

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ АРТЕЗИАНСКИХ ВОД

Статья посвящена вопросам повышения эффективности процесса обезжелезивания артезианской воды. Повышение достигается путем использования на стадии насыщения воды кислородом воздуха комбинированного аппарата нового типа. Приведены рекомендации по проектированию аппарата, основанные на гидродинамических и массообменных исследованиях лабораторной модели данного аппарата.

Введение

Источниками появления соединений железа в природных водах являются процессы выветривания, эрозии почв и растворения горных пород. Глобальный характер приобретает закисление поверхностных и подземных вод из-за выпадения кислых дождей. В кислых водных средах на базе ионов Fe^{2+} , Fe^{3+} и SO_4^{2-} образуется целый ряд соединений железа, характеризующихся различной растворимостью. В питьевой воде железо может присутствовать вследствие использования на муниципальных станциях очистки воды железосодержащих коагулянтов, которые применяют для осветления поступающей воды, либо из-за коррозии водопроводных труб.

Соединения железа могут находиться в природной воде в растворенном, коллоидном и взвешенном состоянии, а также в виде различных химических соединений. Двухвалентное железо почти всегда находится в воде в растворенном состоянии, трехвалентное – только в случае очень низкого значения pH. Существует еще одна форма присутствия железа в природной воде – органические соединения железа, которые, как правило, растворимы или имеют коллоидную структуру и очень трудно поддаются удалению.

Все перечисленные формы железа по-разному «обнаруживают» себя в воде. Коллоидное железо окрашивает воду изначально, но не образует осадка. Если вода желтовато-бурая

А.Е. Иванов*,
аспирант,
Московский
государственный
университет
инженерной экологии
(МГУИЭ)

О.А. Волкова,
инженер,
менеджер отдела
водоотведения
ООО «ЭКОДАР-Л»

М.И. Клюшкова,
кандидат технических
наук, доцент,
Московский
государственный
университет
инженерной экологии
(МГУИЭ)

М.Г. Беренгартен,
кандидат химических
наук, профессор,
проректор,
Московский
государственный
университет
инженерной экологии
(МГУИЭ)



и образуется осадок при отстаивании, то в воде присутствует трехвалентное железо. Если же первоначально вода чистая и прозрачная, а через некоторое время при отстаивании образуется красно-бурый осадок, то это свидетельствует о наличии в воде двухвалентного железа, которое под действием кислорода воздуха окисляется до $Fe(OH)_3$. Биологическое железо, образующееся в процессе жизнедеятельности железобактерий, проявляет себя радужной опалесцирующей пленкой на поверхности воды и желеобразной массой, накапливаемой внутри труб. Наибольшие же концентрации железа фиксируются в подземных водах с низкими значениями pH и содержанием растворенного кислорода. В подземных водах железо присутствует, в основном, в виде растворенных бикарбонатов и сульфатов. Тонкодисперсную взвесь дает воде сульфид железа. При высоких концентрациях железо негативно влияет на здоровье человека, накапливаясь в печени, способствует разрушению её клеток, а также вызывают аллергические

* Адрес для корреспонденции: Saigak__@mail.ru

реакции, которые могут привести к заболеваниям крови.

При концентрации железа в воде 0,5 мг/л возникают серьёзные проблемы в системах горячего водоснабжения – забиваются шламом теплообменники, радиаторы, трубопроводы, выводятся из строя краны, смесители, приборы автоматики. В железистых отложениях уже при концентрации железа 1-2 мг/л происходит размножение железобактерий. Температура 30–45 °С и наличие кислорода – идеальные условия для этого [1].

Согласно принятым санитарным нормам концентрация общего железа в водопроводной воде не должна превышать 0,3 мг/л [2], поскольку это тяжелый металл и, наряду с марганцем, никелем, хромом, мышьяком, кадмием, свинцом и медью, относится к высокотоксическим и долго сохраняющимся в природе веществам. Часто концентрация железа в водопроводной воде превышает норму в 5, 10 и более раз, поэтому проблема обезжелезивания воды стоит особенно остро. Все многообразие методов, применяемых в технологии обезжелезивания воды, можно свести к двум основным – реагентным и безреагентным. Обезжелезивание поверхностных вод обычно осуществляют реагентными методами, а для удаления железа из подземных вод наибольшее распространение получили безреагентные методы.

