

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 15.11.2022 09:29:47  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

**МИНОВЕРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)**

**Кафедра охраны труда и окружающей среды**



**РАСЧЕТ АДСОРБЦИОННЫХ УСТАНОВОК  
ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды» для студентов всех специальностей и направлений подготовки

Курск 2021

УДК 614.71

Составители: В.В. Юшин

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Г.П. Тимофеев

**Расчет адсорбционных установок для очистки сточных вод:** методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин Курск, 2021. 15 с.

Излагается методика расчета устройств для адсорбционной очистки сточных вод.

Работа предназначена для студентов всех специальностей и направлений подготовки.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.09.2021 Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,86. Уч.-изд.л. 0,79. Тираж 30 экз. Заказ 53. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Цель занятия:** изучить конструкции и методику расчета адсорберов для очистки сточных вод..

### **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Аппаратурное оформление адсорбционной очистки сточных вод активными углями включает комплекс оборудования и его обвязки, обеспечивающий в общем случае следующие технологические операции:

- а) подачу сточных вод в адсорбер;
- б) контакт сточных вод с адсорбентом в адсорбере;
- в) отделение очищенной воды от адсорбента и вывод ее из адсорбционной аппаратуры;
- г) вывод отработанного адсорбента из адсорбера с утилизацией или регенерацией его;
- е) загрузку в адсорбер чистого адсорбента.

Выбор конструкции адсорберов прежде всего обусловлен дисперсным составом адсорбента, который принимается с учетом дефицитности, его стоимости и возможности регенерации.

В зависимости от дисперсного состава адсорбента принципиальные конструкции адсорберов можно подразделить на следующие типы:

I - адсорбер с неподвижной или движущейся загрузкой, через которую водный поток фильтруется или нисходящим потоком со скоростью до 20 м/ч, или восходящим - со скоростью до 12 м/ч, применяется для фракции 0,8 - 5 мм;

II - адсорбер с псевдооживленной загрузкой, расширение слоя которого осуществляется не менее чем на 50 % восходящим потоком воды со скоростью 10-40 м/ч, применяется для фракций 0,25 - 2,5 мм;

III - адсорберы-смесители применяются для фракций 0,05 - 0,5 мм;

IV - патронные адсорберы с фильтрованием воды со скоростью 1 - 12 м/ч через слой адсорбента толщиной 0,5 - 2 см, применяются для фракций 0,02 - 0,1 мм.

Адсорберы I типа могут применяться для очистки любых объемов сточных вод самого широкого спектра концентраций и химического строения извлекаемых примесей.

Если исчерпание емкости адсорбента происходит на коротком слое загрузки (за счет высокой эффективности адсорбции или малой концентрации адсорбата), и процесс можно прервать на период

смены загрузки или ее регенерации, то вся высота загрузки, используемая для адсорбции, размещается в одном адсорбере.

Если требуемая высота загрузки больше размеров одного адсорбера или процесс не может прерываться, то используются несколько последовательно работающих адсорберов, или порционный (дискретный или непрерывный) вывод из адсорбера отработанного адсорбента.

В тех случаях, когда расход воды превышает допустимый для одного адсорбера или требуемую степень очистки можно обеспечить за счет смещения потоков, поступающих из адсорберов с разной эффективностью работы, устанавливают параллельно работающие адсорберы.

Адсорберы II типа наиболее целесообразно применять для очистки небольших объемов сточных вод с хорошо сорбируемыми загрязнениями.

Адсорберы III типа эффективно использовать для очистки небольших объемов высококонцентрированных сточных вод, а адсорберы четвертого типа для очистки небольших объемов низкоконцентрированных сточных вод (5-10 мг/л извлекаемых примесей).

Адсорберы с неподвижной гранулированной загрузкой выполняются в виде металлических колонн или бетонных резервуаров.

Промышленное изготовление таких колонных адсорберов в настоящее время ограничено. Возможно применение сорбционных угольных фильтров, предназначенных для глубокой очистки конденсата от нефтепродуктов на ТЭЦ, для обработки любой сточной воды активными углями при условии предварительного удаления из воды грубодисперсных примесей.

