

УДК 628.161

С.Ю. Мартынов

Національний університет водного господарства та природопольовання, г. Ровно

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДЫ

Разработана математическая модель контактного обезжелезивания воды на зернистых фильтрах.

Приведены основные блоки обезжелезивания воды положенные в основу моделирования контактного обезжелезивания воды.

Представлен алгоритм реализации математической модели, который может быть реализован на любом языке программирования или в специализированных программных продуктах, например MathCAD.

Ключевые слова: обезжелезивание воды, гидравлический уклон, пенополистирольные фильтры, гранулометрический состав загрузки, параметры работы зернистых фильтров, концентрация железа, водоочистное оборудование.

Постановка проблемы

Качество воды, забираемой из подземных горизонтов на глубине 100-150 м чаще всего не соответствует требованиям, предъявляемым к питьевой воде, поскольку содержат в своем составе повышенную концентрацию железа.

В последнее время при очистке воды хорошо себя зарекомендовали фильтры с пенополистирольной засыпкой. В сравнении с другими фильтрами они дешевле, проще в эксплуатации и строительстве, не требуют промывных емкостей и насосов, имеют минимальное количество распределительных систем [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день существует значительное количество методов обезжелезивания воды, конструкций фильтров и засыпок для них, однако не существует универсального, экономически выгодного способа обезжелезивания воды, который можно использовать во всех случаях жизни. Наоборот, в каждом конкретном случае для обезжелезивания воды необходимо использовать конкретные методы и водоочистное оборудование [3].

На данное время во многих регионах Украины подземные воды содержат повышенную концентрацию железа до 2 мг/дм³. Вопрос подготовки таких вод до качества питьевых можно решить только путем контактного обезжелезивания с применением пенополистирольных фильтров,

загруженных крупнозернистой плавающей загрузкой.

Сегодня разработано больше ста конструкция фильтров с плавающей пенополистирольной засыпкой, который отличаются технологическими возможностями, условиями размещения ее в корпусах, конструктивными элементами, способами промывки. Выбор конструкции фильтра зависит от фазово-дисперсного состояния очищаемой исходной воды. Скорость фильтрования воды и продолжительность фильтроцикла уточняется в процессе эксплуатации фильтра [4].

Олейником А.Я. и Киселевым С.К. получена математическая модель для определения распределения концентрации железа Fe^{2+} в растворе по высоте фильтра со временем $C_I(x, t)$ [5]. Модель имеет два взаимосвязанных блока: гидродинамический (фильтрационный) и динамики образования соединений железа в пористой среде.

Однако последняя не может быть использована на практике, т.к. затрудняется определение потери напора фильтрующей загрузки, трудно подобрать параметры фильтрования для воды с различным содержанием железа. Модель не раскрывает многих составляющих процесса фильтрования. Поэтому необходимо было проведение специальных исследований, которые позволили с достаточной точностью смоделировать процесс контактного обезжелезивания вод с использованием полистирольной загрузки [6].

Формулировка цели статьи

Цель работы заключается в разработке математической модели контактного обезжелезивания воды с использованием пенополистирольной загрузки.

Изложение основного материала

При обезжелезивании подземных вод на зернистых фильтрах, как и при осветлении поверхностных вод, рассматриваются два параллельных процесса: эффективность очистки воды и рост потерь напора. Первый процесс является основным, а второй – сопутствующим. Поэтому, математическая модель обезжелезивания воды должна базироваться на двух основных блоках [7, 8]:

- осветительный (деформационный) блок – учитывает материальный баланс и кинетику протекания процесса;
- гидродинамический (фильтрационный) блок – описывает динамику потерь напора в зернистой загрузке.

С достаточной точностью уравнения материального баланса можно представить следующим дифференциальным уравнением:

$$V \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где V – скорость фильтрования, м/ч;

$C(x, t)$ – концентрация железа, г/м³, изменяющаяся по высоте загрузки и времени;

x – координата по высоте загрузки, м;

$\rho(x, t)$ – плотность осадка в слое загрузки, г/м³, изменяющаяся по высоте загрузки и времени;

t – время фильтрования, ч.

