

РАСЧЕТ ПРОМЫВКИ ЗЕРНИСТОЙ ЗАГРУЗКИ ФИЛЬТРА ВОСХОДЯЩИМ ПОТОКОМ ВОДЫ

Инж. КРАВЦОВ А. М.

*Институт повышения квалификации и переподготовки кадров
по новым направлениям развития техники, технологии и экономики*

При проектировании и эксплуатации фильтров с зернистой загрузкой одним из важнейших параметров является скорость восходящего потока воды при заданной степени расширения зернистого слоя.

При стесненном осаждении или взвешивании восходящим потоком (обращенная задача) частиц зернистого слоя однородных веществ существуют две основные группы формул для определения скорости движения вещества или скорости восходящего потока [1]: формулы, основанные на рассмотрении массы падающих зерен как фильтрационной среды, через которую жидкость протекает в вертикальном направлении снизу вверх; формулы, основанные на рассмотрении падения в жидкости отдельного вещества; находящегося в массе других веществ. В первом случае стесненное осаждение и псевдооживление (взвешивание зернистых слоев) вещества принято рассматривать как частный случай фильтрации жидкости в деформированной зернистой среде.

На основании обобщения первой группы формул, полученных М. Лева, И. Н. Качаном, Д. М. Минцем и С. А. Шубертом, Б. В. Кизевальтер вывел следующую формулу для расчета скорости стесненного осаждения веществ $v_{ч.ст}$ [1]:

$$v_{ч.ст} = M \frac{\mu c}{d_{\text{ч}} \Omega} L^f, \quad (1)$$

где Ω – коэффициент сферичности частиц; M и f – постоянные; L – параметр.

Параметр L является произведением квадрата модифицированного числа Рейнольдса Re и коэффициента сопротивления η , имеющих вид:

$$Re = \frac{d_{\text{ч}} v_{ч.ст} \rho \Omega}{6 c \mu}; \quad \eta = \frac{\rho_{\text{т}} - \rho}{\rho} \frac{(1-c) d_{\text{ч}} \Omega}{6 v_{\text{ст}}^2}. \quad (2)$$

Постоянные M и f зависят от L , и их значения сведены в таблицы [1]. Причем L задается в очень широких пределах для определенных значений M и f . Так, $M = 5,7$; $f = 3/5$ при $L = 750 \dots 5000$. По мнению Б. В. Кизевальтера [1], недостатком формулы (1) являются ограниченность ее применения и большие значения объемной концентрации ($c \geq 0,2$) [1]. При значениях $c < 0,2$ формула дает завышенные результаты, а при $c \rightarrow 0$ скорость стесненного осаждения стремится к бесконечности.

Д. М. Минц и С. А. Шуберт видоизменили формулу (1) для малых значений объемной концентрации c [2], предположив, что между модифицированным числом Рейнольдса Re и коэффициентом сопротивления η существует зависимость

$$\eta = \frac{c_1}{Re} + \frac{\psi \Omega}{\pi}, \quad (3)$$

где c_1 – коэффициент; ψ – коэффициент сопротивления при свободном падении частиц.

Формула (3) довольно сложна в инженерных расчетах, и ее недостатком является зависимость c_1 от крупности и формы частиц [1]. Кроме того, в [3] показано, что для предельных случаев ($Re \geq 400$ и $Re \leq 1$) расчетные значения по формуле (3) сильно расходятся с опытными данными.

Из формул, основанных на рассмотрении случая падения в жидкости отдельного вещества, следует указать на формулу П. В. Лященко [1]

$$v_{ч.ст} = v_{\text{ч}} (1 - c)^n. \quad (4)$$

Недостатком формулы (4) является то, что показатель степени n изменяется в широких пределах ($n = 2,5 \dots 4,5$) и определяется опытным путем для конкретных условий.

В различных отраслях промышленности широко используется процесс псевдоожижения (взвешивания) зернистых слоев. Например, в химических технологиях при реализации процессов адсорбции и десорбции, сушки, выщелачивания и экстрагирования и т. д. В водоснабжении этот процесс используется в осветлителях со взвешенным осадком и при промывке зернистых фильтров.

В аппаратах химической технологии расчет значений скоростей потока, необходимых для достижения заданного расширения псевдоожиженного слоя, рекомендуется производить по обобщенной эмпирической формуле Б. В. Кизевальтера [1, 4, 5]

$$Re = \frac{Ag(1-c)^{4,75}}{a_1 + b_1 \sqrt{Ag(1-c)^{4,75}}} \quad (5)$$

Коэффициенты a_1 и b_1 в (5), как показывает анализ, непостоянны для заданного вида материала, что свидетельствует о несовершенстве ее конструкции. Иногда их принимают постоянными для любого вида материала и равными соответственно 18 и 0,61. В этом случае, как показывают сопоставления расчетных по (5) и опытных данных, наблюдаются значительные расхождения [6].

