

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 628.16

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ СБРОСНЫХ ВОД СКОРЫХ ФИЛЬТРОВ

Бутко Д.А.

ФГБОУ ВО Донской государственной технической университет,
344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, ,
e-mail: den_111@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты по разработке теории образования, обработки и утилизации сбросных (промывных) вод скорых фильтров (контактных осветлителей) от станции водоподготовки. Показаны этапы формирования сбросных (промывных) вод, факторы влияющие на качество взвеси на каждом из этапов. Приведено математическое описание образования сбросных (промывных) вод, транспортировки по трубопроводам промканализации с учетом гидродинамического воздействия на частицы взвеси и тип применяемого для очистки природных вод реагента. Обработка описана двумя этапами – перемешиванием в камере хлопьеобразования и отстаиванием в статических условиях. Предложен алгоритм выбора технологической схемы обработки промывных вод скорых фильтров в зависимости от направления утилизации.

Предмет исследования. Системы обработки сбросных вод скорых фильтров как неотъемлемая часть станции очистки природных вод.

Материалы и методы. В работе использованы теоретические положения процесса объемного фильтрования Д.М. Минца, теория коагуляции М.С. Смолуховского и работы ее развивающие, теоретическое описание процесса образования осадка Н.Я. Авдеева.

Результаты. Сформированы теоретические основы образования, транспортировки, обработки и утилизации сбросных (промывных) вод.

Выводы. По результатам теоретических работ определены этапы жизненного цикла сбросных (промывных) вод скорых фильтров (контактных осветлителей), разработаны теоретические положения обработки промывных вод, выявлены влияющие факторы на качество взвеси на каждом из этапов. Получена математическая модель процессов образования, транспортировки и обработки в камере хлопьеобразования с последующим статическим отстаиванием. Сформирован алгоритм выбора технологической схемы обработки промывных вод скорых фильтров как описание процесса утилизации сбросных (промывных) вод.

Ключевые слова: скорые фильтры, промывные воды, сбросные воды, станция водоподготовки

ВВЕДЕНИЕ

Схемы повторного использования промывных вод скорых фильтров (контактных осветлителей) и обработки осадка медленно, но верно находят свое применение на станциях очистки природных вод. Новое проектирование или реконструкция ставят перед проектной организацией вопрос эффективного использования в процессе водоподготовки все более дефицитного ресурса – чистой воды из поверхностных водоемов. И решение с экономией до десяти процентов от производительности подсказывает СП 31.13330.2021, учебно-методическая литература, научная периодика – это сооружения повторного использования промывной воды.

Обратимся к СП 31.13330.2021 [1] в вопросе схем повторного использования и обработки осадка. Пункты 9.161-9.164 в общем виде указывают, как необходимо проектировать сооружения, п. 9.165 предлагает «условия применения и расчетные параметры сооружений для обработки промывных вод и осадка следует принимать на основании технико-экономического сравнения технологических решений». Возникает вопрос, а что, в общем-то, сравнивать?? Механическое обезвоживание с обезвоживанием в естественных

условиях – понятно: площади, стоимость оборудования, реагентов, энергоресурсов и т.д. А в схемах повторного использования какие параметры для сравнения? Конструктив сооружений – возможно, но варианты для сравнения все равно на усмотрение проектировщика, поэтому не факт. Остается больше вопросов, чем ответов. Поэтому и практика проектирования сооружений весьма удручающая – там не работает система сбора осветленной воды, здесь система удаления осадка, происходит взмучивание осадка при сбросе новых порций промывной воды с фильтра и т.д., и т.п.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Примеры научного подхода к проектированию схем обработки промывных вод и обработки сбросных вод отстойников. В литературе известны схемы, созданные (реконструированные) В.Л. Драгинским [2], М.И. Урванцевой [3], А.Я. Наймановым [4] и др., успешно функционирующие и обеспечивающие значительную экономию воды на собственные нужды. При этом нам не удалось найти в литературе теории образования, обработки и утилизации сбросных вод от станции водоподготовки, позволившей бы определить влияющие факторы на каждом этапе и, по

возможности, выполнить математическое описание процесса.

МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сначала позвольте небольшое уточнение понятий. Схемы повторного использования промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей известны давно, о них много написано в различных вариантах исполнения – усреднение, безреагентная или реагентная обработка. Занимаясь в течение длительного времени данной проблемой, мы пришли к мысли, что название «схемы повторного использования» исчерпали себя, ограничиваясь исключительно возвратом воды на сооружения обработки природных вод. Возможности утилизации промывных вод на техническое водоснабжение, полив сельскохозяйственных земель позволяет говорить о схемах обработки сбросных (промывных) вод. Причем следует их рассматривать совместно с обработкой сбросных вод отстойников и образующихся при безреагентной или реагентной схемах обработки промывных вод осадков как единую систему образования, транспортировки, обработки и утилизации основного объема сточных вод станции очистки природных вод.

