

УДК 628.33

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-84-88

## Исследование процесса наполнения мешка установки для реагентно-механического обезвоживания осадков сточных вод

Е. В. Макарова, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. С. Макаров, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

*Представлена потребность общества и состояние локальных блочно-модульных очистных сооружений, обеспечивающих выполнение действующих технологических и экологических норм. В настоящее время имеются конструктивные решения станций и модулей очистки воды для систем водоснабжения, но отсутствуют математическое описание и графическое представление параметров обезвоживания осадка неоднородного состава. На основе математического моделирования проведены параметрические исследования процесса наполнения мешка установки для реагентно-механического обезвоживания осадков сточных вод. Приведена математическая модель процесса, состоящая из системы дифференциального уравнения, рассчитывающего скорость отложения осадка в накопительном фильтрационном мешке и алгебраических соотношений, определяющих расчетные величины. Установлены закономерности заполнения фильтрационных мешков осадками сточных вод при постоянном и произвольно изменяющемся объемном расходе. Предложенный численный алгоритм позволяет производить параметрические исследования заполнения фильтрационного мешка в зависимости от значений плотности стоков, объемной доли примесей в смеси стоков, объемного расхода стоков по времени процесса фильтрации, тем самым иметь возможность прогнозировать рациональный эксплуатационный режим работы, оценку производительности, инвестиционные затраты, экономичность эксплуатации очистной установки, всего комплекса очистных сооружений в целом.*

**Ключевые слова:** мешочный обезвоживатель, осадок, примесь, математическая модель, параметрический анализ.

### Введение

Потребность населения в достаточном количестве питьевой воды и других жидких продуктов необходимого качества была и остается жизненно важной [1]. Современное общество нуждается в создании локальных компактных, блочно-модульных очистных сооружений, обеспечивающих выполнение действующих технологических и экологических норм, иметь минимальные капитальные, эксплуатационные и энергетические затраты [2]. Широкое применение в различных отраслях народного хозяйства находят мешочные обезвоживатели для очистки от донных отложений, сапропеля, производственных стоков, шламонакопителей [3]. Главным элементом устройства является мешок, в который подается иловая смесь (сточная вода с механическими примесями), изготовленный из воздухонепроницаемого и водонепроницаемого материала. Очищенная от примесей вода из мешка подается обычно самотеком на водоочистные сооружения либо в сборные резервуары, а содержимое мешка (обезвоженный осадок) подлежит досушке, утилизации, переработке или безопасному размещению в зависимости от вредности. Операция обезвоживания осадков сточных вод является основной и определяет

эффективность дальнейших процессов переработки осадка [4]. Во время работы устройства типичной является ситуация, когда расход стока подается неравномерно, а его состав содержит различные примеси.

Имеются конструктивные решения станций и модулей очистки воды для систем водоснабжения [5], но отсутствует математическое описание и графическое представление параметров обезвоживания осадка в мешке.

Целью настоящей работы является определение параметров механического обезвоживания осадка смешанного состава, параметрические исследования процесса наполнения мешка установки для реагентно-механического обезвоживания осадков сточных вод.

### Используемые подходы

Разработана математическая модель процесса, состоящая из системы дифференциального уравнения, рассчитывающего скорость отложения осадка в накопительном фильтрационном мешке и алгебраических соотношений, определяющих расчетные величины. Установлены закономерности заполнения фильтрационных мешков осадками сточных вод при постоянном и произвольно изменяющемся объемном расходе. Предложенный численный алгоритм позво-

ляет производить параметрические исследования заполнения фильтрационного мешка в зависимости от значений плотности стоков, объемной доли примесей в смеси стоков, объемного расхода стоков по времени процесса фильтрации, тем самым иметь возможность прогнозировать рациональный эксплуатационный режим работы оборудования.

### Материалы и методы

Рассмотрено влияние интенсивности подачи стоков в сборочные мешки на скорость заполнения объемов фильтровальных мешков. При этом проведен анализ влияния плотности стоков на время заполнения осадком фильтрационных мешков.

Расчетная схема процесса наполнения мешка сточной средой приведена на рис. 1, где  $H$  – высота мешка,  $d$  – приведенный диаметр мешка,  $h$  – высота образующихся осадков примесей.