В практике водоснабжения для расчетов скоростей потока v_b при промывке фильтрующих загрузок взвешиванием зернистых слоев из частиц кварцевого песка рекомендуется использовать следующую эмпирическую формулу [7]:

$$v_b = 10 \frac{d_u^{1,31}}{\mu^{0,54}} \frac{(e+m)^{2,31}}{(e+1)^{1,77} (1-m_0)^{0,54}}, \quad (6)$$

где e – степень расширения зернистого слоя; m_0 и m – пористость загрузки до и после расширения.

Сопоставления показали [6], что расчетные значения по формуле (6) существенно отличаются от опытных данных, изложенных в [2] и послуживших основой для вывода данной зависимости.

На рис. 1 представлена классификационная схема различных гидромеханических процессов при взаимодействии тел с потоком вязкой несжимаемой жидкости: стесненное осаждение

(а) и взвешивание (б) одиночного шара; стесненное осаждение (в) и взвешивание (г) одиночных частиц произвольной формы; групповое осаждение (д) и взвешивание (е) частиц произвольной формы; осаждение взвесей (ж) и взвешивание (з) зернистых слоев.

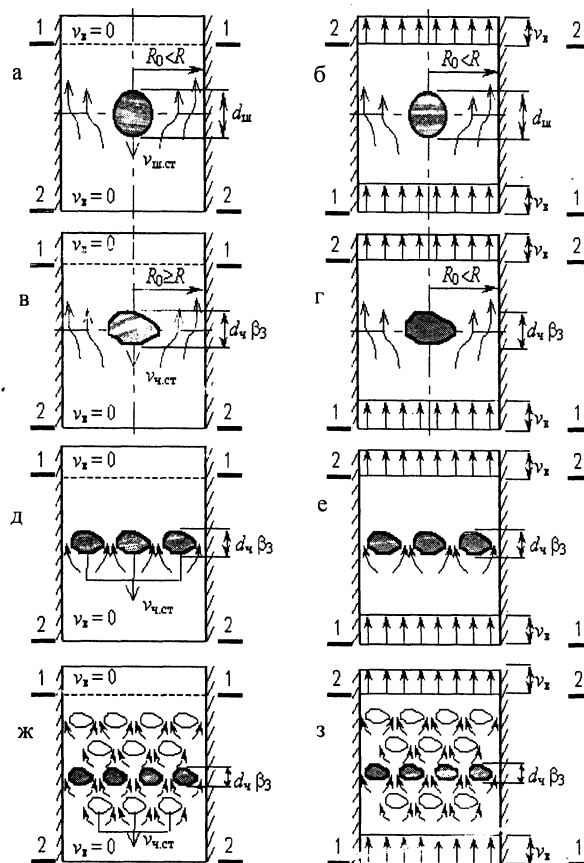


Рис. 1

Целесообразно решение задачи начинать с исследования осаждения шаров и взвесей с частицами сферической формы (симметричная форма сферических частиц упрощает решение задач). При переходе к частицам произвольной формы требуется знать вес (объем частиц), площадь миделя частицы перпендикулярно направлению движения, размер частиц в направлении движения и т. д. Эти величины можно определить только как среднестатистические значения для частиц к соответствующим значениям, относящимся к эквивалентному шару с введением коэффициентов форм β_1 , β_2 , β_3 и т. д. Коэффициент формы β_1 легко определить опытным путем. Для этого следует тщательно подготовить фракцию зернистого материала с

высоким параметром качества фракционирования и определить удельный вес материала $\gamma_{\text{ч}}$. Затем из фракции берется навеска частиц, взвешивается и подсчитывается в ней число частиц N (не менее 100). Коэффициент формы частиц определяется по формуле

$$\beta_1 = \sqrt[3]{\frac{1,91 P_{\text{ч}}}{\gamma_{\text{ч}} d_{\text{ш}}^3 N}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{ч}}$ – навеска частиц; $d_{\text{ш}}$ – диаметр эквивалентного шара.

Сложнее определить значения прочих коэффициентов формы. Поэтому в дальнейшем коэффициенты формы частиц будут включаться в постоянные коэффициенты, входящие в расчетные формулы для различных процессов, которые, в свою очередь, могут быть определены для каждого отдельного материала опытным путем.

Далее будем рассматривать последовательно стесненные движения при реализации процессов осаждения и взвешивания одиночных и групповых тел, осаждения взвесей и взвешивания зернистых слоев.

