

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

УДК 621.694.2:663.63

В. Я. ГРУДАНОВ¹, Ю. А. СЕКАЦКАЯ², А. А. БРЕНЧ¹, Л. Т. ТКАЧЕВА¹

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ ЭЖЕКТОРОВ ДЛЯ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДЫ В ЛИНИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ БЕЗАЛКОГОЛЬНЫХ НАПИТКОВ

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: bgatu-nii@tut.by

²Могилевский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь

(Поступила в редакцию 18.10.2012)

Введение. Стремительное развитие рынка пищевой и особенно пивобезалкогольной и ликероводочной продукции, а также индустрии расфасованной воды сопровождается острой конкурентной борьбой, следствием которой является все более пристальное внимание производителей к качеству продукции, в том числе к водоподготовке как одному из ключевых технологических процессов.

Важнейшим звеном в единой технологической цепочке водоподготовки является обезжелезивание воды, поскольку источником водоснабжения большинства предприятий пищевой промышленности являются подземные скважинные воды, отличающиеся высоким содержанием железа и железобактерий.

В табл. 1 приведены данные по содержанию железа в подземных водах Беларуси по областям.

Т а б л и ц а 1. Содержание железа в подземных водах Беларуси, мг/л

Административная область	Содержание железа
Брестская	0,2–4,8
Витебская	0,3–7,1
Гомельская	0,5–3,8
Гродненская	0,4–1,2
Минская	0,3–2,8
Могилевская	0,2–8,8

Высокое содержание железа ухудшает органолептические показатели воды, она имеет желтовато-бурую окраску и повышенную мутность, приобретает неприятный железистый привкус. Высокое содержание железа также вызывают отложения в металлических трубах, которые ведут к значительным потерям напора и быстрому разрушению труб. Длительное употребление воды с высоким содержанием железа приводит к различным видам заболеваний.

Согласно СанПин 10-124РБ 99, содержание железа в воде хозяйственно-питьевых водопроводов, имеющих сооружения для улучшения качества воды, не должно превышать 0,3 мг/л. Еще более жесткие требования к содержанию железа в воде предъявляют отдельные предприятия при производстве безалкогольных напитков.

Повышение эффективности процесса обезжелезивания подземных вод соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований

Республики Беларусь [1]. Проведенный анализ существующих методов очистки воды от железа обуславливает необходимость модернизации устаревших технологий водоподготовки и совершенствования отечественного оборудования, в частности газо-жидкостных эжекторов.

Особенности процесса обезжелезивания воды. В зависимости от источника и степени воздействия внешних факторов железо в воде может находиться в двух формах окисления Fe^{2+} и Fe^{3+} и множестве комплексных форм. Однако очевидно, что преобладающей формой существования железа в подземных водах является гидрокарбонат двухвалентного железа $Fe(HCO_3)_2$ – нестойкое соединение, в котором железо при контакте с воздухом легко окисляется.

В настоящее время применяют различные методы обезжелезивания воды: озонирование, хлорирование, каталитическое окисление с фильтрацией, промышленное осаждение, ионный обмен, мембранную фильтрацию, биологическое обезжелезивание, упрощенную и принудительную аэрацию и др. [2, 3].

Каждый из методов обезжелезивания применим только в определенных случаях, у каждого есть и достоинства, и существенные недостатки. Выбор конкретного метода удаления железа или их комбинации в большей степени зависит от исходного содержания и формы растворенного железа, температуры, щелочности и pH обрабатываемой воды, требуемой производительности установки и конкретных условий ее эксплуатации. Также не существует универсального способа обезжелезивания, охватывающего все варианты сочетания исходных параметров и имеющего низкую эксплуатационную стоимость.

Наиболее производительным, простым и экономичным методом обезжелезивания является принудительная глубокая аэрация с последующим фильтрованием. Сущность метода заключается в насыщении воды кислородом воздуха и окисление растворенного двухвалентного железа до нерастворимого трехвалентного, которое выпадает в осадок и затем уже легко отфильтровывается на фильтрах с зернистой загрузкой.

Рассмотрим механизм процесса окисления двухвалентного железа кислородом в свободном объеме. В общем случае в присутствии окислителя и достаточной щелочности двухвалентное железо окисляется, органические формы его разрушаются и происходит гидролиз с образованием взвеси гидроксида $Fe(OH)_3$.