Целью данной работы является представление теории образования, обработки и утилизации сбросных (промывных) вод скорых фильтров (контактных осветлителей) от станции водоподготовки.

Задачи по достижению поставленной цели:

- определение этапов жизненного цикла сбросных (промывных) вод скорых фильтров (контактных осветлителей);
- определение влияющих факторов на каждом из этапов;
- математическое описание этапов и процесса в целом.

В данной статье приводим наше видение такой теории. В основу работы положены теории: теория фильтрования Д.М. Минца; теория коагуляции М.С. Смолуховского и работы ее развивающие; теоретическое описание процесса образования осадка Н.Я Авдеева.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Этапы жизненного цикла сбросных вод – образование, транспортировка, обработка и утилизация – формируют общую модель схемы их обработки. Модель включает в себя генезис сбросных вод в процессе промывки скорого фильтра (контактного осветлителя); обработку (камеру хлопьеобразования, осветление, усреднение, уплотнение, обезвоживание) и утилизацию (рис.1). Сразу отмечу, что до недавних пор процесс транспортировки воды от фильтров (контактных осветлителей) до сооружений обработки не рассматривался с точки зрения влияния на качество взвеси. Наши исследования показали ошибочность такого подхода и необходимость учета гидродинамического воздействия на взвесь при движении по трубопроводам промканализации.

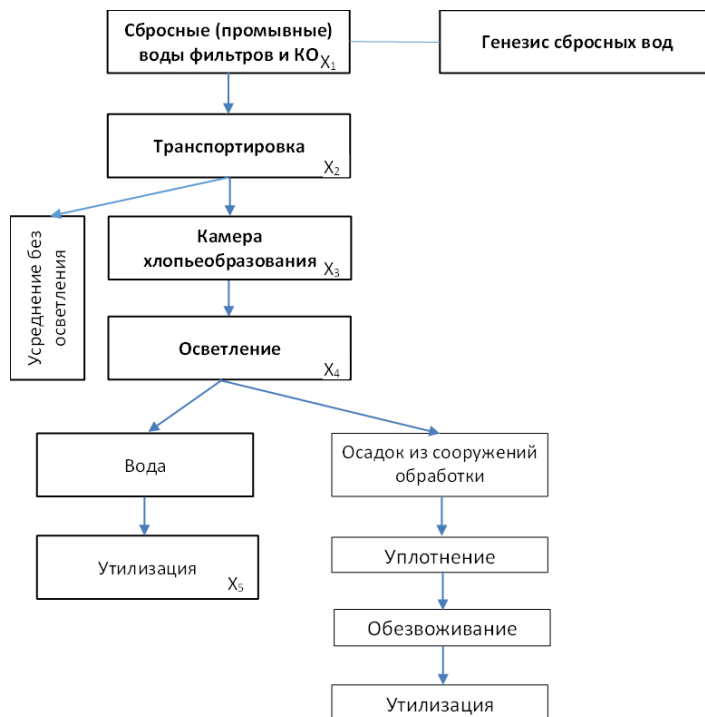


Рис. 1. Концептуальная модель образования, транспортирования, обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки

Fig. 1. Conceptual model of formation, transportation, treatment and disposal of flushing water of rapid filters and contact clarifiers of water treatment plants

Поэтапно в основу описания процесса были положены теории:

- образование сбросных (промывных) вод – теория фильтрования Д.М. Минца;
- транспортировка по трубопроводам промканализации - теория коагуляции М.С. Смолуховского и работы ее развивающие;
- обработка – теория коагуляции М.С. Смолуховского и работы, ее развивающие, совместно с теоретическим описания процесса образование осадка Н.Я Авдеева;
- утилизация – теоретические основы нами не обнаружены.

Гидродинамическое воздействие на взвесь в работе Е.Д. Бабенкова [5, с.192] оценивается негативно: при величине градиента скорости более 100 c^{-1} - происходит разрушение хлопьев, приведена зависимость:

$$\tau_s = \frac{5}{2} \eta G, \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость среды, Па·с;

τ_s – предельное напряжение сдвига, Па.

Учитывая отличие значений предельного напряжения сдвига осадка сбросных (промывных) вод в сравнении с осадком отстойников, в частности в наших исследованиях, величины отличались на порядок, предельная величина градиента скорости будет корректироваться. Расчет градиентов скорости в коллекторах промканализации из стальных и полиэтиленовых труб диаметрами 1000-1400 мм показал, что граница в 100 c^{-1} преодолевается при уклонах трубопровода 0,00075-0,0014. В то же время на станциях водоподготовки уже более 30 лет внедряются новые высокомолекулярные коагулянты-флокулянты (например, типа «ПолиДАДМАХ»), у которых процесс образования хлопьев требует длительного и интенсивного перемешивания обрабатываемой воды. Исходя из всего вышесказанного, нами сформулированы основные теоретические положения обработки промывных вод фильтров и контактных осветлителей:

1. В процессе промывки фильтрующей загрузки скорость суффозии частиц много больше скорости их адгезии, интенсивность прилипания частиц стремится к нулю.

