



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

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ ЖИДКОСТИ В АППАРАТЕ 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 ГКС, включающего гидроциклон, цилиндрические камеры на сливах гидроциклона.

Получены структурные схемы и математические модели гидродинамики, дифференциальные функции распределения времени пребывания жидкости аппарата ГКС, позволяющие оптимизировать режим работы ГКС.

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 department

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

THE DIFFERENTIAL FUNCTIONS OF LIQUID STAY DURATION DISTRIBUTION IN PLANT WITH SWIRLING FLOWS

ABSTRACT

The technology for oil-field sewage (OFS) cleaning is developed. It provides preliminary destruction of armoring shells on the oil drops, agglomeration and decreasing of polydispersity of the oil drops by hydrodynamic treatment of initial OFS in swirling flows of HCD - plant including hydrocyclone, cylindrical chambers at the hydrocyclone discharges. The structure charts, mathematical models of hydrodynamic, the differential functions of liquid stay duration distribution in HCD – plant are received; they allow optimizing the HCD – plant.

В настоящее время в нефтяной промышленности РФ более 90% нефти добывается на месторождениях, разрабатываемых с использованием методов заводнения продуктивных пластов с целью поддержания пластового давления. Утилизация промышленных сточных вод (НСВ) в системах заводнения является и экономически, и экологически высокоэффективной [1, 2].

Обустройство нефтяных месторождений предусматривает широкое применение установок для очистки НСВ в блочном исполнении с высоким эффектом очистки и единичной мощностью при ограниченном объеме; герметичность, транспортабельность и высокую индустриальность установок в изготовлении и монтаже. Одним из направлений в решении указанных требований являются создание новых методов аппаратов, интенсификация и совершенствование технологических процессов гидродинамического разрушения и очистки НСВ.

Сущность и эффективность процесса разрушения, очистки НСВ заключается в достаточно полном и быстром снижении агрегативной и кинетической устойчивости НСВ путем, главным образом, разрушения бронирующей оболочки на каплях нефти и их коалесценции. Эти процессы осуществляются наиболее полно и интенсивно при определенной степени турбулизации потока НСВ в полости различных аппаратов – гидродинамических каплеобразователей.

Исследованиями создана технология очистки НСВ, которая предусматривает предварительное разрушение бронирующих оболочек на каплях нефти, укрупнение и уменьшение полидисперсности капель нефти гидродинамической обработкой исходной НСВ. Технология реализована в установках очистки НСВ по схеме: гидроциклон – цилиндрические камеры на верхнем и нижнем сливах гидроциклона – отстойник (установки типа БГКО) [3-11].

При этом различные схемы «гидроциклон – цилиндрические камеры сливов» в сущности образуют



гидродинамические центробежные каплеобразователи (в дальнейшем сокращенно аппарат ГКС). В конструктивных решениях установок БГКО [4-11] гидродинамический каплеобразователь ГКС скомпонован в единый блок с отстойником и предназначен для интенсификации, повышения эффекта очистки НСВ при последующем отстаивании. При этом гидроциклон служит для предварительной гидродинамической обработки НСВ: разрушения стабилизированных частиц примесей, бронирующих оболочек нефтяных капель и их коалесценции и уменьшения полидисперсности капель нефти. В составе аппарата ГКС гидроциклон является также устройством для получения закрученного потока в камерах сливов в результате тангенциальной подачи НСВ в гидроциклон.

Время пребывания частиц нефти в гидроциклоне составляет 1,1-3 сек, что недостаточно для наиболее полной реализации известных стадий механизма разрушения НСВ [2]. С целью увеличения времени пребывания частиц нефти в объеме аппарата с закрученным течением, т.е. увеличения времени гидродинамической обработки НСВ в закрученном потоке, в составе аппарата ГКС установки БГКО предусмотрены достаточно длинные цилиндрические камеры на сливах гидроциклона. В зависимости от геометрических и технологических параметров гидроциклона диаметр и длина сливных камер могут быть разными. Сливными камерами могут служить трубопроводы обвязки. В любом случае сливные камеры выполняют транспортные и технологические функции по разрушению НСВ, в которых образуется сложное закрученное турбулентное течение, о котором количественная и качественная информация практически отсутствует. После гидроциклона в камерах сливов его гидродинамическая обработка НСВ осуществляется последовательно во всех областях потока – в зонах: расширения закрученной струи, стабильного закрученного течения, затухания закрученного течения, переходного и осевого потенциального течения, циркуляционных и тороидальных. Указанные области течения характеризуются различными качественными и количественными параметрами течения, изменяющимися по длине и объему в целом сливных камер. В сливных камерах НСВ подвергается наиболее универсальной комплексной гидродинамической обработке по наиболее полному числу и качеству различных видов сил воздействия на частиц нефти в НСВ.

