

УДК 621.694.2

ГАЗО-ЖИДКОСТНОЙ ЭЖЕКТОР ДЛЯ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В.Я. Груданов, А.А. Бренч, Ю.А. Секацкая

Разработана новая конструкция газо-жидкостного эжектора, в которой взаимосвязаны все геометрические параметры, что позволило повысить эффективность работы эжектора и существенно улучшить качество процесса обезжелезивания воды. По результатам проведенного химического анализа воды установлено, что при использовании новой конструкции газо-жидкостного эжектора содержание железа в воде снижается до полного его удаления, а химический состав и концентрация полезных веществ остаются в допустимых пределах и не изменяются. Проведены промышленные испытания опытного образца эжектора новой конструкции. Результаты сравнительных испытаний серийных и новых конструкций газо-жидкостных эжекторов доказывают правильность выводов, сделанных по результатам теоретических исследований.

Введение

Как известно, качество готовой продукции во многом зависит от качества сырья, из которого она изготовлена. В линиях по производству безалкогольных напитков (соков, сладких газированных и минеральных вод) основным компонентом является вода, от качества которой и зависит конечный результат. Поэтому в данных типах производства вода должна соответствовать существующим правилам и нормам и систематически подвергаться проверке. Необходимо осуществлять подготовку воды и строго контролировать её состав.

Источником водоснабжения большинства предприятий пищевой промышленности являются подземные скважинные воды. К сожалению, в природной воде, находящейся в недрах земли, присутствуют химические элементы и их соединения, концентрация которых превышает предельно допустимую. К таким элементам относится железо. Подземные скважинные воды отличаются большим содержанием железа и железобактерий и повышенным содержанием углекислоты и сероводорода.

Высокое содержание железа существенно влияет на качество воды. Ухудшаются её органолептические показатели, вода имеет желтовато-бурую окраску и повышенную мутность, приобретает неприятный железистый привкус, становится непригодной для производственных целей. Железобактерии питаются растворенным в воде железом, а когда отмирают, откладываются в виде ржавой слизи, что становится причиной язвенной коррозии железа и стали и сильно ускоряет процесс образования железных отложений в металлических трубах водопроводной сети, подающих такую воду. Отложения ведут к суживанию сечений труб, а иногда и к их полной закупорке; к снижению скорости потоков и давления в трубопроводах; к быстрому разрушению труб. Высокое содержание углекислоты препятствует переходу двухвалентного железа в трехвалентное и выпадению соединений железа в осадок. Наличие в воде сероводорода придаёт ей неприятный запах, ощущаемый уже при концентрации 0,5 мг/л, интенсифицирует процесс коррозии оборудования и вызывает его зарастание вследствие развития серобактерий [1,2].

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. Ещё более жесткие требования к содержанию железа в воде предъявляют отдельные производства.

Именно поэтому удаление железа из воды (обезжелезивание), понижение его концентрации до допустимой нормы являются одной из самых насущных и сложных задач водоподготовки.

Особенности процесса обезжелезивания воды

Метод обезжелезивания выбирается в зависимости от того, в какой форме железо

содержится в воде.

Наиболее распространенным соединением железа, находящимся в подземной воде, является гидрокарбонат железа $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$. Встречаются также карбонатная (FeCO_3), сульфатная (FeSO_4) и сульфидная (FeS) формы растворенных соединений двухвалентного железа. В трехвалентном состоянии растворенное железо встречается крайне редко в виде сульфатов ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) или растворимых органических комплексов.

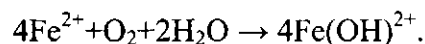
В настоящее время применяют следующие методы обезжелезивания: безреагентный, осуществляемый путём аэрации, отстаивания и фильтрования; реагентный (коагулирование, хлорирование, озонирование, известкование); метод ионного обмена, применяемый в том случае, если кроме обезжелезивания необходимо производить и умягчение воды; с помощью катализаторов; биологическое обезжелезивание; мембранная фильтрация. Правильно выбрать метод можно только пробным обезжелезиванием.

Наиболее традиционным, простым и экономичным методом обезжелезивания является аэрация воды, т.е. насыщение её кислородом воздуха. Принцип метода заключается в окислении кислородом воздуха, бесплатным природным окислителем, двухвалентного железа до трехвалентного, которое выпадает в осадок и затем уже легко отфильтровывается на фильтрах с зернистой загрузкой. При этом нерастворимый осадок задерживается в слое засыпки и сам по себе способствует более эффективному окислению растворенного железа.

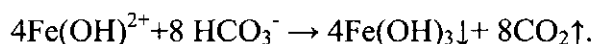
Необходимость аэрации зависит от физико-химических показателей источника водоснабжения: величины содержания железа, рН воды, окисляемости, наличия запахов, привкусов, агрессивных газов (углекислоты, сероводорода).