Окисление двухвалентного железа происходит при обмене электрона по следующей схеме [2, 4]:



Для окисления железа по этой реакции необходим кислород в количестве 0,143 мг на 1 мг Fe^{2+} . В присутствии ионов воды реакция окисления железа имеет такой вид:



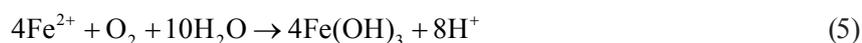
Концентрация ионов водорода H^{+} оценивается значением pH воды, а активность электронов значением окислительно-восстановительного потенциала Eh, при этом реакция окисления двухвалентного железа кислородом в водном растворе описывается уравнением



Далее происходит гидролиз трехвалентного железа:



Суммарно уравнение реакции окисления и гидролиза может быть записано в виде



В присутствии бикарбонатных ионов в воде окисление двухвалентного и гидролиз трехвалентного железа могут быть суммарно представлены уравнением реакции



Согласно обобщенному уравнению реакции, при окислении 1 мг двухвалентного железа образуется 1,6 мг свободной двуокиси углерода и на 0,036 мг-экв/л снижается общая щелочность воды.

В зависимости от конкретных условий реакции окисление Fe^{2+} может предшествовать гидролизу или идти параллельно с ним, но независимо от того, в какой последовательности протекают реакции окисления и гидролиза, конечным их продуктом всегда является гидроокись железа.

В итоге в воде образуются бурые нерастворимые хлопья гидроксидов, которые придают ей интенсивную окраску.

Технологический процесс обезжелезивания завершается удалением продукта реакции – нерастворимого гидроксида железа: фильтрацией на фильтрах с инертными фильтрующими загрузками, при этом нерастворимый осадок задерживается в слое засыпки и сам по себе способствует более эффективному окислению растворенного железа.

Разработка новой конструкции газо-жидкостного эжектора. Для обезжелезивания подземных вод с высоким содержанием железа целесообразно использовать безреагентный аэрационный метод с применением специальных аппаратов – эжекторов.

Сущность метода основана на непрерывном дроблении капель воды в потоке эжектируемого воздуха до мелкодисперсного эффекта абсорбции кислорода с одновременным достижением высоких скоростей окисления двухвалентного железа в трехвалентное, которое выпадает в осадок и отфильтровывается. Помимо удаления железа применение данного метода позволяет отдувать из воды присутствующий сероводород и иные растворенные газы.

Схема обработки воды: вода, подлежащая обезжелезиванию, под напором насосов подается на эжекторы, которые являются главным элементом схемы и устанавливаются вертикально над фильтрами с зернистой загрузкой. Количество агрегатов и количество ступеней определяется экспериментально – расчетным методом, в зависимости от требований, предъявляемых к качеству исходной воды. От рациональности конструкций этих элементов зависит производительность оборудования, надежность его работы, качество готовой продукции.

Эжектор выполняет две главные функции: насыщает обрабатываемую воду кислородом воздуха (аэрация) и организует движение потоков в общем объеме воды с целью равномерного распределения растворенного в ней кислорода. К достоинствам эжектора можно отнести то, что он не требует дополнительного расхода энергии для подачи воздуха, способен при изменении производительности поддерживать с достаточной точностью постоянство пропорционирования воды и воздуха, а также прост в изготовлении и обслуживании, компактен и подвергается незначительному износу.

Проведенный анализ научно-технической и патентной литературы позволяет сделать вывод о том, что существующие конструкции эжекторных аппаратов имеют недостатки и не являются

достаточно эффективными [5, 6]. Поэтому с целью совершенствования технологий водоподготовки и улучшения качества обезжелезивания подземных вод методом глубокой аэрации нами была предложена и запатентована новая конструкция газо-жидкостного эжектора, позволяющая эффективно очищать воду от железа и других примесей (рис. 1).

Обрабатываемая вода через патрубок 4 под давлением подводится по коллектору 2 на сопловой узел 3, состоящий из расчетного числа сопел, распределяется равномерно по соплам и под действием перепада давления распыляется в рабочей зоне. Распыляемая вода эжектирует воздух, который поступает через окна 5 входа воздуха в количестве, стехиометрически необходимом для окисления содержаще-

