

Тагибаев Д.Д., Абдурасулов А.И., Мамбетова Р.Ш.

**ПРИРОСТ ПОТЕРИ НАПОРА ПРИ ФИЛЬТРОВАНИИ СУСПЕНЗИЙ ЧЕРЕЗ
ЗЕРНИСТЫЕ СЛОИ**

D.D. Tagibaev, A.I. Abdurasulov, R.Sh. Mambetova

**INCREASE THE PRESSURE LOSS WHILE FILTERING SUSPENSIONS THROUGH
GRANULAR LAYERS**

УДК:668.36.073

В статье приведены характер изменения потери напора по высоте фильтрующего слоя.

The article contains the character of change of the pressure loss on the height of filtering layer.

Одним из основных вопросов, который всегда рассматривается при проектировании и эксплуатации фильтров, является вопрос о гидравлическом сопротивлении фильтров и его изменении на протяжении рабочего цикла фильтра. Рост гидравлического сопротивления, обусловленный накоплением осадка в порах фильтрующей загрузки, определяет продолжительность работы фильтра между промывками и является важнейшим фактором при определении оптимального режима работы фильтровальных сооружений. Поэтому изучение кинетики насыщения порового пространства осадком и закономерностей роста гидравлического сопротивления фильтров имеет важное практическое значение. Вопрос об изменении гидравлического сопротивления пористой среды при фильтровании суспензий имеет также большое значение при рассмотрении явлений коагуляции в гидротехнике [1], нефтедобыче, очистке воды от нефтесодержащих продуктов [2,3] и других областях техники. В связи с этим исследователи неоднократно обращались к рассмотрению данного вопроса.

В последние годы развитие теории фильтрования малоцентрированных суспензий [4,5,6] привело к разработке методики расчета процесса фильтрования и фильтровальных сооружений, основанной на методах технологического моделирования, созданию математического аппарата, необходимого для инженерных расчетов. Его практическое применение показало, что установленные зависимости для определения продолжительности защитного действия фильтров дают удовлетворительное совпадение расчетов и опытных данных. Однако, при определении гидравлического сопротивления зернистой пористой среды в процессе ее заиливания отмечаются значительные расхождения в расчетных и опытных данных. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения процесса коагуляции загрузок фильтров.

Как известно, существует два вида фильтрования суспензий: без образования осадка на поверхности фильтрующей среды, когда твердые частицы задерживаются в толще фильтрующего ма-

териала, и с образованием осадка на поверхности фильтрующей среды, когда основную роль в извлечении твердых частиц играет слой осадка, а фильтрующая среда служит поддерживающей основой для слоя осадка.

Первый вид фильтрования характерен для нормально работающих водоочистных фильтров с зернистым фильтрующим материалом. Второй - для фильтров химической технологии. Он может иметь место также и на водоочистных фильтрах, например, при чрезвычайно мелкозернистой загрузке или при недопустимо высокой концентрации взвеси в воде, поступающей на фильтры. Тогда гидравлическое сопротивление фильтра растет очень быстро и продолжительность фильтровального цикла резко сокращается. Поэтому принимают меры, чтобы такой вид фильтрования на водоочистных фильтрах не возникал. Закономерности изменения гидравлического сопротивления фильтров при фильтровании с образованием осадка изучаются в теории промышленных фильтров химической технологии.

В настоящей диссертации рассматривается гидравлическое сопротивление зернистых загрузок водоочистных фильтров при фильтровании малоцентрированных суспензий без образования осадка на поверхности фильтрующей среды.

В теории фильтрации однородных жидкостей принято использовать для расчета гидравлического сопротивления зернистой пористой среды идеализированные модели фильтрующей среды, так называемый "идеальный" и "фиктивный" грунт [7]. Модель "идеального" грунта заменяет реальную пористую среду системой параллельных трубок, модель "фиктивного" грунта - системой геометрически правильных шаров.

С помощью указанных моделей и с использованием формул сопротивления при ламинарном движении жидкостей по трубкам и при обтекании шаров удалось получить [7,8] расчетные формулы для определения гидравлического сопротивления пористой среды и коэффициента фильтрации (или проницаемости), в которых указанные величины были выражены через структурные характеристики пористой среды.