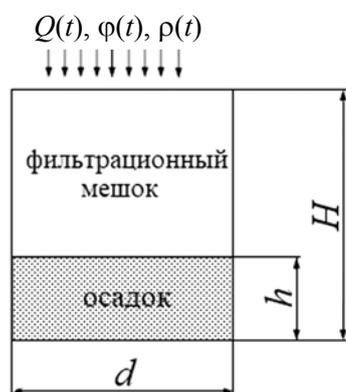


Рис. 1. Расчетная схема процесса наполнения мешка

Будем считать, что подача стоков производится с переменным по времени объемным расходом  $Q(t)$ , переменной плотностью  $\rho(t)$  и объемной долей взвесей и твердой фазы в потоке  $\varphi(t)$ .

### Математическая модель

В основу математической модели положены известные положения гидромеханики и математические соотношения, отражающие связь параметров двухфазной движущейся среды.

Массовый расход смеси стоков будем определять известной зависимостью [6]:

$$G = \rho F V. \quad (1)$$

Плотность смеси стоков будем находить из соотношения [7]:

$$\rho = \rho_1 \varphi + (1 - \varphi) \rho_2, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – объемная доля примесей плотностью  $\rho_1$  в сточной смеси; плотность воды  $\rho_2$ .

Примем допущение: формируемый осадок, переносимый потоком жидкости, равномерно распределяется по сечению мешка площадью  $F$ , а массовый расход смеси можно представить как сумму массовых расходов жидкой фазы (воды) и твердой фазы (осадка). Тогда скорость наполнения мешка потоком смеси будем производить по соотношению [8]:

$$V = \frac{G}{\rho F}. \quad (3)$$

С учетом того, что вода как часть смеси сливается из мешка, то в мешке остаются только осадочные примеси. Скорость заполнения мешка осадочными примесями определим соответственно:

$$V_1 = \frac{G_1}{\rho_1 F} \text{ или } \frac{dh}{dt} = \frac{G_1}{\rho_1 F}, \quad (4)$$

где  $G_1$  – массовый расход примеси в потоке смеси.

$$G_1 = G \cdot X, \quad (5)$$

где  $X = \varphi \frac{\rho_1}{\rho}$  – массовая доля примесей в смеси стоков [9].

Уравнение (4) можно записать через объемный расход  $Q$  смеси в виде:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{G_1}{\rho_1 F} = \frac{G \cdot X}{\rho_1 F} = \frac{Q \cdot \rho \cdot \varphi \cdot \frac{\rho_1}{\rho}}{\rho_1 F} = \frac{Q \varphi}{F}. \quad (6)$$

Таким образом, зная массовый или объемный расход смеси стоков, плотность примесей, их объемную долю в смеси, площадь заполнения мешка, можно рассчитать высоту осадков в мешке за расчетный временной интервал.

Решение дифференциального уравнения (6) будем производить известными численными методами, например методом Эйлера [10].

### Результаты численных исследований

В качестве исходных данных для исследований примем расчетное время, равное одни сутки, или 24 часа. Значение исходных данных запишем в виде четырех режимов, описываемых следующими параметрами:

1. В качестве плотности примесей в стоках зададим переменную, изменяющуюся через каждые 6 часов работы установки:  $750 \text{ кг/м}^3$ ,  $850 \text{ кг/м}^3$ ,  $800 \text{ кг/м}^3$ ,  $650 \text{ кг/м}^3$  (рис. 2).



Рис. 2. Плотность примесей за сутки

2. Объемная доля примесей  $\varphi$  изменяется по времени от 0,01 до 0,05 (рис. 3).



Рис. 3. Объемная доля примесей за сутки

Массовая доля примесей в смеси стоков за сутки приведена на рис. 4.



Рис. 4. Массовая доля примесей за сутки

Объемный расход стоков  $Q$  зададим двумя способами:

- 1) объемный расход постоянный, равный  $10 \text{ м}^3/\text{сут.}$ ;
- 2) объемный расход переменный, произвольно изменяющийся от 10 до  $26 \text{ м}^3/\text{сут.}$  (рис. 5).

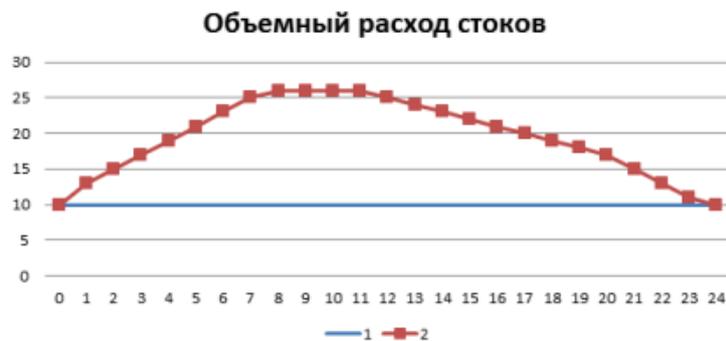


Рис. 5. Объемный расход примесей за сутки

Применяя численный алгоритм, разработанный на основе математической модели, представленной системой уравнений (1)–(6), получены результаты параметрического исследования.