Фильтры сорбционные угольные вертикальные (ФСУ-2,0-6; ФСУ-2, 6-6; ФСУ-3, 0-6 и ФСУ-3, 4-6) представляют собой однокамерные цилиндрические аппараты из листовой стали с приваренными эллиптическими штампованными днищами. К нижнему днищу приварены три опоры для установки фильтра на фундамент. В центре верхнего и нижнего днища приварены патрубки для подвода и отвода сточной воды. К ним снаружи присоединяются трубопроводы, расположенные по фронту фильтра, а внутри - распределительные устройства, состоящие из вертикальных коллекторов, со-

единенных с радиально расположенными перфорированными трубами.

Корпус угольного фильтра снабжен двумя лазами - верхним эллиптическим размером 420x320 мм и нижним круглым диаметром 600 мм. На уровне нижнего распределительного устройства к корпусу фильтра приварен штуцер для гидравлической выгрузки отработанного угля. При общей высоте фильтра 5 - 5,7 м высота загрузки составляет 2,5 м.

Ввиду дефицитности угольных фильтров в качестве адсорберов может использоваться и промышленное оборудование, изготавливаемое для фильтрования воды через другие загрузки, например фильтры ионообменные.

Все указанные фильтры рассчитаны на подачу воды под напором до 0,6 МПа, но могут работать и в безнапорном режиме. Корпус и трубопроводы фильтров изготавливаются из углеродистой стали, их внутренние поверхности подлежат защите коррозионностойкими покрытиями, распределительные устройства изготавливаются из нержавеющей стали и полиэтилена.

В комплект поставки входят: корпус фильтра, верхнее и нижнее распределительные устройства, трубопроводы и арматура в пределах фронта фильтра, пробоотборное устройство, манометры с трехходовыми кранами и сифонными трубками, крепежные и прокладочные материалы.

В тех случаях, когда производительность адсорберов с плотным слоем загрузки превышает 120 - 200 м<sup>3</sup>/ч, а также при отсутствии промышленных адсорберов, они изготавливаются в индивидуальном порядке в виде металлических колонн напорного и безнапорного типа или в виде открытых бетонных резервуаров.

В резервуарных адсорберах гранулированный адсорбент укладывается или на беспровальную решетку с колпачковыми дренажными устройствами, или на слой гравия и мелкого щебня высотой 0,4 - 0,5 м. Трубчатая система подачи сточной воды устанавливается в слое гравия и представляет собой набор кольцевых или радиальных трубопроводов с отверстиями, направленными к нижней части адсорбера.

В резервуарных адсорберах сбор очищенной воды осуществляется системой открытых лотков или перфорированных трубопроводов. Выгрузка отработанного угля ведется гидроэлеватором или через придонное отверстие при расширении загрузки восходящим

потоком воды. Загрузка свежим активным углем обеспечивается гидроэлеватором.

Подача воды в колонны осуществляется равномерно по сечению адсорбера с помощью распределительной системы, сбор очищенной воды - открытыми лотками или трубчатой системой. Впуски и выпуски воды могут быть оформлены также и в виде решетчатых патрубков, равномерно рассредоточенных по сечению колонны в верхней и нижней ее части. Патрубки выполняются из нержавеющей стали с отверстиями 0,5 мм, поверхность их покрыта сеткой из нержавеющей стали. Подающие и сборные патрубки устанавливаются таким образом, чтобы площадь адсорбера между патрубками и наружными стенками составляла половину поперечного сечения адсорбера. В напорных колонных адсорберах вверху необходимо предусмотреть устройство для регулирования давления в колонне. В противном случае возможно разрушение адсорбера при его опорожнении и образование воздушных пробок в загрузке адсорбера при его наполнении.

Перегрузка адсорберов может выполняться с помощью воздушного или водного потоков, но в первом случае наблюдается большая эрозия труб и арматуры, а также срыв вакуума. Поэтому чаще применяется гидротранспорт угля по трубопроводам уклоном  $0,02 - 0,1^\circ$ , диаметром не менее 50 мм при скорости угольной пульпы 0,8 - 1 м/с и отношении твердой части к жидкой в пульпе по массе Т: Ж не менее 1 : 8.