При обезжелезивании воды с отдельными воздухоотделителями и постоянном расходе, скорость фильтрования на каждом из фильтров будет постоянной, то есть $V=const$. При общем воздухоотделителе для нескольких пенополистирольных фильтров, они будут работать с разной скоростью. Кроме того, при промывке одного фильтра, на других скорость будет повышаться до значения:

$$V_{\text{пр}} = V \cdot N / (N - 1), \quad (2)$$

где N – количество пенополистирольных фильтров с общим воздухоотделителем.

Скорость фильтрования изменяется и при изменении расхода воды, подаваемой на обезжелезивание, то есть $V=f(Q)$, что характерно при многозонном тарифе на электроэнергию. В периоды минимальной стоимости электроэнергии фильтры работают с максимально возможной производительностью, а в периоды максимальной стоимости – работают с минимально необходимым расходом или вообще не работают.

Для описания кинетики процесса обезжелезивания в слое пенополистирольной загрузки может быть применено линейное уравнение вида:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = a(x) \cdot \rho(x,t) - b(x) \cdot C(x,t), \quad (3)$$

где $a(x)$, $b(x)$ – кинетические коэффициенты, характеризующие интенсивности отрыва и прилипания соединений железа в загрузке и могут быть определены по формулам:

$$a = \alpha \cdot V^{\varepsilon_1} \cdot d(x)^{\varepsilon_2}, \quad (4)$$

и

$$b = \varphi(\rho) \cdot \beta \cdot V^{\varepsilon_3} \cdot d(x)^{\varepsilon_4} \quad (5)$$

где $\varphi(\rho)$ – коэффициент, учитывающий каталитическое влияние осадка;

α , β , ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 – эмпирические коэффициенты;

$d(x)$ – эквивалентный диаметр зерен загрузки, мм.

Гидродинамический блок описывается уравнениями изменения гидравлического уклона, пористости загрузки и общих потерь напора в обезжелезивающей установке.

Поскольку пенополистирольные фильтры могут эффективно обезжелезывать воду и в неламинарном режиме, то гидравлический уклон загрузки удобно определять по формуле:

$$I = 4.23 \cdot 10^3 \cdot \frac{(1 - m(x,t))^2 \cdot v(t) \cdot V}{m(x,t)^3 \cdot d(x)^2} + 1.37 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{(1 - m(x,t)) \cdot V^2}{m(x,t)^3 \cdot d(x)} \quad (6)$$

где $m(x,t)$ – пористость слоя загрузки;

$v(t)$ – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с;

V – скорость фильтрования, м/ч;

$d(x)$ – диаметр частицы, мм.

Данная модель может быть решена численным (конечно-разностным) способом, используя метод продольно-поперечной прогонки [9, 10].

Предложенная математическая модель решается численным методом. Для этого необходимо задать или экспериментально установить следующие величины: диаметры зерен по высоте загрузки $d(x)$; пористость чистой загрузки m_0x ; температуру воды t_B ; эмпирические коэффициенты α , β , φ , ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 ; массовую концентрацию твердых частиц γ ; концентрацию загрязнений после промывки $\rho(x, 0)$; потери напора в коммуникациях и удерживающей решетке H_0 .

В зависимости от поставленной задачи дополнительно могут задаваться следующие показатели: скорость фильтрования V ; входная концентрация железа C_0 ; концентрация железа в фильтрате C_ϕ ; продолжительность фильтрования t ; общая высота загрузки L ; максимальные потери напора в обезжелезивающей установке $h_{дон}$.

На рис. 1 точками показаны результаты исследований гранулометрического состава пенополистирольной загрузки, которая использовалась при исследовании напорного и безнапорного режимов обезжелезивания воды.

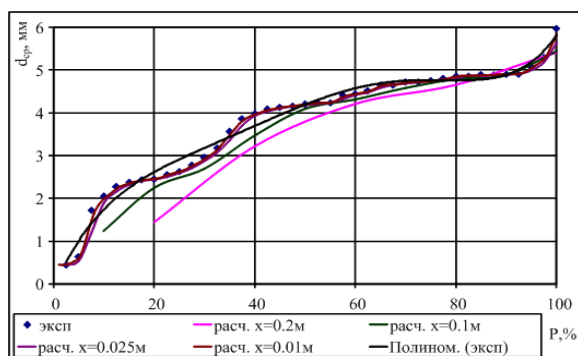


Рис. 1. Зависимость $d_{cp}=f(\Delta x)$

Установлена зависимость для пенополистирола с насыпной плотностью $15...110 \text{ г/м}^3$. По результатам исследований построен график (рис. 2).