Для решения задачи о стесненном стенками сосуда осаждении (взвешивании) одиночных шаров (рис. 1а, б) воспользуемся положениями теории подобия и анализа размерностей, которые гласят, что любое физическое явление или процесс зависят от ряда физических величин. В нашем случае

$$f(G_{\text{эф}}, \rho, \mu, \nu, d_{\text{ш}}, D) = 0, \quad (8)$$

где $G_{\text{эф}} = 1/6 \pi d_{\text{ш}}^3 \Delta \rho g$ – эффективный вес шара в жидкости; ρ и μ – плотность и динамический коэффициент вязкости жидкости; ν – скорость равномерного движения; $d_{\text{ш}}$ и D – диаметр шара и трубки; $\Delta \rho$ – разность плотностей шара $\rho_{\text{ш}}$ и жидкости ρ ; g – ускорение силы тяжести.

Принцип соотношения этих величин, известный как π -теорема, формулируется следующим образом: если для описания какого-нибудь физического явления необходимо n (в нашем случае $n = 6$) величин и если эти величины влекут за собой m размерных категорий (при гидромеханических исследованиях $m = 3$ – кг, м, с), соотношение может быть сведено к такому, которое содержит $n - m$ безразмерных комплексов. В нашем случае

$$f(\text{Ar}, \text{Re}, d_{\text{ш}}/D) = 0, \quad (9)$$

где $\text{Ar} = \frac{d_{\text{ш}}^3 \Delta \rho \rho g}{\mu^2}$ – критерий Архимеда;

$\text{Re} = \frac{\nu d_{\text{ш}} \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса; $d_{\text{ш}}/D$ – отношение диаметров, характеризующее условия стеснения.

Путем анализа и компьютерной обработки результатов исследований, приведенных в [3], нами получена следующая зависимость между безразмерными комплексами в (9) для случая стесненного стенками сосуда осаждения (взвешивания) одиночных шаров

$$\text{Re}_{\text{ш, ст}} = \frac{\frac{4}{3} \text{Ar}_{\text{ш}} \left(1 - \frac{d_{\text{ш}}^2}{D^2}\right)}{\frac{a_0}{\left(1 - \frac{d_{\text{ш}}}{D}\right)^2} + b_0 \sqrt{\frac{4}{3} \text{Ar}_{\text{ш}}}}, \quad (10)$$

где a_0 и b_0 – постоянные коэффициенты.

Сопоставительный анализ (10) с опытными данными приведен в [8].

При стесненном осаждении (взвешивании) одиночной частицы произвольной формы (рис. 1в, г) скорости движения могут быть определены по формуле (10) с введением постоянных коэффициентов a , b , K_1 и K_2 , зависящих от вида зернистого материала:

$$\text{Re}_{\text{ч, ст}} = \frac{\frac{4}{3} \text{Ar}_{\text{ч}} \left(1 - K_1 \frac{d_{\text{ч}}^2}{D^2}\right)}{\frac{a}{\left(1 - K_2 \frac{d_{\text{ч}}}{D}\right)^2} + b \sqrt{\frac{4}{3} \text{Ar}_{\text{ч}}}}, \quad (11)$$

где $\text{Re}_{\text{ч, ст}} = \frac{\nu d_{\text{ч}} \rho}{\mu}$; $\text{Ar}_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{ч}}^3 \Delta \rho \rho g}{\mu^2}$; $d_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{п}} + d_{\text{н}}}{2}$ – диаметр частицы; $d_{\text{п}}$ и $d_{\text{н}}$ – диаметры проходного и непроходного отверстий сит.

При групповом стесненном осаждении (взвешивании) частиц произвольной формы (рис. 1д, е) скорости движения могут быть определены по формуле (11) с учетом числа частиц N в горизонтальном слое

$$\text{Re}_{\text{ч, ст}} = \frac{\frac{4}{3} \text{Ar}_{\text{ч}} \left(1 - K_1 N \frac{d_{\text{ч}}^2}{D^2}\right)}{\frac{a}{\left(1 - K_2 \sqrt{N} \frac{d_{\text{ч}}}{D}\right)^2} + b \sqrt{\frac{4}{3} \text{Ar}_{\text{ч}}}}, \quad (12)$$

