

***Абдурасулов А.И., Исмаилова Э.К., Осмонов Ж.И., Джалимбетов Ш.Ж.,
Зорбанов Е.З., Тагибаев Д.Д.***

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСКА

***A.I. Abdurasulov, E.K. Ismailova, Zh.I. Osmonov, Sh.Zh., Dzhalimbetov,
E.Z. Zorbanov, D.D. Tagibaev***

INVESTIGATION OF FILTER CHARACTERISTICS OF SAND

УДК: 628.15.537 (043)

В статье рассмотрены понятие о воде, об его свойствах и качестве, использовании в производстве, а также вопросы исследования фильтровальных характеристик песка.

In the article the notion of water on its properties and qualities used in the production, as well as studies of filter characteristics of the sand.

Вода есть главный жизненно необходимый природный ресурс во всем земном шаре, и она является главным переносчиком инфекционных заболеваний и всевозможных химических соединений в организм человека. Питьевая вода по качественным показателям должна соответствовать требованию ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая». Вода, используемая на технологические нужды промышленных предприятий, должна отвечать требованию выполняемых в них технологических процессов. В системе питьевого и промышленного водоснабжения предусматриваются очистные сооружения.

За последнее время существенно возросли требования к качеству воды для хозяйственно-питьевых целей и технологических нужд промышленных предприятий. В связи с этим особую актуальность приобрело исследование работы фильтровальных сооружений, которые завершают технологическую цепочку кондиционирования природных вод. В зернистых фильтрах основным рабочим элементом является фильтрующая загрузка. В технологии подготовки воды для питьевого и промышленного водоснабжения используются зернистые фильтры, на которые в СНиП 2.04.02-84- «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» отведен специальный раздел.

Для кондиционирования поверхностных вод повсеместно требуется использование процесса фильтрации как последней ступени очистки воды. СНиП 2.04.02-84 рекомендует в качестве фильтрующих загрузок фильтров кварцевых песков на Русской платформе – Центральная зона, Южный склон Балтийского щита, Украины, Среднего и Нижнего Поволжья и других регионов Российской Федерации.

В статье рассматриваются вопросы моделирования процесса очистки воды фильтрованием через зернистые фильтрующие материалы.

Природные воды, используемые на хозяйственно-питьевые и др. нужды, обладают физико-химическими свойствами и бактериологическими показателями. Свойство воды существенно влияет на ход технологических процессов ее очистки, в том числе на процесс фильтрации. Вместе с тем свойства воды различных водоисточников в значительной степени отличаются друг от друга. Эти отличия приводят к тому, что одинаковые фильтрованные сооружения в одних случаях имеют скрытые резервы возможного увеличения их производительности, а в других – требуемая производительность не может быть достигнута без нарушения стандарта качества питьевой воды.

Природные воды представляют собой сложные системы, фильтрационные свойства которых не могут быть в полной мере записаны часто математически. В связи с этим эксперимент является единственным средством получения надежных данных для проектирования сооружений, для получения которых необходимо проведение огромного числа разнообразных экспериментов, учитывающих многочисленные варианты условий фильтрации и конструктивного оформления сооружений. Применение в таких случаях методов моделирования дает возможность значительно снизить объем экспериментальных работ с тем, чтобы получить характерные фильтрационные показатели изучаемого объекта. Задача моделирования состоит в том, чтобы, изучив ход технологического процесса при определенных выбранных параметрах, затем после простого пересчета предсказать, как будет протекать этот процесс при иных параметрах. Применение методов технологического моделирования позволяет рассчитывать оптимальный режим работы проектируемых и интенсифицировать работу действующих фильтровальных сооружений. Технологическое моделирование процесса очистки воды фильтрованием основано на теории фильтрации Д.М. Минца.

Специфика фильтрации малопрочной, сильногидратированной взвеси через фильтрующую загрузку описывается дифференциальным уравнением:
$$-\frac{dc}{dx} = bc - \frac{a}{v}p, \quad (1)$$

где c – концентрация взвеси; x – высота фильтрующего слоя; b – параметр фильтрования, характеризующий интенсивность прилипания взвешенных частиц к зернам загрузки; a – параметр, характеризующий интенсивность отрыва ранее задержанных частиц; p – плотность насыщения фильтрующей загрузки осадком; v – скорость фильтрования.

