

ФИЛЬТРОВАНИЕ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТЫЙ СЛОЙ С УБЫВАЮЩЕЙ СКОРОСТЬЮ

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

Получена математическая модель скорого водоочистного фильтра, работающего с убывающей скоростью, и разработан алгоритм численной реализации модели с помощью ПЭВМ.

Фильтрация через зернистый слой – один из самых важных технологических процессов, используемых в хозяйственно-питьевом и промышленном водоснабжении. Наиболее распространенные режимы работы скорых водоочистных фильтров:

1. Фильтрация с постоянной скоростью.
2. Фильтрация с убывающей скоростью.

Для обеспечения первого режима используется один из двух вариантов:

- Фильтры оборудуют регуляторами скорости фильтрации, устанавливаемыми, как правило, на выходе из каждого фильтра.

- Воду в фильтр подают с разрывом потока. В этом случае подаваемый расход не зависит от сопротивления загрузки и потому остается постоянным до тех пор, пока уровень воды в фильтре не достигнет кромки перелива. Естественно, при постоянной подаче будет и постоянная скорость фильтрации.

В первом варианте необходим регулятор с блоком управления, связанным с расходомером. В начале процесса фильтрации регулятор закрыт и, по мере увеличения сопротивления загрузки, постепенно открывается. Во втором варианте регулятор не нужен, поскольку рост потерь напора в загрузке компенсируется подъемом уровня воды в фильтре. Однако здесь необходим фильтр большей высоты. Ясно, что оба варианта требуют дополнительных капиталовложений, а при невысоком качестве регуляторов снижается надежность работы фильтров.

Поэтому подавляющее большинство станций очистки воды в странах СНГ работают без регулирования скорости фильтрации. В этом режиме по мере увеличения потерь напора в загрузке растет уровень воды в фильтре, из-за чего снижается подача воды и постепенно падает скорость фильтрации. Следует отметить, что скорые фильтры,

работающие в блоке, гидравлически взаимосвязаны. Поэтому фильтры с более чистой загрузкой (которые недавно были промыты) автоматически получают большую нагрузку, чем «грязные» фильтры, т.е. происходит саморегулирование работы фильтров.

К недостаткам работы фильтров с падающей скоростью авторы [1] относят возможное ухудшение качества фильтрата, особенно в начале цикла, когда скорости фильтрования максимальны. По-видимому, такой эффект может иметь место, если начальная скорость фильтрования слишком высокая. В специально поставленных опытах других авторов [2,3,4] было установлено, что при падающей скорости качество фильтрата не хуже, а во многих случаях даже лучше, чем при постоянной производительности.

Большинство математических описаний процесса фильтрования через зернистый слой сделано для случая постоянной скорости [5-8]. Связано это, по-видимому, с тем, что уравнения для переменной скорости намного более сложны, чем для случая $V=\text{const}$. Как будет показано ниже, это исключает возможность получения аналитических решений.

Отсутствие надежных математических описаний фильтрования с переменной скоростью затрудняет выбор основных технологических параметров фильтров – крупности зерен, высоты слоя, скорости фильтрования, продолжительности фильтроцикла. Таким образом, описание фильтрования с переменной скоростью является вполне актуальной задачей, представляющей интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Основные уравнения для процесса фильтрования через зернистый слой приведены ниже. Уравнение баланса частиц взвеси в воде и в задержанном осадке –

$$m \frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

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.

Уравнение кинетики принято по Д.М. Минцу [5], поскольку для этого уравнения¹ имеются обширный экспериментальный материал и решения, которые можно использовать как тестовые –

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

¹ Это уравнение кинетики Д.М. Минц получил с учетом предположений об однородности зерен загрузки и частиц взвеси.

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

Пористость загрузки изменяется по глубине слоя и во времени –

$$m(x, t) = m_0 - \frac{\rho(x, t)}{\gamma}, \quad (3)$$

где γ – массовая концентрация твердых частиц в единице объема осадка.

Уравнения (1) – (3) определяют динамику осветления воды зернистым слоем. В эти уравнения входит скорость фильтрования, которая переменна во времени, т.е. $V=V(t)$. Скорость фильтрования падает из-за уменьшения пористости (см. уравнение (3)) и роста сопротивления загрузки. Гидравлический уклон в пористом слое может быть рассчитан по аддитивной формуле Эргана [9] –

$$I = 150\nu V(1-m)^2/gd_s^2m^3 + 1,75(1-m)V^2/m^3gd_s, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, см/с^2 ; V – скорость фильтрования, см/с ; ν – коэффициент кинетической вязкости воды, $\text{см}^2/\text{с}$; d_s – эквивалентный диаметр зерен, см .

Суммарная потеря напора в слое определяется интегралом

$$h_c(t) = \int_0^L I dx, \quad (5)$$

где L – высота слоя загрузки, см .

При увеличении потери напора в загрузке растет уровень воды в фильтре H , снижается подача воды в фильтр V_1 и падает скорость фильтрования V (см. рис. 1).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: Z_1 и Z_2 – пьезометрические отметки в коллекторе подачи исходной воды и сбора фильтрата, H – отметка уровня воды в фильтре (H_0 – отметка уровня в начале фильтрования), S_1 – сопротивление коммуникаций, подводящих воду в фильтр, S_2 – сопротивление коммуникаций фильтрата (в т. ч. и дренажа), V_1 – расход воды, поступающей в фильтр на единицу его площади.