Наиболее часто встречающееся двууглекислое соединение железа $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ (гидрокарбонат железа (II)) – нестойкое соединение, в котором железо (II) при контакте с воздухом легко окисляется.

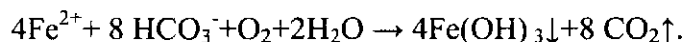
Процесс окисления железа (II) кислородом воздуха в воде без гидрокарбонат-ионов описывается уравнением



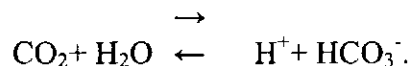
Железо (III) в последующем подвергается гидролизу:



В общем виде процессы гидролиза и окисления соединений железа можно записать уравнением



Образовавшийся углекислый газ (CO_2) подкисляет воду:



В результате реакции, интенсивно протекающей при аэрации, 1 мг гидролизованного железа выделяет 1,57 мг/л свободной углекислоты CO_2 , щёлочность воды при этом снижается на 0,036 мг-экв/л. Образовавшийся растворимый в воде гидроксид железа (II) $\text{Fe}(\text{OH})_2$, соединяясь с кислородом воздуха, превращается в коллоидный гидроксид железа (III) $\text{Fe}(\text{OH})_3$, который коагулирует при рН воды 6,5-7,5 и переходит в оксид железа $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, выпадающий в осадок в виде бурых хлопьев [2].

Происходящий при аэрации воды гидролиз двууглекислого железа понижает рН воды вследствие образования свободной углекислоты. Понижение рН воды тем интенсивнее, чем больше железа и меньше её щёлочность.

Разработка новой конструкции газо-жидкостного эжектора

Для обезжелезивания подземных вод с высоким содержанием железа был разработан безреагентный аэрационный метод с применением эжекционных аппаратов. Данный метод

рекомендуется для применения и последующей корректировки с учетом особенностей природных вод.

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 растворённые 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); организует движение потоков в общем объеме воды с целью равномерного распределения растворённого 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 [3]

Существующие конструкции эжекторов имеют существенные недостатки. Использование в эжекторах принципа центральной подачи воды при наличии только одного сопла или периферийной подачи воды без закрутки активного потока сокращает количество эжектируемого воздуха, подсосываемого в струю. Это происходит за счёт того, что потоки воды движутся прямолинейно, не происходит их дополнительного закручивания и усиления действия друг друга, сокращается путь струи до места соприкосновения со стенками горловины (камеры смешения). При этом не происходит достаточно эффективного и качественного использования площади сечения горловины, ухудшается качество процесса смешения сред, уменьшается время контакта кислорода воздуха с двухвалентным железом, содержащимся в воде, и, как следствие, ухудшается процесс обезжелезивания. Нами предложена новая конструкция газо-жидкостного эжектора, представленного на рисунке 1.

Целью работы является улучшение процесса смешения воды с воздухом, увеличение площади и времени контакта кислорода воздуха с двухвалентным железом, содержащимся в воде и, как следствие, повышение эффективности работы эжектора.

Поставленная задача достигается тем, что в эжекторе, содержащем горловину, патрубок для подвода воды и коллектор с соплами, расположенными концентрично и наклонно к плоскости осевого сечения горловины, площадь поперечного сечения горловины разделена по числу сопел на ряд концентрических условных окружностей, разбивающих её на равные по площади участки, при этом радиус окружностей R_i определяется по формуле

$$R_i = \sqrt{\frac{R_2^2 \cdot i}{n}}, \quad (1)$$

где R_2 - радиус горловины, см;

i - порядковый номер условной окружности, считая от центра горловины;

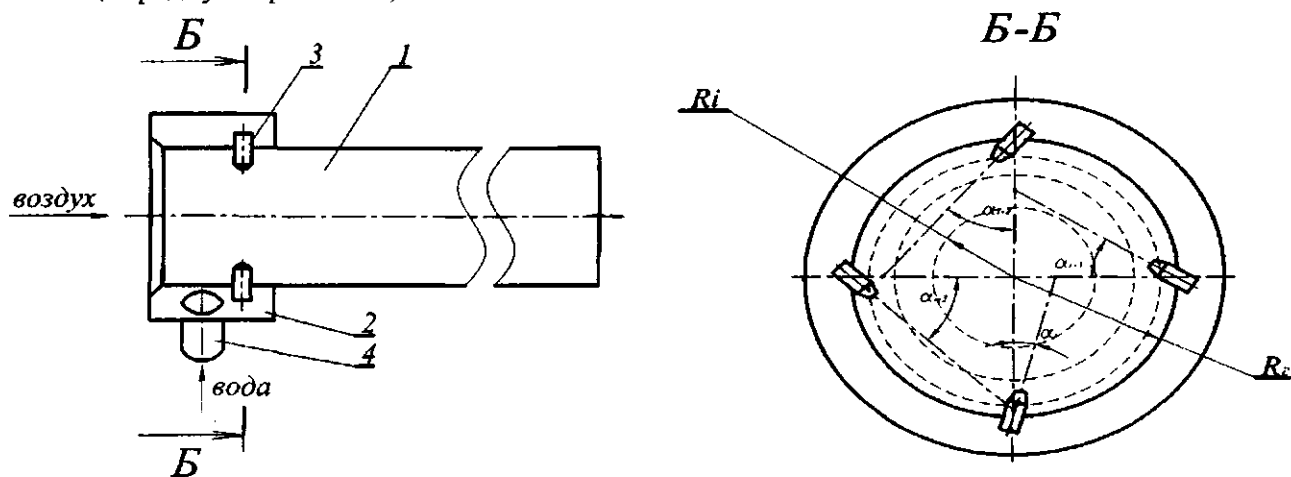
n - количество сопел;