2. При промывке фильтровального сооружения поступление взвеси в промывную воду происходит за счет ее отрыва с зерен загрузки, а также за счет разрушения ранее образовавшихся в процессе контактной коагуляции агрегатов.

3. Частицы взвеси в промывной воде представляют собой дестабилизированные или частично дестабилизированные реагентной обработкой частицы, имеющие в своем составе ионы коагулянта, хлопья из продуктов гидролиза коагулянта или сорбированные на поверхности частиц молекулы флокулянта. В отличие от классической теории коагуляции в потоке

промывной воды имеются коагуляционные структуры (частицы), состоящие из двух, трех и более частиц и одиночных (первичных) частиц дисперсной фазы.

4. При промывке фильтрующей загрузки концентрация частиц (количеством) дисперсной фазы в подаваемой на промывку от резервуаров чистой воды много меньше, чем извлекается из загрузки, поэтому ею можно пренебречь. При промывке неочищенной водой дополнительное количество одиночных частиц следует суммировать с частицами, образовавшимися в процессе промывки.

5. При движении по трубопроводам промканализации станций водоподготовки, в общем случае, коагуляционные структуры подвергаются разрушению (дроблению) за счет взаимного трения и гидродинамического воздействия потока. В случае использования для осветления природных вод на станции водоподготовки некоторых высокомолекулярных флокулянтов, в частности типа ПолиДАДМАХ, следует учитывать возможность хлопьеобразования в условиях высокого градиента скорости.

6. Вводимый реагент до сооружения обработки только смешивается с промывной водой. Коагулянты и флокулянты используемые в реагентных схемах обработки промывных вод, не образуют двоичных, третичных и т.д. структур (хлопьев) при движении по трубопроводу промканализации.

7. При использовании камеры хлопьеобразования, встроенной в сооружение по обработке промывных вод, происходит укрупнение коагуляционных структур, но не происходит седиментация взвешенных частиц.

В общем виде этапы концептуальной модели предлагается описать функциями:

$$X_1 = f(\omega, v, C, a, b, d, n, N);$$

$$X_2 = f(G, \tau_{\text{тр}});$$

$$X_3 = f(D, G, \tau_{\text{кх}}); \quad (2)$$

$$X_4 = f(M(C), \tau_{\text{отст}});$$

$$X_5 = f(\text{ОКБ, БПК, ХПК, рН})$$

где v - скорость фильтрования;

a – параметр фильтрования, определяющий интенсивность отрыва частиц и зависящий от условий фильтрования;

b – параметр фильтрования, определяющий интенсивность адгезии частиц;

d – диаметр загрузки; ω – интенсивность промывки; n – число первичных (единичных) частиц;

N – число вторичных, третичных и т.д. частиц (хлопьев взвеси);

C – массовая концентрация взвеси;

G – градиент скорости;

$\tau_{тр}$ и $\tau_{кхо}$ – время соответственно движения воды по трубопроводу промканализации и перемешивания в камере хлопьеобразования в сооружении обработки;

Д – доза реагента для обработки промывных вод;

М – мутность воды; ОКБ – общие колиформные бактерии;

БПК – биохимическое потребление кислорода;

ХПК – химическое потребление кислорода;

$\tau_{отст}$ – время отстаивания.

Рассмотрим математическое описание для каждого этапа концептуальной модели.

Этап 1 (Х1). Генезис сбросных (промывных) вод при промывке скорого фильтра (контактного осветлителя).

Математическое описание процесса осветления в фильтрующей загрузке согласно теории Д.М. Минца представляет собой дифференциальное уравнение изменения концентрации по высоте фильтрующего слоя и времени фильтрования [6]:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x \partial \tau} + av \frac{\partial c}{\partial x} + b \frac{\partial c}{\partial \tau} = 0. \quad (3)$$

С учетом принятого нами допущения о скорости процесса адгезии при промывке третье слагаемое принимаем равным нулю, тогда:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x \partial \tau} + av \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

где v – скорость фильтрования;

a – параметр фильтрования, определяющий интенсивность отрыва частиц и зависящий от условий фильтрования

$$a = \alpha \frac{v}{d} \quad (5)$$

где d – диаметр загрузки;

α – коэффициент, учитывающий совокупное влияние всех физических и физико-химических свойств воды и взвеси.