Для перехода от случая движения группы тел в горизонтальном слое (рис. 1д, е) к случаю взвешивания зернистых слоев (рис. 1з) будем рассуждать следующим образом. Пусть в объеме взвешенного слоя содержится N_0 частиц, а в слое толщиной $\beta_3 d_4$ – N частиц. Тогда объемная концентрация c в слое взвешенного зернистого материала будет равна

$$c = \frac{2}{3} \frac{d_4^2 N}{D^2 \beta_3}. \quad (13)$$

Из (13) получается, что

$$N \frac{d_4^2}{D^2} = \frac{3}{2} c \beta_3. \quad (14)$$

С учетом (14) формула (12) преобразуется к виду

$$Re_b = \frac{\frac{4}{3} Ar_b \left(1 - \frac{3}{2} \beta c\right)}{\frac{a}{\left(1 - \sqrt{\frac{3}{2} \beta_0 c}\right)^2} + b \sqrt{\frac{4}{3} Ar_b}}, \quad (15)$$

где

$$Re_b = \frac{\nu d_4 \rho}{\mu}; \quad Ar_b = \frac{d_4^3 \rho^2 g}{\mu^2} \frac{\Delta \rho_c}{\rho_c};$$

$\frac{\Delta \rho_c}{\rho_c} = \frac{(1-c)(\rho_\tau - \rho)}{\rho_\tau c + \rho(1-c)}$; $\Delta \rho_c = \rho_\tau - \rho_c$; ρ_τ и ρ_c – плотности твердого тела и суспензии.

Постоянные коэффициенты a , b , $\beta = K_1 \beta_3$ и

$\beta_0 = K_1^2 \beta_3$ к формуле (15) следующие:

- для частиц естественных наносов (песок и гравий) – $a = 15,5$; $b = 1,1$; $\beta = 0,725$; $\beta_0 = 0,5$;

- для частиц дробленых материалов остроугольной формы (антрацит, керамзит и т. п.) – $a = 59,8$; $b = 1,09$; $\beta = 0,89$; $\beta_0 = 0,315$.

Сопоставления расчетных по (15) и опытных данных о взвешивании зернистых слоев из частиц керамзита (наши исследования), кварцевого песка, гравия и антрацита (данные из [2]) приведены на рис. 2 и 3.

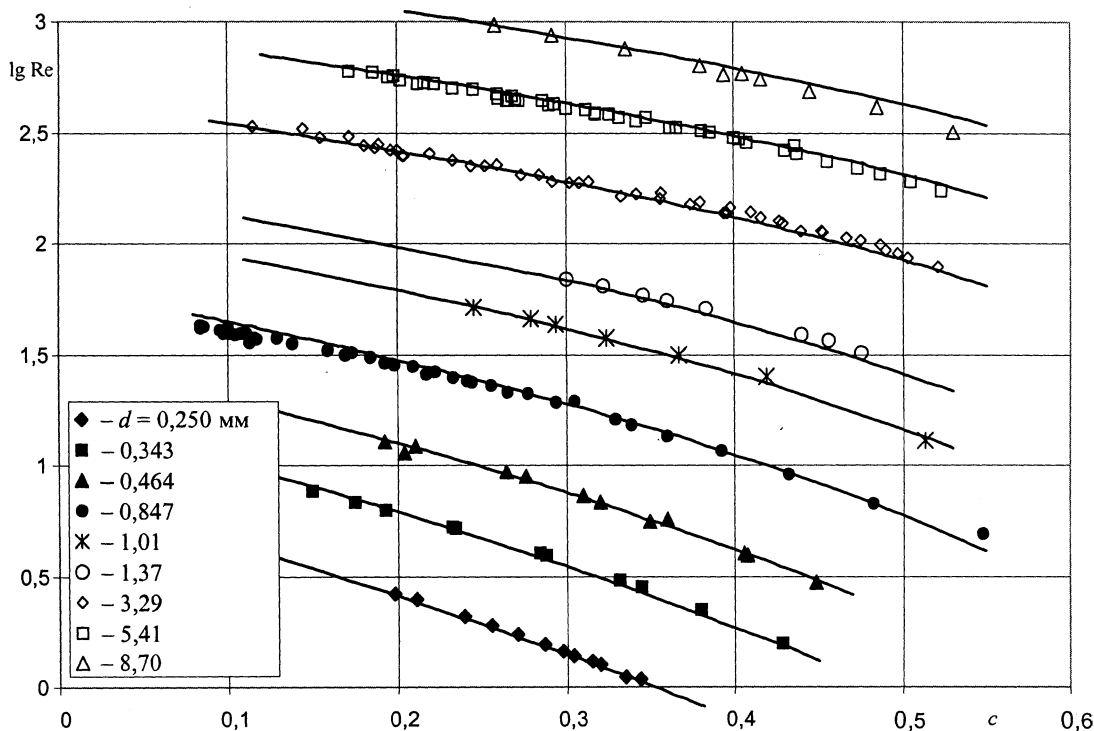


Рис. 2. Сопоставление расчетных по (15) (линии) и опытных [2] (точки) данных взвешивания зернистых слоев из частиц кварцевого песка и гравия ($\rho_\tau = 2470 \dots 2670 \text{ кг/м}^3$) в воде