При изучении явлений коагуляции зернистой пористой среды при фильтровании суспензий некоторые исследователи [7,9] также пытались получить расчетные формулы для определения гидравлического сопротивления, коэффициента

фильтрации или проницаемости заиленной пористой среды на основе гипотезы об "идеальном" или "фиктивном" грунте.

При рассмотрении модели "идеального" грунта [7] принимается, что пористая среда состоит из определенного количества цилиндрических трубок равного диаметра, оси трубок параллельны между собой и отложение осадка происходит равномерно по периметру этих трубок (рис.1а).

В соответствии с уравнением Пуазейля для гидравлического уклона в капиллярной трубке имеем

$$i = \frac{32\mu}{\gamma} \times \frac{v_{ист}}{d^2}, \quad (1)$$

где: i - гидравлический уклон;
 μ - динамическая вязкость жидкости;
 γ - плотность жидкости;
 $v_{ист}$ - истинная скорость движения жидкости;
 d - диаметр капиллярной трубки.

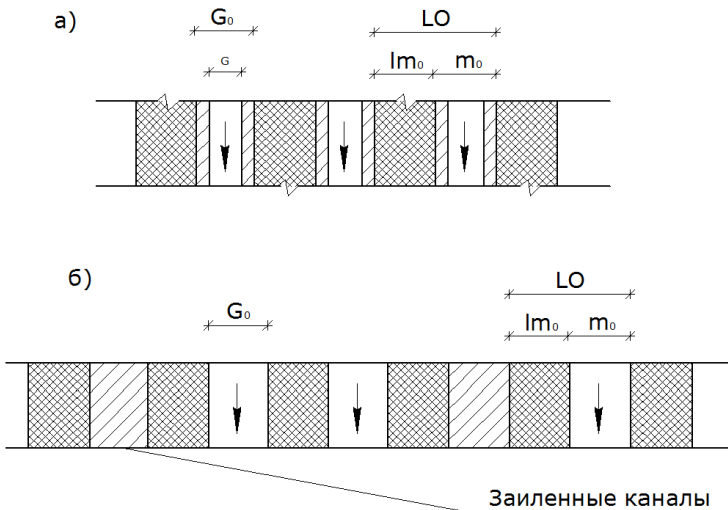


Рис. 1. Кольматация «идеальной» модели фильтрующей среды:

- а) равномерное отложение осадка на стенках каналов;
 б) уменьшение числа действующих каналов.

Истинная скорость связана со скоростью фильтрации известным соотношением:

$$v_{ист} = \frac{v_{\phi}}{m}, \quad (2)$$

где: m – пористость фильтрующего материала;
 v_{ϕ} – скорость фильтрации.

Подставляя значение истинной скорости фильтрации в уравнение процесса фильтрования для гидравлического уклона к начальному гидравлическому уклону, получаем

$$\frac{i}{i_0} = \frac{m_0}{m} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2. \quad (3)$$

Индексом "0" обозначены значения величин в начальный момент фильтрования.

При равномерном заилинии капиллярных трубок получается квадратичная зависимость отношения пористостей и отношения диаметра трубок:

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2. \quad (4)$$

Подставляя выражение 1.10. в уравнение 1.9., имеем

$$\frac{i}{i_0} = \frac{m_0}{m} = \left(\frac{1}{1-\delta} \right)^2, \quad (5)$$

где $\delta = m_0 - \frac{m}{m_0}$ – насыщенность порового пространства отложениями.

Иногда при рассмотрении "идеальной" модели предполагают, что поровые отложения не откладываются равномерно по периметру каналов, а происходит закупорка и уменьшение числа каналов, через которые фильтруется жидкость, причем в процессе фильтрования все большее число каналов заиляется [10,9]. Очевидно, что при таком предположении $d/d_0 = 1$ (рис.1.б) и после подстановки в уравнение (5). получается

$$\frac{i}{i_0} = \frac{m_0}{m} = \frac{1}{1-\delta}. \quad (6)$$

Задача определения гидравлического уклона при кольматации "фиктивной" модели фильтрующей среды с использованием уравнения Козени-Кармана была решена Т.Кэмпом [9]. Он предположил, что при фильтровании суспензий сферические зерна загрузки обволакиваются отложениями равномерно (рис.2) фактор формы зерен изменяется незначительно и плотность отложений остается постоянной на протяжении фильтроцикла.

