

Карагяур А.С.

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ ВОДЫ АДСОРБЦИЕЙ
В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ**

Введение. При подготовке питьевой воды из поверхностных источников важной задачей является удаление растворенных органических примесей, обуславливающих ее органолептические свойства. На Украине проблему усиливает зарегулированность большинства водоемов, а также антропогенное воздействие в виде сброса недостаточно очищенных сточных вод. Данные процессы приводят к эвтрофикации источника водоснабжения и ухудшению качества воды. Из-за неудовлетворительного качества очистки на существующих очистных сооружениях с применением традиционных методов растет интерес населения к различным бытовым устройствам доочистки [1].

Улучшение органолептических свойств воды может быть достигнуто тремя основными способами: окислением, сорбцией, нанофильтрацией или их комбинацией [2, 3]. В традиционной схеме очистки удаление растворенных органических примесей осуществляется окислением хлорсодержащими реагентами. Несмотря на дешевизну и относительную простоту данного метода, его главный недостаток заключается в том, что в процессе окисления образуются промежуточные хлорорганические вещества более опасные, чем исходные. Окисление озонном требует значительных энергетических затрат и усложнения технологии. Из-за неустойчивости данного элемента его необходимо приготавливать непосредственно на станции очистки. Применение нанофильтрации также требует повышенных энергетических затрат на продавливание воды через поры соответствующего размера, кроме того, необходима тщательная предочистка (удаление взвешенных и коллоидных частиц). Применение динамических мембран позволяет удалять ор-

ганические вещества на устройствах ультрафильтрации при меньшей разности давлений [4]. Однако, данный метод требует применения коагулянтов.

В последнее время при реконструкции водопроводных очистных сооружений в Российской Федерации, США и странах ЕС все чаще в технологической схеме предусматривают сорбционные фильтры [3]. В этих сооружениях вода фильтруется через неподвижную загрузку. В качестве материала адсорбента наиболее часто используют активированный гранулированный уголь. Проблема истирания частиц загрузки, а также невозможность удаления отработанного адсорбента в процессе очистки, являются недостатками данных сооружений. Перспективным является применение более дешевых порошкообразных и пылевидных углей. Из-за малых размеров зерна адсорбента и большей удельной поверхности процесс протекает более интенсивно. Также повышению эффективности очистки способствует движение слоя адсорбента в противотоке [5, 6] или перпендикулярно потоку воды [7]. За счет большей разности концентрации сорбата в воде и адсорбенте улучшается кинетика массообмена. Применение центробежных сил, создаваемых центрифугирующим устройством [8], позволит при использовании дешевого пылевидного материала организовать перекрестное движение очищаемой воды и частиц адсорбента (рис. 1), соответственно, интенсифицировать процесс извлечения примесей.

Цель и задачи. Целью исследований является обоснование параметров центробежного адсорбера, позволяющих сократить затраты энергии и адсорбента при очистке природной воды. Для достижения цели решались следующие задачи: разрабатывалась математическая модель, описывающая гидродинамические условия, а

также процессы переноса и массопередачи в указанном устройстве, проводились теоретические исследования влияния его параметров на эффективность очистки.

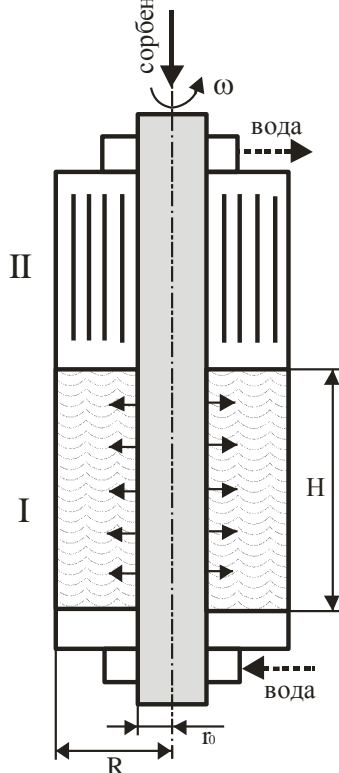


Рис. 1 Центробежный адсорбер
I – зона адсорбции
II – зона осветления

Результаты исследований

Исследования выполнены с помощью математической модели, основу которой составляют система уравнений (1) – (7), записанных в цилиндрической системе координат:

- уравнения переноса количества движения:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right); \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = \omega^2 r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right); \tag{2}$$

- уравнение неразрывности потока:

$$\frac{u}{r} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \tag{3}$$

- уравнение переноса концентрации адсорбтива:

$$\left(1 - \frac{b}{\rho_b} \right) \frac{\partial C}{\partial t} + b\beta(a_p - a) + u \frac{\partial C}{\partial r} + v \frac{\partial C}{\partial z} = D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{\partial C}{r \partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right); \tag{4}$$

- уравнение переноса концентрации адсорбента в воде:

$$\frac{\partial b}{\partial t} + u \frac{\partial b}{\partial r} + u_w \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial(rb)}{\partial r} + v \frac{\partial b}{\partial z} = D_b \left(\frac{\partial^2 b}{\partial r^2} + \frac{\partial b}{r \partial r} + \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \right); \tag{5}$$

- уравнение материального баланса:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + u \frac{\partial a}{\partial r} + u_w \frac{\omega^2 r}{g} \frac{\partial a}{\partial r} + v \frac{\partial a}{\partial z} = \beta(a_p - a); \tag{6}$$

- изотерма адсорбции:

$$a_p = K \cdot C, \tag{7}$$

где r, z – координаты; t – время; v, u – составляющие скорости; p – давление; ρ – плотность суспензии; ω – угловая скорость; u_w – гидравлическая крупность зерна адсорбента; a – концентрация адсорбата; C – концентрация адсорбтива; b – концентрация адсорбента; ρ_b – насыпная плотность адсорбента; v – коэффициент кинематической вязкости; β – коэффициент массопередачи; D_c, D_b – коэффициенты диффузии; a_p – равновесная концентрация адсорбата; K – коэффициент адсорбции.

Граничные и начальные условия:

$$t = 0 \quad C = 0; \quad a = 0; \quad b = 0;$$

$$v = \frac{Q}{\pi(R^2 - r_0^2)}; \quad u = 0;$$

$$r = r_0 \quad a = 0, \quad b = b_0; \quad C = 0; \quad v = 0;$$

$$u = \frac{Q_b}{2\pi r_0 H};$$

$$r = R \quad \frac{\partial a}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial b}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial C}{\partial r} = 0; \quad v = 0; \quad u = 0;$$

$$z = 0 \quad C = C_0; \quad a = 0; \quad b = 0;$$

$$v = \frac{Q}{\pi(R^2 - r_0^2)}; \quad u = 0;$$

$$z = H \quad \frac{\partial a}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial b}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial C}{\partial r} = 0;$$

$$v = \frac{Q + Q_b}{\pi(R^2 - r_0^2)}; u = 0,$$

где H – высота рабочей зоны; Q – расход очищаемой воды; Q_b – расход суспензии с адсорбентом; R, r_0 – соответственно, внешний и внутренний радиусы рабочей зоны; C_0, b_0 – концентрации, соответственно, адсорбтива и адсорбента на входе в устройство.

Важным параметром является диаметр зерна адсорбента d_b . От него зависит гидравлическая крупность u_w и, соответственно, скорость переноса частицы в поле центробежных сил $u_w \omega^2/g$, а также коэффициент массопередачи β . Связь между параметрами u_w и d_b описывается формулой Стокса:

$$u_w = \frac{\Delta \rho d_b^2 g}{18\mu}, \quad (8)$$

где $\Delta \rho$ – разность плотностей суспензии и материала адсорбента; g – ускорение свободного падения; μ – динамическая вязкость.