С учетом того, что скорость фильтрования v можно выразить через интенсивность промывки ω уравнение (4) нами преобразовано в

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x \partial \tau} + \frac{\alpha \omega^2}{d} \frac{\partial c}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Массовую концентрацию C в уравнении (4) можно представить через объемную концентрацию

$$C = C_0 \gamma_0 \quad (7)$$

или через количество частиц в единице объема в общем случае, принимая, что хлопья состоят из i первичных частиц и введение с промывной водой первичных частиц в количестве $n_{пром}$, нами получено уравнение для массовой концентрации частиц в промывной воде во время промывки

$$C = C_0 \gamma_0 = \frac{4}{3} \gamma_0 \pi r_1^3 \left(n + n_{пром} + \sum_{i=2}^{\infty} i N_i \right), \quad (8)$$

где r_1 – радиус одиночной (первичной) частицы;

N_i – численная концентрация хлопьев из i частиц радиусом r_i

После подстановки получаем уравнение количества одиночных частиц и хлопьев при промывке фильтрующей загрузки

$$\frac{\partial^2 (n + n_{пром} + \sum_{i=2}^{\infty} i N_i)}{\partial x \partial \tau} + \frac{\alpha \omega^2}{d} \frac{\partial (n + n_{пром} + \sum_{i=2}^{\infty} i N_i)}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

Этап 2 (Х2). Транспортировка по трубопроводам промканализации.

Согласно сформулированным теоретическим положениям, при движении сбросной (промывной) воды по трубопроводам следует рассмотреть влияние на взвешенные частицы двух одновременно проходящих процессов: разрушения имеющихся хлопьев и, при использовании для осветления природных вод высокомолекулярных флокулянтов, хлопьеобразования.

Работа камер хлопьеобразования по укрупнению хлопьев в работах Н.С. Harris [7] на основании теории М.С. Смолуховского описывается уравнением скорости убывания первичных частиц в системе

$$-\frac{dn_1}{d\tau} = \sum_{i=1}^{p-1} \frac{4}{3} N n_1 R_{i1}^3 G = \frac{4}{3} G n_1 \sum_{i=1}^{p-1} N_i \left(a r_1 \left(i^{1/3} + 1 \right) \right)^3 = \frac{a^3}{\pi} G C_0 n_1 \varepsilon_p, \quad (10)$$

где a – отношения радиуса столкновения частицы к ее истинному радиусу; ε_p – параметр равный

$$\varepsilon_p = \frac{\sum_{i=1}^{p-1} N_i (i^{1/3} + 1)^3}{\sum_{i=1}^p i N_i} \quad (11)$$

где p – максимально возможное число первичных частиц в каждом из хлопьев.

При этом предполагается, что все единичные (первичные) частицы взвеси имеют одинаковый эквивалентный диаметр.

В целом для камеры хлопьеобразования

$$\frac{n_0}{n_\tau} = \exp(KEG n_0 \tau). \quad (12)$$

Разрушение хлопьев в потоке за счет соударений и ударных сил в турбулентном потоке в связи с гидродинамическими условиями перемешивания может быть описано уравнением [5, с.149] скорости образования первичных частиц в системе

$$\frac{dn_1}{d\tau} = K_B N \frac{r_f^2}{r_1^2} G, \quad (13)$$

где n_i и N – концентрация в воде соответственно первичных частиц и хлопьев;

r_1 и r_f – размер первичных частиц и хлопьев;

K_B – константа скорости разрушения хлопьев.

Тогда уравнение скорости изменения количества первичных агрегатов при движении воды по коллектору промканализации имеет вид:

$$\frac{dn}{d\tau} = \frac{dN_i}{d\tau} - K_B N \frac{r_f^2}{r_1^2} G + \frac{4}{3} G n_1 \sum_{i=1}^{p-1} N_i \left(ar_1 \left(i^{\frac{1}{3}} + 1 \right) \right)^3. \quad (14)$$

Этап 3 (X₃, X₄). Обработка сбросных (промывных) вод.

Восстановлению и (или) образованию хлопьев способствует медленное перемешивание, осуществляемое в камере хлопьеобразования, а процессу осветления – седиментация. Следовательно, в общем случае необходимо рассмотреть два подэтапа обработки: камеру хлопьеобразования и седиментацию в покое.