К применяемым в настоящее время безреагентным методам относятся: упрощённая аэрация с последующим фильтрованием (используется при концентрациях Fe^{2+}

Ключевые слова:
комбинированный
аппарат,
барботаж,
очистка,
обезжелезивание

менее 3 мг/л); аэрация с последующим отстаиванием и фильтрованием (при концентрациях Fe^{2+} свыше 3 мг/л); электрокоагуляция; обработка в слое взвешенного осадка и фильтрование в подземных условиях с предварительной подачей в пласт воды, насыщенной кислородом.

Во всех технологиях обезжелезивания важным моментом является насыщение воды кислородом воздуха, то есть разработка метода аэрации, который при атмосферном давлении позволяет поглотить кислород до концентраций, близких к равновесным. Известно, что таким методом является барботаж воздуха через слой воды.

Материалы и методы исследования

В МГУИЭ на кафедре ЮНЕСКО «Техника экологически чистых производств» разработан оригинальный метод создания барботажного слоя без установки в аппарате массообменных контактных устройств. Метод заключается в подаче газа в слой жидкости с помощью «Г»-образного патрубка, раструб которого может быть как погружен в жидкость, так и отстоять от зеркала светлой жидкости (рис.1). [3] Под раструбом в слое светлой жидкости расположен отбойный экран, устанавливаемый для стабилизации барботажного слоя и определяющий высоту светлой жидкости, участвующей в образовании барботажного слоя. Получаемый барботажный слой в совокуп-



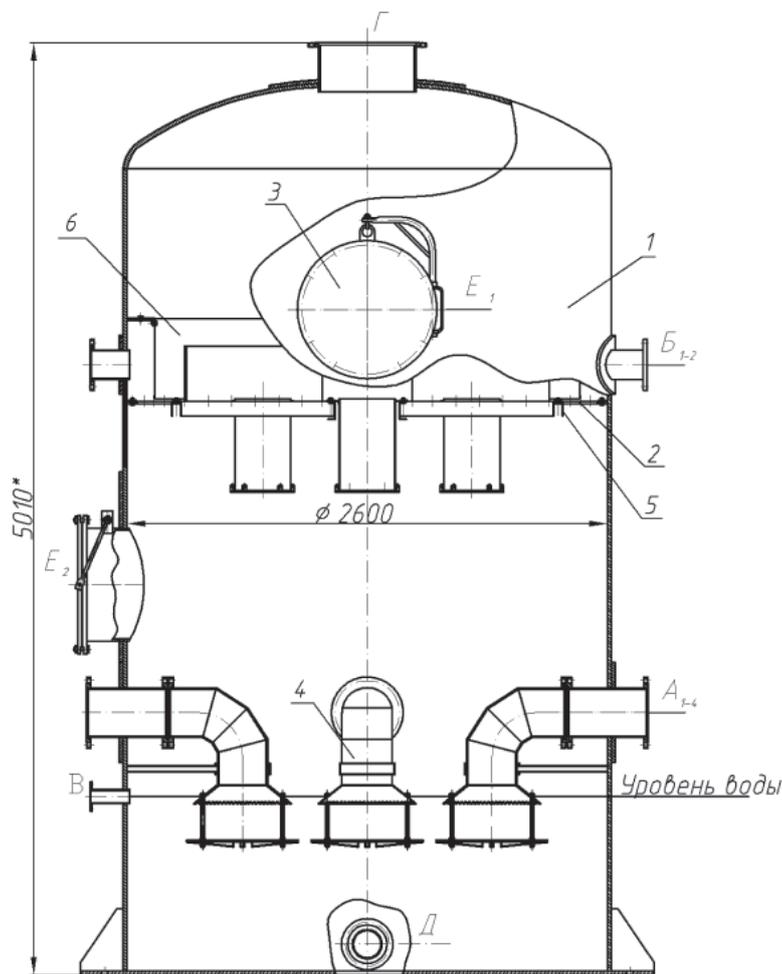


Рис. 1. Комбинированный аппарат обезжелезивания артезианской воды: 1 – корпус, 2 – распределительная тарелка, 3 – люк, 4 – трубы для подачи газа, 5 – опора распределительной тарелки, 6 – распределитель жидкости, А1-4 – вход атмосферного воздуха, Б1-2 – вход артезианской воды, В – перелив воды, Г – выход воздуха, Д – выход окисленной воды, Е1-2 – люк.

ности с устанавливаемым над ним пленочным оросителем способен эффективно работать на средах, склонных к зарастанию, так как благодаря особенностям конструкции он является самоочищающимся, что особенно актуально для установки обезжелезивания воды. Совместная работа нового способа создания барботажного слоя и пленочного оросителя осуществляется в едином комбинированном аппарате, защищенном патентом [4].

