

А.С. КАРАГЯУР, доктор технических наук  
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

## О ПРИМЕНЕНИИ ЦЕНТРИФУГИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СОСТАВЕ КОМПАКТНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

*Розроблено схему компактної очисної установки для підготовки питної води. Наведено рекомендації з проектування та експлуатації основних елементів установки: освітлюючих центрифуг, мембранних ультрафільтраційних апаратів і відцентрових адсорберів.*

**Ключові слова:** освітлююча центрифуга, ультрафільтраційні мембранні модулі, відцентровий адсорбер

*Разработана схема компактной очистной установки для подготовки питьевой воды. Приведены рекомендации по проектированию и эксплуатации основных элементов установки: осветляющих центрифуг, мембранных ультрафильтрационных аппаратов и центробежных адсорберов.*

**Ключевые слова:** осветляющая центрифуга, ультрафильтрационные мембранные модули, центробежный адсорбер.

*The scheme of the compact purification plant for drinking water preparation is designed. Recommendations for the design and operation of the basic elements of the plant (clarifying centrifuges, membrane ultrafiltration devices, centrifugal adsorbers) are presented.*

**Keywords:** clarifying centrifuges, membrane ultrafiltration modules, centrifugal adsorbers.

Обеспечение населения качественной питьевой водой для Украины является актуальной задачей. Для многих регионов проблема усугубляется дефицитом водных ресурсов. Техногенные и климатические факторы обуславливают ухудшение качества воды в поверхностных источниках водоснабжения. Сброс недостаточно очищенных сточных вод, увеличение температуры, зарегулирование водоемов приводят к их эвтрофикации. Ухудшаются органолептические свойства воды, забираемой для хозяйственно-питьевых нужд.

На сегодняшний день традиционная схема очистных сооружений для подготовки воды из поверхностных источников с повышенной загрязненностью не всегда может обеспечить необходимое качество очищенной воды [1, 45]. В современных условиях важными факторами, обеспечивающими конкурентоспособность той или иной технологии,

являются компактность, ресурсо- и энергоэкономность оборудования, возможность автоматизации, простота в обслуживании.

Применение компактных установок подготовки питьевой воды особенно актуально для малых населенных пунктов, где проблема качественного водоснабжения является наиболее острой [2, 1]. Также компактные установки актуальны при чрезвычайных ситуациях, когда существующие системы водоподготовки могут быть разрушены, а источники водоснабжения загрязнены.

В последнее время все большее распространение получают мембранные устройства [3, 18]. Установки микро- и ультрафильтрации обеспечивают практически полное удаление взвешенных и коллоидных веществ, большинства вирусов и бактерий. Для более широкого применения данных устройств необходимы исследования и технические решения, направленные на разработку эффективного оборудования предочистки. Актуальным также является интенсификация способов очистки от растворенных органических примесей. Большим потенциалом в этом направлении обладает адсорбционная очистка [1, 308], но значительная стоимость адсорбентов требует новых решений по их более эффективному применению.

Для решения перечисленных задач предлагается применять в составе компактных установок центрифугирующие устройства [4, 17]. Для обоснования данного решения на кафедре водоснабжения, канализации и гидравлики ХНУСА были проведены теоретические и экспериментальные исследования, на основе которых разработана компактная очистная установка, включающая в себя следующие элементы (рис. 1):

- 1) оборудование для удаления взвешенных и коллоидных веществ;
- 2) центробежные адсорберы, а также оборудование для приготовления суспензии адсорбента, необходимые для улучшения органолептических свойств воды: удаление растворенных органических соединений, запахов и привкусов;
- 3) оборудование для обеззараживания: УФ-облучение, если временной интервал между очисткой и потреблением небольшой, веществами, содержащими хлор для обеспечения пролонгированного действия;
- 4) оборудование для обработки образующихся осадков.