Перед загрузкой в адсорбер уголь замачивается горячей водой в течение 5 ч или холодной водой в течение 20 - 24 ч при постоянном перемешивании.

Адсорберы с движущейся плотной или ожиженной не более чем на 10 % загрузкой выполняются в виде колонных аппаратов, дополнительно оборудованных устройствами для непрерывной подачи сверху замоченного и отмытого от мелкой фракции адсорбента, находящегося в верхней части адсорбера, и для вывода отработанного адсорбента из нижней зоны адсорбера. Сточная вода при этом подается через распределительное устройство под загрузкой и собирается сборным устройством над загрузкой угля. Кроме того, адсорбер оборудуется устройством, обеспечивающим равномерность перемещения толщи угольной загрузки по поперечному сечению аппарата.

Наиболее надежными адсорберами второго типа с псевдооживленным слоем угольной загрузки являются цилиндрические металлические колонны, разделенные по высоте беспровальными решетками, оборудованными переточными устройствами. Очищаемая сточная вода подается в нижнюю часть аппарата по трубчатой системе большого сопротивления, уложенной в слое гравия, очищенная вода отводится через кольцевое сборное устройство в верхней части адсорбера. Активированный уголь в сухом виде непрерывно дозируется с помощью вакуумной системы через шлюзовую питатель в загрузочное устройство, где происходит его замачивание и перемещение в адсорбер.

Выгрузка отработанного угля осуществляется эрлифтом, нижний конец которого установлен вблизи гравийных поддерживающих слоев. Угольная загрузка, заключенная в каждой секции между беспровальными решетками, расширяется восходящим потоком воды в 1,5 - 1,75 раза по сравнению с высотой того же объема загрузки в неподвижном состоянии. Режим перетока сорбента с верхних решеток на нижние задается на основе расчета необходимой дозы сорбента и расхода сточных вод.

В адсорберах с псевдооживленным слоем нет необходимости отмывать загружаемый уголь от пылевидной фракции, так как она выносится из адсорбера вместе с очищенной водой. После адсорберов с псевдооживленным слоем обязательно устанавливается фильтр для осветления воды. В настоящее время в химической технологии разработано и применяется большое число мешалочных аппаратов и патронных фильтров, которые могут быть использованы как адсорберы III и IV типов. Для перемешивания сточных вод с активным углем рекомендуется использовать лопастные, турбинные или пропеллерные мешалки в аппаратах, изготавливаемых отечественной промышленностью.

Адсорберы IV типа - патронные фильтры широко используются в химической технологии, например в ионообменной технологии для очистки низкосолевых водных растворов. Практически все промышленные аппараты этого типа могут быть использованы для адсорбционной очистки, но специфика физических характеристик сорбента требует и специфических технологических параметров эксплуатации.

В настоящее время в промышленной практике адсорбции загрязнений из малоконцентрированной по органическим загрязне-

ниям воды на мелкодисперсных активных углях КАД и БАУ могут применяться патронные фильтры, площадь фильтрации 248 патронов составляет  $80 \text{ м}^2$ . Патроны выполнены из витой проволоки, для намыва на них угольного порошка фракции 40 – 30 мкм, они предварительно покрываются двойной капроновой сеткой производства Рахмановской шелкопрядильной фабрики. Продолжительность фильтроцикла в зависимости от состава очищаемой воды обусловлена либо потерями напора, либо проскоком недопустимой концентрации растворенных загрязнений.

Для проектирования адсорберов должны быть известны следующие параметры: размеры адсорберов, объем и масса загрузки адсорбента, режим смены загрузки, количество и технологическая схема обвязки адсорберов, тип и количество используемой арматуры.

При расчете адсорберов необходимы следующие исходные параметры: расход сточных вод; начальная концентрация загрязнений; концентрация загрязнений в очищенной воде; изотерма адсорбции; скорость фильтрования сточной воды через загрузку или скорость движения сточной воды через поперечные сечения адсорбера; объем адсорбента, одновременно выгружаемого из адсорбционной установки; ориентировочная продолжительность периода работы адсорбента до проскока и соответственно замены отработанного адсорбента чистым; требуемая степень обработки; кажущаяся и насыпная плотность адсорбента.