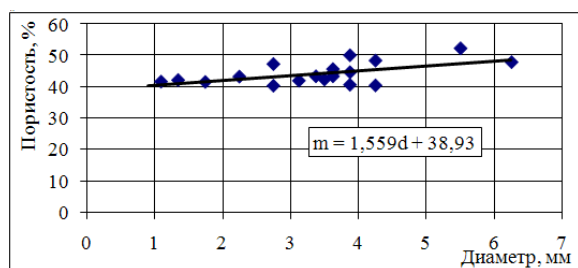


Рис. 2. Зависимость пористости «чистой» пенополистирольной загрузки от диаметра частиц

Итак, по результатам экспериментальных исследований видно, что пористость загрузки незначительно возрастает при увеличении гранул и может быть описана зависимостью:

$$m_0 = 1,559 \cdot d_{cp} + 38,93, \quad (7)$$

где d_{cp} – средний диаметр зерен загрузки, мм.

Средняя пористость исследуемой загрузки составляла 44,2%, что хорошо согласуется с данными других исследователей: по данным Орлова В.О. – 45%, Журбы М.Г. – 46%.

Важным показателем при моделировании контактного обезжелезивания воды является зависимость начальной концентрации осадка после промывки по высоте слоя загрузки $\rho_0=f(x)$.

Начальная концентрация осадка (железа), то есть перед фильтрацией, зависит от эффективности промывки

$$E = f(i_{пп}, t_{пп}, \rho(x), \gamma), \quad (8)$$

где $t_{пп}$ – интенсивность промывки загрузки;

$t_{пп}$ – продолжительность промывки загрузки;

$\rho(x)$, γ – плотность осадка и массовая концентрация твердых частиц в единице объема осадка до промывки.

Алгоритм реализации математической модели следующий:

1. Задаются необходимые коэффициенты и шаги счета по высоте загрузки и времени.

2. Определяются массивы средних диаметров, начальное распределение осадка по высоте загрузки, коэффициентов отрыва и прилипания частиц.

3. Организуются два вложенных цикла – по времени фильтрования и по высоте загрузки.

4. Определяется эффективность обезжелезивания воды по слоям загрузки, плотность осадка, пористость, гидравлический уклон и потери напора при фиксированном значении времени фильтрования.

5. Увеличивается время фильтрования и расчеты параметров по высоте слоя повторяются, причем в качестве исходных данных (плотность осадка) принимаются данные расчетов предыдущего времени.

6. При необходимости, может быть организована проверка выполнения определенных условий (например, качество фильтрата, потери напора), с последующим уточнением исходных данных (например, корректировки общей высоты загрузки, скорости фильтрования).

7. Вывод результатов в форме таблиц и графиков.

Данный алгоритм может быть реализован на любом языке программирования или в специализированных программных продуктах, например, MathCAD [11, 12].

Проверка адекватности модели проводилась путем сравнения значений рассчитанных по модели с экспериментальными исследованиями, полученными как в лабораторных, так и в производственных условиях. Для примера, на рис. 3 линиями приведены потери напора в слоях загрузки 30 см, 70 см и 1 м полученные по модели, а точками – в результате проведения экспериментальных исследований.

Результаты расчетов по предложенной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными, относительная погрешность не превышает 4,8%.

Выводы

1. Разработана математическая модель контактного обезжелезивания воды при помощи пенополистирольной загрузки.

2. Представлен алгоритм реализации математической модели, последняя может быть решена численным способом, используя метод продольно-поперечной прогонки.

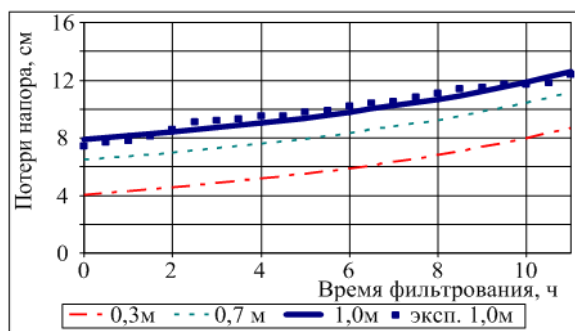


Рис. 3. Ріст втрат напора со временем фільтрування при обезжелезивании воды

3. Проверка адекватности модели хорошо согласуется с экспериментальными исследованиями, что позволяет рекомендовать разработанную модель для практических расчетов.