Для удаления взвешенных и коллоидных веществ рекомендуется применять следующие устройства:

- осветляющие центрифуги с цилиндрическими вставками, разделяющие рабочее пространство на секции с малой шириной осаждения, – для предочистки и удаления основной массы взвешенных веществ, а также для сглаживания неравномерности по количеству и качеству очищаемой воды;

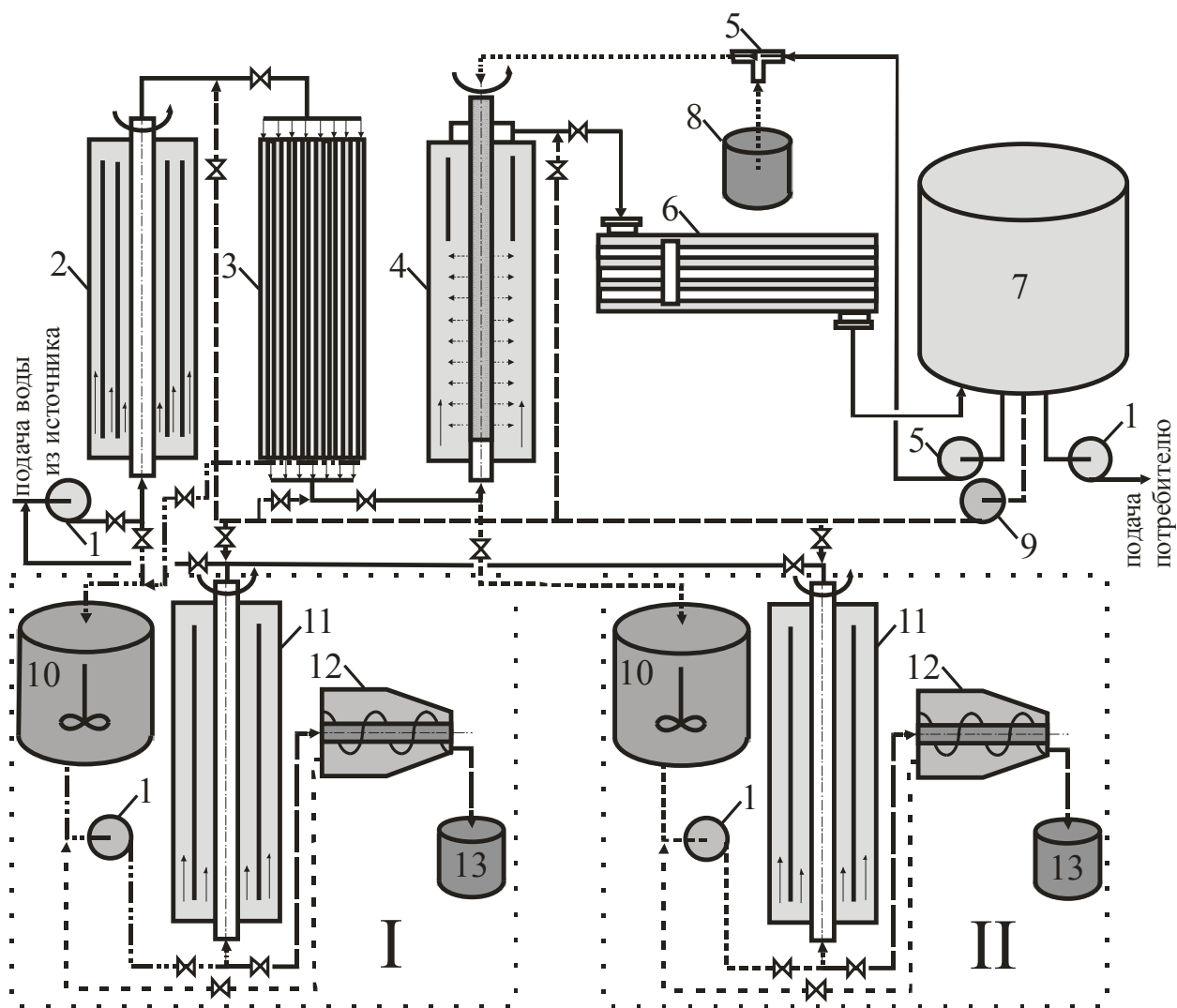


Рис.1. Схема компактной установки для подготовки питьевой воды:

1 – насос; 2 – осветляющие центрифуги с цилиндрическими вставками для предочистки воды; 3 – ультрафильтрационные мембранные установки; 4 – центробежные адсорберы; 5 – оборудование для приготовления и дозирования суспензии адсорбента; 6 – оборудование для обеззараживания воды; 7 – регулирующая емкость (для хранения чистой воды); 8 – емкость для хранения адсорбента; 9 – насос подачи воды для промывки очистного оборудования; 10 – емкость для накопления осадка (отработанного адсорбента); 11 – осветляющие центрифуги с цилиндрическими вставками для концентрирования осадка; 12 – шнековые центрифуги; 13 – бункер для накопления обезвоженного осадка (отработанного адсорбента); I – оборудование для обработки осадка; II – оборудование для обработки отработанного адсорбента

- ультрафильтрационные мембранные модули с полуволоконными полимерными мембранами, рейтингом фильтрации 0,01 мкм, работающие в режиме «тупиковой» фильтрации, – для доочистки воды, удаления мелких частиц взвеси, коллоидных веществ, а также нерастворимых примесей, плотность которых мало отличается от

плотности воды, удаления большинства вирусов и бактерий и, соответственно, снижения нагрузки на установку для обеззараживания;

- ультрафильтрационные мембранные модули с полуволоконными полимерными мембранами, рейтингом фильтрации 0,05 мкм, работающие в режиме «тангенциальной» фильтрации с очисткой циркуляционного потока в осветляющих центрифугах с цилиндрическими вставками, – в случае необходимости при повышенном содержании в исходной воде взвешенных и коллоидных веществ мелкодисперсного состава.

Удаление взвешенных и коллоидных веществ согласно предложенной технологии не требует применения реагентов, что для сооружений небольшой производительности является экономически выгодным.

При проектировании и расчете осветляющих центрифуг с цилиндрическими вставками необходимо принимать рациональные значения конструктивных и технологических параметров, то есть, обеспечивающие при заданном качестве очистки минимальные энергетические затраты.

Конструктивно осветляющая центрифуга представляет собой цилиндрический ротор, установленный вертикально, высота которого намного превышает диаметр (рис. 2).