В том случае, когда физико-химический состав загрязнений в сточной воде неизвестен, например, в многокомпонентной сточной воде после биохимической очистки, в расчете концентраций адсорбата может использоваться обобщенный показатель, в частности ХПК, ВПК, органический углерод.

Расчет размеров адсорберов начинают с определения общей площади адсорбционной установки, используя СНиП 2.04.03 - 85, а затем, выбрав конструкцию и площадь поперечного сечения одного адсорбера, рассчитывают минимально необходимое число параллельно работающих адсорберов.

Наиболее точный расчет высоты загрузки адсорбента в адсорберах и режима ее замены выполняется по результатам работы модели адсорбера выбранной конструкции на данной или аналогичной сточной воде. В режиме, соответствующем реальному, т. е. при сохранении продолжительности контакта и объемной нагрузки



сточной воды на адсорбент (скорости фильтрования), определяют продолжительность работы адсорбера до проскока минимально допустимой концентрации и до полного исчерпания емкости адсорбента.

На основе указанных опытных данных для адсорберов с плотным слоем загрузки строят выходную кривую. Выходная кривая представляется в виде графика в системе координат: концентрация адсорбата в жидкой фазе  $C_1$  - на оси ординат и время  $t$  - на оси абсцисс. Она характеризует изменение концентрации в очищаемой воде в каком-либо сечении адсорбционной колонны в процессе адсорбции. Выходная кривая начинается с момента появления минимальной проскоковой концентрации и заканчивается моментом появления максимальной концентрации адсорбата в воде.

По данным экспериментальной выходной кривой определяется длина зоны массопередачи  $H_M$ , заключенной между слоями чистого и отработанного адсорбента:

$$H_M = H_{tot} \frac{t_{2 ads} - t_{1 ads}}{t_{1 ads} + \xi(t_{2 ads} - t_{1 ads})}. \quad (1)$$

С увеличением скорости водного потока  $v$  длина зоны массопередачи увеличивается, но для многокомпонентной сточной воды - менее чем в пропорциональном отношении, в частности при доочистке биохимически очищенных сточных вод:

$$H_{M1}/H_{M2} = 0,6 - 0,7 \text{ от } v_1/v_2. \quad (2)$$

Длина зоны массопередачи должна быть меньше общей высоты загрузки на резервную высоту слоя, обеспечивающего очистку сточных вод в период смены отработанного адсорбента, и на высоту слоя отработанного адсорбента. Резервную высоту загрузки определяют по двум выходным кривым на высоте  $H_A$  и  $H_B$

$$H_3 = u_n \tau = \frac{(H_A - H_B)\tau}{t_A - t_B}, \quad (3)$$

где  $u_n$  - фактическая скорость водного потока, равная  $v/\varepsilon$  ( $\varepsilon$  - порозность загрузки).

Для расчета продолжительности работы адсорберов до смены адсорбента используют данные выходной кривой по объему жидкости, обработанной определенным объемом загрузки до обеспечения требуемого исчерпания емкости:

$$t_{ads} = \frac{W_b^t W_b^p}{q_w W_{sb}}. \quad (4)$$

Для расчета массы адсорбента следует пользоваться величиной кажущейся плотности (следует учитывать, что насыпная плотность активных углей характеризует массу образца адсорбента, занимающего определенный объем, включая воздушные прослойки между частицами угля и внутри его пор, и составляет 0,25 - 0,6 г/см<sup>3</sup>). В отличие от насыпной, кажущаяся плотность активных углей включает только массу частиц с внутренними порами. При заполнении внутренних пор частиц воздухом эта величина равна 0,4 - 0,9 г/см<sup>3</sup>. При заполнении внутренних пор водой кажущаяся плотность равна 1,2 - 1,5 г/см<sup>3</sup>, поэтому в плотном слое мокрого гранулированного угля возможно создавать восходящий поток воды со скоростью 8 -12 м/ч без всплывания частиц угля. Истинная плотность углеродного скелета активного угля равна 1,9 -2 г/см<sup>3</sup>. Следует учитывать и повышение плотности углей в процессе накопления на их поверхности молекул адсорбата. Изменение плотности адсорбентов должно учитываться при пересчете объема активных углей на их массу, в частности, при перегрузках адсорбционных аппаратов и расчете поддерживающих конструкций.