Совместный анализ гидродинамических процессов и механизма разрушения НСВ по схеме БГКО показывает, что здесь максимально достигается полнота условий воздействия факторов и требуемое технологическое время для очистки НСВ и реализуются все этапы механизма разрушения, очистки НСВ при воздействии более 12 многократно действующих интенсифицирующих факторов – сил: тяжести,

центробежных, набегающего потока, столкновения капель, турбулентных пульсаций, притяжения к стенке, косоугольного удара, гидродинамического воздействия, давления потока на стенку, разрыва частиц, поверхностного натяжения, разности динамических напоров у стенки, изменяющиеся по величине и направлению градиенты скорости и давления, а также существование зон циркуляции, в т.ч. центральные тороидальные; существование подвижных инверсирующих поверхностей нулевых скоростей, границ расширения и сужения потока, процессирующего вихревого ядра. При этом продолжительность предварительной комплексной гидродинамической обработки НСВ в закрученном потоке по схеме «гидроциклон – камеры сливов» составляет 30-40 с [2, 3]. В камерах сливов гидроциклонов ГКС гидродинамические параметры потоков во всех областях способствуют получению наиболее монодисперсной системы частиц нефти наибольшего размера. При этом основными факторами процесса коалесценции являются: расход, диаметр, вязкость среды, поверхностное натяжение, концентрация и степень полидисперсности частиц нефти. Очевидно, в камерах сливов необходимо исключить возможность расслоения эмульсии, гравитационного осаждения нефтяных глобул, что обуславливает длительность воздействия, максимальное сближение, число столкновений, слияние, уменьшение полидисперсности частиц нефти, т.е. в целом эффективную коалесценцию. Для предотвращения расслоения эмульсии в камерах сливов следует поддерживать в них турбулентный режим в автомодельной области ($Re \geq 10000$) и достаточно высокое значение параметра закрутки, чтобы скорость турбулентных пульсаций потока превышала скорость гравитационного осаждения частиц нефти [3].

При построении модели структуры потока следует учитывать, что модель должна отражать физическую сущность реального потока и в то же время иметь достаточно простое математическое описание; давать возможность определить ее параметры (коэффициенты уравнений) по экспериментальным данным или расчетным способом; быть удобной для использования при расчетах конкретных технологических процессов [12]. Из этих общих требований исходят во всех случаях построения модели и, кроме того, дополняют их специфическими требованиями после выяснений особенностей, характерных для каждого конкретного случая объекта исследования.

Объекты установок очистки НСВ многообразны по устройству, неодинаковы по сложности, отличаются физической природой процессов и могут состоять из нескольких элементов, взаимосвязанных между собой. При изучении сложных объектов обычно расчленяют их на ряд звеньев и затем составляют из этих звеньев структурные схемы, которые во многих случаях

