



УДК 628.3.622.5

А.А. Адельшин – аспирант, инженер

А.Б. Адельшин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения и водоотведения

Р.А. Каюмов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и основ теории упругости

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ УСТАНОВКИ С ЗАКРУЧЕННЫМ ТЕЧЕНИЕМ

АННОТАЦИЯ

Исследованиями создана технология очистки нефтепромысловых сточных вод (НСВ), которая предусматривает предварительное разрушение бронирующих оболочек на каплях нефти, укрупнение и уменьшение полидисперсности капель нефти за счет гидродинамической обработки исходной НСВ в закрученных потоках аппарата, включающего: гидроциклон, цилиндрические камеры на сливах гидроциклона (ГКС). Получены математические модели гидродинамики аппарата ГКС и установки, включающей блок гидроциклон – камеры сливов – отстойник (БГКО). Экспериментами показана адекватность разработанных математических моделей гидродинамики аппарата ГКС и в целом по БГКО.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Установка, очистка воды, закрученный поток, распределение, капля.

A.A. Adelshin – post-graduate student, engineer

A.B. Adelshin – doctor of technical sciences, professor, head of Water Supply and Water-Drainage department

R.A. Kayumov – doctor of physical-mathematical sciences, professor, head of Materials Resistance and Foundations of the Elasticity Theory department

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HYDRODYNAMICS OF SWIRLING FLOWS PLANT

ABSTRACT

The technology for oil-field sewage (OFS) cleaning was developed. It provides preliminary destruction of armoring shells on the oil drops, agglomeration and decreasing of polydispersiveness of the oil drops by hydrodynamic treatment of initial OFS in swirling flows of plant, including hydrocyclone, cilindric chambers at the hydrocyclone discharges (HCD). The mathematical models of hydrodynamics of HCD and block of hydrocyclone - the discharges chambers - a Sedimentation tank (BHCS) have been developed. The adequacy of developed mathematical models of hydrodynamics of HCD and BHCS plants has been shown.

KEYWORDS: Plant, water purification, swirling flow, distribution, drop.

Исследованиями создана технология очистки нефтепромысловых сточных вод (НСВ) для утилизации их в системах заводнения нефтяных пластов. Технология предусматривает предварительное разрушение бронирующих оболочек на каплях нефти, укрупнение и уменьшение полидисперсности капель нефти гидродинамической обработкой исходной НСВ в закрученных потоках [1-8].

Технология реализована в установках очистки НСВ по схеме: «гидроциклон – цилиндрические камеры на верхнем и нижнем сливах гидроциклона – отстойник» (установки типа БГКО) [9-16]. При этом различные

схемы «гидроциклон – камеры сливов» [7] в сущности образуют гидродинамические центробежные каплеобразователи (в дальнейшем сокращенно аппарат ГКС), которые конструктивно скомпонованы в единый блок с отстойниками установки БГКО. В составе установки БГКО (в т.ч. ГКС) гидроциклон служит для предварительной гидродинамической обработки НСВ: разрушения стабилизированных частиц примесей, бронирующих оболочек нефтяных капель и их коалесценции и уменьшения полидисперсности капель нефти, а также для получения закрученного потока в камерах сливов. С целью увеличения времени наиболее

полной эффективной гидродинамической обработки НСВ в объеме закрученного потока в составе аппарата ГКС предусмотрены цилиндрические камеры на сливах гидроциклона. Длина и диаметр камер устанавливаются в зависимости от геометрических и технологических параметров гидроциклона [1, 2, 7].

После гидроциклона в камерах его сливов осуществляется гидродинамическая обработка НСВ последовательно во всех областях турбулентного закрученного потока – в зонах: расширения закрученной струи, стабильного закрученного течения, затухания закрученного течения, переходного и осевого потенциального течения, циркуляционных и тороидальных. В сливных камерах НСВ подвергается наиболее универсальной комплексной обработке по наиболее полному числу и количеству различных видов сил воздействия на частицы нефти в НСВ, что способствует интенсификации коалесценции капель нефти. При этом теоретическими исследованиями получены дифференциальные функции распределения времени пребывания жидкости в рабочем объеме аппаратов ГКС и в целом для установки БГКО [4, 8].