Потери адсорбента при перегрузке зависят от его прочности, которая для активных углей в зависимости от исходного сырья и технологии активации находится в пределах 60 - 90%. В частности, прочность менее 75 % приводит к потерям на истирание более 15 %, поэтому эти угли рекомендуются к одноразовому употреблению.

При отсутствии выходных кривых и других данных работы модели адсорберов в реальных режимах эксплуатации расчет необходимого объема загрузки адсорбента начинают с определения дозы адсорбента, обеспечивающей требуемую характеристику очищенной сточной воды.

Этот расчет для условия полного исчерпания емкости адсорбента при извлечении одного компонента при известных характеристиках адсорбата и адсорбента ведется по формуле:

$$D_{sb}^{min} = \frac{0,47\gamma C_{en}^{0,667} C_s^{0,178}}{K_p^{0,142} g_a^{0,991}}; \quad K_p = e^{-\Delta F^0/RT}; \quad \gamma = \frac{V_M}{0,99}, \quad (5)$$

где  $V_M$  - молярный объем сорбата, дм<sup>3</sup>/моль.

Во всех остальных случаях (многокомпонентный состав загрязнений, отсутствие характеристик адсорбата и адсорбента и пр.) используется формула из СНиП 2.04.03-85:

$$D_{sb}^{min} = (C_{en} - C_{ex})/K_{sb} a_{sb}^{min}. \quad (6)$$

Изотерму адсорбции, выражающую связь между концентрацией адсорбата в воде ( $C_e$ , мг/л) и максимальной адсорбционной емкостью ( $a_{sb}^{max}$ , мг/л), описывают уравнениями. При начальной концентрации сточной воды до 100 мг/л ХПК можно использовать изотерму Генри:

$$a_{sb}^{min} = \Gamma C_{ex}; \quad a_{sb}^{max} = \Gamma C_{en}. \quad (7)$$

При больших концентрациях обычно используют изотерму Фрейндлиха:

$$a_{sb}^{min} = f C_{ex}^{1/n}; \quad a_{sb}^{max} = f C_{en}^{max} = f C_{en}^{1/n}. \quad (8)$$

Адсорбция индивидуального вещества из воды при условии заполнения поверхности монослоем может быть описана уравнением Лэнгмюра:

$$a_{sb}^{min} = a_{sb}^{max} b C_{ex} / (1 + b C_{ex}) \quad (9)$$

Для адсорбции ограничено растворимого вещества с размером молекулы, близким размеру пор адсорбента из однокомпонентного раствора, может быть использовано уравнение

$$\lg a_{sb}^{min} = \lg \frac{W}{\vartheta_a} - 2,3 \frac{BT^2}{\beta^2} \left( \lg \frac{C_s}{C_{ex}} \right)^2 \quad (10)$$

Определив коэффициенты по опытным точкам, вычисляют величины  $a_{sb}^{max}$  и  $a_{sb}^{min}$  задавшись  $C_{ex}$  и  $C_{en}$  и по ним определяют дозы адсорбента, которые в статических условиях обеспечивают очистку воды до требуемого качества (до проскока) и до качества воды, соответствующего заданному исчерпанию емкости адсорбента. На основе расчетных доз, задавшись ориентировочной продолжительностью работы адсорбционной установки до перегрузки адсорбера, рассчитывают высоту адсорбционной загрузки, обеспечивающей очистку воды до проскока  $H_2$  и высоту загрузки, которая за тот же период должна исчерпать емкость  $H_1$ :

$$H_1 = \frac{D_{sb}^{min} q_w t_{ads}}{F_{ads} \gamma_{sb}^{nac}}; \quad H_2 = \frac{D_{sb}^{max} q_w t_{ads}}{F_{ads} \gamma_{sb}^{nac}}. \quad (11)$$

Уточняется величина  $H_i$  с учетом условий замены отработанного адсорбента чистым, т. е., например, для неподвижного плотного слоя загрузка  $H$  принимается равной высоте загрузки в одном аппарате.