Литература

1. Орлов В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою / В.О. Орлов. – Рівне: НУВГП, 2005. – 163 с.
2. Орлов В.О. Водопостачання та водовідведення: підручник / В.О. Орлов, Я.А. Тугай, А.М. Орлова. – К.: Знання, 2011. – 359 с.
3. Орлов В.О. Очищення природної води на пінополістирольних фільтрах / В.О. Орлов, С.Ю. Мартинов, А.М. Орлова, В.О. Зоцук, Н.Л. Мінаєва, С.О. Куницький та ін., під загальною редакцією В.О. Орлова. Монографія. – Рівне: НУВГП, 2012. – 172 с.
4. Орлов В.О. Пінополістирольні фільтри в технологічних схемах водопідготовки / В.О. Орлов, А. М. Зоцук, С.Ю. Мартинов. - Рівне: РДТУ, 1999. – 144 с.
5. Киселев С.К. Гидродинамическая модель фильтрования при очистке подземных вод от соединений железа / С.К. Киселев, А.Я. Олейник // Прикладна гідромеханіка – 1999.- №2 – С. 208-210.
6. Орлов В.О. Дослідження режимів фільтрування знезалізнюючого піно полістирольного фільтра / В.О. Орлов, С.Ю. Мартинов, С.О. Куницький // Вісник НУВГП: Збірник наукових праць. – 2010. – Рівне. – Вип.. 4(52). – С. 21-27.
7. Тугай А. М. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах коломатажу : [монографія] / А. М. Тугай, О. Я. Олійник, Я. А. Тугай. – Харків : ХНАМГ, 2004. – 240 с.
8. Станкявичус В. И. Обезжелезивание воды фильтрованием (основы теории и расчет установок) / В. И. Станкявичус. – Вильнюс : Мокслас, 1978. – 120 с.
9. Орлов В.О. Интенсификация работы водоочистных сооружений / В.О. Орлов, Б.И. Шевчук. – К.: Будивельник, 1989. – 128 с.
10. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. / Д. М. Минц. – М. : Стройиздат, 1964. – 155 с.
11. Теоретические основы очистки воды / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернишов, В.Н. Маслак, Н.И. Зотов. – Макеевка: ДІАСА, 1999. _ 277 с.

12. Орлов В.О. Дослідження контактного знезалізнення на пінополістирольних фільтрах / В.О. Орлов, С.Ю. Мартинов, С.О. Куницький, М.М. Меддур // Вісник ОДА БА. - 2012. – Одеса. – Вип.. 45 - С. 176-182.

References

1. Orlov V.O. Water treatment filters with granular backfill / V.O. Orlov. - Rivne: NUWMNRU, 2005. - 163 p.
2. Orlov V.O. Water supply and sewage: a textbook / V.O. Orlov, Y.A. Tugay, A.M. Orlova. - K.: Znamya, 2011. - 359 p.
3. Orlov V.O. The treatment of natural water on polystyrene filters / V.O. Orlov, S. Martynov, A.M. Orlova, V.O. Zoschuk, N.L. Minaeva, S.O. Kunitsky, Edited by V.O. Orlov. Monograph. - Rivne: NUWMNRU, 2012. - 172 p.
4. Orlov V.O. Polystyrene filters in water treatment technological schemes / V.O. Orlov, A.M. Zoschuk, S.Y. Martynov. - Rivne: RDTU, 1999. - 144 p.
5. Kiselev S.K. The hydrodynamic model of filtration in the treatment of groundwater from iron / S.K. Kiselev, A.J. Olejnik // Applied gidromehaniка - 1999.-№2 - P. 208-210.
6. Orlov V.O. Research of the modes of filtration of deferrization of polystyrene filter / V.O. Orlov, S. Martynov, S.O. Kunitsky // Bulletin NUWMNRU: Collected Works. - 2010 - Rivne. - Issue 4 (52). - P. 21-27.
7. Tugay A.M. The productivity of water intake mining holes is in terms to the colmatage [monograph] / A.M. Tugay, A. J. Olejnik, JA. Tugay. - Harkiv: KNAME, 2004. - 240 p.
8. Stankevicius V.I. Deferrization of water filtration (bases of theory and calculation of options) / V.I. Stankevicius. - Vilnius: Mokslas, 1978. - 120 p.
9. Orlov V.O. Intensification of work of water treatment plants / V.O. Orlov, B.I. Shevchuk. - K.: Budivelnik, 1989. - 128 p.
10. Mints D.M. Theoretical basis of water treatment technology / D.M. Mintz. - M.: Stroyizdat, 1964. – 156 p.
11. Theoretical basis of water treatment / N.I. Kulikov, A.J. Naiman, N.P. Omelchenko, V.N. Chernysh, V.N. Maslak, N.I. Zotov. - Makeyevka: DIASA, 1999_ 277 p.
12. Orlov V.O. Research of pin deferrization is on polystyrene filters / V.O. Orlov, S. Martynov, S.O. Kunitsky, M.N. Meddur // Bulletin OSABA. - 2012 - Odessa. - Issue 45 - P. 176-182.