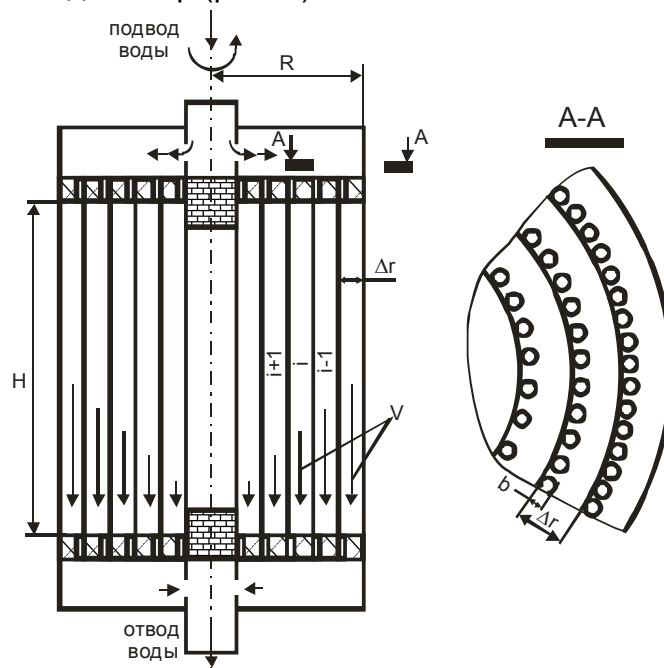


Рис. 2. Схема осветляющей центрифуги с цилиндрическими вставками

Ориентировочные размеры осветляющей центрифуги: рабочая высота – 1,2...1,5 м, диаметр – 200...500 мм. Корпус ротора может быть выполнен из пластмассы или нержавеющей стали. Внутри рабочее пространство корпуса разделено цилиндрическими вставками на секции с малой шириной осаждения (5...20 мм). Рабочая высота – это размер рабочей зоны, где непосредственно происходит очистка воды, то есть расстояние между входными и выходными отверстиями, по которым вода подводится и отводится из секций. Приводом, обеспечивающим вращение центрифуги с

заданной частотой, служит электродвигатель с плавным регулированием частоты вращения с помощью преобразователей частоты тока.

Конструктивные параметры осветляющих центрифуг с цилиндрическими вставками – это внешний радиус, рабочая высота, количество секций, ширина секций, конструктивные условия подвода и отвода очищаемой воды; технологические – производительность устройства, частота вращения, организация (распределение) потока в секциях.

Для определения рациональных конструктивных и технологических параметров осветляющих центрифуг с цилиндрическими вставками необходимо придерживаться нижеследующих рекомендаций.

- Перед расчетом осветляющих центрифуг следует провести исследование качества исходной воды для определения изменения концентрации взвешенных веществ во времени и дисперсного состава загрязнений для построения зависимости эффекта осветления от гидравлической крупности частиц взвеси  $\Xi(u_w)$ . Зависимость  $\Xi(u_w)$  необходима для определения расчетной гидравлической крупности, от которой зависят конструктивные и технологические параметры центрифуги.

- Распределение потока в секциях осветляющей центрифуги с цилиндрическими вставками необходимо организовывать из условия, что качество очистки воды в каждой секции одинаково, а также, что число Фруда превышает критическое значение в  $K$  (коэффициент запаса) раз. В этом случае обеспечиваются минимальные удельные затраты энергии на раскручивание жидкости, поступающей на очистку. Необходимое распределение потока в каждой секции регулируется площадью входных и выходных отверстий. Критическое значение числа Фруда определяется по зависимости (1).

$$Fr_{кр} = \frac{27 \pi \mu^2 V_{пов}^2 (\alpha f + 1)^2}{2 D^2 k_A f^2 g \Delta \rho} + \frac{1}{f}, \quad (1)$$

где  $Fr_{кр}$  – критическое число Фруда;  $V_{пов}$  – скорость потока возле поверхности осаждения на расстоянии  $D$  от стенки, м/с;  $D$  – расстояние от поверхности осаждения, на котором распределение скорости на участке  $R_1 - D$  можно считать линейным, м;  $R_1$  – радиус внешней стенки секции;  $\Delta \rho$  – разница плотностей частички взвеси и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $k_A$  – коэффициент адгезии, Н/м;  $f$  – коэффициент трения;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

Под критическим значением параметров подразумевается такая их величина, при которой начинается смыв потоком очищаемой воды осадка с поверхности осаждения.

- Коэффициент запаса принимается равным 1,02...1,05 из условия накопления некоторого количества осадка на поверхности осаждения без смыва его обратно в поток. Толщина слоя осадка зависит от концентрации взвеси в исходной воде, эффекта осветления, принятого времени работы устройства в режиме очистки, свойств осадка (плотности, сжимаемости и т.д.).