Общая высота загрузки адсорбента принимается не менее чем

$$H_{tot} = H_1 + H_2 + H_3. \quad (12)$$

Ввиду того, что условия исчерпания емкости адсорбента в динамическом (проточном) режиме отличаются от принятых для ори-

ентировочного расчета статических (контактных) условий, необходимо уточнить продолжительность работы загрузки адсорбционной установки до проскока по формуле

$$t_{ads} = \frac{2C_{ex}(H_{tot}-H_1)\varepsilon(C_{en}+a_{sb}^{max})}{\vartheta C_{en}^2}; \quad (13)$$

$$\varepsilon = 1 \frac{\gamma_{sb}^{nac}}{\gamma_{sb}^{kaj.}} \quad (14)$$

При отсутствии справочных данных в расчете адсорберов с активных углем  $\varepsilon$  принимается равным 0,5. В условиях адсорбционной очистки воды от одного компонента при  $Re > 4$  расчет продолжительности работы адсорбера до появления на выходе из слоя проскоковой концентрации проводится по формуле

$$t_{ads} = \frac{\gamma_{sb}^{nac}}{D_{sb}^{max}\vartheta} \left\{ H_{tot} - \frac{\vartheta}{\beta} \left[ \frac{1}{P} \ln \left( \frac{C_{en}}{C_{ex}} - 1 \right) + \ln \left( 1 - \frac{C_{ex}}{C_H} \right) + 1 \right] \right\}. \quad (15)$$

Расчет при  $Re < 4$  проводится по формуле

$$t_{ads} = \frac{\gamma_{sb}^{nac}}{D_{sb}^{nac}\vartheta} \left\{ H_{tot} - \frac{\vartheta}{\beta} \left[ \frac{1}{P} \ln \left( \frac{C_{en}}{C_{ex}} - 1 \right) + \ln \left( 1 - \frac{C_{en}}{C_{ex}} \right) + 1 \right] \right\}. \quad (16)$$

Формулы для определения коэффициентов массоотдачи имеют вид:

$$\beta = 1,24(D_M/\varepsilon d_{sb}^2)Re^{0,568}Pr^{0,333}; \quad (0,2 < Re^2 < 1); \quad (17)$$

$$\beta = 1,12(D_M/\varepsilon d_{sb}^2)Re^{0,418}Pr^{0,333}; \quad (1 < Re < 4). \quad (18)$$

Добиться уменьшения объема угля в адсорбционной установке, не снизив эффект очистки, можно, обеспечив непрерывный или дискретный вывод из адсорбера порций отработанного адсорбента и одновременную подачу в него порций чистого адсорбента. Такой процесс может быть осуществлен в адсорберах с движущимся слоем загрузки. Скорость движения загрузки должна быть равна скорости перемещения контролируемой концентрации адсорбата по слою загрузки при условии его неподвижности. В практике очистки сточных вод эта скорость находится в пределах 1 - 20 см/ч.

Для расчета скорости перемещения по неоживленному слою адсорбента заданной концентрации загрязнений сточных вод, находящейся в пределах 20 - 80 % начальной, используется формула

$$u = \vartheta C_{en} / [\varepsilon(C_{en} + a_{sb}^{max})]. \quad (19)$$

В условиях адсорбционной обработки многокомпонентной сточной воды граница истощения емкости сорбента перемещается медленнее границы проскоковой концентрации, поэтому режим

выгрузки отработанного сорбента должен периодически корректироваться.