Масса примесей в смеси стоков, отчищаемых за сутки, приведена на рис. 6.

Скорость наполнения мешка осаждаемыми примесями приведена на рис. 7.



Рис. 6. Массовый расход примесей за сутки



Рис. 7. Скорость наполнения мешка примесями за сутки

На рис. 8 показан рост высоты отложений примеси на единицу площади фильтрационного мешка по времени процесса отчистки при условии, что приведенный диаметр мешка  $d = 0,55$  м.



Рис. 8. Высота отложений примесей на единицу площади мешка за сутки

Как видно из расчетов, для полной отчистки стоков при постоянном объемном расходе (1) необходимо произвести отчистку отложений, формирующихся от стоков высотой до 1,5 м. При произвольно изменяющемся объемном расходе (2) необходимо произвести отчистку отложений, формирующихся от стоков высотой до 2,1 м. По расчетным данным выбирается количество фильтрационных мешков высотой мешка  $H$ .

### Выводы

Таким образом, можно определить время заполнения фильтрационных мешков в зависимости от значений плотности стоков, объемной доли примесей в смеси стоков, объемного расхода стоков и тем самым спрогнозировать рациональный эксплуатационный режим работы оборудования.

Полученные результаты исследования были использованы при отработке комплексной установки реагентно-механического обезвреживания осадка «Поток», которая служит для глубокой очистки сточных вод от биологических и минеральных примесей и применяется при очистке хозяйственно-бытовых и промышленных стоков.

### Библиографические ссылки

1. Манвелов А. Н., Горбунова В. А. Проблемы модернизации очистных сооружений // Проблемы теории и практики современной науки : сб. статей VIII Междунар. науч.-практ. конф. М., 2017. С. 229–234.

2. Степанов А. С., Беляков А. В., Самсонова А. А. Модульные сооружения биологической очистки сточных вод [Электронный ресурс] // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сб. статей. Самара, 2018. URL [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_36397216\\_56323525.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36397216_56323525.pdf) (дата обращения: 07.08.2020).

3. Марченко Б. Я., Кондратьев Д. П. Обзор установок мешкового типа для реагентно-механического обезвреживания осадка сточных вод // Технологии водоснабжения и водоотведения : сб. статей II Русско-немецкой летней школы по проблеме водоснабжения и водоотведения населенных мест. Ижевск, 2019. С. 93–105.

4. Царев Н. С., Ясницкая К. В., Максимова Е. А. Обезвреживание осадка сточных вод смешанного состава на камерном фильтр-прессе // Системные технологии. 2019. № 2 (31). С. 70–73.

5. Блочная-модульная станция очистки воды для систем водоснабжения: пат. 2590543 Рос. Федерация № 2015106426/05; заявл. 25.02.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19. 7 с.

6. Алексеев Е. В., Викулина В. Б., Викулин П. Д. Моделирование систем водоснабжения и водоотведения [Электронный ресурс] : учеб. пособие. Электрон. текстовые данные. М. : Изд-во МГСУ, 2015. 128 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/40194>. ЭБС «IPRbooks».

7. Накоряков В. Е. Тепломассообмен в двухфазных системах. Новосибирск : Изд-во Ин-та теплофизики, 1994. 431 с.

8. Математическое моделирование процесса гидроочистки среднедистиллятного сырья в смеси с атмосферным газойлем [Электронный ресурс] : книга / А. А. Татаурщиков и [др.] ; под ред. А. А. Татаурщиков. Электрон. текстовые данные. Томск : Изд-во ТПУ, 2017. 75 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/84017>. ЭБС «IPRbooks».

9. Лабунцов Д. А. Механика двухфазных систем. М. : МЭИ, 2000. 374 с.

10. Зализняк В. Е. Основы научных вычислений. Введение в численные методы для физиков и инженеров [Электронный ресурс] : книга. Электрон. текстовые данные. М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. 264 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/91976>. ЭБС «IPRbooks».

### References

1. Manvelov A.N., Gorbunova V.A. *Problemy modernizatsii ochistnykh sooruzhenii* [Problems of modernization of treatment facilities]. *Problemy teorii i praktiki sovremennoy nauki : sb. statei VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf.* [Proc. Problems of theory and practice of

modern science: collection of articles. articles of the VIII International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2017. Pp. 229-234 (in Russ.).