- Для повышения производительности одного центрифугирующего устройства, если нет необходимости обеспечивать глубокую очистку, следует увеличивать внешний радиус аппарата, а также ширину 1-ой секции  $\Delta r_1$ . Ширина остальных секций рассчитывается по зависимости (2):

$$\frac{\Delta r_i}{\Delta r_1} = \left( \frac{r_i}{R} \right)^{0,282} \quad (2)$$

- При расчете конструктивных и технологических параметров осветляющей центрифуги для повышения КПД ее работы, следует придерживаться таких значений, при которых затраты энергии на преодоление сил трения будут не больше 25% от общих энергетических затрат. Мощность центрифугирующего устройства, необходимая для преодоления сил трения определяется по зависимости (3), мощность необходимая для раскручивания жидкости (полезная мощность) рассчитывается по зависимости (4):

$$N_f = f_w \omega r_{ц} P_d, \quad (3) \quad N_{\omega i} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^{k_c} Q_i \omega^2 (r_i^2 + r_{i+1}^2), \quad (4)$$

где  $k_c$  – количество секций;  $Q_i$  – производительность  $i$ -ой секции, м<sup>3</sup>/с;  $f_w$  – коэффициент трения подшипников;  $r_{ц}$  – радиус цапфы, м;  $P_d$  – динамическая нагрузка на подшипники, Н;  $\omega$  – частота вращения, с<sup>-1</sup>.

- При расчете максимального значения необходимой мощности осветляющей центрифуги и подборе электродвигателя следует учитывать возможную агломерацию взвешенных веществ при высокой мутности исходной воды. Расчетный (самый неблагоприятный) случай может не соответствовать периоду с наибольшей концентрацией взвешенных веществ в источнике.

- При необходимости применения нескольких центрифугирующих устройств для увеличения общей производительности, центрифуги следует объединять в блоки по 4...6 штук с одним электродвигателем.

- Удаление осадка из ротора центрифуги происходит периодически: при отключении устройства осадок смывается потоком воды, продолжающем поступать в центрифуги.

- При повышенном содержании взвешенных веществ в исходной воде (более 200 мг/л) для повышения эффекта осветления и времени работы устройства в режиме очистки следует применять осветляющие центрифуги с двухступенчатой очисткой, конструкция которых представлена на рис. 3.

- Стоимость осветляющей центрифуги вместе с необходимым оборудованием примерно в 7-10 раз меньше, чем модуля мембранной ультрафильтрации, поэтому неравномерность расхода и качества исходной воды следует сглаживать на центрифугах, обеспечивая подачу воды на ультрафильтрационные установки со стабильными характеристиками. Для этого необходимо предусматривать большее количество резервных осветляющих центрифуг.

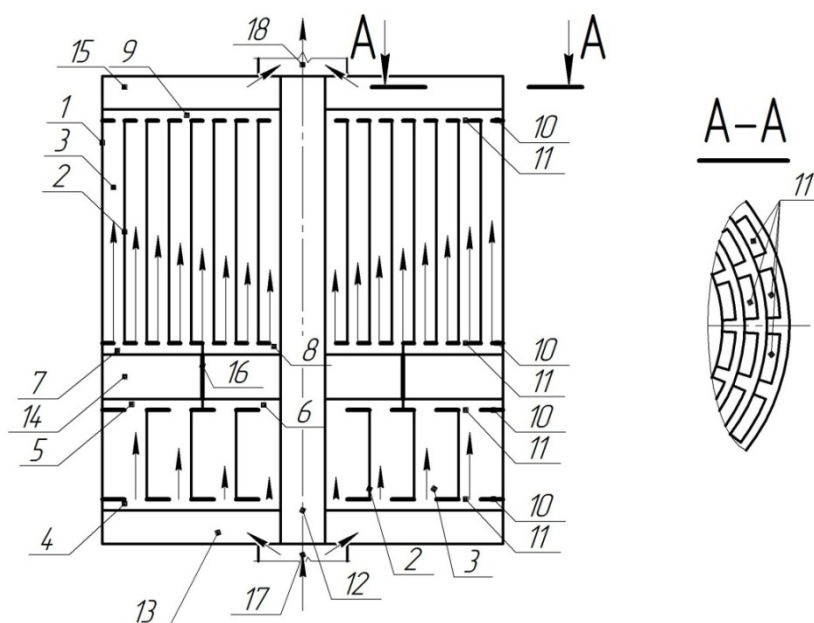


Рис. 3. Схема осветляющей центрифуги с двухступенчатой очисткой:  
 1 – корпус; 2 – цилиндрические вставки; 3 – секции; 4–9 – полые диски;  
 10 – торцевая поверхность; 11 – отверстия; 12 – полая ось;  
 13-15 – распределительные камеры; 16 – цилиндрическая вставка; 17,  
 18 – трубы