а угол наклона α_i каждого последующего сопла больше предыдущего, считая от сопла с минимальным углом наклона, и определяется по формуле

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{R_i + R_{i-1}}{2R_2}\right), \quad (2)$$

где R_i – радиус i -ой условной окружности, см;

R_c – радиус горловины, см.



1 – горловина, 2 – коллектор, 3 – сопла, 4 – патрубок для подвода активной среды,
 R_c – радиус горловины, R_i – радиус i -ой условной окружности, i – порядковый номер условной окружности, считая от центра горловины; α_i – угол наклона i -го сопла

Рисунок 1 – Схема газожидкостного эжектора

Вода под давлением через патрубок 4 поступает в коллектор 2. Проходя через сопла 3 коллектора 2, активные струи воды захватывают пассивный воздушный поток и в горловине 1 происходит быстрое и качественное смешение сред.

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 конструкция, форма и размеры эжектора определялись произвольно, исходя из выбранных коэффициентов, которые принимались при расчете.

Геометрические параметры новой конструкции эжектора взаимосвязаны и рассчитаны с использованием законов «золотой» пропорции, что также позволяет улучшить качество процесса обезжелезивания подземных вод [4].

Скорость истечения воды из сопла

$$v_b = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_b}}, \quad (3)$$

где ΔP – давление воды в сети, Па;

ρ_b – плотность воды, кг/м³;

φ – коэффициент истечения (табл. 1).

Таблица 1 – Значения 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

Площадь поперечного сечения сопла

$$F_c = \frac{V_b}{3600 v_b n} \quad \text{и} \quad F_c = \frac{d_c^2}{\sqrt{\Phi}}, \text{ м}^2 \quad (4)$$

где V_b – расход воды, м³/с;

v_b – скорость истечения воды, м/с;

n – количество сопел, шт.;

d_c – диаметр сопла, м;

Φ – коэффициент «золотой» пропорции ($\Phi = 1,618$).

Диаметр соплового отверстия определяем по формуле

$$F_c = \frac{d_c^2}{\sqrt{\Phi}} \quad \text{или} \quad d_c^2 = \sqrt{\Phi} F_c \quad \text{и} \quad d_c = \sqrt{1,272 F_c}, \quad (5)$$

Диаметр смесителя определяется по формуле

$$D_{см} = d_c \sqrt{\frac{(1 + U)(1 + U \frac{\rho_{воз}}{\rho_{в}})(1 + \frac{g}{2})}{\cos \alpha_i}}, \quad (6)$$

где U – объемный коэффициент инжекции;

g – коэффициент аэродинамического сопротивления смесителя ($g = 0,2$);

α_i – угол наклона соплового отверстия к оси смесителя, рад;

$\rho_{воз}$ – плотность воздуха, кг/м³.

Длина смесителя определяется по формуле

$$L_{см} = \Phi^2 D_{см}. \quad (7)$$

В результате данного технического решения происходит закрутка периферийного потока воды в тангенциальном направлении, поскольку каждый поток воды, выходящий из сопла, описывает свой спиралевидный путь, потоки не мешают друг другу и усиливают действие друг друга. Происходит эффективное и качественное использование площади сечения горловины (камеры смешения) за счёт того, что потоки воды, выходящие из сопел, заполняют соответствующие участки площади сечения горловины, равные между собой, и при этом направляются строго в центр соответствующего участка. Благодаря всему этому увеличивается путь струи до места соприкосновения со стенками горловины, захватывается большое количество пассивного воздушного потока, происходит его эффективное перемешивание с активными потоками воды, увеличивается время и площадь контакта кислорода воздуха с двухвалентным железом, содержащимся в воде, и, как следствие, повышается процесс обезжелезивания.