Рецензент: д-р техн. наук проф. С.С. Душкин, Харьковський національний університет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков.

Автор: МАРТЫНОВ Сергей Юрьевич кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и бурового дела Национальный университет водного хозяйства и природопользования, E-mail – d.akass@mail.ru.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОГО ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ВОДИ

С. Ю. Мартинов

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

*Розроблена математична модель контактного знезалізнення води на зернистих фільтрах.**Приведені основні блоки знезалізнення води, що покладені в основу моделювання контактного знезалізнення води.**Представлений алгоритм реалізації математичної моделі, який може бути реалізований на будь-якій мові програмування або в спеціалізованих програмних продуктах, наприклад MathCAD.**Ключові слова:* знезалізнення води, гідравлічний ухил, пінополістирольні фільтри, гранулометричний склад завантаження, параметри роботи зернистих фільтрів, концентрація заліза, водоочисне обладнання.

MATHEMATICAL MODEL OF PIN DEFERRIZATION OF WATER

S. Martynov

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

*There is a far of methods of deferrization of water to date, constructions of filters and filings up for them, however there is an universal, economic advantageous method of deferrization of water. In every case for the deferrization of water it is necessary to use concrete methods and waste-water treatment facility.**The mathematical model of deferrization of water is based on two basic blocks: lighting (deformation) block which takes into account financial balance and kinetics of flowing of process and hydrodynamic (lauter), which describes the dynamics of losses of pressure in a grainy load.**At the deferrization of water with separate vozdukhootdelatelyami and indirect cost, speed of filtration on each of filters will be permanent. At general vozdukhootdelitele for a few penopolistirol'nykh filters, they will work with different speed.**Speed of filtration changes at the change of rate-of-flow, given on a deferrization, that characteristically at a multiarea tariff on electric power. In periods of minimum electricity charges filters work with the maximally possible productivity, and in periods of maximal cost – work with a minimally necessary expense or does not work in general.**Researches roined that porosity of load insignificantly increased at the increase of granules.**It is set that an important index at the design of contact deferrization of water is dependence of initial concentration of sediment after washing on a height sloya loads.**With the sufficient degree of exactness mathematical balance can be presented equalization, which takes into account speed of filtration, washing of filter and rational expense of electric power.**The mathematical model of contact deferrization of water is developed on grainy filters.**The basic blocks of deferrization of water are resulted the designs of contact deferrization of water fixed in basis.**The algorithm of realization of mathematical model is presented, which can be realized in any programming language or in the specialized software products and which plugs in itself the followings principal items: necessary coefficients and steps of account are set on the height of load and time, the arrays of middle diameters, initial distributing of sediment, are determined on the height of load, coefficients of tearing away and adhesion of particles, the two embedded loops get organized – at times filtrations and on the height of load, efficiency of deferrization of water is determined on the layers of load, closeness of sediment, porosity, hydraulic slope and losses of pressure at the fixed value of time of filtration, time of filtration and calculations of parameters is increased on a height sloya, if necessary, verification of implementation of certain terms (for example, quality of filtrate, losses of pressure) can be organized, with subsequent clarification of basic data (for example, adjustments of general height of load, speeds of filtration). The results of researches can be presented as tables and charts.**Verification of model adequacy well comports with experimental researches, that allows to recommend the developed model for practical calculations.**Keywords:* deferrizations of water, hydraulic slope, polystyrene filters, grain-size distribution of loading, parameters of work of grainy filters, concentration of iron, waste-water treatment facility.