В этом уравнении $\frac{dc}{dx}$ – градиент концентрации частиц взвеси в воде по высоте фильтрующей загрузки. Знак минус в левой части уравнения показывает, что концентрация уменьшается с увеличением расстояния от первого по направлению фильтрования слоя фильтрующей загрузки. Правая часть уравнения отражает ход процесса осветления воды за счет двух одновременно протекающих процессов – изъятия частиц из воды вследствие прилипания к поверхности зерен загрузки bC и отрыва ранее задержанных частиц под действием потока воды $-\frac{a}{v}P$.

Вторым уравнением теории является уравнение баланса вещества $-\frac{dp}{dt} = -v \frac{dc}{dx}$, (2) где t – продолжительность фильтрования.

Это уравнение показывает, что количество вещества, извлеченного фильтрующим слоем из воды за единицу времени, равно количеству накопившегося в этом слое вещества за тот же промежуток времени.

Дифференцирование уравнения (1) с учетом уравнения баланса вещества (2) позволяет получить основные уравнения теории в дифференциальной форме, описывающие ход процесса осветления при фильтровании суспензий и изменение плотности насыщения фильтрующей загрузки осадком по ее толщине и с течением времени:

$$\frac{d^2C}{dxdt} + a \frac{dC}{dt} + b \frac{dC}{dx} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d^2P}{dxdt} + a \frac{dP}{dx} + b \frac{dP}{dt} = 0. \quad (4)$$

Неоднородность физико-химических свойств частиц взвешенных веществ и фракционного состава зернистой загрузки реальных производительных фильтров приводит к тому, что параметры фильтрования a и b , зависящие от свойств взвеси, осадка и размера зерен загрузки, изменяются по высоте фильтрующего слоя, т.е. являются некоторыми функциями координаты x . Вследствие разнообразия свойств воды и неоднородности гранулометрического состава зернистых загрузок установить вид этих функций теоретически невозможно. При постоянных значениях a и b уравнения (3) и (4) интегрируются, но решение получается в виде бесконечного ряда, и его трудно использовать для практических расчетов.

Упрощение решения уравнения (3) достигается за счет его преобразования введением безразмерных соотношений:

$$y = \frac{C}{C_0}, \quad (5)$$

$$x = bx, \quad (6)$$

$$T = at, \quad (7)$$

где C_0 – исходная концентрация взвеси в воде. Тогда получается:

$$\frac{d^2y}{dxdt} + \frac{dy}{dx} + \frac{dy}{dt} = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) является общим для всего многообразия различных форм процесса очистки воды фильтрованием, поскольку в него непосредственно не входят параметры фильтрования a и b , которые характеризуют конкретные условия протекания процесса. Это достигнуто путем преобразования независимых переменных. Вместо координаты x в уравнении (8) входит безразмерная переменная T . Новые безразмерные переменные устанавливают подобие различных форм протекания процесса осветления и являются критериями подобия. В результате изменение концентрации взвеси в воде при ее движении через фильтрующий слой определяется только значением этих критериев, т.е.

$$C/C_0 = f(X, T). \quad (9)$$

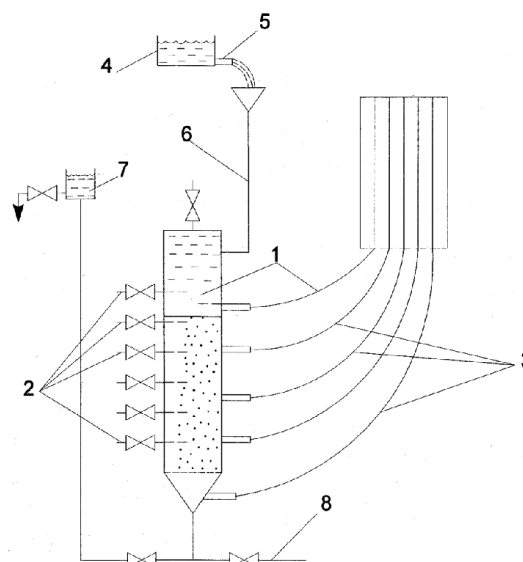


Рис.1. Установка для проведения фильтрационного технологического анализа:

- 1 - фильтрующая колонка; 2- проотборники;
- 3- пьезометрические трубки; 4- бачок постоянного уровня; 5- калиброванная насадка; 6- подающая трубка;
- 7- отвод очищенной воды; 8- подача воды на промывку.