Для подтверждения результатов теоретических исследований процессов гидродинамики создана экспериментальная установка (рис. 1), состоящая из узлов: гидроциклон 1, цилиндрическая камера нижнего слива 2, цилиндрическая камера верхнего слива 3, емкость исходной воды 4, центробежный насос 5, отстойник 6, дозирующее устройство 7, контрольно-измерительных приборов, запорно-регулирующей арматуры. Масштаб линейных и угловых размеров гидроциклона в модели и в натуральных условиях

приняты 1:1. Геометрические размеры гидроциклона: диаметр $D = 75$ мм, угол конусности $\alpha = 5^\circ$; диаметры: входного патрубка $d_{\text{вх}} = 15$ мм, верхнего слива $d_{\text{в.сл.}} = 20$ мм, нижнего слива $d_{\text{н.сл.}} = 26$ мм, глубина погружения верхнего патрубка $h_{\text{п}} = 48$ мм, высота цилиндрической части гидроциклона $H_{\text{ц}} = 48$ мм; гидроциклон скомплектован насадками диаметрами: для верхнего слива 20, 20.5, 21, 21.5, 22 мм; для нижнего слива 16, 18, 20, 22, 24 мм. Камеры 2 и 3 оборудованы пробоотборниками с вентилями П-1, П-3, П-4, П-6, установленными на расстоянии 70 мм от начала и конца камер 2 и 3, и пробоотборниками с вентилями П-2, П-5 на расстоянии 1000 мм от начала камер и П-7 на входе гидроциклона 1, а также образцовыми манометрами 8, установленными на расстоянии 200 мм от начала и конца камер 2 и 3, и манометрами 9 и 10 на напорном трубопроводе 11 насоса 5 и на отстойнике 6 соответственно.

Емкость исходной воды 4 размерами $1040 \times 1020 \times 800$ мм служит для накопления необходимого количества воды при опытах.

Центробежный насос 5 производительностью до 10 м³/ч, напором до 6 кгс/см, при числе оборотов в минуту 2500. На всасывающем трубопроводе 12 насоса 5 установлено устройство для дозирования 7 через шаровой кран К13. Устройство 7 представляет собой градуированный по объему (в миллиметрах) прозрачный сосуд высотой 250 мм, диаметром 100 мм и служит для дозированного ввода раствора (импульсного ввода индикатора) в исходную воду, подаваемую насосами 5 из емкости 4 в гидроциклон 1.

