

ОСТАТОЧНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ФИЛЬТРОВАНИЯ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТУЮ ЗАГРУЗКУ

Грабовский П.А., Гуринчик Н.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Показана роль остаточных загрязнений при описании очистки воды фильтрованием через слой зернистой загрузки. Установлена необходимость ввода дополнительного коэффициента γ_0 , определяющего массовую концентрацию твердых частиц в единице объема осадка для остаточных загрязнений.

Математическое описание фильтрования малоконцентрированных суспензий через зернистый слой – одна из классических задач водоснабжения, которой занимались многие исследователи [1-5].

Для случая фильтрования с постоянной скоростью процесс осветления описывается следующими уравнениями:

- Уравнение баланса-

$$m \frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $C=C(x,t)$ – концентрация взвешенных веществ в воде; $\rho=\rho(x,t)$ – концентрация осадка в загрузке; x, t – пространственная и временная координаты; V – скорость фильтрования; $m(x,t)$ – пористость загрузки, D – коэффициент диффузии.

- Уравнение линейной кинетики по Д.М. Минцу [1] –

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -bC + \frac{a}{V} \rho, \quad (2)$$

где a, b – коэффициенты кинетики, определяющие соответственно интенсивность отрыва и прилипания взвешенных частиц от поверхности загрузки (или от ранее прилипших частиц).

В уравнении (1) большинство авторов ввиду малого влияния пренебрегают как первым членом уравнения баланса, так и диффузионной составляющей.

Система (1) – (2) решается при начальных и граничных условиях:

$$\left. \begin{aligned} x=0 \quad C=C_0 \\ t=0 \quad \rho_o = \rho_o(x), \\ t \rightarrow \infty, \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad C=C_0, \quad \rho = \rho_{np}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где C_0 - концентрация взвеси в исходной воде; $\rho_o(x)$ - концентрация осадка в фильтрующем слое в начальный момент времени, которая может быть переменной по его длине; ρ_{np} - предельная насыщенность порового пространства задержанной взвесью.

Последнее граничное условие в (3) означает, что при большой продолжительности фильтрования слой «зарабатывается» и перестает осветлять воду. Естественно, вначале это происходит в первых по ходу воды слоях загрузки. Для упрощения задачи и возможности получения аналитического решения обычно предполагается, что $\rho_o(x) = 0$. Тогда уравнение (2) принимает вид

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -bC, \quad (4)$$

и легко интегрируется –

$$C = C_0 \exp(-bx). \quad (5)$$

Система (1) – (3) с упрощением $\rho_o(x) = 0$ решается аналитически в виде бесконечных рядов /1/, которые в некоторых случаях медленно сходятся, что сильно затрудняет анализ решения.

В /6/ показано, что систему (1)-(3) можно решать численными методами. Для этого была разработана методика послойно-пошагового счета: по высоте слоя производится послойный счет, а по времени - пошаговый счет. Были получены рекомендации по выбору шагов Δx и Δt . Установлено хорошее соответствие решений, полученных этим методом и результатов расчетов в /1/.

Попытки получения решений при наличии в начале фильтрования остаточных загрязнений в загрузке (а загрузка никогда не отмывается полностью) привели к странным результатам. При равномерном распределении этих загрязнений по высоте слоя ($\rho_o(x) = const$) и сравнительно небольшом его загрязнении¹, как это видно из рис. 1, построенном для случая $t=0$, в начале фильтрования выходная концентрация довольно высокая.

¹ 1000г/м³ соответствует остаточным загрязнениям примерно 0,06% по массе, в то время как правила технической эксплуатации /7/ допускают эту величину до 1%.