2. Stepanov A.S., Belyakov A.V., Samsonova A.A. *Modul'nye sooruzheniya biologicheskoi ochistki stochnykh vod* [Modular structures for biological wastewater treatment]. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'nye tekhnologii: sb. statei* [Proc. Traditions and innovations in construction and architecture. Construction technologies: Sat. articles] Samara, 2018. URL [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_36397216\\_56323525.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36397216_56323525.pdf) (date of access 07.08.2020).

3. Marchenko B.Ya., Kondratyev D.P. *Obzor ustanovok meshkovogo tipa dlya reagentno-mekhanicheskogo obezvozhivaniya osadka stochnykh vod* [Overview of bag-type installations for reagent-mechanical dewatering of sewage sludge]. *Tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya : sb. statei II Russko-nemetskoj letnei shkoly po probleme vodosnabzheniya i vodootvedeniya naselennykh mest* [Water supply and water disposal technologies; Sat. articles of the II Russian-German Summer School on the problem of water supply and wastewater disposal in populated areas]. Izhevsk, 2019. Pp. 93-105 (in Russ.).

4. Tsarev N.S., Yasnitskaya K.V., Maksimova Ye.A. [Dewatering of mixed composition sewage sludge on a chamber filter press]. *Sistemnyye tekhnologii*. 2019. No. 2 (31). Pp. 70-73 (in Russ.).

5. Block-modular water treatment plant for water supply systems: US Pat. 2590543 Rus. Federation No. 2015106426/05; declared 02/25/2015; publ. 10.07.2016, Bul. No. 19. 7 p.

6. Alekseev E.V., Vikulina V.B., Vikulin P.D. *Modelirovanie sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Modeling of water supply and water disposal systems]: textbook. Moscow : MGSU Publishing House, 2015. 128 p. URL: <http://www.iprbookshop.ru/40194>. EBS "IPRbooks" (in Russ.).

7. Nakoryakov V.E. *Teplomassoobmen v dvukhfaznykh sistemakh* [Heat and Mass Transfer in Two-Phase Systems]. Novosibirsk: Publishing house of the Institute of Thermophysics, 1994. 431 p. (in Russ.).

8. Tataurshchikov A.A. et al. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa gidroochistki srednedistillyatnogo syr'ya v smesi s atmosferym gazoilem* [Mathematical modeling of the process of hydrotreating middle distillate raw materials in a mixture with atmospheric gas oil], ed. A. A. Tataurschikov. Electron. text data. Tomsk: TPU Publishing House, 2017. 75 p. URL: <http://www.iprbookshop.ru/84017>. EBS "IPRbooks" (in Russ.).

9. Labuntsov D.A. *Mekhanika dvukhfaznykh sistem* [Mechanics of two-phase systems]. Moscow: MPEL, 2000. 374 p. (in Russ.).

10. Zaliznyak V.E. *Osnovy nauchnykh vychislenii. Vvedenie v chislennyye metody dlya fizikov i inzhenerov* [Fundamentals of Scientific Computing. An introduction to numerical methods for physicists and engineers]. Moscow, Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ., Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2019. 264 p. URL: <http://www.iprbookshop.ru/91976>. ЭБС «IPRbooks» (in Russ.).

\*\*\*

### Study of Bag Filling Process of the Plant for Reagent-Mechanical Dewatering of Sewage Sludge

E. V. Makarova, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

S. S. Makarov, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russian

*The need of society and the state of local block-modular treatment facilities that ensure the implementation of existing technological and environmental standards are presented. Currently, there are design solutions for water treatment plants and modules for water supply systems. Still, there is no mathematical description and graphical representation of dehydration parameters of the heterogeneous composition's sludge. Based on mathematical modeling, parametric studies of the plant's bag filling process for reagent-mechanical dewatering of sewage sludge were carried out. A mathematical model of the process is presented; it consists of a differential equations system that calculates the rate of sediment deposition in a storage filtration bag and algebraic relations that determine the calculated values. The regularities of filling filtration bags with sewage sludge at a constant and arbitrarily varying volume flow rate are established. The proposed numerical algorithm makes it possible to perform parametric studies of the filtration bag filling depending on the values of the flow density, the volume fraction of impurities in the flow mixture, and the volume flow rate of the flow during the filtration process, thus being able to predict the rational operational mode of the equipment.*

**Keywords:** bag dehydrator, sediment, impurity, mathematical model, parametric analysis.

Получено: 20.07.2020