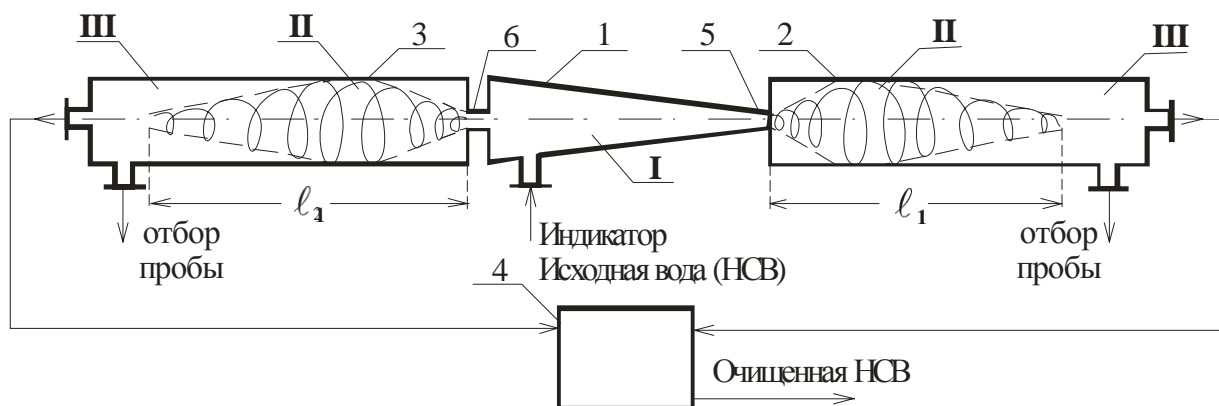


Рис. 1

облегчают нахождение математического описания объекта в целом, если предварительно составить математическое описание его отдельных звеньев. В качестве звеньев установок очистки, подготовки воды обычно выделяют участки, которые либо являются повторяющимися элементами конструкции аппарата, либо конструктивно представляют самостоятельную часть установки, либо отличаются по виду переходных процессов. Принципиально расчленение объекта на отдельные элементарные звенья не имеет предела, поэтому выбор звеньев должен производиться не произвольно, а с учетом знания о процессе и реальной возможности решения получаемых решений [12].

С учетом вышеизложенных положений рассматривается технологическая схема БГКО (в т.ч. ГКС), которая включает гидроциклон 1, цилиндрические камеры 2 и 3 и отстойник 4 (рис. 1). Исходная НСВ поступает в гидроциклон 1, в котором она подвергается гидродинамической обработке и разделению на потоки верхнего 6 и нижнего 5 сливов гидроциклона 1. Эти потоки поступают в цилиндрические камеры верхнего 3 и нижнего 2 сливов гидроциклона 1, в которых продолжается гидродинамическая обработка НСВ за счет остаточной энергии закрученных потоков. Из цилиндрических камер 2 и 3 НСВ поступает в отстойник 4, в котором происходит перемешивание поступающих потоков из камер верхнего и нижнего сливов гидроциклона и последующее отстаивание воды и нефти.

В качестве первого шага исследования нами рассмотрены гидродинамические процессы, происходящие в цилиндрических камерах верхнего и нижнего сливов ГКС.

Для аналитического решения задачи гидродинамики закрученных потоков в цилиндрических камерах рассматривается схема (см. рис. 1), которая включает гидроциклон 1, цилиндрические камеры нижнего слива 2 и верхнего слива 3. Исходная вода с расходом Q_0 поступает в гидроциклон 1 через патрубок, установленный тангенциально. Перед поступлением воды в гидроциклон в нее подается индикатор (раствор

NaCl). В гидроциклоне происходит разделение воды на два потока, которые удаляются через нижний слив 5 и верхний слив 6. Эти потоки подаются в цилиндрические камеры соответственно 2 и 3 в виде закрученных струй, длина действия которых l_1 и l_2 , соответственно. Для нахождения времени пребывания жидкости по схемам аппарата ГКС: «гидроциклон 1 – цилиндрическая камера нижнего слива 2» и «гидроциклон 1 – цилиндрическая камеры верхнего слива 3» – составлены их структурные схемы, представленные в виде трех ячеек идеального перемешивания: I ячейка – гидроциклон, II ячейка – объем камеры, соответствующий длине (l_1 и l_2) действия закрученной струи, III ячейка – объем камер равной разности объемов всей длины цилиндрических камер и объема камер, соответствующий длинам действия струи.