Связь между параметрами β и d_b описывается зависимостями, полученными из условия, что процесс массопередачи между раствором и зерном адсорбента лимитируются внешним массопереносом (такое допущение оправдано для зерен малого диаметра) [9]:

$$\beta = Nu_u \frac{D_c}{d_b^2}; Nu_u = 0,81 Re^{0,4}; \quad (9)$$

$$Re = \frac{d_b \sqrt{v^2 + u^2}}{\nu}$$

где Nu_u – число Нуссельта; Re – число Рейнольдса.

Система уравнений (1) - (8) решается численно с помощью метода конечных разностей. Определение давления осуществляется с помощью уравнения Пуассона путем подстановки выражений для составляющих скорости из уравнений переноса количества движения и уравнения неразрывности [10].

На рис. 2-5 представлены примеры расчета влияния диаметра зерна адсорбента d_b , концентрации адсорбента на входе

в адсорбер b_0/C_0 , удельной производительности $q = \frac{Q}{\pi(R^2 - r_0^2)}$ и числа Фруда

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g}$$

на эффект очистки C_1/C_0 (1), а также на параметр m_b/m_c (2). C_1 – средняя концентрация адсорбтива на выходе из устройства. Параметр m_b/m_c представляет собой отношение массы затраченного адсорбента к массе адсорбированных примесей.

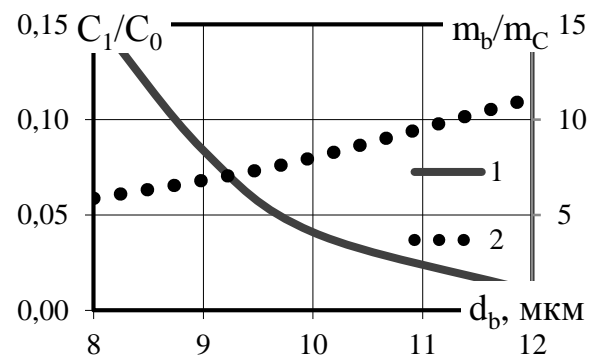


Рис. 2 Влияние диаметра зерна адсорбента на его требуемое количество и качество очистки

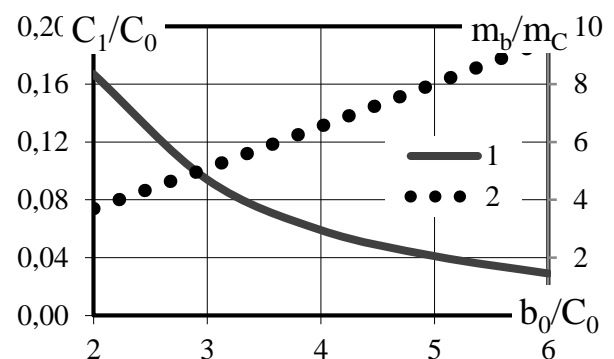


Рис. 3 Влияние исходной концентрации адсорбента на его требуемое количество и качество очистки

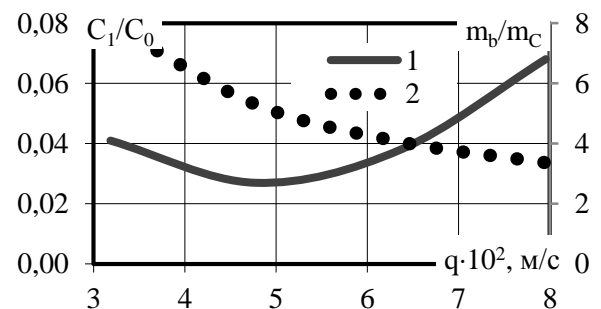


Рис. 4 Влияние удельной производительности на качество очистки и требуемое количество адсорбента