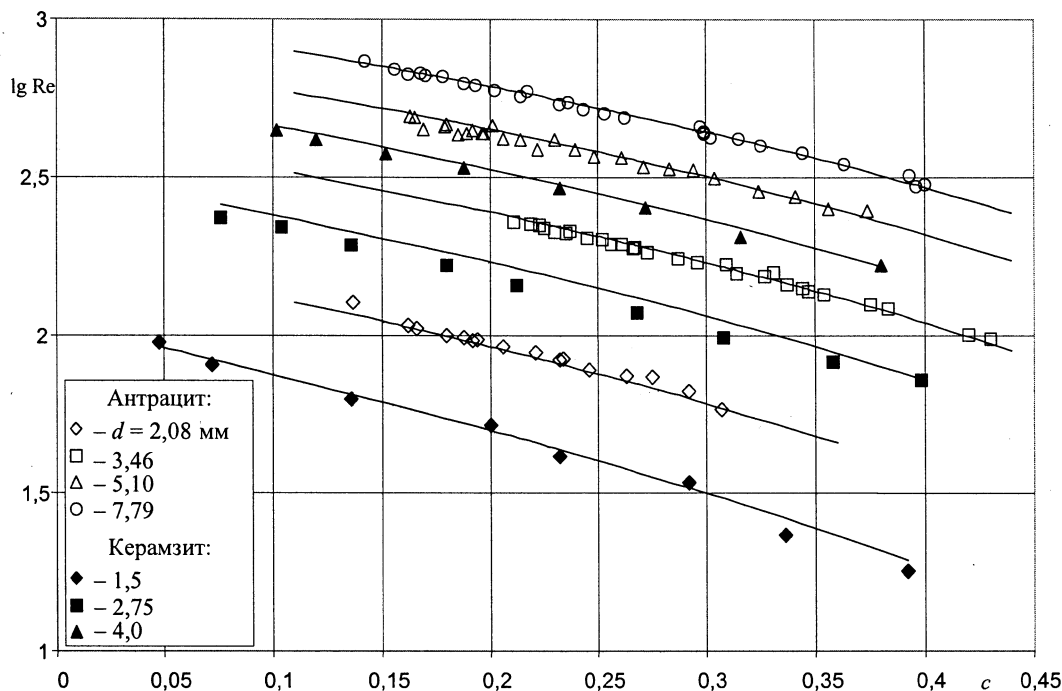


Рис. 3. Сопоставление расчетных по (15) (линии) и опытных (точки) данных взвешивания зернистых слоев из частиц антрацита [2] ($\rho_r = 1661 \text{ кг/м}^3$) и керамзита ($\rho_r = 1900 \text{ кг/м}^3$) (данные автора) в воде

Сопоставления расчетных и опытных данных (439 значений при концентрациях от 0,05 до 0,53) показали, что во всех исследованных диапазонах параметров взвешенных слоев и для различных материалов относительные среднеарифметические погрешности не превысили значения 0,05 (5 %).

Полученную нами формулу (15) рекомендуется использовать для расчетов процессов взвешивания зернистых слоев из различных материалов в технике водоочистки. Кроме этого, формулой можно воспользоваться для расчетов скоростей осаждения взвешенных минеральных частиц и капель органических жидкостей, а также всплытия пузырьков газа в случае больших концентраций, когда влиянием частиц друг на друга нельзя пренебречь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роев Г. А., Юфин В. А. Очистка сточных вод и вторичное использование нефтепродуктов. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
2. Минц Д. М., Шуберт С. А. Гидравлика зернистых материалов. – М.: Изд-во МХ РСФСР, 1955. – 112 с.
3. Кравцов М. В. Гидравлика зернистых материалов. – Мн.: Наука и техника, 1980. – 126 с.
4. Гельперин Н. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: В 2-х кн. – М.: Химия, 1981. – 812 с.
5. Романков П. Г., Курочкина М. И. Гидромеханические процессы химической технологии. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
6. Кравцов М. В. Гидромеханические процессы и сооружения гидроочистки. – Мн.: Ураджай, 1990. – 226 с.
7. Абрамов Н. Н. Водоснабжение. – М.: Стройиздат, 1974. – 480 с.
8. Кравцов А. М. Ротаметрические измерения расходов и свойств жидкостей // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 6. – С. 76–82.