A.** Khimicheskaya gidrodinamika. Spravochnoe posobie. M., Kvantum, 1996. 336 s.
4. **Mullakaev M.S., Butkov V.V., Chepura I.V., Andreev E.F.** Metody fiziko-khimicheskoi gidrodinamiki v protsessakh i apparatakh khimicheskoi tekhnologii. Kaluga, izd. OOO Noosfera, 2010. 331 s.
5. **Rudenko O.V.** Teoreticheskie osnovy nelineinoi akustiki. M., Nauka, 1975. 287 s.
6. **Strett Dzh. V.** (lord Relei). Teoriya zvuka. M., GITTL, 1955. T. 1. 503 s. T. 2. 474 s.
7. **Shlikhting G.** Teoriya pogranchnogo sloya. M., Nauka, 1974. 711 s.
8. **Gupalo Yu.P., Polyaniin A.D., Ryazantsev Yu.S.** Massoteploobmen reagiryushchikh chastits s potokom. M., Nauka, 1985. 336 s.
9. **Meshcheryakov S.V., Gonopol'skii A.M., Mullakaev M.S., Polovkov S.A., Nikolaeva A.V.** Reagentno-ul'trazvukovaya intensivatsiya protsessa sedimentatsii poverkhnostnykh stokov na nefteperekachivayushchikh stantsiyakh. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. T. 22. № 2. 2018. S. 8–12.
10. **Gonopol'skii A.M., Stompel' S.I., Ladygin K.V.** Kriterial'noe obobshchenie rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy protsessa ul'trazvukovoi ochistki obratnoosmoticheskikh membran. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2014. № 8. S. 28–31.
11. **Muradov A.V., Meshcheryakov S.V., Polovkov S.A., Nikolaeva A.V., Gonopol'skii A.A.** Sravnitel'nyi analiz tekhnologicheskikh skhem flotatsionnoi ochistki stochnykh vod na nefteperekachivayushchikh stantsiyakh. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2017. T. 21. № 4. S. 8–12.
12. **Polovkov S.A., Meshcheryakov S.V., Gonopol'skii A.M., Ivanov M.V.** Intensifikatsiya reagentnoi ochistki neftesoderzhashchikh stochnykh vod metodom vibroakusticheskogo vozdeistviya. Bezopasnost' v tekhnosfere. 2018. T. 6. № 6. S. 25–32.
13. **Polovkov S.A. i dr.** Tekhnologiya vibroakusticheskoi intensivatsii ochistki neftesoderzhashchikh stokov. Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nef'ti i nefteproduktov. 2018. T. 8. № 3. S. 352–359.
14. **Kolmogorov A.N.** Rasseyanie energii pri lokal'no izotropnoi turbulentsii. DAN SSSR. 1941. 32. № 1. S. 19–21.
15. **Polovkov S.A.** Obespechenie promyshlennoi bezopasnosti, okhrany truda i ekologii v organizatsiyakh sistemy "Transneft". Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nef'ti i nefteproduktov. 2016. № 2(22). S. 28–31.

А.М. Гонопольский – д-р техн. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (научно-исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т 65, e-mail: amgonopolsky@mail.ru • С.А. Половков – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ООО "НИИ Транснефть", 117186 Россия, г. Москва, Севастопольский проспект 47а • Г.Г. Кутаев – магистр, Российский государственный университет нефти и газа (научно-исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т 65, e-mail: gkutaev@mail.ru

A.M. Gonopolsky – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), 119991 Russia, Moscow, Leninsky prospect 65, e-mail: amgonopolsky@mail.ru • S.A. Polovkov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, LLC "The Pipeline Transport Institute", 117186 Russia, Moscow, Sevastopolskiy prospect 47a • G.G. Kutaev – magister, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), 119991 Russia, Moscow, Leninsky prospect 65, e-mail: gkutaev@mail.ru