Структурная схема (рис. 2), состоящая (см. рис. 1) из гидроциклона 1 и цилиндрической камеры 2 нижнего слива гидроциклона представлена в виде трех ячеек идеального перемешивания. Ячейка I представляет собой объем W_1 гидроциклона 1; ячейка II – объем W_2 цилиндрической камеры 2, соответствующий длине

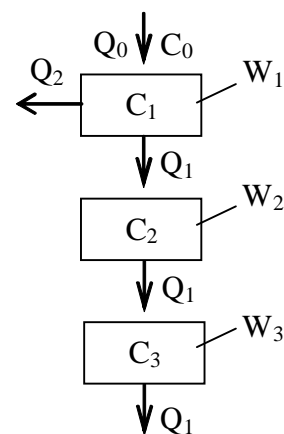


Рис. 2

действия закрученной струи I_1 ; ячейка III – объемом W_3 цилиндрической камеры 2, равной разности объемов всей длины цилиндрической камеры и объема цилиндрической камеры, соответствующего длине действия струи I_1 .

В структурной схеме (см. рис. 2) $C_0; C_1; C_2; C_3$ – концентрации индикатора, соответственно, на входе и в ячейках объемами $W_1; W_2; W_3; Q_0$ – расход жидкости, поступающей в гидроциклон 1; Q_1 – расход жидкости, поступающей в цилиндрическую камеру 2 нижнего слива гидроциклона 1 в виде закрученной струи; Q_2 – расход жидкости поступающей в цилиндрическую камеру 3 верхнего слива гидроциклона 1.

Для получения дифференциальной функции распределения времени пребывания жидкости $C(\tau)$ составлены дифференциальные уравнения материального баланса по индикатору:

$$\begin{aligned} W_1 \frac{dC_1}{d\tau} &= Q_0 C_0 - Q_1 C_1 - Q_2 C_1 \\ W_2 \frac{dC_2}{d\tau} &= Q_1 C_1 - Q_1 C_2 \\ W_3 \frac{dC_3}{d\tau} &= Q_1 C_2 - Q_1 C_3 \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения (1) в операторной форме с учетом преобразования по Лапласу записываем в следующем виде [12]:

$$\begin{aligned} A_1 p C_1 &= C_0 - \lambda_1 C_1 - \lambda_2 C_1 \\ A_2 p C_2 &= \lambda_1 C_1 - \lambda_1 C_2 \\ A_3 p C_3 &= \lambda_1 C_2 - \lambda_1 C_3 \end{aligned} \quad (2)$$

где $A_1 = \frac{W_1}{Q_0}; A_2 = \frac{W_2}{Q_0}; A_3 = \frac{W_3}{Q_0}; \lambda_1 = \frac{Q_1}{Q_0}; \lambda_2 = \frac{Q_2}{Q_0}$; p – оператор Лапласа.

В результате решения системы уравнений (2) найдена передаточная функция $W(p)$:

$$W(p) = \frac{C_3}{C_0} = \frac{\lambda_1^2}{(A_1 p + \lambda_1 + \lambda_2)(A_2 p + \lambda_1)(A_3 p + \lambda_1)}. \quad (3)$$

Для получения $C(\tau)$ уравнение (3) можно привести к виду, удобному для обратного преобразования по Лапласу:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{\lambda_1^2}{A_1 A_2 A_3} \cdot \frac{1}{(p-a)(p-b)(p-c)}; \\ \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{A_1} &= -a; \quad \frac{\lambda_1}{A_2} = -b; \quad \frac{\lambda_1}{A_3} = -c. \end{aligned} \quad (4)$$

В результате обратного преобразования по Лапласу (13) получим $C(\tau)$ в виде:

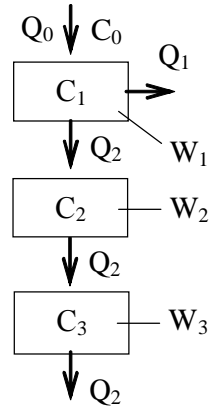


Рис. 3

$$C(\tau) = \frac{\lambda_1^2}{A_1 A_2 A_3} \left[\frac{1}{(a-b)(a-c)} e^{a\tau} + \frac{1}{(b-a)(b-c)} e^{b\tau} + \frac{1}{(c-a)(c-b)} e^{c\tau} \right] \quad (5)$$

Структурная схема (рис. 3), состоящая (см. рис. 1) из гидроциклона 1 и цилиндрической камеры 3 верхнего слива гидроциклона также представлена в виде трех ячеек идеального перемешивания. Ячейка I – представляет собой объем W_1 гидроциклона 1; ячейка II – объем W_2 цилиндрической камеры 3, соответствующий длине действия закрученной струи I_2 ; ячейка III – объем W_3 цилиндрической камеры 3, равной разности объемов всей длины цилиндрической камеры и объема цилиндрической камеры, соответствующего длине действия закрученной струи I_2 .