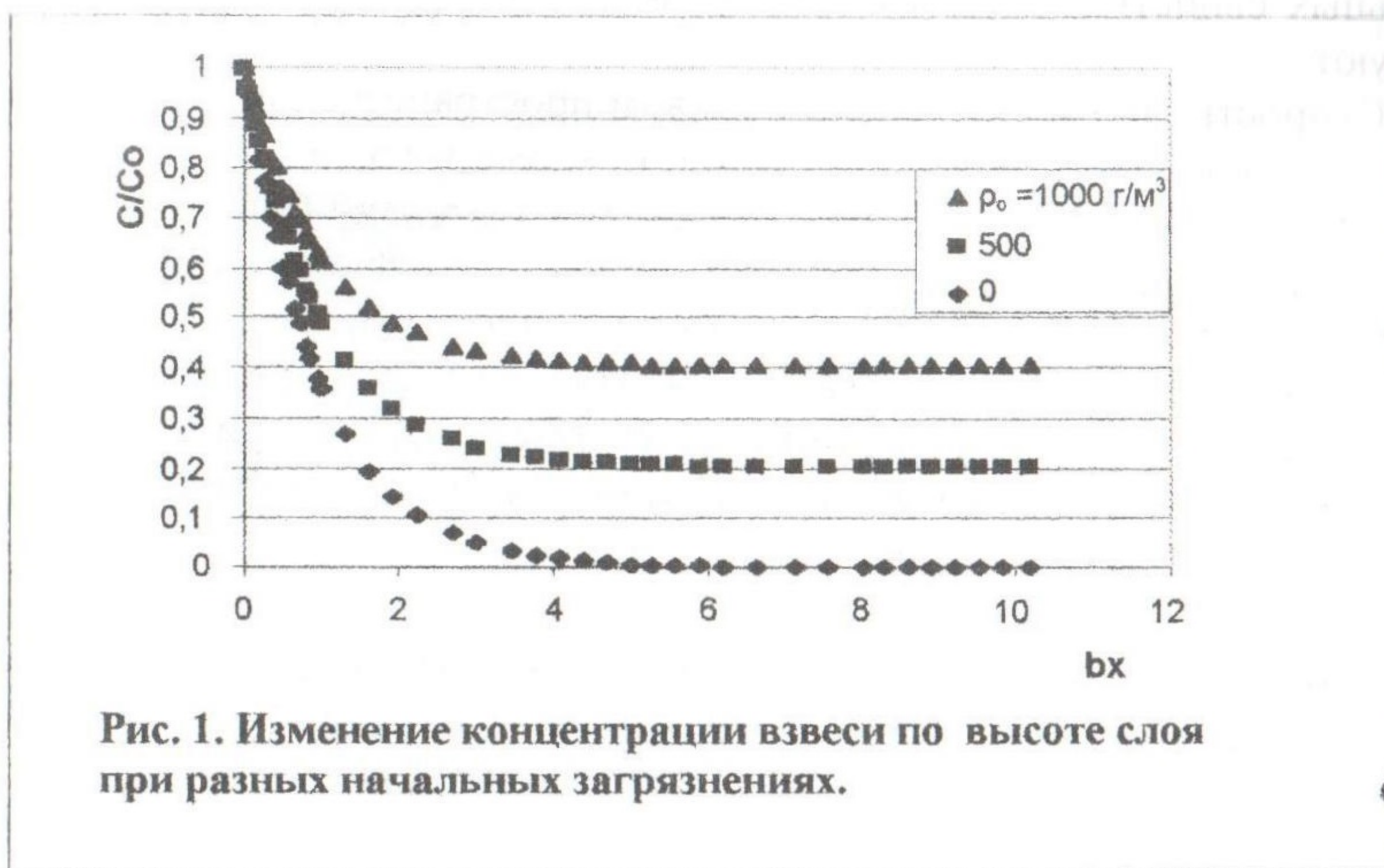


Рис. 1. Изменение концентрации взвеси по высоте слоя при разных начальных загрязнениях.

Так, при $\rho_0 = 1000 \text{ г/м}^3$ степень осветления $C/C_0 > 0,4$, что значительно превышает допустимые нормы и не соответствует опыту эксплуатации. По-видимому, предположение о том, что остающийся после промывки осадок равномерно распределен по высоте слоя, не соответствует действительности. Вероятно, более правильно предположить, что эффект промывки одинаков для каждого слоя. Тогда концентрация осадка после промывки равна –

$$\rho(x, 0) = \rho(x, T_k)(1 - \mathcal{E}_{np}), \quad (6)$$

где $\rho(x, T_k)$ – распределение концентрации осадка по высоте слоя к моменту времени окончания фильтрования (T_k); \mathcal{E}_{np} – эффективность промывки, равная отношению массы вымытых за промывку загрязнений к исходному их количеству.

Необходимо также учитывать, что осадок, оставшийся в поровом пространстве после промывки, имеет не такую плотность и такие же свойства (например, кинетический коэффициент α , определяющий интенсивность отрыва загрязнений от зерен загрузки), как осадок, образующийся в поровом пространстве в процессе фильтрования. Можно предположить, что его плотность намного больше, поскольку на поверхности зерен остаются лишь наиболее прочные частицы осадка, которые выдержали действие сил, возникающих при промывке. А эти силы значительно большие, чем те, которые воздействуют на частицы осадка при фильтровании. Таким образом, возможно, частицы осадка в начале процесса фильтрования не отрываются столь интенсивно, как «свежие» задержанные частицы. Вероятно у этих частиц намного меньший коэффициент α . К сожалению, какие либо данные о сравни-

тельных свойствах осадка после промывки, и «свежего» осадка отсутствуют.