Для решения практических задач необходимо определить связь критериев подобия с физическими величинами, от которых зависит технологический процесс фильтрации. С помощью теории размерностей получено:

$$b = \beta \vartheta E_1 \quad d\lambda_1, \quad (10)$$

$$a = \alpha \vartheta E_1 \quad d\lambda_2, \quad (11)$$

где α и β размерные коэффициенты, учитывающие совокупное влияние всех физических и физико-химических свойств воды и взвеси; v – скорость фильтрации; d – крупность зерен загрузки.

Оно вытекает из анализа основных дифференциальных уравнений (3) и (4), из которых видно, что эффективность процесса очистки и накопление отложений в толще фильтрующей загрузки определяются значениями параметров a и b .

Приrost потери напора зависит от равномерности распределения отложения по высоте загрузки и определяется также значением параметра a . Определение параметров фильтрации для воды конкретного водоисточника с целью получения данных для расчета сооружений и является основной задачей фильтрационного технологического анализа воды.

Для проведения фильтрационного технологического анализа воды необходимо иметь специальную пилотную установку (рис.1). Основным элементом установки является модель фильтра в виде фильтровальной колонки. Для снижения влияния пристеночного эффекта, а также для того, чтобы расход отбираемой для анализа воды не был выше допустимого фильтрации колонка должна иметь диаметр не менее 150...200 мм. Высота колонки принимается равной 2.5...3 мм, что дает возможность разместить в ней достаточный для эксперимента слой фильтрующего материала и иметь при этом над загрузкой пространство для поддержания напора при увеличении гидравлического сопротивления в ней.

Для анализа воды по слоям фильтрующей загрузки фильтровальная колонка оборудуется пробоотборниками. Пробоотборники устанавливаются равномерно по высоте фильтрующего слоя на расстоянии 15...20 см друг от друга. Пробоотборник, расположенный перед входом воды в загрузку, служит для контроля качества фильтрата. Остальные пробоотборники предназначаются для определения изменения концентрации взвеси в воде по слоям фильтрующей среды и располагаются в толще зернистой загрузки.

Для получения достоверных результатов фильтровальная колонка должна иметь не менее

шести пробоотборников. В ходе проведения опыта обеспечивают непрерывное истечение воды из пробоотборников. Суммарный расход воды, затрачиваемый на отбор, должен составлять не более 5 % общего расхода фильтруемой через колонку воды, что дает возможность пренебречь уменьшением скорости фильтрации по слоям загрузки в связи с отбором проб. Основное конструктивное требование, предъявляемое к пробоотборникам, заключается в том, чтобы проба воды, отбираемая ими, оставалась неизменной, т.е. при прохождении через них не должно происходить изменения концентрации взвеси в пробе воды за счет ее осаждения или дополнительной фильтрации воды в самом пробоотборнике. Для исключения этих явлений пробоотборник изготавливают таким образом, чтобы скорость движения воды в нем была бы соизмеримой со значением первой скорости потока очищаемой воды в толще фильтрующей загрузки. Известно несколько конструкций пробоотборников, отвечающих этим требованиям (рис. 2). В исследовательском центре санитарной техники (США) для этой цели используют иглы ветеринарных шприцев, которые вставляют в стенку фильтровального устройства с помощью резиновой пробки или прокладки (рис. 2 а). Часто также в качестве пробоотборника применяют тонкую трубку, конец которой, находящийся в загрузке, покрыт металлической сеткой. Такие пробоотборники конструктивно просты, однако с их помощью проба воды отбирается только с одной точки исследуемого сечения фильтра, что может исказить показания. Этот недостаток устранен в пробоотборниках, применяемых в Лондонском университете (рис. 2 б). Пробоотборник выполнен в виде тонкой трубки, по всей длине которой имеется щель шириной 0,2 мм. На внешнем конце трубки установлен специальный клапан для регулирования расхода воды, отбираемого из пробоотборника. Эти пробоотборники в наибольшей степени отвечают предъявляемым к ним требованиям, однако масштабы их использования ограничиваются сложностью фрезерования столь тонких щелей.