Тогда удельный объем отложений будет равен

$$m = \frac{\beta(D_0 + d) - D_0}{D_0} (1 - m), \quad (7)$$

где m – удельный объем поровых отложений, равный $m_0 - m$;

D_0 – диаметр шаров загрузки;

d – средняя толщина слоя осадка на зернах загрузки;

R – отношение объема закольматированного зерна к объему шара, имеющего диаметр $D = D + \Delta d$.

Решение относительно D дает:

$$\begin{aligned} (D_0 - \Delta d)^2 &= D_0^2 \times \left[1 + 2 \frac{\Delta d}{D_0} + \left(\frac{\Delta d}{D_0} \right)^2 \right] = \\ &= D_0^2 \times \left[\sqrt{\beta \frac{\Delta m}{3 \times (1 - m_0)} + \frac{1}{4}} + \beta \frac{\Delta m}{3 \times (1 - m_0)} + \frac{1}{2} \right]. \end{aligned} \quad (7a)$$

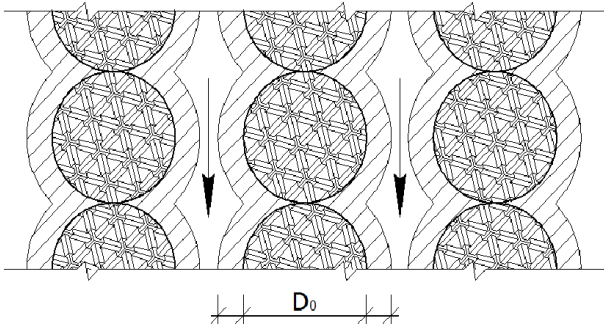


Рис. 2. Кольматация «фиктивной» модели фильтрующей среды.

По расчетам Т. Кэмп значения β будет наименьшим при большом удельном объеме отложений в поровом пространстве, но оно всегда остается близким к единице. Так при $\Delta m = 0,3$ значение $\beta = 0,9$ и выражение в скобках в формуле (7а), изменится приблизительно на 2% по сравнению с $\beta = 1$. Таким образом, изменением значения β можно пренебречь и считать $\beta = 1$.

Уравнение Козени-Кармана для определения удельных потерь напора имеет вид

$$i = \frac{\gamma \times S^2 v}{g} \times \frac{(1-m)^2}{m^3} \times \frac{v}{D^2} \quad (8)$$

где i – безразмерный коэффициент; S – фактор формы (для $S = 6$); v – кинематическая вязкость; g – ускорение силы тяжести; D – диаметр зерен загрузки.

Подставляя выражение (7а) в уравнение (8), имеем

$$i = \frac{\gamma \delta v}{g} \times \frac{(1-m_0 + \Delta m)^2}{(m_0 - \Delta m)^3} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{\Delta m}{3(1-m_0)} + \frac{1}{4} + \frac{\Delta m}{3(1-m_0)} + \frac{1}{2}}} \quad (9)$$

и, сопоставляя отношение для гидравлического уклона в процессе фильтрования к начальному гидравлическому уклону, получим окончательный вид уравнения для определения прироста удельных потерь напора при кольматации «фиктивной» модели пористой среды:

$$\frac{i}{i_0} = \frac{(1-m_0 + \Delta m)^2 \times m^3}{(1-m_0)^2 \times (m_0 - \Delta m)^3} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{\Delta m}{3(1-m_0)} + \frac{1}{4} + \frac{\Delta m}{3(1-m_0)} + \frac{1}{2}}} \quad (10)$$