Камера хлопьеобразования (X₃). Устраивая в сооружении обработки промывных вод камеру хлопьеобразования, мы предполагаем, что в ней происходит только образование хлопьев (п.7 теоретических положений). Тогда с учетом наличия в воде, прошедшей коллектор промканализации, некоего числа двоичных, третичных и т.д. структур скорость изменения единичных структур в камере хлопьеобразования сооружений обработки промывных вод предлагается описать уравнением

$$\frac{dn}{d\tau} = \frac{dN_i}{d\tau} - \frac{4}{3} G n_1 \sum_{i=1}^{p-1} N_i \left(ar_1 \left(i^{\frac{1}{3}} + 1 \right) \right)^3. \quad (15)$$

Седиментация (X₄). С учетом того, что осветление воды в сооружениях обработки происходит в статических условиях, нами предлагается рассмотреть осветление, как совокупность двух процессов – гравитационной коагуляции и седиментации (собственно образования осадка). Коагуляция, как уменьшение общего количества частиц в системе, описана выше. Оценка седиментационных свойств взвеси с использованием аналитических методов выполнена в работе [8], и показана возможность их применения для обработки результатов экспериментов с промывными водами фильтровальных сооружений, представляющих собой малоцентрированные суспензии с количеством твердой фазы (дисперсной фазы) менее 500 мг/дм³. В результате сравнения методов обработки и формул для расчета скорости осаждения частицы наиболее достоверно процессы описывает метод профессора Н.Я. Авдеева, который и применяется далее для анализа опытного материала в рамках настоящей работы. Расчет скоростей осаждения по формулам, предложенным Стоксом и Е.Ф. Кургаевым [9], [10], показал отличие в значениях скоростей осаждения при эквивалентных диаметрах частиц больше 1,1 мм.

Следовательно, при определении параметров системы по методу Н.Я. Авдеева с использованием представленных зависимостей для частиц с эквивалентным диаметром более 1,1 мм, полученные данные будут недостоверны. Однако на практике частицы с таким эквивалентным диаметром встречаются весьма редко и не характерны для промывных вод, образующихся при очистке вод источников малой и средней мутности.

Принимая плотность хлопьев в осадке одинаковой по слою осадка и массу выпавшего осадка пропорциональной количеству частиц и используя уравнение 5, получаем

$$Q \approx \frac{4}{3} \gamma_0 \pi r_1^3 \sum_{i=1}^{\infty} i n_i \approx K_{oc} n_{oc}, \quad (16)$$

тогда скорость изменения количества единичных частиц, исправленная на количество единичных частиц, выпавших ко времени τ в осадок, предлагаем определять по формуле

$$-\frac{dn^{исп}}{d\tau} = \frac{dn}{d\tau} - \frac{dn_{oc}}{d\tau} = \frac{2}{3} \psi k T \frac{1}{\eta} n^2 + \frac{1}{K_{oc}} e^{-\frac{1}{\mu_0 \tau^\beta}} (1 - \mu_0 \beta \tau^{\beta-1}) - \frac{1}{K_{oc}} \beta \tau^{-1} (1 + \mu_0 \tau^\beta), \quad (17)$$

где K_{oc} – коэффициент пропорциональности; $n^{исп}$ – исправленное на количество выпавших в осадок значение частиц в объеме воды к времени τ . Интегрируя (15)

$$n_0 - n = \frac{2}{3} \psi k T \frac{1}{\eta} n^2 \tau + \frac{1}{K_{oc}} \left(1 - e^{-\frac{1}{\mu_0 \tau^\beta}} \right) \mu_0 \tau^\beta, \quad (18)$$

тогда количество частиц в системе к времени τ

$$n = \frac{[1+2K(n_0-C)]^{0.5}}{K\tau} \quad (19)$$

при $K = \frac{4}{3} \psi k T \frac{1}{\eta}$ и $C = \frac{1}{K_{oc}} \left(1 - e^{-\frac{1}{\mu_0 \tau^\beta}} \right) \mu_0 \tau^\beta$.

Объединяя этапы 1-3, получаем математическое описание процессов образования, транспортировки и обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей, предполагая монодисперсность одиночных (первичных) частиц

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^2(n+n_{\text{пром}}+\sum_{i=2}^{\infty} iN_i)}{\partial x \partial \tau} + \frac{\alpha \omega^2}{d} \frac{\partial(n+n_{\text{пром}}+\sum_{i=2}^{\infty} iN_i)}{\partial x} = 0 \\ & \frac{dn}{d\tau} = \frac{dN_i}{d\tau} - K_B N \frac{r_i^2}{r_1^2} G + \frac{4}{3} G n_1 \sum_{i=1}^{p-1} N_i \left(ar_1 \left(i^{\frac{1}{3}} + 1 \right) \right)^3 \\ & \frac{dN_i}{d\tau} = \frac{dN_i}{d\tau} - \frac{4}{3} G n_1 \sum_{i=1}^{p-1} N_i \left(ar_1 \left(i^{\frac{1}{3}} + 1 \right) \right)^3 \\ & -\frac{dn}{d\tau} = \frac{2}{3} \psi k T \frac{1}{\eta} n^2 + \frac{1}{K_{oc}} e^{-\frac{1}{\mu_0 \tau^\beta}} (1 - \mu_0 \beta \tau^{\beta-1}) - \frac{1}{K_{oc}} \beta \tau^{-1} (1 + \mu_0 \tau^\beta) \end{aligned} \right. \quad (20)$$

где r_1 – радиус одиночной (первичной) частицы; N_i – численная концентрация хлопьев из i частиц радиусом r_i ;

$n_{\text{пром}}$ – количество первичных частиц в воде из РЧВ, подаваемой на промывку.