В адсорберах с псевдооживленным углем для расчета используются формулы:

- для двухсекционного аппарата

$$\frac{C_{ex}}{D_{sb}^2 q_w} q_{sb}^2 + \frac{C_{ex}}{D_{sb}^{max}} q_{sb} - q(C_{en} - C_{ex}) = 0; \quad (20)$$

- для трехсекционного аппарата

$$\frac{C_{ex}}{D_{sb}^3 q_{sb}^2} q_{sb}^3 + \frac{C_{ex}}{D_{sb}^2 q_w} q^2 + \frac{C_{ex}}{D_{sb}} b_{sb} - q_w(C_{en} - C_{ex}) = 0; \quad (21)$$

$$0,64^{4,762} = 18Re + 0,3Re^2, \quad (22)$$

где  $Re - vd_{sb}/\nu$  - число Рейнольдса,  $Re=2,57$ .

Преобразуя число Рейнольдса, определим скорость потока  $\vartheta$ , м/ч:

$$\vartheta = \frac{Re v}{d_{sb}} = \frac{2,57 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 5,14 \cdot 10^{-3} = 18,5. \quad (23)$$

Таким образом, для обеспечения полуторакратного расширения псевдооживленного слоя активного угля с размером частиц  $0,5 \cdot 10^{-3}$  (0,5 мм) скорость потока должна быть равна 18,5 м/ч.

При диаметре адсорбера 3 м его производительность равна, м<sup>3</sup>/ч:

$$q_w = \frac{\pi D^2}{4} \vartheta = \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} 18,5 = 131. \quad (24)$$

Следовательно, для обеспечения очистки 400 м<sup>3</sup>/ч сточной воды необходимо три адсорбционных аппарата.

Часовой расход равен  $(51,4/10)131 = 673$  кг/ч. Перепад давления в псевдооживленном слое активного угля определяем по формуле, Н/м<sup>2</sup>:

$$\Delta P = g(\rho_u - \rho)(1 - P_i)(1 - \varepsilon_n)L_n = 9,81(1900 - 1000)(1 - 0,5)(1 - 0,6)4,5 = 7946.$$

Для расчета адсорбционной аппаратуры в таблице 1 приводятся характеристики активных углей, выпускаемых отечественной промышленностью. В таблице 2 приведены инкременты стандартного уменьшения свободной энергии адсорбции из водных растворов некоторых структурных элементов и функциональных групп молекул органических веществ, часто встречающихся в сточных водах.

Таблица 1

Характеристика активированного угля	Марка активированного угля										
	ДАК	АГ-2	АГ-3	АГ-5	КАД-йодный	КАД-молотый	БАУ	АР	СКТ	ОУ-А Сухой щелочной	ОУ-Б Влажный кислый
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Основной размер зерен (более 90%), мм	1,0-3,6	1,0-3,5	1,5-2,5	1,0-1,5	1,0-1,5	0,04	1,0-3,6	3,5	1,5-2,7	порошок	порошок
рН водной вытяжки	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	6	8	4 - 6
Удельный объем пор, см <sup>3</sup> /г:											
- общий	1,45	0,6	0,8-1	0,8-1,0	1,0-1,3		1,5-2,1	0,6-0,7	0,8-1,0	-	
- макропор (0.1-0.0004 мкм)	1,23	0,22	0,41-0,52	0,46	0,51-1,0		1,19-1,8	0,3-0,5	0,27	-	1,8
- мезопор (0.0015-0.004 мкм)	0,04	0,05	0,12-0,16	0,18	0,11-0,15	0,09	0,08-0,16	0,06-0,07	0,20	0,20	0,15
- микропор (менее 0.0015 мкм)	0,17	0,3	0,32-0,42	0,43-0,46	0,29-0,34	0,11-0,23	0,23-0,35	0,28-0,33	0,51	0,26-0,38	0,35
Удельная поверхность мезопор, м <sup>2</sup> /г	-	33	-	-	110	64	57	48	108	138	
Плотность, г/см <sup>2</sup> :											
- кажущаяся	0,4-0,5	0,8-0,9	0,8-0,9	0,8-0,9	0,55-0,65		0,4-0,5	1	-	-	-
- истинная	1,8	2	2	2	2,1		1,8	1,95	-	-	-
- насыпная	0,23	0,6	0,45	0,45	0,45		0,21-0,35	0,6	0,38-0,45	0,42	0,44
Структурные константы:											
- W <sub>1</sub> , см <sup>3</sup> /г	0,17	0,20	0,3	0,25-0,30	0,23	0,12	0,22-0,37	0,3	0,45-0,56	-	-
- W <sub>2</sub> , см <sup>3</sup> /г		0,13		0,7-0,8	0,13						
- V <sub>1</sub> , 10 <sup>6</sup> , град <sup>-2</sup>	0,64	0,67	0,7-0,8		0,7	1,08	0,55-0,7	0,7-0,8	0,6-0,85	-	-
- V <sub>2</sub> , 10 <sup>6</sup> , град <sup>-2</sup>		2,5		5							
Влажность, %	10	5	5		10		10	15	8	-	-
Прочность на стирание, %	70	75	75	75	90	10	70	90	70	-	-
Оптовая цена, руб/т	790	750	660		485	400	1260-1340	835-1010	850	1010	1290