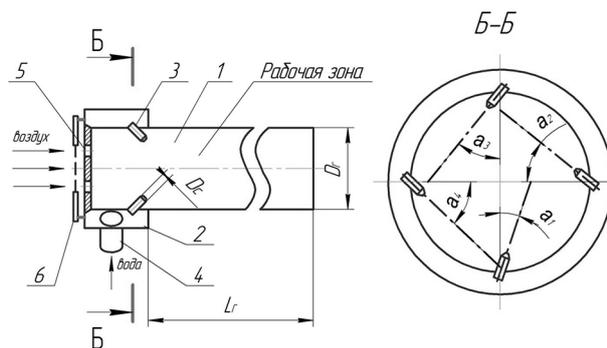


Рис. 1. Схема газо-жидкостного эжектора [7]: 1 – камера смешения (горловина); 2 – коллектор; 3 – сопловой узел; 4 – патрубок для подвода воды (активной среды); 5 – отверстия (окна) для подвода воздуха; 6 – заслонка-регулятор воздуха; D_c – диаметр сопла; D_r – диаметр горловины; L_r – длина горловины; α_i – угол наклона сопел

гося в воде железа. Отличительной особенностью данной конструкции эжектора является то, что угол α_1 расположения каждого последующего сопла больше предыдущего, считая от сопла с минимальным углом наклона, и определяется из выражения

$$\alpha_i = \arctg \frac{i}{n+i},$$

где α_i – угол наклона i -го сопла, рад; i – порядковый номер сопла; n – количество сопел, шт., при этом $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4$.

Проходя через сопла 3 коллектора 2, активные струи воды захватывают пассивный воздушный поток и в горловине 1 происходит быстрое и качественное смешение сред.

Благодаря тому что угол наклона α_i каждого последующего сопла больше предыдущего, считая от сопла с минимальным углом наклона, достигается интенсивное перемешивание воды с воздухом. Потoki активной среды движутся под разными углами закрутки, не мешая и усиливая действие друг друга, при этом каждый из них описывает свой спиралевидный путь, что позволяет им заполнить и использовать максимально всю площадь сечения горловины. За счет этого захватывается большое количество пассивной воздушной среды, происходит ее интенсивное смешение с активными потоками воды и, как следствие, повышается эффективность работы эжектора. Количество ижектируемого воздуха регулируется заслонкой 6.

Важнейшим элементом процесса эжектирования является степень дробления капель воды. До настоящего времени не решен вопрос о влиянии геометрических характеристик эжектора на степень дробления. Это позволило бы рассчитать оптимальные линейные размеры эжектора, что способствовало бы увеличению эффективности процесса обезжелезивания воды. До сегодняшнего дня конструкции, формы и размеры эжектора определяли произвольно, исходя из выбранных коэффициентов, которые принимались при расчете без достаточного теоретического обоснования.

Расчет газо-жидкостного эжектора. Геометрические параметры новой конструкции эжектора взаимосвязаны между собой и рассчитаны с использованием закономерностей теории предпочтительных чисел на основе универсального инверанта «золотого» отношения, что позволяет получить техническое совершенство конструкции.

Скорость истечения воды из сопла при известном давлении воды определяется по формуле (7):

$$g_B = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_B}}, \quad (7)$$

где g_B – скорость истечения воды, м/с; ΔP – давление воды в сети, Па; ρ_B – плотность воды, кг/м³; φ – коэффициент истечения (расхода), учитывающий неравномерность скорости движения воды по сечению сопла. Значение φ приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Значение коэффициента φ для конических сопел

$\frac{l_c}{D_c}$	0,18	0,35	0,45	0,55	1,00	2,25	4,50
φ	0,75	0,84	0,85	0,87	0,85	0,84	0,83

Тогда площадь поперечного сопла F_c определяется по формуле

$$F_c = \frac{B_B}{3600 g_B n}, \quad (8)$$

где B_B – расход воды, м³/с; n – количество сопел, шт.

Зная значение F_c , можно определить диаметр сопла с использованием универсального инварианта «золотого» отношения $\varphi \approx 1,618$ [7].

$$F_c = \frac{D_c^2}{\sqrt{\varphi}} = \frac{D_c^2}{\sqrt{1,618}} = \frac{D_c^2}{1,272}. \quad (9)$$

Диаметр камеры смещения (горловины) $D_{см}$ можно определить из уравнения закона сохранения количества движения при смешении двух сред – воды и воздуха, при этом начальную скорость воздуха и количество движения воздуха, подсасываемого (инжектируемого) из окружающей среды, принимаем равными нулю, т. е.

$$\omega_B \rho_B = \omega_{см} (\rho_B + U \rho_r), \quad (10)$$

где ω_B – скорость движения воды, м/с; $\omega_{см}$ – скорость движения газо-жидкостной смеси в камере смешения, м/с; U – объемный коэффициент инжекции – количество воздуха, инжектируемого 1 м³ воды, м³/м³; ρ_B – плотность воды, кг/м³; ρ_r – плотность воздуха, кг/м³.