В институте гидродинамики (Чехия, Брно) применяются пробоотборники, выполненные из двух игл шприцев, заключенных в металлическую трубку, вставленную в стенку фильтра (рис. 2 в). На внутреннем конце трубки имеется несколько отверстий. Нижняя игла служит для отбора пробы воды, а верхняя для промывки пробоотборника. Необходимость специального устройства для промывки пробоотборника труднообъяснима, поскольку при отсутствии внешней металлической трубки промывку пробоотборника легко производить за счет пропуска через него большого количества воды при промывке фильтрующей загрузки.

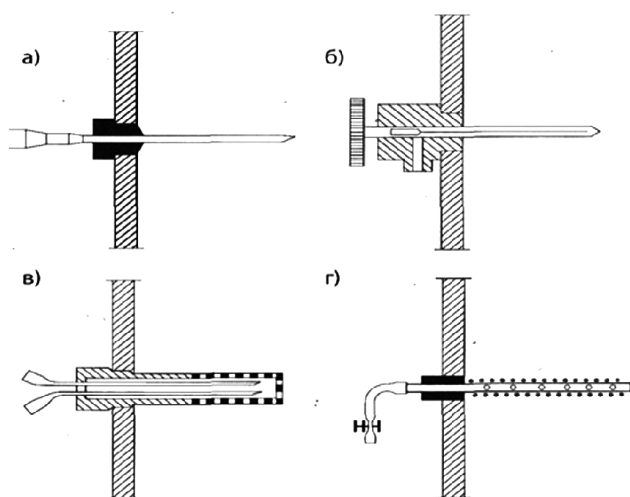


Рис. 2. Конструкции пробоотборников.

Служит для отбора пробы воды, а верхняя для промывки пробоотборника. Необходимость специального устройства для промывки пробоотборника труднообъяснима, поскольку при отсутствии внешней металлической трубки промывку пробоотборника легко производить за счет пропуска через него большого количества воды при промывке фильтрующей загрузки.

В НИИ КВОВ АКХ им. К.Д. Памфилова применяются пробоотборники, выполняемые из тонкой медной (или латунной) трубки, имеющей внутренний диаметр 2-3 мм (рис. 2 г), труба имеет шруцер, винчиваемый в стенку фильтровальной колонки. Часть трубки, располагаемая внутри фильтровальной колонки, имеет длину около 10 см, на этой части трубки равномерно по ее длине просверливают 10-12 отверстий диаметром 1мм, после чего на нее навивают с прозорами 0,1 – 0,2 мм медную (или латунную) проволоку диаметром 1-1,5 мм. Наибольшая равномерность прозора между проволоками достигается плотной навивкой радиотехнического провода с шелковой обмоткой, которая потом выжигается; при этом образуются равномерные прозоры между проволоками, равные двум толщинам шелковой обмотки, что составляет примерно 01-0,2 мм. Изменение расхода воды, проходящего по пробоотборнику, осуществляется с помощью винтового зажима, устанавливаемого на шланге, отводящем воду от пробоотборника. Такие пробоотборники успешно апробированы при разработке методики технологического процесса фильтрования, а также при проведении многочисленных технологических изысканий.

Фильтровальная колонка загружается по возможности более однородным зернистым фильтрующим материалом. Желательно применять тот же вид фильтрующего материала, который будет использоваться для загрузки проектируемых сооружений (при интенсификации действующих фильтров используется материал, взятый непосредственно из них).

Средний диаметр зерен загрузки должен составлять 0,7-1,1 мм, толщина фильтрующего слоя не менее 1-1,2 мм.

Требуемое для засыпки в фильтровальную колонку количество отмытого и отсортированного зернистого материала определяется по формуле:

$$G = p \times (1 - m) \times V \quad (12)$$

где G-масса фильтрующего материала, кг; p-плотность загрузки, кг/м².