В структурной схеме (рис. 3) $C_0; C_1; C_2; C_3$ – концентрация индикатора соответственно на входе в ячейках объемами $W_1; W_2; W_3; Q_0$ – расход жидкости, поступающей в гидроциклон 1; Q_1 – расход жидкости, поступающей в цилиндрическую камеру 2 нижнего слива гидроциклона 1; Q_2 – расход жидкости, поступающей в цилиндрическую камеру верхнего слива 3 в виде закрученной струи.

Аналогично вышеизложенному, решая уравнения баланса по индикатору, получим дифференциальную функцию $C(\tau)$ времени пребывания жидкости в схеме гидроциклон 1 – цилиндрическая камера 3 верхнего слива в виде:

$$C(\tau) = \frac{\lambda_2^2}{A_1 A_2 A_3} \left[\frac{1}{(a-b)(a-c)} e^{a\tau} + \frac{1}{(b-a)(b-c)} e^{b\tau} + \frac{1}{(c-a)(c-b)} e^{c\tau} \right]; \quad (6)$$

$$\text{Здесь } \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{A_1} = -a; \quad \frac{\lambda_2}{A_2} = -b; \quad \frac{\lambda_2}{A_3} = -c.$$

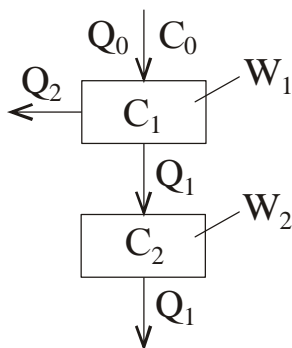


Рис. 4

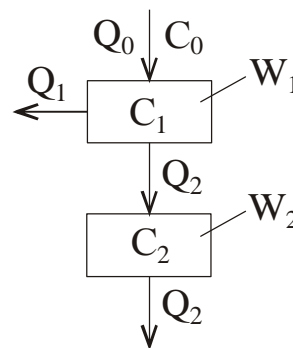


Рис. 5

Дифференциальные функции распределения времени пребывания жидкости по схеме гидроциклон 1 – цилиндрические камеры нижнего 2 и верхнего 3 сливов гидроциклона, представляющие собой трехъячеечные комбинированные модели (уравнения 5 и 6), могут быть использованы для расчета функции $C(\tau)$ для цилиндрических камер длиной 2 м и 3 м. Как показывают результаты исследований [14] по визуализации потоков в цилиндрических камерах нижнего и верхнего сливов при их длине 1 м, закрученная струя распространяется по всей длине камер и вследствие этого комбинированная ячейчатая модель из трехъячеечной превращается в двухъячеечную по схемам ГКС: «гидроциклон 1 - цилиндрическая камера нижнего слива 2» и «гидроциклон 1 - цилиндрическая камера верхнего слива 3».

Структурная схема гидроциклон 1 – цилиндрическая камера 2 нижнего слива представлена на рисунке 4.

В этой схеме обозначение параметров то же, что и в трехъячеечной модели (см. рис. 2), за исключением того, что объем W_2 – представляет собой объем цилиндрической камеры длиной 1 м.

Из уравнений материального баланса по индикатору для структурной схемы получим дифференциальную функцию распределения времени пребывания жидкости в системе гидроциклон – цилиндрическая камера нижнего слива гидроциклона:

$$C(\tau) = \frac{\lambda_1}{A_1 A_2} \left(\frac{1}{a-b} e^{a\tau} + \frac{1}{b-a} e^{b\tau} \right); \quad (7)$$

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{A_1} = -a; \quad \frac{\lambda_1}{A_2} = -b.$$

По технологической схеме гидроциклон 1 – цилиндрическая камера 3 верхнего слива гидроциклона структурная схема гидродинамики представлена на рисунке 5.