Выражая расход воды B и смеси $B_{см}$ через соответствующие скорости и сечения, получаем

$$B = 3600 \frac{D_c^2}{\sqrt{\varphi}} \cdot \omega_B,$$

$$B_{см} = B(1+U) = 3600 \frac{D_c^2}{\sqrt{\varphi}} \cdot \omega_{см},$$

$$\text{Или } \omega_B = \frac{\sqrt{\varphi} B}{3600 D_c^2} \text{ и } \omega_{см} = \frac{\sqrt{\varphi} B(1+U)}{3600 D_{см}^2}.$$

$$\text{Тогда } \frac{\sqrt{\varphi} B \rho_B}{3600 D_c^2} = \frac{\sqrt{\varphi} B(1+U)(\rho_B + U \rho_r)}{3600 D_{см}^2}.$$

Окончательно получаем

$$D_{см} = D_c \sqrt{(1+U) \left(1 + U \frac{\rho_r}{\rho_B} \right)}. \quad (11)$$

Длина горловины (камеры смешивания) определяется по формуле

$$L_{см} = \varphi^2 D = (1,618)^2 D = 2,618 D. \quad (12)$$

Таким образом, совмещение в многосопловом эжекторе новой конструкции процессов мелкодисперсного дробления воды, ее усиленной аэрации и принудительного контакта с осадком, обладающим каталитическими свойствами, позволяет проводить экономическое высокоэффективное обезжелезивание воды с такими начальными концентрациями растворенного железа, которые невозможно устранить традиционными способами.

Экспериментальные исследования. Для дальнейшего изучения газо-жидкостного эжектора новой конструкции и оптимизации процесса обезжелезивания подземных вод в проточной части аппарата были проведены экспериментальные исследования. С этой целью была изготовлена экспериментальная установка, которая позволяет определить влияние режимно-конструктивных параметров работы газо-жидкостного эжектора на производительность и эффективность очистки подземных вод от железа (рис. 2).

Принцип работы установки заключается в следующем: вода из емкости 1 подается на насос 2. После насоса жидкость под напором подается на эжектор 8, проходя через редуцирующий

клапан 5 и манометр 4, конструкция которых позволяет изменять и замерять величину рабочего давления в гидросистеме. Проходя через сопла 9 с большой скоростью, жидкость создает разрежение в приемной камере струйного аппарата, что позволяет эжектировать воздух. Количество инжектируемого воздуха регулируется задвижкой 10. В камере смешения эжектора 8 происходит перемешивание потоков жидкости и газа, превращение кинетической энергии потока в потенциальную энергию давления. После эжектора 8 смесь по линии попадает в емкость 12 для очищенной воды, проходя перед этим через фильтр с зернистой загрузкой 11, где происходит отделение осадка, образовавшегося при окислении двухвалентного железа Fe_{2+} кислородом воздуха.

На начальном этапе экспериментальных исследований была проведена серия «отсеивающих экспериментов». Это позволило определить основные факторы, влияющие на процесс обезжелезивания и интервалы их изменения.

Конструкция экспериментальной установки для обезжелезивания воды позволяет регулировать следующие основные параметры, влияющие на процесс:

- угол наклона сопел;
- диаметр выходного сечения сопел;
- длину камеры смешения;
- рабочее давление в гидросистеме.

В результате эксперимента выявлено, что необходимо выполнять эжектор с четным количеством сопел и их симметричным расположением относительно оси камеры смешения. Кроме того, число сопел не должно превышать четыре, поскольку при большем количестве возрастают потери на удар при вводе активного потока в приемную камеру, что приводит к ухудшению характеристик эжектора. Принцип периферийной подачи воды с закруткой активного потока в тангенциальном направлении, при котором сопла располагаются концентрично и наклонно к оси камеры смешения, придает воде дополнительные центробежные силы, отбрасывающие ее к периферии и циркулируя поток, они повышают эффект подсоса воздушной среды. В процессе обработки экспериментальных данных было установлено, что на эффективность работы эжектора влияют не конкретные численные значения режимно-конструктивных параметров, а их сочетание.