В результате проведенных исследований разработана методика расчета совместной работы осветляющих центрифуг и микро-, ультрафильтрационных мембранных установок, позволяющая спрогнозировать рост во времени потерь напора и уменьшение производительности, а также рассчитать энергетические затраты в зависимости от количества и качества исходной воды.

При выборе микро-, ультрафильтрационных мембранных установок и при разработке регламента их работы совместно с осветляющими центрифугами следует учитывать следующие рекомендации.

- Для уменьшения количества основных элементов компактной установки и упрощения технологических процессов уменьшение производительности осветляющих центрифуг должно происходить синхронно с уменьшением производительности мембранных установок. При этом частота вращения центрифугирующего устройства должна быть постоянной на протяжении всего фильтроцикла.

- При подборе аппаратов микро-, ультрафильтрации следует принимать такие материалы мембран и с таким рейтингом фильтрации, при которых преимущественно обеспечивается фильтрование с образованием слоя осадка на поверхности фильтровальной перегородки.

- Расчетами должен определяться такой эффект предочистки, при котором суммарная мощность осветляющих центрифуг и установок мембранной фильтрации будет минимальной.

- При образовании осадка с высокой степенью сжимаемости, а также при повышении начальной концентрации взвешенных веществ, следует увеличивать качество предочистки на осветляющих центрифугах.

- При подборе насосов для создания необходимого давления в очистном оборудовании следует принимать насосы с умеренно крутопадающей H-Q характеристикой и невысоким значением напора при нулевой подаче.

- При использовании микро-, ультрафильтрационных мембранных модулей с «тангенциальной» фильтрацией следует предусматривать очистку циркуляционного потока и промывной воды после регенерации мембранных модулей в осветляющих центрифугах с цилиндрическими вставками.

Применение центробежных сил при удалении из вод поверхностных источников растворенных органических примесей позволит реализовать основные направления интенсификации этого процесса: применение более дешевых порошкообразных или пылевидных адсорбентов; повышение кинетики массообмена за счет создания перекрестного движения очищаемой воды и потока адсорбента; удаление адсорбента из очищенной воды.