Результаты и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований нового способа создания барботажного слоя была построена структурная модель, закрепляющая оптимальные соотношения между конструктивными параметрами узла ввода газа в слой жидкости.

Структурную модель такого аппарата можно описать следующим образом. Газ подается в аппарат с помощью «Г»-образного патрубка со скоростью, достаточной для образования в нижней части аппарата барботажного слоя с высотой, достаточной для обеспечения заданной эффективности проводимого в аппарате процесса. Высота барботажного слоя в данном аппарате может регулироваться не только скоростью газа. Изменяя величины заглубления «Г»-образного патрубка – Δ путем поддержания различного уровня светлой жидкости в аппарате также возможно регулировать высоту барботажного слоя и его сопротивление.

Экспериментально было установлено, что рабочим диапазоном изменения заглубления должно являться значение Δ в пределах от -10 мм до 10 мм. При этом отрицательные значения заглубления Δ соответствуют режиму работы с зазором между раструбом газоподающего патрубка и зеркалом светлой жидкости в аппарате. При положительных значениях Δ патрубок погружен в слой светлой жидкости на величину Δ . Работа на заглублениях вне приведенного диапазона приводит либо к чрезмерно высокому сопротивлению барботажного слоя ($\Delta > 10$ мм), либо к отсутствию однородного барботажного слоя, охватывающего всю жидкость над отбойным экраном ($\Delta < -10$ мм). Величина заглубления определяется как

$$\Delta = h_0 - h_{\partial}. \quad (1)$$

Раструб на конце «Г»-образного патрубка, как и отбойный экран, служит для более равномерного распределения газа по объему барботажного слоя и обеспечивает захват зоной барботажа кольцевого сечения большего диаметра. Оптимальная геометрия раструба также была определена опытным путем. Было установлено, что для создания барботажного слоя во всем объеме светлой жидкости, находящейся над отбойным экраном, диаметр раструба должен составлять не менее 0,4 от диаметра аппарата. Угол раскрытия раструба не играет существенной роли и может определяться диаметром газоподающего патрубка. Диаметр отбойного экрана должен быть не менее диаметра раструба газоподающего патрубка во избежание проскока газа под отбойный экран, что негативно сказывается на равномерном распределении газа по сечению аппарата. Очень важную роль также играет высота размещения раструба диспергатора над отбойным экраном d_{∂} . Опытным путем было установлено, что оптимальной с точки зрения распределения газового потока по сечению

аппарата и созданию развитого барботажного слоя является диапазон значений

$$h_{\partial} = (2 \div 2,5) d_n / d_{\partial}. \quad (2)$$

Диаметр газоподающего «Г»-образного патрубка должен быть выбран исходя из скорости газа, которую необходимо в нем обеспечить для получения заданной эффективности процесса.

Геометрия и размеры зубцов на конце раструба не оказывают существенного влияния на барботажный слой. Основной функцией этих зубцов является дополнительная турбулизация барботажного слоя и устранение влияния незначительных перекосов, допущенных при монтаже «Г»-образного патрубка.

Основные геометрические характеристики лабораторной модели комбинированного аппарата и диапазон их изменения в ходе исследований сведены в табл. 1.

Гидродинамические и массообменные исследования нового комбинированного аппарата были проведены в границах оптимальных значений конструктивных параметров, определенных полученной структурной моделью. В результате гидродинамических исследований были определены нагрузки как по газу, так и по жидкости, характеризующие границы рабочего режима барботажного слоя. Рекомендуемый диапазон скорости газа в патрубке подачи составляет 11-19 м/с. Диапазон изменения плотности орошения 18-28 м³/м²*ч, при котором наблюдалась максимальная высота барботажного слоя, был признан оптимальным. Была получена зависимость высоты барботажного слоя от скорости газа при различных значениях

Таблица 1

Основные геометрические характеристики лабораторной модели комбинированного аппарата и диапазон их изменения в ходе исследований