Представленная система дифференциальных уравнений описывает скорость изменения количества одиночных (первичных) и хлопьев, состоящих из i таких частиц при промывке фильтрующей загрузки, движении промывной воды по коллектору промканализации, перемешиванию в камере хлопьеобразования (при наличии), статического отстаивания промывных вод. Три последних уравнения системы имеют конечное

решение при τ от 0 до $\tau_{\text{пр.к.}}$, $\tau_{\text{кхо}}$, и $\tau_{\text{отст}}$ соответственно.

Математическое описание утилизации промывных вод весьма проблематично, так как имеет значительное количество малоуправляемых параметров. В связи с этим был разработан алгоритм принятия решения о направлении утилизации, позволяющем на основании физико-химических свойств осадка определить вид утилизации: возврат в схему обработки природных вод; промывка контактных осветлителей; техническое водоснабжение (поливомоечные нужды, на производственные нужды промышленных предприятий и т.п.); полив сельскохозяйственных культур (рис. 2).

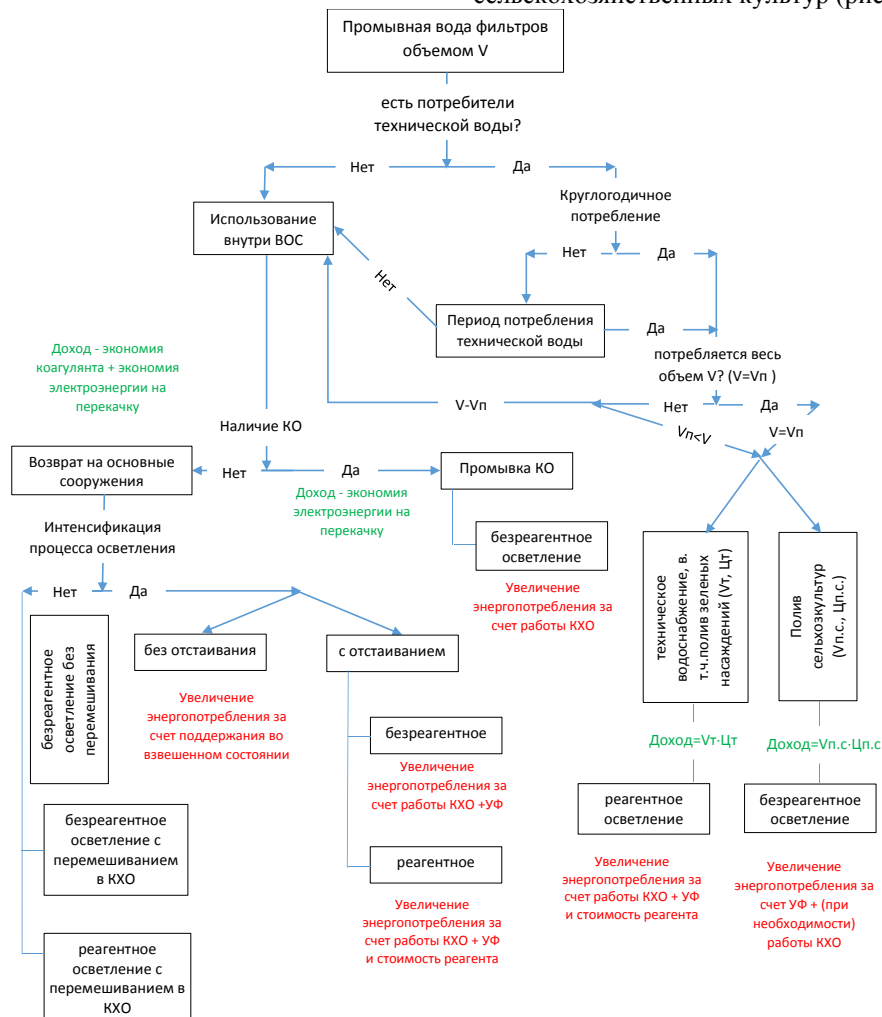


Рис. 2. Алгоритм выбора технологической схемы обработки промывных вод скорых фильтров в зависимости от направления утилизации
 Fig. 2. Algorithm for selecting the technological scheme for the treatment of flushing water of rapid filters, depending on the direction of disposal

Переход от количества частиц в воде к содержанию взвешенных веществ может быть выполнен по соотношению

$$C = C_0 \gamma_0 = \frac{4}{3} \gamma_0 \pi r_1^3 (n + \sum_{i=2}^{\infty} i N_i), \quad (21)$$

где C_0 – объемная концентрация частиц в воде;
 γ_0 – массовое содержание твердой фазы в единице объема осадка при эффективном давлении осадка $P=0$, определяемое опытным путем по методике Е.Ф. Кургаева[9].