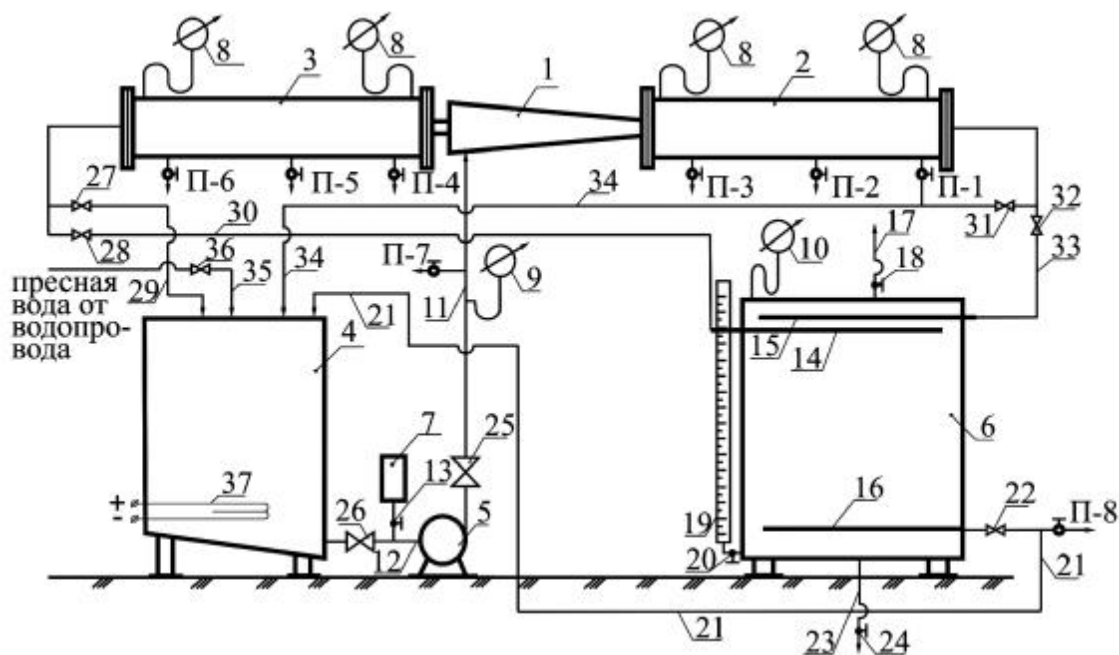


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки



Отстойник 6 напорный, диаметром 800 мм, высотой 1250 мм оборудован: трубчатыми перфорированными распределителями потоков из верхнего слива 14 и из нижнего слива 15, трубчатым перфорированным устройством 16 для сбора очищенной воды, патрубком 17 с вентилем 18 для удаления воздуха, мерным стеклом 19 с миллиметровой градуировкой по высоте и с вентилем 20; водоотводящими трубопроводами 21, задвижкой 22 с пробоотборником с вентилем П-8, патрубком 23 с вентилем 24 для опорожнения отстойника 6.

Экспериментальная установка оборудована также задвижками: 25 на напорном трубопроводе насоса 5, 26 на всасывающем трубопроводе насоса 5; 27 и 28 на водоотводящих трубопроводах 29 и 30 камеры 3 верхнего слива гидроциклона 1; 31 и 32 на водоотводящих трубопроводах 33 и 34 камеры 2 нижнего слива гидроциклона 1; а также трубопроводом 35 пресной воды от водопровода с задвижкой 36; водонагревателем 37.

В процессе исследований использованы следующее оборудование и приборы: расход жидкости определялся объемным способом при помощи мерных цилиндров (ГОСТ 17770-74) и секундомера СОП ПР-2а-3-000 «Агат» 4282 (ГОСТ 5079) с погрешностью хода $\pm 0,4$ с. При измерении расхода жидкости делалось не менее трех замеров. Общий расход жидкости через гидроциклон – камеры сливов – отстойник определялся как сумма расходов камер нижнего и верхнего сливов и проверялся на выходе из отстойника.

Измерение давления на входе в гидроциклон 1, на выходе сливов гидроциклона 1 (т.е. в начале камер сливов), на выходе камер верхнего 3 и нижнего 2 сливов, в отстойнике 6 осуществлялось образцовыми манометрами типа МО модели 11202 верхним пределом измерения 1,0 МПа (10 кгс/см), класс точности 0,4.

Температура жидкости измерялась ртутным термометром (ГОСТ 823-73) с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$.

При исследованиях в качестве индикатора использовался химически чистый хлористый натрий (NaCl). Концентрация индикатора в воде определялась с помощью кондуктометра типа АНИОН 4120, обеспечивающего измерение значений величин: степени минерализации растворов в пересчете на хлористый натрий в пределах от 1 мг/л до 20 г/л с погрешностью $\pm 5\%$; автоматической температурной компенсации результатов измерений; вывод результатов измерений в единицах мг/л, мСм/см; цифрового представления результатов измерения.

В соответствии с теоретическими исследованиями [4, 8], эксперименты проводились по технологическим схемам (см. рис. 1): а) емкость 4 – насос 5 – гидроциклон 1 – камера нижнего слива 2; б) емкость 4 – насос 5 – гидроциклон 1 – камера верхнего слива 3; в) емкость 4 – насос 5 – гидроциклон 1 – камеры нижнего 2 и

верхнего 3 сливов – отстойник 6.

Перед проведением опытов система заполнялась пресной водопроводной водой, затем включался в работу насос 5 и система вводилась в режим циркуляции по указанным выше технологическим схемам продолжительностью 8-10-кратного обмена суммарного объема гидроциклона 1 и камер нижнего 2 и верхнего 3 сливов. Далее система вводилась в соответствующий режим работы: задвижкой 25 устанавливался расход воды, при этом давление на входе 11 в гидроциклон 1 фиксировалось манометром 9.

Навеска NaCl растворялась в 500 мл воды и тщательно перемешивалась до получения насыщенного раствора. Полученный раствор индикатора заливался в дозирующую емкость 7. Ввод индикатора в систему производился импульсным методом [17], сущность которого заключалась в том, что в момент времени $\tau = 0$ на всас 12 насоса 5 залпом вводилась доза NaCl. Для этого открывался шаровой кран 13 и под действием вакуума на участке всасывающего трубопровода 12 перед насосом 5 происходило мгновенное опорожнение дозирующей емкости 7 до заданной нижней отметки; продолжительность процесса ввода индикатора не превышала 2 секунд, в то время как продолжительность пребывания жидкости в системе составляла десятки секунд.