Заключение. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что разработанный многосопловой газо-жидкостный эжектор с двойной закруткой активной среды (воды) в поперечном и продольном направлениях обеспечивает на короткой длине камеры смешения высокоэффективное и равномерное насыщение воды кислородом воздуха, что обуславливает высокий коэффициент очистки воды от железа в широком диапазоне изменения давления воды от 3 до 6 бар при угле наклона сопел $\alpha = 35^\circ$, диаметре сопел 0,8 мм и длине камеры смешения $\alpha_{см} = 500$ мм, при этом коэффициент очистки при данных режимно-конструктивных параметрах эжектора достигает 96,8%.

Опытный образец нового газо-жидкостного эжектора был установлен в технологической линии по производству безалкогольных напитков на Чериковском комбинате кооперативной промышленности и успешно прошел производственные испытания.

Создание отечественного высокоэффективного аппарата (газо-жидкостного эжектора) для обезжелезивания воды – необходимый этап в рамках совершенствования технологии водоподготовки. Разработанный газо-жидкостный эжектор с принципиально новыми конструктивными решениями позволяет с более высокой эффективностью очищать подземные воды от железа. Конструкция газо-жидкостного эжектора защищена патентами на изобретения РБ № 10537 и № 11810 [8, 9].

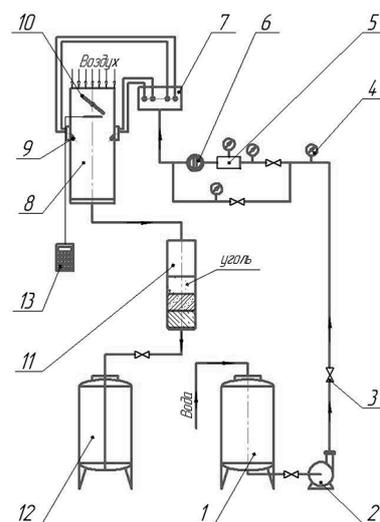


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – емкость для исходной воды; 2 – насос; 3 – вентиль; 4 – манометр; 5 – редукционный клапан; 6 – счетчик воды; 7 – распределитель воды; 8 – эжектор; 9 – сопла; 10 – заслонка; 11 – фильтр с зернистой загрузкой; 12 – емкость для очищенной воды; 13 – анемометр

Литература

1. Об утверждении перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы: Постановление совета Министров Респ. Беларусь, 19 апр. 2010 г., № 585 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2010. – № 69. – 5/14142.
2. Кулаков, А. В. Обезжелезивание и деманганация подземных вод: учеб. пособие / А. В. Кулаков, Е. В. Сошников, Г. П. Чайковский. – Хабаровск: ДВГУПС, 1998. – 100 с.
3. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Е. Я. Зингер. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
4. Громогласов, А. А. Водоподготовка: Процессы и аппараты: учеб. пособие для вузов / А. А. Громогласов, А. С. Копылов, А. П. Пильщиков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 229 с.
5. Кострикин, Ю. М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справочник / Ю. М. Кострикин, Н. А. Мещерский, О. В. Коровина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
6. Кульский, Л. А. Основы химии и технологии воды / Л. А. Кульский. – Киев: Наукова думка, 1991. – 328 с.
7. Груданов, В. Я. Основы инженерного творчества: учеб. пособие / В. Я. Груданов. – Минск: Изд. центр БГУ, 2005. – 299 с.
8. Эжектор: пат. № 10537 Респ. Беларусь, МПК F 04 F 5/00 / В. Я. Груданов, С. В. Акуленко, А. А. Бренч, Ю. А. Секацкая; заявитель Могилевский гос. ун-т продовольствия. – № а20060018; заявл. 11.01.06; опубл. 14.01.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1. – С. 6.
9. Эжектор: пат. № 11810 Респ. Беларусь, МПК F 04 F 5/00 / В. Я. Груданов, Ю. А. Секацкая, А. А. Бренч; заявитель Могилевский гос. ун-т продовольствия. – № а20070012; заявл. 10.01.07; опубл. 28.01.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1. – С. 3.

V. Ya. GRUDANOV, Yu. A. SEKATSKAYA, A. A. BRENCH, I. T. TKACHOVA

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF GAS-LIQUID EJECTORS FOR IRON REMOVAL FROM WATER IN THE LINES FOR SOFT DRINKS PRODUCTION

Summary

The article deals with the process of iron removal from water using a gas-liquid ejector of a new design. The design parameters of a multijet ejector are calculated.

Theoretical and experimental research shows that the created gas-liquid ejector ensures efficient and equal oxygenation of water, at the same time with these design parameters of the ejector the water decontamination factor is 96.8 %. The laboratory and field tests of a trial sample of a new ejector show its high efficiency.