Скорость движения воды в поровом пространстве при промывке в 6-7 раз выше, чем при фильтровании, и, кроме того, осадок на поверхности зерен при промывке подвергается значительно большим силам, чем касательные напряжения – это силы, возникающие при взаимодействии частиц загрузки /8/. Поэтому для предварительных оценок можно предположить, что осадок, который не был оторван от поверхности зерен загрузки при промывке, не будет оторван при фильтровании. Потому уравнение кинетики (2) необходимо скорректировать –

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -bC + \frac{a}{V}(\rho - \rho_0). \quad (2')$$

Смысл этого уравнения заключается в том, что начальное загрязнение загрузки не учитывается в уравнении кинетики. Поскольку при расчете концентрации задержанного осадка для каждого момента времени идет суммирование с предыдущим значением ρ , поэтому величина ρ_0 должна вычитаться из ρ . При $t=0$ $\rho=\rho_0$, следовательно, для начального момента времени будет действительно уравнение (5). Однако остаточные загрязнения могут повлиять на потери напора в зернистом слое. Как показано в /6/, при использовании ПЭВМ потери напора в загрузке можно рассчитывать не по уравнению Козени-Кармана, область применимости которого ограничена скоростями фильтрования до 7-8 м/ч, а по более универсальной аддитивной формуле/8/, учитывающей квадратичную составляющую потерь напора в зернистом слое –

$$I = 150\nu V m^3 / g d_s^2 (1-m)^2 + 1,75(1-m)V^2 / m^3 g d_s, \quad (7)$$

где I – гидравлический уклон; g – ускорение силы тяжести, см/с²; V – скорость фильтрования, см/с; ν – коэффициент кинетической вязкости воды, см²/с; d_s – эквивалентный диаметр зерен, см.

Пористость загрузки меняется во времени из-за того, что часть объема пор занята задержанным осадком. Таким образом,

$$m = m(x,t) = m_0 - \Delta m, \quad (8)$$

где Δm – изменение пористости зернистого слоя, которое рассчитывается по формуле–

$$\Delta m = \rho / \gamma, \quad (9)$$

γ – массовая концентрация твердых частиц в единице объема осадка.

Наличие остаточных загрязнений в загрузке приводит к необходимости ввести коррективы в формулу (9), поскольку, как отмечалось ранее, прочность осадка после промывки и, следовательно, его весовая концентрация намного большая, чем «свежего» осадка. Таким образом,

$$\Delta m = \frac{\rho_0}{\gamma_0} + \frac{\rho - \rho_0}{\gamma}, \quad (10)$$

где γ_0 - весовая концентрация твердых частиц в единице объема осадка, не вымытого из фильтра. Смысл уравнения (10) – часть объема пор занята осадком, оставшимся после промывки (концентрация в единице объема ρ_0 , весовая концентрация γ_0), и часть объема пор занята «свежим» осадком (концентрация в единице объема $\rho - \rho_0$, весовая концентрация γ).

Выводы

1. Таким образом, для описания процесса фильтрования с постоянной производительностью необходимо знать два коэффициента кинетики процесса осветления – a и b , а также две величины весовой концентрации осадка – γ_0 и γ .

2. Задачей последующих исследований является разработка методики определения коэффициентов a , b , γ_0 и γ . Как показали предварительные численные эксперименты, использование ПЭВМ позволяет существенно снизить трудоемкость и повысить точность определения всех коэффициентов.

Литература

1. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. М.: Стройиздат, 1964. -156 с.
2. Шехтман Ю.М. Фильтрация малоцентрированных суспензий. М.: Изд. АН СССР, 1961.-212с.
3. Венецианов Е. В., Рубинштейн Р. Н. Динамика сорбции из жидких сред. М.: Наука, 1983. – 237 с.
4. Олейник А. Я., Тугай А. М. Моделирование процессов кольматажа и суффозии в прифильтровой зоне скважины //Докл. НАН Украины. – 2001. – N 9. – с. 190 – 194.
5. Поляков В. Л. О фильтровании суспензий при заданном напоре //Докл. НАН Украины. – 2005. – N 4. – С. 48-54.
6. Грабовський П. О., Гурінчик Н.О. Чисельна реалізація математичної моделі фільтрування. //Науково-технічний збірник «Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки», вип.6, К. 2005, с.4-13.
7. Правила технічної експлуатації систем водопостачання та каналізації населених пунктів України. КДП 204-12.-95с.
8. Грабовский П. А. Математическая модель регенерации скорых фильтров. //Химия и технология воды, т.7, №1, 1985.– с.27-29.
9. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979.– 46 с.