В реальных полидисперсных системах необходимо определиться с функциями распределения по диаметрам единичных частиц и хлопьев, что составляет значительные трудности. В связи с чем на первый план выходят эмпирически полученные зависимости, например [11]:

для статических условий (вода непосредственно из фильтра без транспортировки по коллектору промканализации):

$$\Theta = 12,19 \ln(\tau h^{0,51}) - K_1 t + K_2 C_{взв} \quad (22)$$

где τ – время осветления промывной воды до заданного эффекта осветления, с;

Θ – эффект осветления, %; $C_{взв}$ – начальная концентрация взвешенных веществ, мг/дм³;

t – температура промывной воды в процессе осветления, °С;

h – высота слоя отстаивания, м;

K_1 и K_2 – коэффициенты, численно равные соответственно 0,93 1/°С и 0,019 дм³/мг.

в условиях гидродинамического воздействия на взвесь:

$$\Theta = 100 - \exp\left(\left(\frac{0,17}{t^{0,03}}\right)^3 \frac{0,01GT+13085}{(C_{взв}h)^{0,02}} \left(\frac{0,23}{\tau^{0,03}} - 0,01\right) - 6,53\right), \quad (23)$$

где GT – критерий Кэмпбелла.

С достоверностью 95 % уравнение (20) описывает изменение эффекта осветления сбросных вод с содержанием взвешенных веществ от 50÷400 мг/дм³, температуре воды от 5÷25°С и в диапазоне времени осветления от 60÷2700 с при высоте слоя осветления до 2,0 м. Уравнение (21) действительно для промывных вод с содержанием взвешенных веществ 50÷400 мг/дм³, температуре воды 5÷25°С, высоте слоя осветления 0,15÷3,5 м, критериях Кэмпбелла $1 \cdot 10^4 \div 9 \cdot 10^4$.

Анализируя систему (18) и уравнения (20, 21), можно утверждать, что влияющие на скорость изменения количества частиц, выявленные при формировании математической модели, полностью подтверждаются эмпирическими зависимостями.

ВЫВОДЫ

1. Определены этапы жизненного цикла сбросных (промывных) вод скорых фильтров (контактных осветлителей). Разработаны теоретические положения обработки промывных вод, учитывающие гидродинамическое воздействие на хлопья дестабилизированных взвешенных частиц (двоичные, третичные и т.д. структуры) и первичные частицы при движении по трубопроводам от фильтров до сооружений обработки, камер хлопьеобразования в сооружениях и осветления в статических условиях совместно с седиментационной коагуляцией.

2. Выявлены влияющие факторы на качество взвеси на каждом из этапов. Получена математическая модель процессов образования, транспортировки и обработки в камере хлопьеобразования с последующим статическим отстаиванием. Эмпирическими зависимостями, полученными для обработки сбросных (промывных) вод, подтверждены теоретические выводы.

3. Сформирован алгоритм выбора технологической схемы обработки промывных вод скорых фильтров как описание процесса утилизации сбросных (промывных) вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свод правил «Водоснабжение, наружные сети и сооружения»: СНиП 2.04.02-84*: [СП 31.13330-2021]: дата введения 2022-01-28. М., 2022. 214 с.
2. Драгинский, В. Л. Обработка промывных вод фильтров водоочистных станций / В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева // Водоснабжение и санитарная техника. 2005. № 8. С. 25-32.
3. Урванцева, М. И. Обработка промывных вод и осадков водопроводных станций, расположенных на источниках малой и средней мутности и цветности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Урванцева Марина Игоревна; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Новосибирск, 2011. - 20 с.
4. Реконструкция сооружений повторного использования промывной воды фильтров станции обезжелезивания / Кармалов А. И., Найманов А. Я. [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 10. С. 14-20.
5. Бабенков, Е. Д. Очистка воды коагулянтами / Е. Д. Бабенков; АН СССР, Ин-т физ. химии. М.: Наука, 1977. 356 с.
6. Фрог, Б. Н. Водоподготовка / Б. Н. Фрог, А. Г. Первов: учеб. для вузов. М.: Издательство АСВ, 2015. 255 с.
7. Harris, H. S. Orthokinetic Flocculation in Water Purification / H. S. Harris, W. J. Kaufman, R. B. Krone // J. Sanit. Eng. Div., proc. Am. Soc. Civ. Eng. 1966. № 6. pp. 95.
8. Бутко, Д. А. Промывные воды скорых фильтров и их повторное использование:

монография / Д. А. Бутко; Рост. гос. строит. ун-т. Ростов н/Д.: РГСУ, 2009. 121 с.