Характеристика	Обозначение	Диапазон изменения	Рекомендуемое значение
Внутренний диаметр аппарата, м	D_{an}	-	Определяется по F-фактору скорости. $F\phi = (0,5 \div 1,0) (\text{м/с}) \cdot (\text{кг/м}^3)^{0,5}$
Внутренний диаметр «Г»-образного патрубка подачи газа, м	d_n	-	Определяется по F-фактору скорости. $F\phi = (11 \div 19) (\text{м/с}) \cdot (\text{кг/м}^3)^{0,5}$
Диаметр раструба газоподающего патрубка, м	d_{∂}	(0,085 ÷ 0,140) м	$(0,42 \div 0,46) D_{an}$
Диаметр отбойного экрана, м	d_{∂}	(0,09 ÷ 0,16) м	$(1,1 - 1,5) d_{\partial}$
Величина заглупления раструба в слой светлой жидкости, м	Δ	(-0,03 ÷ 0,03) м	(-0,01 ÷ 0,01) м
Высота установки раструба от отбойного экрана, м	h_{∂}	(0,035 ÷ 0,07) м	$(2 \div 2,5) d_n / d_{\partial}$

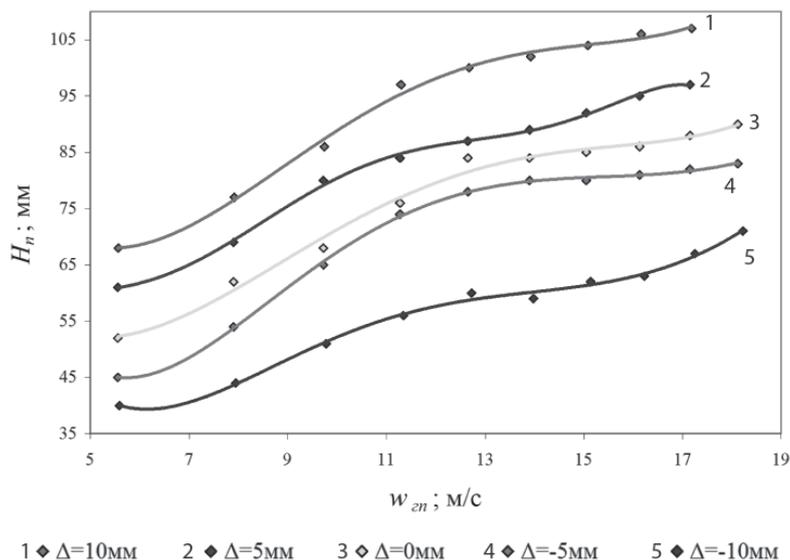


Рис. 2. Зависимость высоты барботажного слоя Hn от скорости газа в «Г»-образном патрубке w_{zn} при $L_{y\partial} = 22,32 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

заглупления диспергатора в слой светлой жидкости Δ (рис. 2).

На основе опытных данных по изучению высоты барботажного слоя, полученных на различных нагрузках по газу и жидкости, а также с изменением физико-химических свойств жидкой фазы, было получено критериальное уравнение

$$H_{y\partial} = 165 \cdot 10^{-7} \cdot Re_G^{1,024} \cdot Re_L^{0,26} \cdot We^{0,183} \cdot K_{\mu}^{0,58} \cdot \Gamma^{0,35}, \quad (3)$$

где

$$Re_G = \frac{w_{zn} \cdot d_n \cdot \rho_G}{\mu_G}; \quad (4)$$

$$Re_L = \frac{L_{y\partial} \cdot h_0 \cdot \rho_L}{\mu_L}; \quad (5)$$

$$We = \frac{\sigma}{g \cdot \rho_L \cdot h_0^2}; \quad (6)$$

$$K_{\mu} = \frac{\mu_L^{p,y.}}{\mu_{H_2O}^{20}} ; (7)$$

$$\Gamma = \frac{h_0}{h_o} (8)$$

Кроме высоты барботажного слоя важной характеристикой работы аппарата является его сопротивление.

Все эксперименты по гидродинамике барботажного аппарата новой конструкции сопровождались замерами ΔP . Кроме того, производился замер сопротивления сухой колонны. Часть полученных данных отражена на *рис. 3*.

Эксперимент показал, что сопротивление барботажного слоя является суммой местных сопротивлений и сопротивления, возникающего при проходе газа через слой жидкости.

$$\Delta P = \Delta P_{cm} + \Delta P_L (9)$$

Местные сопротивления обусловлены криволинейной траекторией движения газа в патрубке подачи и колонне, а сопротивление в слое жидкости характеризуется высотой барботажного слоя и высотой светлой жидкости, участвующей в образовании барботажного слоя.

Сопротивление сухого аппарата (сопротивление, обусловленное траекторией движения газа) описывается уравнением:

$$\Delta P_{cm} = \zeta \cdot \frac{\rho_G \cdot w_{cm}^2}{2}, (10)$$

где: $\xi=3,3$ – коэффициент сопротивления, найден эмпирически.