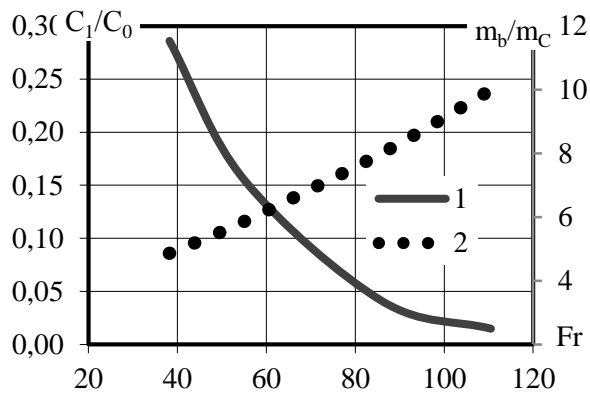


Рис. 5 Влияние числа Фруда на качество очистки и требуемое количество адсорбента

Анализ данных, представленных на рис. 2-5 позволяет сформулировать следующие выводы. На качество очистки значительно влияют такие параметры, как диаметр зерна адсорбента d_b , исходная концентрация адсорбента и число Фруда. При завышенном значении d_b гидравлическая крупность такой частицы больше, она быстрее достигает поверхности осаждения, не успевая исчерпать свою адсорбционную способность по причине уменьшения коэффициента массопередачи. Качество очистки резко снижается. За счет большей гидравлической крупности увеличивается скорость переноса, соответственно возрастает расход адсорбента. При заниженном значении d_b , наоборот, коэффициент массопередачи больше, зерно быстро насыщается загрязнениями. Из-за небольшой гидравлической крупности скорость переноса меньше, еще не доходя до поверхности осаждения, частица почти перестает адсорбировать из воды примеси, рост качества очистки резко замедляется (рис. 2). Зато при этом уменьшается расход адсорбента. Аналогичное действие оказывают центробежные силы, характеризуемые числом Фруда (рис. 5).

При увеличении концентрации адсорбента на входе в устройство, соответственно увеличивается средняя концентрация адсорбента в рабочей зоне. При этом возрастает поток примесей из раствора в твердую фазу, скорость извлечения загрязнений увеличивается. Однако насыщение может произойти до того, как зерно адсорбента достигает поверхности осаждения, рост качества очистки замедляется (рис.3).

Соответственно, при увеличении концентрации адсорбента увеличивается его расход.

При определенных сочетаниях параметров центробежного адсорбера зависимость качества очистки от удельной производительности будет иметь минимальный экстремум (рис. 4). Это объясняется тем, что при увеличении q возрастают продольные скорости, которые делают траекторию зерна адсорбента более наклонной (рис. 6). При этом зерно проходит до осаждения больший путь (2), возрастает время его контакта с раствором, и, если частица не исчерпала адсорбционной способности, улучшается качество очистки.

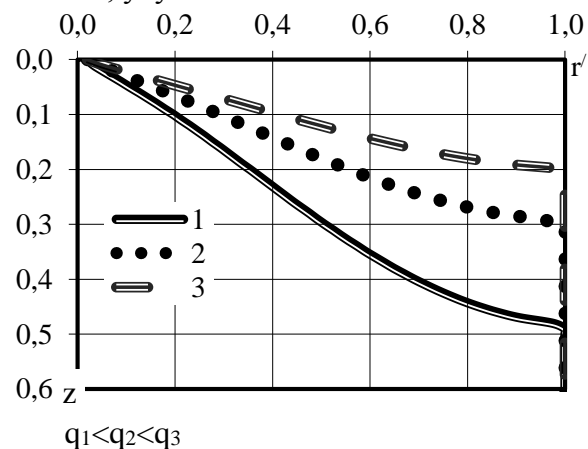


Рис. 6 Влияние удельной производительности на траекторию зерна адсорбента

При дальнейшем увеличении производительности и длины траектории частица адсорбента насыщается примесями, массопередача замедляется. Кроме того, увеличивается зона (в правом верхнем углу), слабо насыщенная адсорбентом, в итоге – падает качество очистки.