9. Кургаев, Е. Ф. Осветлители воды / Е. Ф. Кургаев. М.: Стройиздат, 1977. 192 с.

10. Клячко, В. А. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения / В. А. Клячко, И. Э. Апельцин; Акад. строительства и архитектуры СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инженерной гидрогеологии «ВОДГЕО». М.: Госстройиздат, 1962. 819 с.

11. Butko, D.A., Volodina, M.S. Regularities of rapid filter backwash water clarification in reagent-free mode. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. 111(3). Article No. 11107. DOI: 10.34910/MCE.111.7

REFERENCES

1. Code of rules "Water supply, outdoor networks and structures": SNiP 2.04.02-84*: [SP 31.13330 - 2021]: date of introduction 2022-01-28. М., 2022. 214 p.

2. Draginsky, V. L. Treatment of washing water filters of water treatment plants / V.L. Draginsky, L.P. Alekseeva // *Water supply and sanitary equipment*. 2005. No. 8. pp. 25-32.

3. Urvantseva, M.I. Treatment of washing waters and sediments of water supply stations located at sources of low and medium turbidity and chromaticity: abstract. dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.23.04 / Urvantseva Marina Igorevna; Novosibirsk State Art-architecture.-builds. un-T. Novosibirsk, 2011. 20 p.

4. Reconstruction of facilities for reuse of flushing

water filters of the de-ironing station / Karmalov A. I., Naimanov A. Ya. [et al.] // *Water supply and sanitary equipment*. 2020. No. 10. pp. 14-20.

5. Babenkov, E.D. Water purification with coagulants / E.D. Babenkov; USSR Academy of Sciences, Institute of Physics. chemistry. -M.: Nauka, 1977. 356 p.

6. Frog, B.N. Water treatment / B.N. Frog, A. G. Pervov: textbook. for universities. М.: Publishing of the DIA, 2015. 255 p.

7. Harris, H.S. Orthokinetic Flocculation in Water Purification / H.S. Harris, W.J. Kaufman, R. B. Krone // *J. Sanit. Eng. Div., proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 1966. № 6. P. 95.

8. Butko, D. A. Washing water of fast filters and their reuse: monograph / D. A. Butko; Rost. gos. builds. un-T. Rostov n/A: RGSU, 2009. 121 p.

9. Kurgaev, E. F. Water clarifiers / E. F. Kurgaev. М.: Stroyizdat, 1977. 192 p.

10. Klyachko, V.A. Water preparation for industrial and urban water supply / V.A. Klyachko, I. E. Apeltsin; Akad. construction and architecture of the USSR. All-Union. scientific-research. in-t water supply, sewerage, hydraulic engineering. structures and engineering hydrogeology "VODGEO". М.: Gosstroizdat, 1962. 819 p.

11. Butko, D.A., Volodina, M.S. Regularities of rapid filter backwash water clarification in reagent-free mode. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. 111(3). Article No. 11107. DOI: 10.34910/MCE.111.7

THEORETICAL ASPECTS OF WASTE WATER TREATMENT SYSTEMS OF RAPID FILTERS

Butko D.A.

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, 1 Gagarin Square, 344003, Russia, e-mail: den_111@mail.ru

Abstract. The article presents the results of the development of the theory of formation, treatment and disposal of waste (flushing) water of rapid filters (contact clarifiers) from the water treatment plant. The stages of the formation of waste (washing) waters, factors affecting the quality of the suspension at each stage are shown. A mathematical description of the formation of waste (washing) waters, transportation through industrial sewerage pipelines, taking into account the hydrodynamic effect on suspended particles and the type of reagent used for natural water purification is given. The treatment is described in two stages – mixing in the flocculation chamber and settling under static conditions. An algorithm is proposed for selecting the technological scheme for the treatment of flushing water of rapid filters, depending on the direction of disposal.

Subject of research. Waste water treatment systems of rapid filters as an integral part of a natural water treatment plant.

Materials and methods. The paper uses the theoretical provisions of the process of volumetric filtration by D.M. Mints, the theory of coagulation by M.S. Smolukhovskiy and its developing works, the theoretical description of the process of sediment formation by N.Ya. Avdeev.

Results. The theoretical foundations of the formation, transportation, treatment and disposal of waste (washing) waters have been formed.

Conclusions. Based on the results of theoretical work, the stages of the life cycle of waste (washing) water of rapid filters (contact clarifiers) have been determined, theoretical provisions for the treatment of washing water have been developed, influencing factors on the quality of the suspension at each stage have been identified. A mathematical model of the processes of formation, transportation and processing in the flocculation chamber with subsequent static settling is obtained. The algorithm of selection of the technological scheme of treatment of washing waters of fast filters as a description of the process of disposal of waste (washing) waters is formed.

Key words: fast filters, washing water, waste water, water treatment plant