К. Айвес [103] показал, что при принятых Т. Кэмпом допущениях можно упростить формулу (10), и привел ее к виду

$$\frac{i}{i_0} = \left(\frac{1-m_0 + \Delta m}{1-m_0} \right)^{4/3} \times \left(\frac{m_0}{m_0 - \Delta m} \right)^3 \quad (11)$$

Геометрическая структура реальной зернистой

пористой среды в процессе ее заилиenia весьма далека от рассмотренных моделей. По мнению В. Мацкрле [8] наилучшее соответствие реальной кольматации фильтрующей среды дает комбинированная модель заилиenia. Согласно этой модели, в начале процесса кольматации пористой среды преобладает «фиктивная» модель, а после соединения отложений на соседних зернах суспензия движется по извилистым каналам, близким к «идеальной» модели фильтрующей среды.

Изменение гидравлического уклона для такой комбинированной модели заилиenia фильтрующей среды В. Мацкрле предлагает определять по формуле

$$\frac{i}{i_0} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + 0,0146 \text{Re}^{0,75} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{1,25}}{[1 + 0,0146 \text{Re}^{0,75}] \times (1-\delta)^3}, \quad (12)$$

где Re – число Рейнольдса;

ω/ω_0 – изменение удельной поверхности поровых каналов, которое определяется выражением:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = (1-\delta)^{1,5} \times (1 + 7,5\delta)^{0,5}.$$

Однако и комбинированная модель фильтрующей среды не достаточно хорошо описывает сложный характер изменения параметров геометрической структуры реальной фильтрующей среды в процессе кольматации. Визуальные наблюдения процесса кольматации песка, проведенные рядом исследователей [6,11], показали, что отложение осадка на поверхности зерен фильтрующего материала происходит неравномерно. В реальных условиях взвешенные частицы прежде всего откладываются на лобовых участках зерен, и лишь при значительной степени кольматации прилипают к боковой поверхности зерен загрузки. Вследствие указанных причин, попытки подойти к установлению количественных закономерностей изменения потери напора при движении суспензии в заиленной пористой среде с помощью «фиктивной» или «идеальной» модели не привели к практическим результатам.

При режиме постоянной скорости фильтрации, характерном для водоочистных фильтров, с увеличением гидравлического сопротивления загрузки растет потеря напора на фильтрах. Рядом исследователей были сделаны попытки теоретически установить количественные закономерности изменения потерь напора при кольматации фильтрующей среды.

В.Т. Турчинович [12] считал, что при отложении осадка в толще загрузки справедливо соотношение:

$$\frac{h}{t} = S_1 \frac{C_0 \times v}{\gamma} \quad (13)$$

где h/t – темп прироста потери напора;

C_0 – весовое содержание взвеси в фильтруемой воде;

γ – плотность частиц взвеси;

v – скорость фильтрации;

S_1 – постоянный коэффициент.

Учитывая, что в реальном фильтре отложение частиц может происходить не только в толще фильтрующей среды, но и на поверхности загрузки, В.Т. Турчинович предложил для общего случая следующую формулу:

$$\frac{h}{t} = S \frac{C_0 \times v}{\gamma} \quad (14)$$

где n – показатель степени, меняющийся от 1 до 2 в зависимости от условий фильтрования.

Д.М. Минц [54] предложил определять темп прироста потери напора по формуле

$$\frac{h}{t} = i_0 F(A) \frac{a}{b}, \quad (15)$$

где $F(A)$ – функция предельной насыщенности порового пространства отложениями

a/b – параметр фильтрования, характеризующий скорость проникновения хлопьев вглубь загрузки;

i_0 – начальный гидравлический уклон.

Формула (15), в отличие от других, приведенных выше, была получена не прибегая к замене реальной пористой среды моделями "идеального" или "фиктивного" грунта. Она была выведена Д.М. Минцем путем решения предложенных им дифференциальных уравнений кинетики фильтрования малоцентрированных суспензий.