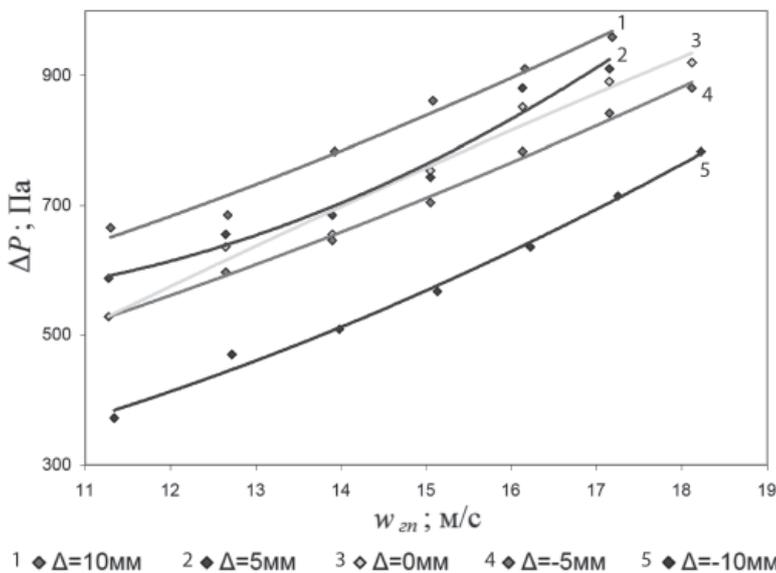


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости газа в газоподающем патрубке при $L_{y\partial} = 22,31 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и различных значениях Δ .

Зависимость сопротивления, возникающего при проходе газа через слой жидкости, была определена в результате анализа всего массива экспериментальных данных по замеру сопротивления барботажного слоя и описана следующим критериальным уравнением:

$$\frac{\Delta P_L}{\Delta P_{cm}} = 1,38 \cdot H_{y\partial}^{-1,9} \cdot \Gamma^{2,5} (11)$$

Гидравлическое сопротивление аппарата складывалось из сопротивления сухого узла ввода газа, сопротивления слоя жидкости и сопротивления пленочного оросителя:

$$\Delta P_{ка} = \Delta P + \Delta P_{пл} (12)$$

Анализ выполненных гидродинамических исследований показал, что при работе на небольших расходах по газу необходимо использовать диспергатор, заглубленный в объем жидкости, для обеспечения работы в рабочем режиме. При работе на слабозагрязненных газах при увеличенных расходах газа можно использовать диспергатор, не погруженный в объем промывной жидкости, так как значительная скорость обеспечит выход на рабочий режим, а сопротивление при этом будет ниже, чем при заглублении диспергатора.

Известно, что коэффициент массоотдачи слабо зависит от конструктивных особенностей контактного устройства, что позволяет распространять ранее полученные уравнения для более широкого спектра конструкций барботажных аппаратов, то есть, в частности, уравнения, полученные на традиционных контактных устройствах, могут быть использованы для описания процесса





массоотдачи в жидкой фазе в новом комбинированном аппарате.

Опираясь на вышесказанное, в качестве расчетного уравнения для определения коэффициента массоотдачи в жидкой фазе рекомендуется уравнение

$$Nu_{Lj} = 2,5 \cdot Re_L^{0,7} \cdot Pr_L^{0,5}, \quad (13)$$

полученное для барботажного слоя, наблюдаемого на ситчатых тарелках. Уравнение (13) опробовано и по результатам проверки может быть рекомендовано для данной конструкции комбинированного аппарата.

Заключение

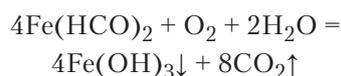
Таким образом, проведенные исследования позволили разработать методику расчета представленного аппарата новой конструкции и рекомендовать его к внедрению. Возникающие проблемы масштабного переноса, связанные с проектированием аппаратов больших диаметров, то есть отвечающих промышленным нуждам, решаются путем применения продольно-поперечного секционирования. Как известно, суть продольно-поперечного секционирования состоит в суммировании контактных устройств с сохранением оптимальных геометрических размеров, зарекомендовавших себя в ходе экспериментальных исследований. Такой подход в решении проблемы масштабного переноса успешно реализован в промышленности, в частности, при внедрении двухзонных массообменных тарелок, являющихся одним из прототипов нового комбинированного аппарата.