После засыпки в фильтровальную колонку фильтрующий материал занимает объем, несколько больший расчетного, поэтому перед проведением опытов загрузку уплотняют постукиванием по стенке колонки, пока верхняя поверхность материала не опустится до метки, соответствующей заданному расчетному объему загрузки, при котором она будет иметь межзерновую пористость, равную пористости этого материала в реальных крупномасштабных фильтрах.

Установка должна работать с постоянной скоростью фильтрования в пределах 5-10м³/ч.

При определении параметров работы фильтров на колонку подают воду из трубопровода, питающего производственные фильтры, или же подают воду после лабораторной установки, воспроизводящей работу отстойников или осветлителей с взвешенным осадком. Если определяют параметры фильтрования для процессов контактного осветления, то на колонку подают воду из водоисточника после добавления к ней реагентов в оптимальных количествах.

Перед проведением опыта испытывают и настраивают установку на чистой воде без ввода реагентов, устанавливая при этом постоянную скорость фильтрации и замеряя начальную потерю напора в фильтрующей загрузке.

В ходе опыта в журнале наблюдений записывают результаты определений концентрации взвеси во всех пробах и потерю напора в загрузке. Концентрацию взвеси в воде при проведении технологического моделирования определяют с помощью фотоэлектроколориметра.

Частоту контрольных определений устанавливают в зависимости от хода опыта. Важно по возможности точнее определить начало ухудшения качества воды, отбираемой с различной высоты, и проследить дальнейшее изменение концепции взвеси в пробах при малой загрязненности фильтруемой воды и скорости фильтрования может потребоваться отбор проб через каждые 30 и даже 15 мин.

В журнал записывают также характеристику качества воды источника водоснабжения и условия проведения эксперимента – крупность зерен и толщину слоя загрузки, скорость фильтрования, температуру воды.

Полученные данные в опыте дают возможность определить необходимую для оптимизации

ционных расчетов величину предельной насыщенности парового пространства А. Сначала определяют значение $F(A)$ по формуле:

$$F(A) = \frac{h}{\delta i_0 \left(\frac{a}{b}\right)}, \quad (13)$$

где h/t - темп прироста потери напора, определяемый из графика на рис. 4; δ - коэффициент неоднородности фильтрующей загрузки, равный $(d_{20}^{sk}/d_{20})^2$; i_0 - начальный гидравлический уклон в фильтрующей загрузке.

Затем величину А можно определить согласно графическим зависимостям.

Изложенный способ определения параметров фильтрования описан в «Методических указаниях по проведению химического и технологического анализа воды» (М., 1973г.). Это прямой способ определения параметров процесса очистки воды фильтрованием, так как он основан на определении фронта продвижения отложений в толщу фильтрующей загрузки по непосредственному измерению концентрации взвеси в воде по высоте загрузки. Общее количество замеров концентрации взвеси зависит от продолжительности фильтроцикла и достигает 100 и более за опыт, что делает эксперименты весьма трудоемкими и требует одновременного участия в эксперименте 2-3 чел. Кроме того, неодновременность послойного отбора проб обычно сказывается на точности эксперимента.

Вместе с тем идентичность структуры дифференциальных уравнений (3) и (4), описывающих изменение мгновенной концентрации суспензии при фильтровании и мгновенной плотности насыщения в толще загрузки, позволяет предположить одинаковую скорость продвижения в толщу фильтрующей среды фронта загрязнений и плотности насыщения. Насыщение фильтрующего материала осадком вызывает прирост потери напора в загрузке, поэтому параметры процесса фильтрования могут быть определены косвенным методом по послойному изменению потери напора в фильтрующей загрузке. Данный пьезометрический метод упрощает технику проведения экспериментов. Для его проведения фильтровальная колонка должна иметь 6-8 пьезометрических датчиков, установленных равномерно по высоте фильтрующего слоя через каждые 15...20 см.

Исследования, изложенные в работе [2,5,8], показали, что точность пьезометрического метода в значительной степени зависит от продолжительности фильтроцикла, более 4-6 ч отклонения параметров фильтрования не превышает 7%, что приемлемо для инженерных расчетов. Использование пьезометрического метода фильтрационного технологического анализа позволяет принимать фильтровальные колонки меньше, чем в традиционном методе диаметра,

поскольку при нем анализируются только пробы исходной воды по высоте колонки из за послойного отбора проб воды. Простота метода позволяет также организовать автоматизированный съем информации и проводить технологическое моделирование непосредственно на производственных фильтрах.