В соответствии с этой формулой продолжительность работы фильтра t_n до момента достижения предельной потери напора равна

$$t_n = \frac{H_{np} - i_0 x}{i_0 F(A) a/b}, \quad (16)$$

Формулы (15). и (16). учитывают все факторы, влияющие на прирост потери напора и продолжительность работы фильтра до достижения предельной потери напора. Влияние скорости фильтрации, размера зерен загрузки, свойств фильтрующей суспензии и осадка, накапливающегося в фильтре, учитывается параметрами a , b , A . Влияние скорости фильтрации и размера зерен учитывается также значением начального гидравлического уклона i_0 , который кроме того зависит от температуры воды и структурных характеристик пористой среды – пористости и формы зерен. Исходная концентрация суспензии оказывает влияние на прирост потери напора через параметр "а", который изменяется пропорционально исходной концентрации.

К. Айвес [13] предложил для определения приращения гидравлического уклона при заилении фильтрующей среды уравнение вида

$$\Delta t = i - i_0 = p \int_0^\sigma b d\sigma, \quad (17)$$

где p – постоянный коэффициент;

σ – удельный объем осадка, т.е. объем задержанного вещества в единице объема загрузки фильтра;

b – коэффициент фильтрования, равный по К.Айвесу

$$b = b_0 + c\sigma - a \frac{\sigma^2}{m_0 - \sigma}, \quad (18)$$

где b_0 – начальное значение коэффициента фильтрования;

c , a – постоянные коэффициенты.

Физический смысл уравнения (18) и его связь с законами движения жидкости в пористой среде не ясны. Полная потеря напора в фильтрующем слое толщиной l равна:

$$H = H_0 + \int_0^l \Delta i dx. \quad (19)$$

Практическое использование уравнений К. Айвеса затруднено, поскольку расчет потерь напора в фильтре требует двойного интегрирования.

Лерк К. [14] рассматривает пористую среду как совокупность ламинарных ячеек, при этом все частицы суспензии удаляются только из некоторой части объема суспензии, названной им объемом адгезии. Для расчета полной потери напора в фильтре он получил формулу:

$$H = i_0 x + p_1 m_0 x - \frac{p_1}{b} \ln \left[1 + e^{-BC_0^* v T} \times (e^{Bm_0 x} - 1) \right], \quad (20)$$

где p_1 – эмпирический коэффициент;

b – параметр, характеризующий интенсивность задержания частиц взвеси;

C_0^* – объемная концентрация взвеси перед фильтром;

T – безразмерная величина, являющаяся функцией времени.

В этой формуле первый член правой части уравнения представляет собой начальные потери напора на фильтре, а второй и третий суммарно выражают прирост потери напора в процессе фильтрования.

Таблица 1.

Автор	Формула
1. В. Т. Турчинович	$\frac{h}{t} = S_1 \frac{C_0 \times v}{\gamma}$
2. Д. М. Минц	$\frac{h}{t} = i_0 F(A) \frac{a}{b}$
3. Из формул Д. Бейлиса	$\frac{h}{t} = \frac{H_{np} v^{1,5}}{K_4 d^{2,15}} - \frac{K_3 x v^{2,5}}{K_4 d^{4,15}}$
4. Д. Клеасби	$\frac{h}{t} = k v^{1,5} C^{1,4} \frac{x^{0,5}}{d^{1,5}}$
5. Д. М. Минц, В. П. Криштул	$\frac{h}{t} = K \frac{v}{d^{0,5}}$
6. К. Лерк	$\frac{h}{t} = K \frac{v}{d^2} C_0$
7. Из формулы Б. Лундберга	$\frac{h}{t} = K v$

Известен целый ряд эмпирических формул. Провести сравнение всех рассмотренных в этом разделе зависимостей не представляется возможным, вследствие различного построения формул и наличия в них коэффициентов, определяемых эмпирически. Однако, может быть проведено сравнение формул для темпа прироста потери напора. Сводка этих формул дана в табл.1.

Сравнительные расчеты по формулам для прироста гидравлического уклона в процессе коагуляции фильтрующей среды представлены на Рис.3.