Отбор проб воды из пробоотборников П-1 и П-6, установленных в конце цилиндрических камер 2 и 3, производился с момента ввода индикатора с интервалом в 1 секунду, а из патрубка пробоотборника П-8, установленного на выходе из отстойника 1, – через 20 секунд.

В результате экспериментальных исследований, проведенных для величины давления на входе в гидроциклон 0,4 МПа с противодавлением 0,2 МПа, получены опытные точки дифференциальных

функций $\bar{C}(\tau)$ распределения времени пребывания жидкости на выходах из цилиндрических камер нижнего 2 и верхнего 3 сливов гидроциклона 1 (рис. 2, 3), а также на выходе из отстойника 6 (рис. 4). На рисунках 2-4

представлены графики функций $\bar{C}(\tau)$, на которых сплошной линией показаны теоретические кривые, построенные по уравнениям дифференциальных функций распределения времени пребывания жидкости [4, 8], и нанесены опытные точки.

Сравнение опытных кривых с теоретическими показывает, что закономерность их изменения практически одинакова.

Как видно из рис. 2, 3, 4, результаты экспериментальных данных и теоретических расчетов близки. Для качественной оценки понятия «близость» необходимо вводить некоторые нормы для отклонений функций друг от друга, а также для самих функций. Поскольку обычные статические оценки здесь

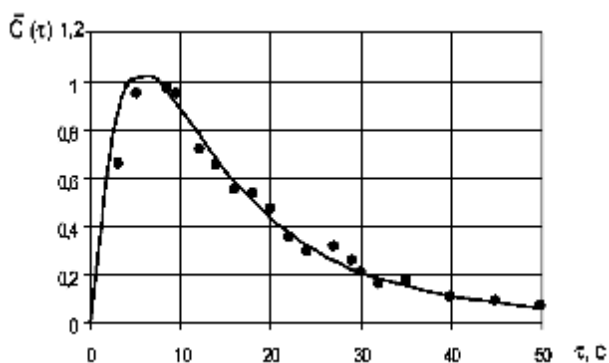


Рис. 2. — — теория; ● — эксперимент

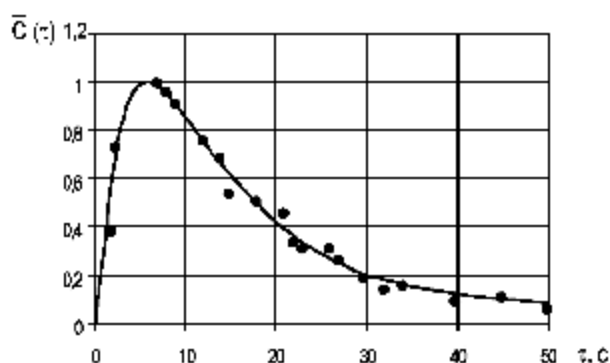


Рис. 3. — — теория; ● — эксперимент

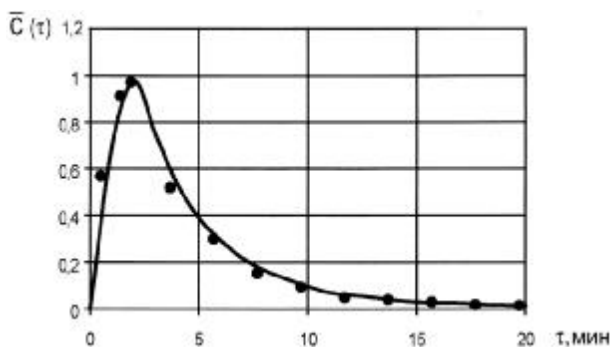


Рис. 4. — — теория; ● — эксперимент

провести невозможно, то введем следующие нормы. Во-первых, отклонения экспериментальных результатов от теоретических будем оценивать параметром (m - нормой) [18]:

$$\|\Delta \bar{C}\|_m = \left(\sum_{i=1}^n (\bar{C}_i^{\text{эксп.}} - \bar{C}_i^{\text{теор.}})^m / n \right)^{1/m}$$

Здесь n – число экспериментальных точек.