В этой схеме обозначение параметров то же, что и в трехъячеечной модели (см. рис. 3), и объем W_2 равен объему цилиндрической камеры длиной 1 м.

Дифференциальная функция распределения

времени пребывания жидкости в системе гидроциклон – цилиндрическая камера верхнего слива гидроциклона запишется в виде, аналогичном предыдущему:

$$C(\tau) = \frac{\lambda_2}{A_1 A_2} \left(\frac{1}{a-b} e^{a\tau} + \frac{1}{b-a} e^{b\tau} \right); \quad (8)$$

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{A_1} = -a; \quad \frac{\lambda_2}{A_2} = -b.$$

На рис. 6 приведены функции распределения $C(\tau)$ времени пребывания жидкости в цилиндрической камере нижнего слива гидроциклона различной длины L – от 40 см (кривая 1) с шагом 40 см до 240 см (кривая 6) при давлении на входе гидроциклона $P = 4$ атм. Видно, что дальнейшее увеличение этой длины мало влияет на функцию распределения времени пребывания жидкости в камере. Поэтому за оптимальную длину этой камеры принято значение $L = 2$ м. При расчетах были приняты следующие значения.

$$Q_0 = 1,9 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_1 = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_2 = 0, \text{ м}^3/\text{с};$$

$$A_1 = 1,965 \text{ с}; \quad A_2 = 5,1 \text{ с}; \quad A_3 = 0,785 \text{ с}.$$

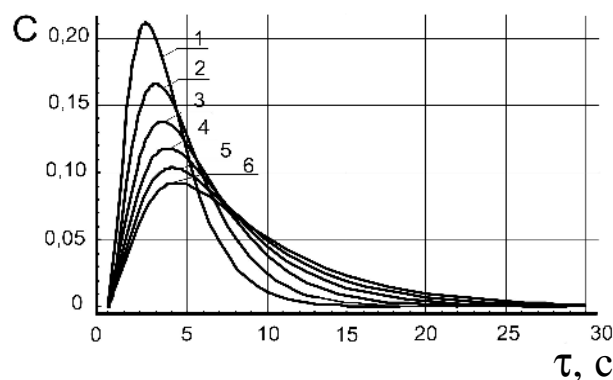


Рис. 6. Функции распределения времени пребывания жидкости в нижней камере различной длины: кривая 1 – для $l_j = 40$ см, кривая 2 – для $l_j = 80$ см, ... , кривая 6 – для $l_j = 240$ см, ...



Аналогичные результаты получены и для цилиндрической камеры верхнего слива гидроциклона.

Полученные структурные схемы и математические модели гидродинамики позволяют оптимизировать режим работы аппарата ГКС.

Литература

1. Тронов В.П., Тронов А.В. Очистка вод различных типов для использования в системе ППД. – Казань: ФЭН, 2001. – 560 с.
2. Адельшин А.Б. Интенсификация процессов гидродинамической очистки нефтесодержащих сточных вод / Дис. докт. техн. наук. – СПб., 1998. – 73 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Патент РФ №2255903. Бюл. №26 от 20.09.2002 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Адельшин А.А., Каюмов Р.А., Урмитова Н.С.
9. 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.
10. Патент РФ №2303002. Бюл. №20 от 20.07.2007 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.А., Адельшин А.Б.
11. Патент РФ №2313493. Бюл. №36 от 27.12.2007 г. Устройство для очистки нефтесодержащих сточных вод. Адельшин А.А., Адельшин А.Б., Файзулин Р.Н., Сахапов Н.М.
12. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1977. – 632 с.
14. Адельшин А.Б., Потехин Н.И., Ланцов М.В., Адельшин А.А. Параметры закрученных струй на сливах гидроциклона. // Исследование проблем водоснабжения, водоотведения и подготовки специалистов. Межвуз. сб. научн. трудов. – Казань: КазГАСА, 1999. – С. 137-142.