По заданию Вяземского завода железобетонных шпал, использующего артезианскую воду в технологическом цикле производства и как питьевую для населения, была разработана усовершенствованная технологическая схема безреагентного обезжелезивания артезианской воды с участками окисления, осветления и напорной фильтрации воды, а также системы сбора и обезвоживания осадка. Оригинальность схемы заключается в применении в качестве блока окисления воды нового исследованного высокоэффективного барботажного аппарата оригинальной конструкции, в котором за счет развитой поверхности барботажного слоя время контакта газа (атмосферного воздуха) и жидкости (артезианской воды) минимально, при этом достигается высокая степень насыщения воды кислородом и не происходит его зарастания продуктами реакции.

При проектировании аппарата для обеспечения достаточной эффективности очистки применена полученная в результате исследований методика расчета. Требуемую высокую производительность аппарата удалось добиться путем использования принципов продольно-поперечного секционирования, при которых в аппарате размещены несколько пленочных оросителей и штуцеров подачи газа, работающих практически независимо друг от друга. Благодаря этому удается сохранить гидродинамическую картину, наблюдаемую в лабораторной модели, что позволяет сделать вывод о том, что эффективность процесса в промышленном аппарате будет аналогична данным, полученным экспериментально. А значит допустимо использовать рекомендуемую методику расчета в самом широком диапазоне изменения диаметра аппарата, что и лежит в основе принципа продольно-поперечного секционирования.

В барботажном аппарате новой конструкции (рис. 1) артезианская вода подается непосредственно (без предварительного отстаивания) в аппарат через два штуцера Б и равномерно растекается по полотну пленочной распределительной тарелки 2, попадает в переливные устройства, расположенные на полотне пленочной тарелки и образует летящую пленку жидкости. Атмосферный воздух поступает в объем жидкости в нижней части аппарата через четыре диспергатора 4, заглубленных в слой воды на 10 мм и образует барботажный слой по всему сечению аппарата. Контакт между водой и воздухом происходит на развитой поверхности контакта фаз в барботажном слое. Под действием кислорода воздуха происходит реакция окисления (переход) ионов растворимого в

воде двухвалентного железа до трехвалентной формы с образованием труднорастворимого гидроксида железа и газообразного диоксида углерода по следующей формуле:



Из зоны контакта отработанный воздух направляется в верхнюю часть аппарата. Пройдя зону сепарирующих пленок жидкости, перекрывающих все сечение аппарата, воздух освобождается от большей части унесенных из барботажного слоя капель воды. Поднимаясь вверх, воздух выбрасывается в атмосферу. Обработанная вода собирается в нижней части аппарата и через штуцер Д1 направляется в блок осветления, в пленочный отстойник, а затем на напорный фильтр с двойной загрузкой.

Аппарат рассчитан на расход воды в 120 м³/ч, при этом нагрузка по газу составляет 29850 нм³/ч. Содержание ионов железа в воде на входе и на выходе из аппарата составит, соответственно, 4,4 г/л и 0,1 мг/л. Вода в результате контакта с воздухом насыщается кислородом с начальной концентрации кислорода 0,3 мг/л до 11 мг/л на выходе из аппарата. Сопротивление для газовой фазы спроектированного аппарата не превышает 7 кПа.

Литература

1. Мамченко А.В. Приоритетные направления в технологии очистки подземных вод от железа / Мамченко А.В., Мисочка И.В., Дешко И.И., Кий Н.Н., Герасименко Н.Г. // Химия и технология воды, 2009. Т. 31, № 1. С. 57-77
2. СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения».
3. Иванов А.Е. Гидродинамика и массообмен в комбинированном абсорбционном аппарате, совмещающем барботажную и пленочную зоны контакта фаз / Иванов А.Е., Беренгартен М.Г., Ключенкова М.И. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 8. С. 3-6.
4. Гидродинамический пылегазоуловитель: пат. RU 02377050 С1, МПК В 01 D 47/06 / Ключенкова М. И., Назаров В. И., Иванов А. Е., Руднев В. Е., Баринский Е. А., Семенов М. С., Алексеев С. Ю.; заявка №2008136687/15 от 12.09.2008; опубл. 27.12.2009.



A.E. Ivanov, O.A. Volkova, M.I. Klyushenkova, M.G. Berengarten

OPTIMIZATION OF IRON REMOVAL PROCESS IN ARTESIAN WATERS

Intensification of iron removal process of artesian waters has been described in the paper. Intensification is reached by application of new combined apparatus on oxygen water

saturation stage. Recommendations on modification and design, based on hydrodynamic and mass-transfer research of pilot model of the apparatus have been presented.

Key words: combined apparatus, bubbling, cleaning, iron removal