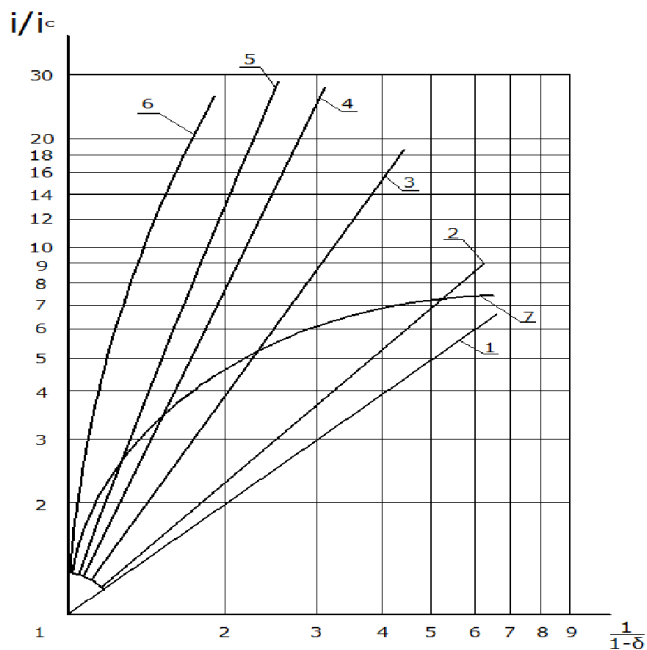


Рис. 3. Сравнение зависимостей, связывающих изменение удельных потерь напора с насыщенностью порового пространства.

Примечание:

1. Расчеты по формуле 5 проведены при значении $m_0 =$;
2. Номера кривых соответствуют порядковому номеру формул в табл. 1.

Таким образом, анализ эмпирических зависимостей для определения темпа прироста потери напора показал, что результаты расчетов по разным формулам при изменении отдельных переменных дают существенные расхождения. Кроме того, эмпирические коэффициенты, входящие в эти формулы, могут сильно меняться в различных условиях фильтрования, что является причиной несоответствия результатов расчетов по эмпирическим формулам в условиях отличных от тех, на основе которых они были получены.

Вследствие указанных причин эмпирические зависимости для определения темпа прироста потери напора не получили практического применения.

Литература

1. Лейбензон Л.С. Собрание трудов, т.2. - М.:Изд. АН СССР, 1953.
2. Обозный В.Ф., Пичахчи И.Д., Хват В.М. Исследование процесса фильтрования нефтесодержащих сточных вод через пенополиуретановую загрузку. "Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья", 1975, № 2.
3. Родзиллер И.Д. Доочистка от нефти сточных вод нефте-перерабатывающих заводов фильтрацией через песчаные фильтры. Канд. диссертация. М., 1954.
4. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. М., Стройиздат, 1964.
5. Минц Д.М. Кинетика фильтрации малоконцентрированных водных суспензий на водоочистных фильтрах. ДАН, т.8, №2, 1951.
6. Минц Д.М., Криштул В.П. Моделирование процесса фильтрации суспензий через зернистые слои. Сб. научных работ АКХ, №1, - М.: Изд. МКХ РСФСР, 1960.
7. Лейбензон Л.С. Собрание трудов, т.2. - М.: Изд. АН СССР, 1953.
8. Mackrle V. The Theory of Rapid Filtration. International Water Supply Congress, Barcelona, 1966.
9. Camp T.R., Kreske W.I. - Water and Waste Engineering, № 1, 1974- 274 -
10. Егоров А.И. Гидравлика напорных трубчатых систем в водопроводных очистных сооружениях. М. Стройиздат, 1984.
11. Митин Б.А. Исследование насыщения порового пространства и изменения потерь напора при фильтровании. Сборник "Процессы фильтрования при очистке природных и сточных вод". Южно-уральское изд-во, 1965.
12. Турчинович В.Т. Улучшение качества воды, Стройиздат, 1940.
13. Ives K.J. Filtration using Radioactive Algae. American Society of Civil Engineers. Vol.127, Part 3. 1962.
14. Lerk C.F. Some Aspects of the Deferrisation of Groundwater. Technical University, Netherlands, 1965.

Рецензент: д.т.н., доцент Халимов Д.Г.