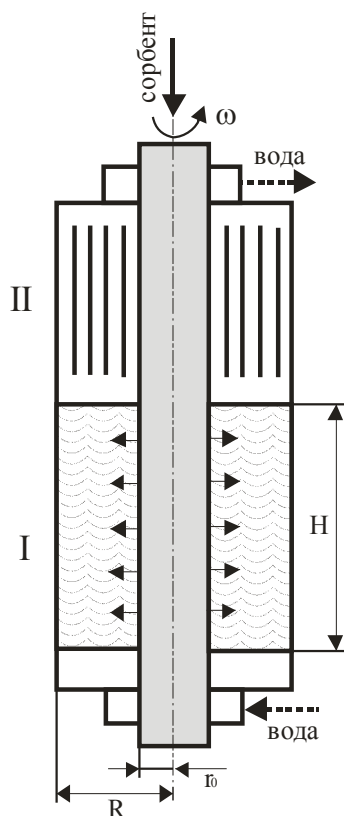


Рис. 4. Центробежный адсорбер  
I – зона адсорбции  
II – зона осветления

Конструктивно центробежный адсорбер (рис. 4) представляет собой цилиндрический ротор, установленный вертикально. Ориентировочные размеры данного устройства: рабочая высота – 1,2...1,5 м, диаметр – 200...400 мм. Аналогично осветляющей центрифуге корпус ротора может быть выполнен из пластмассы или нержавеющей стали. Внутри рабочее пространство ротора имеет две зоны: зону адсорбции и зону осветления. Высота зоны адсорбции равна 70...80% от рабочей высоты устройства, высота зоны осветления – 20...30%. Зона осветления по аналогии с осветляющей центрифугой разделена цилиндрическими вставками на секции с малой шириной осаждения (3...5 мм). Ротор также содержит внутреннюю полую трубу диаметром 100...200 мм, в которую подается суспензия адсорбента. Эта труба имеет отверстия, через которые суспензия адсорбента подается в зону адсорбционной очистки. Приводом, обеспечивающим вращение устройства, также служит электродвигатель с плавным регулированием частоты вращения с помощью преобразователей частоты тока.



На основе проведенных исследований разработана методика расчета рациональных значений конструктивных и технологических параметров данных аппаратов. При проектировании центробежных адсорберов и разработке регламента их работы следует учитывать следующие рекомендации.

- Значения конструктивных и технологических параметров устройства при заданном размере зерен адсорбента должны соответствовать максимальному значению эффекта очистки.

- Для удаления из воды растворенных органических примесей в центробежных адсорберах следует применять порошкообразный адсорбент как можно более монодисперсного состава, с хорошей кинетикой адсорбции, и эквивалентным диаметром зерен равным  $10\div 50$  мкм.

- При выборе адсорбента следует принимать такой материал, пористая структура (распределение пор по размерам) которого обеспечивает равнозначную адсорбционную и транспортную способность.

- Качество адсорбционной очистки в центробежном адсорбере при постоянной производительности следует регулировать изменением частоты вращения и концентрации адсорбента в суспензии.

- Подача суспензии адсорбента должна осуществляться по всей высоте зоны адсорбции с одинаковой его концентрацией.

- По причине высокой стоимости адсорбента в сравнении с остальными затратами при значительной производительности компактной установки, когда работают несколько устройств, целесообразным является повторное использование адсорбента. Для этого необходимо дополнительное оборудование для накопления и перекачки адсорбента с разной степенью накопления загрязняющих веществ. В зависимости от количества центробежных адсорберов возможны следующие варианты движения очищаемой жидкости и адсорбента через очистные устройства:

- очищаемая вода последовательно пропускается через два центробежных адсорбера, которые работают с производительностью, удвоенной в сравнении с отдельным применением устройств, адсорбент последовательно пропускается через устройства в направлении противоположном движению воды;

- очищаемая вода параллельно пропускается через три и более центробежных адсорбера, адсорбент последовательно пропускается через эти устройства.

**Выводы:** разработанные рекомендации по проектированию и эксплуатации компактных установок позволяют обеспечить эффективную подготовку воды из поверхностных источников до качества питьевой при минимальных эксплуатационных затратах.

## Список литературы

1. *Журба М.Г.* Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. [учеб. пособие] / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. – [3-е изд., доп. и перераб]. – Т. 2. Очистка и кондиционирование природных вод. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 552 с.

2. *Інформація* про якість питної води в Україні [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Міністерства охорони здоров'я України. – Режим доступу: [http://www.moz.gov.ua/ua/portal/pre\\_20110602\\_5.html](http://www.moz.gov.ua/ua/portal/pre_20110602_5.html)

3. *Андріанов А.П.* Доочистка Московської водопровідної води: застосування мембранних технологій / А.П. Андріанов. – Вестник МГСУ. – 2010. – № 4. – Т. 2. – С. 16-20.

4. *Епоян С.М.* Використання відцентрових сил для підвищення якості очистки води / С.М. Епоян, А.С. Карагяур, С.П. Бабенко // Водокористування: технології, споруди, менеджмент: робоча програма та тези допов. першої міжнар. конф., 2-4 грудня 2014 р., м. Київ. – К.: КНУБА, 2014. – С. 17.

*Надійшло до редакції 13.05.2016*