Технологический фильтрационный анализ желательно проводить на том фильтрующем материале, который предполагает использовать для загрузки производственных фильтров. Проведя технологические изыскания на одном фильтрующем материале, мы не можем только пересчетом определить точные фильтрационные показатели данной воды для любого другого фильтрующего материала, так как пока нет математических зависимостей, связывающих параметры фильтрования среды. Однако большое число экспериментальных работ и многолетний опыт эксплуатации фильтров с загрузкой из различных зернистых материалов позволяют примерно оценить их фильтрационные показатели по отношению к кварцевому песку.

Полученные в результате технологического фильтрационного анализа данные позволяют провести оптимизационный расчет загрузки фильтровальных сооружений.

За последнее время существенно возросли требования к качеству потребляемой воды. За 30 лет в Кыргызстане объем используемой воды на хозяйственно-питьевые нужды увеличился в 2,1 раза. В республике сложилась тенденция к увеличению в качестве источников водоснабжения поверхностных вод.

1. Все поверхностные воды Кыргызской Республики формируются на ее территории и их объем, в зависимости водности года, составляет 36-58 млрд, м³. Главные водные артерии свое начало берут у высокогорных ледников, горных снежных залежей, горных родников, фирновых полей и 0,8 % их питается подземными водами. У всех горных рек наблюдается один или два подземных периода.

2. Качества воды находится в прямой зависимости от горных пород, с которыми контактируется вода и антропогенных воздействий. Качественные показатели колеблются в широких пределах: мутность 35-850 мг/л (в паводок до 2400); окисляемость от 3 до 23 мг О₂/л, цветность – до 90 градусов, фтор – отсутствует; ионный состав в основном гидрокарбонатный.

3. Речные воды Кыргызстана в систему хозяйственно-питьевого водоснабжения можно подавать после осветления и обесцвечивания, а также с согласованием вопроса, что отсутствуют фтор и йод. Во всех случаях требуется использование двухступенчатой технологии обработки воды, с использованием в качестве последней ступени процесса фильтрования.

4. Результаты впервые проведенного технологического анализа кварцевых песков КР

показали, что их измельчаемость находится в пределах – 3-9%; истираемость – 0,3-0,9%; гранулометрический состав – 0,25-2,5 мм, а выход годной продукции песка для очистки станции – 21-36%; коэффициент неоднородности – 3-15. Из песчаных залежей Кыргызстана является наиболее перспективным кварцевый песок Ивановского карьера.

5. Результаты лабораторных исследований процесса фильтрования малоконцентрированных суспензий на модели фильтра, загруженного песком из Ивановского карьера при $d = 0,63-1,25$ мм, $K=1,9$, $d_{жв}=0,9$ мм и $x=90$ см, показали возможность использования их на водопроводных очистных станциях; фильтроцикл составляет 7-19 часов; темп прироста потери напора 0,1-0,23м; возможность использования упрощенного способа моделирования процесса фильтрования по методике, предложенной В.З. Мельцером.

6. Впервые получены аналитические и графические зависимости по работе фильтров, загруженных Ивановским песком, при условии $t_3=0$ t_H показали, что с увеличением величины C_0 от 5 до 40мг/л: величина v увеличивается от 12 до 33 m^{-1} ; a/v растет 0,04 до 0,08 м/ч, t_3 уменьшается от 19,8 до 6,3 ч, a величина возрастает от 0,45 до 3 ч-1, $(h/t)/C_0$ уменьшается от 3,9 до 2,1 см/ч на 1 мг задержанной взвеси.

7. Определены оптимальные технологические работы скорых зернистых фильтров в реальных условиях, которые обеспечивают продолжительность фильтроцикла 12 и 24 часов, т.е. формулы (21) и (22).

8. Разработана новая технология обработки воды Кыргызстана с использованием кварцевых песков из Ивановского карьера в качестве фильтрующей загрузки и с защитным устройством водопроводной очистки станции в период паводков.

Рецензент: д.т.н. Осмонов К.А.