Результаты промышленных испытаний

Согласно заказу Могилевского областного союза потребительских обществ, на кафедре «Машины и аппараты пищевых производств» УО «Могилевский государственный университет продовольствия» был разработан и изготовлен газо-жидкостный эжектор инжекционного типа. Данный эжектор внедрен на ЧПУП «Чериковский плодоконсервный завод» Белкоопсоюза РБ в линии по производству минеральной воды «Сож».

Для проверки эффективности работы газо-жидкостного эжектора и оценки качества воды до обезжелезивания и после был проведен химический анализ сульфатной магниевой-кальциевой минеральной воды «Сож».

Массовая концентрация компонентов минеральной воды (табл. 2) была определена с помощью атомно-абсорбционного анализа.

Таблица 2 - Массовая концентрация компонентов минеральной воды

	Массовая концентрация мг/л		
	Катионы		
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ K ⁺
Допустимые концентрации	300–600	80–180	200–300
Вода до обезжелезивания	460	164	240
Вода после обезжелезивания	460	164	240
	Массовая концентрация мг/л, не более		
	Стронций Sr	Цинк Zn	Медь Cu
	Допустимые концентрации	25,0	5,0
Вода до обезжелезивания	9,3	0,49	<0,04
Вода после обезжелезивания	9,8	0,42	<0,04

Анализ на содержание железа проводился согласно ГОСТ 4011-72, при чувствительности метода 0,05 мг/л. Результаты анализа приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Содержание железа в минеральной воде

Вода до обезжелезивания	Выпадает осадок в виде гидроксида железа (Fe (OH) ₃)
Вода после обезжелезивания	Железо отсутствует

Все полученные значения находятся в пределах допустимых норм.

Проведенный химический анализ сульфатной магниевно-кальциевой минеральной воды «Сож» показал, что при обезжелезивании воды с применением газо-жидкостного эжектора достигается явный положительный эффект: снижается уровень содержания железа до полного удаления, при этом химический состав и концентрация других обнаруженных компонентов остаются величинами постоянными.

Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 3,9 млн бел.руб. (в ценах на 01.01.2005 г.). Экономический эффект достигается за счет повышения эффективности процесса обезжелезивания подземных вод при использовании эжектора ЖГЭ-5,0 новой конструкции.

Заключение

На основе изучения теоретических особенностей процесса обезжелезивания подземных вод и существующих конструкций эжекторов была разработана новая конструкция газо-жидкостного эжектора, в которой взаимосвязаны все геометрические параметры. После промышленных испытаний опытного образца эжектора новой конструкции был проведен химический анализ воды, подвергавшейся обезжелезиванию. Результаты проведенного химического анализа показали, что при использовании новой конструкции газо-жидкостного эжектора содержание железа в воде снижается до полного его удаления, а химический состав и концентрация полезных веществ остаются в пределах допустимых норм и не изменяются. Это позволило судить о повышении эффективности работы эжектора и существенном улучшении качества процесса обезжелезивания воды.

Литература

1. Журба, М.Г. Повышение качества очистки питьевых вод/ М.Г. Журба, В.А. Мякишев, Н.Н. Гироль; под ред. А.С. Рабинковой. – Кишинев: МолдНИИНТИ, 1979. – 61 с.
2. Румянцев, Л.П. Брызгальные установки для обезжелезивания воды/ Л.П. Румянцева; под ред. В.В. Хоревой. – М.: Стройиздат, 1973. – 104 с.
3. Успенский, В.А. Струйные вакуумные насосы/ В.А. Успенский, Ю.М. Кузнецов; под ред. О.В. Маргулис. – М.:Машиностроение, 1973. – 144 с.
4. Груданов, В.Я. Основы инженерного творчества: учеб. пособие/ В.Я. Груданов. – Минск: Изд. центр БГУ, 2005. – 299 с.
5. Беленький, С.М. Технология обработки и розлива минеральных вод/ С.М. Беленький, Г.П. Лаврешкина, Т.Н. Дульнев; под ред. И.В. Шарудиной. – 2-е изд. – М.: Агропромиздат, 1990. – 151 с.
6. Белан, А.Е. Проектирование и расчет устройств водоснабжения/ А.Е. Белан, П.Д. Хоружий. – Киев: Будивельник, 1976. – 208 с.
7. Громогласов, А.А. Водоподготовка: Процессы и аппараты: учеб. пособие для вузов/ А.А. Громогласов, А.С. Копылов, А.П. Пильчиков; под ред. О.И. Мартыновой. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.
8. Вышелесский, А.Н. Тепловое оборудование предприятий общественного питания: учебник для технол. фак. торг. вузов/ А.Н. Вышелесский; под ред. Л.С. Червяковой. – 5-е изд. – М.: Экономика, 1976. – 399 с.

Поступила в редакцию 28.02.2007