Таблица 2

Ароматические соединения		Алифатические соединения	
структурный элемент или функциональная группа	теплота адсорбции, КДж/моль	структурный элемент или функциональная группа	теплота адсорбции, КДж/моль
СН (в бензольном кольце)	3,53±0,02	- СН <sub>2</sub> (в спиртах и карбоновых кислотах)	2,18±0,08
СН (в нафталиновом кольце)	2,35±0,02		
- СН <sub>3</sub>	0,85±0,08		
- СН	0,042±0,04	>С=С<	0,88±0,04
- NH <sub>2</sub>	1,05±0,02		
- Cl <sub>2</sub>	1,38±0,02	- ОН (при вторичном или третичном атоме)	0,25
- NO <sub>2</sub>	2,59±0,08	- ОН (при первичном атоме)	2,3±0,2
- SO <sub>3</sub> H	-1,13±0,08		
- С <sub>4</sub> H <sub>4</sub>	2,3	- ОН (при наличии в цепи аминного азота)	0,25
Пиралозоновое кольцо	0,84	Сl (алиф.)	5,0±0,25

**Задание.** Рассчитать адсорбционную установку с плотным неподвижным слоем угля для очистки многокомпонентной воды.

№ вар.	Производительность, м <sup>3</sup> /сут	C <sub>ex</sub> , мг/л	C <sub>ex</sub> , мг/л	Вид изотермы адсорбции	v, м/ч	t <sub>агс</sub> <sup>оп</sup> , ч	Уголь	H <sub>сдс</sub> , м	k <sub>sb</sub>	Д, м
1	2000	510	40	$a_{sb}^{min} = 253C_{ex}^{1/2}$	5	15	АГ-3	2,5	0,7	3,5
2	3000	430	44	-//-	4	16	АГ-2	-//-	-//-	-//-
3	4000	530	41	-//-	5	19	АГ-5	-//-	-//-	-//-
4	5000	625	55	-//-	6	21	ДАК	-//-	-//-	-//-
5	6000	700	60	-//-	7	20	КАД	-//-	-//-	-//-
6	7000	510	51	-//-	5	18	БАУ	-//-	-//-	-//-
7	8000	750	65	-//-	6	20	АР	-//-	-//-	-//-
8	9000	335	25	-//-	7	22	СКТ	-//-	-//-	-//-
9	10000	650	50	-//-	10	24	ОУ-А	-//-	-//-	-//-
10	1000	670	55	-//-	11	26	ОУ-Б	-//-	-//-	-//-

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Технологические операции адсорбционной очистки сточных вод.
2. Особенности и основные характеристик адсорбера I–го типа.
3. Особенности и основные характеристик адсорбера II–го типа.
4. Особенности и основные характеристик адсорбера III–го типа.
5. Особенности и основные характеристик адсорбера IV–го типа.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Справочник проектировщика: Канализация населенных мест и промышленных предприятий. - М.: Стройиздат, 1981. - 639с.
2. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод / - М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2004. - 702 с.
3. Воронов Ю.В. Водоотведение. М.: Инфа.-М. 2007 Г.-415 с.