Во-вторых, некое осредненное значение функции распределения $\bar{C}$ на рассматриваемом интервале по времени определим аналогичной p – нормой:

$$\|\bar{C}\|_p = \left(\sum_{i=1}^n (\bar{C}_i)^p / n \right)^{1/p}.$$

Параметры p, m выбираются в зависимости от экспертных предпочтений. При больших p, m предпочтение отдается наибольшим значениям

функции $\bar{C}_i$ и отклонениям $|\bar{C}_i^{\text{эксп.}} - \bar{C}_i^{\text{теор.}}|$.

Относительное отклонение теоретических результатов от экспериментальных можно оценить теперь по формуле:

$$\Delta\% = \left(\|\Delta \bar{C}\|_m / \|\bar{C}\|_p \right) \cdot 100\%.$$

Ниже в таблице представлены значения D% при сравнении результатов, приведенных на рис. 2-4, для различных m и p.

Вычисления при других значениях m, p показали, что относительное отклонение D не превышает

Таблица

m, p	m = 1, p = 1	m = 1, p = 2	m = 2, p = 1	m = 2, p = 2
рис. 2	5,4 %	4,5 %	7,6 %	6,4 %
рис. 3	7,0 %	5,8 %	9,9 %	8,2 %
рис. 4	12,3 %	9,0 %	21,3 %	15,6 %



значений, полученных при $m = 2$, $p = 1$. Таким образом, даже в случае наиболее жесткой оценки результатов только в третьем эксперименте отличие теоретических расчетов от результатов натурных испытаний превышает 10 %. Все это свидетельствует о качественном и количественном, адекватном описании математическими моделями [4, 8] гидродинамики ГКС и БГКО по принятым технологическим схемам.

Литература

1. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Ланцов М.В., Адельшин А.А. Параметры закрученных струй на сливах гидроциклона // «Исследования проблем водоснабжения, водоотведения и подготовки специалистов». Межвуз. сб. научн. трудов. – Казань: КазГАСУ, 1999. – С. 137-142.
2. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Хисамеева Л.Р., Шешегова И.Г. К основным положениям разработки блочных установок очистки нефтепромысловых сточных вод с использованием закрученных потоков. – М.: Технология нефти и газа, 2007. – С. 13-17.
3. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Хисамеева Л.Р., Шешегова И.Г. Аппарат очистки нефтепромысловых сточных вод на основе использования закрученных потоков с целью заводнения нефтяных пластов // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. – Уфа, 2007. – 12 с.
4. Адельшин А.А. Дифференциальная функция распределения времени пребывания жидкости установки БГКО // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. – М.: Академия наук о Земле, 2004. Том. 2. – С. 104-105.
5. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Каюмов Р.А. Численные эксперименты по моделированию процессов коалесценции капель нефти в закрученных потоках установки БГКО // Известия КазГАСУ, 2008, № 1 (8). – С. 141-144.
6. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Каюмов Р.А. Дифференциальные функции распределения капель нефти в закрученных потоках // Поволжский научный журнал, 2008, № 4. – С. 158-163.
7. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Андреев С.Ю., Гришин Б.М. Новые технические решения для очистки нефтесодержащих сточных вод с использованием закрученных потоков // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск, 2008, № 10. – С. 64-69.
8. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Каюмов Р.А. Дифференциальные функции распределения времени пребывания жидкости в аппарате с закрученным течением // Известия КазГАСУ, 2008, № 2 (10). – С. 115-120.
9. Патент РФ №2189360. Бюл. № 26 от 20.09.2002 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Адельшин А.А.
10. Патент РФ № 2227791. Бюл. №12 от 27.04.2004 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Адельшин А.А., Каюмов Р.А.
11. Патент РФ № 2248327. Бюл. №8 от 20.03.2005 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Адельшин А.А.
12. Патент РФ № 2253623. Бюл. №16 от 10.06.2005 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Адельшин А.А.
13. Патент РФ № 2255903. Бюл. №19 от 10.07.2005 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Адельшин А.А., Каюмов Р.А., Урмитова Н.С.
14. Патент РФ № 2257352. Бюл. №21 от 27.07.2005 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Адельшин А.А.
15. Патент РФ № 2303002. Бюл. №20 от 20.07.2007 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.Б., Адельшин А.А.
16. Патент РФ №2313493. Бюл. №36 от 27.12.2007 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Файзуллин Р.Н., Сахапов Н.М.
17. Закгейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1973. – 224 с.
18. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функции и функционального анализа. – М.: Наука, Физматлит, 1976. – 543 с.