Таким образом, представленная математическая модель адекватно описывает процессы, протекающие при адсорбции в центробежном поле, расчетные результаты имеют ясную физическую интерпретацию.

Выводы. Разработана математическая модель процесса адсорбции в центробежном поле, создаваемого центрифугирующим устройством, которая позволяет исследовать влияния различных факторов на эффективность его работы. Показана возможность обоснования рациональных

значений конструктивных и технологических параметров, что позволит сократить эксплуатационные затраты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ахманов М. Вода, которую мы пьем. Качество питьевой воды и ее очистка с помощью бытовых фильтров. – СПб.: «Невский проспект», 2002. – 192 с.
2. Епоян С.М., Колотило В.Д., Друшляк О.Г., Сухоруков Г.І., Айрапетян Т.С. Водопостачання та очистка природних вод: Навчальний посібник – Х: Фактор, 2010. – 192с.
3. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. Т.2. Очистка и кондиционирование природных вод. – изд. 3-е, перераб. и доп.: Учеб. пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 552 с.
4. Нечитайло Н.П. Условия формирования динамической мембраны при извлечении гуминовых кислот из воды методом ультрафильтрации // Вода, экология, общество: матер. IV междунар. науч.-техн. конф., 20-21 марта 2014 г. Харьков: ХНУГХ, 2014. – С. 112-114.
5. Пат. 2165284 (RU), МПК B01D15/00, G21F9/12. Способ проведения непрерывного противоточного сорбционного процесса / Горовой Л.Ф. (RU), Косяков В.Н. (RU), Кузнецов Г.И. (RU), Пушков А.А. (RU), Шкляр Л.И. (RU) - № 99109577/12; заявл. 27.02.2001; опубл. 20.04.2001.
6. Исаков А.А., Алексанян А.Р., Кудрявцев А.Г., Давтян В.А., Торосян Г.О. Технологические аспекты адсорбционной очистки сточных вод от органических загрязнителей // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Хімія і хімічна технологія. – 2010. – Вип.15(163). – С. 137-140.
7. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. – Л.: Химия, 1982. – 168 с.
8. Карагяур А.С. Теоретическое обоснование усовершенствования сорбционной очистки воды // MOTROL / Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2013. – V. 15, № 6, P. 35-42.
9. Ягубов А.И. Сорбционные процессы очистки сточных вод от метилена голубого на Fe(III) бентоните: экспериментальные исследования и моделирование // Конденсированные среды и межфазные границы – 2007. – Т.9, № 2 – С. 177-181.
10. Бруязкий Е.В., Костин А.Г., Никифорович Е.И., Розумнюк Н.В. Метод численного решения уравнений Навье-Стокса в переменных скорость-давление // Прикладна гідромеханіка. – К., 2008. – Т.10, №2. – С. 13-23.

УДК 628.16

Епоян С.М. Сухоруков Г.І.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

Яркін В.А.

Комунальне підприємство «Харківводоканал»

ІСНУЮЧІ СПОРУДИ ЗМІШУВАННЯ ПРИРОДНИХ ВОД І МЕТОДИ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

Технологічні схеми очищення питної води, які використовуються в Україні, розраховані на очищення води від колоїдних та завислих речовин та її знезараження [1-3].

Слід зазначити, що існуючий стан в області очищення води визначає необхідність впровадження нових технологій очищення та підходи до екологічної безпеки питного водопостачання. Сучасні техно-

логії очищення води (реагентні, сорбційні, мембранні та ін.) дозволяють очистити воду від будь яких забруднень, але застосування цих методів значно підвищує вартість очистки води та не завжди доцільно, виходячи з місцевих умов водопідготовки [4-6].

Найбільш розповсюдженим методом очищення води від грубодисперсних та колоїдних забруднень є метод обробки води