Уравнение баланса поступающей и отводимой из фильтра воды –

$$V_1 - V = \frac{dH(t)}{dt}. \quad (6)$$

Величина V_1 определяется из условия квадратичной зависимости потерь напора от скорости, т.е. $h=SV^2$, откуда

$$V_1 = [(Z_1 - H)/S_1]^{0,5} \quad (7)$$

Уровень воды в фильтре равен-

$$H = Z_2 + h_c(t) + S_2 V^2. \quad (8)$$

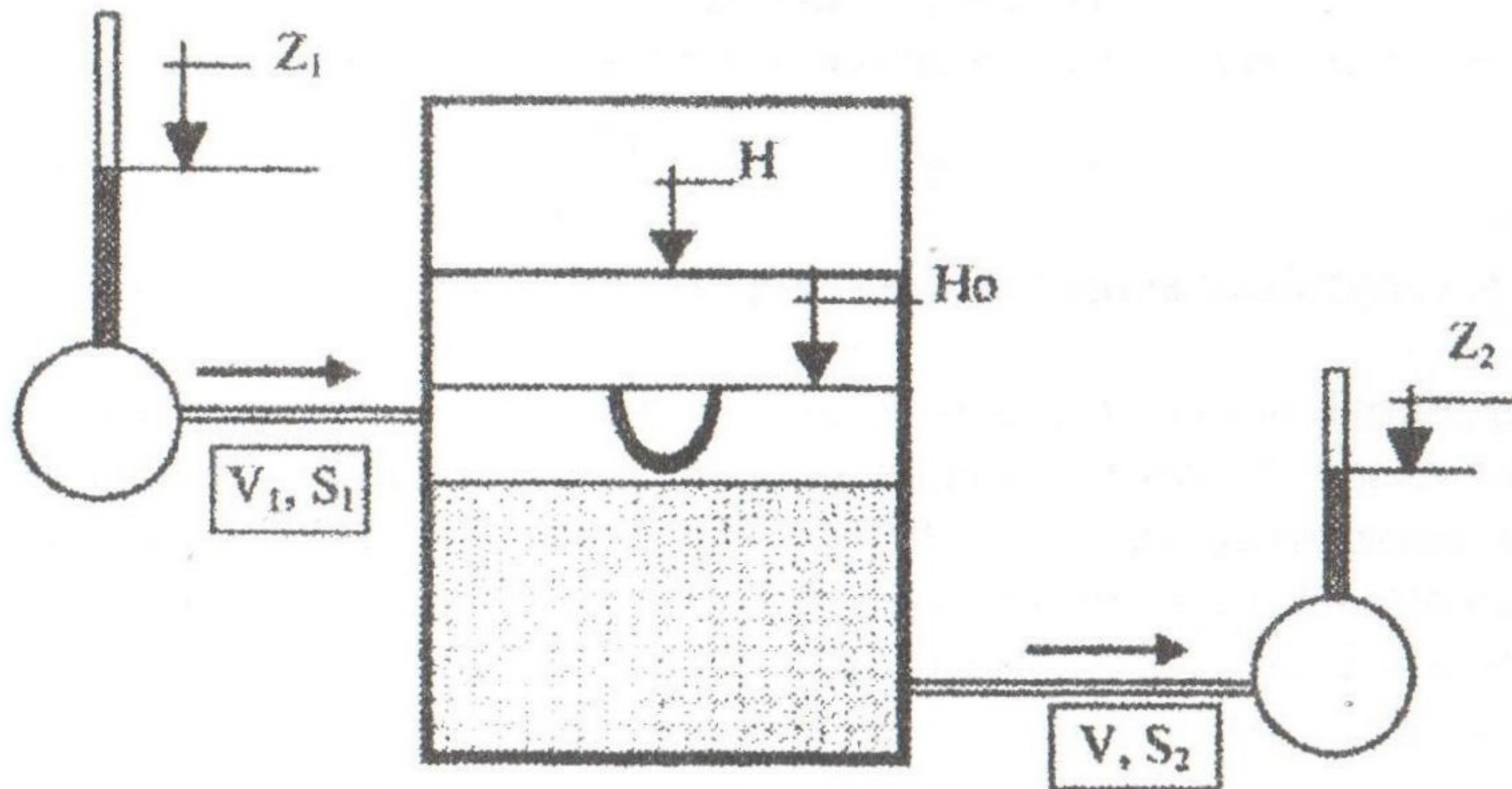


Рис. 1. Расчетная схема фильтра

Начальные и граничные условия следующие:

$$\left. \begin{aligned} x = 0 \quad C &= C_0 \\ t = 0 \quad \rho_0 &= \rho_0(x), V = V_0, H = H_0, m = m_0 \\ t \rightarrow \infty, \frac{\partial C}{\partial x} &= 0, C = C_0, \rho = \rho_{np}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где ρ_{np} — предельная насыщенность порового пространства задержанной взвесью. Последнее граничное условие означает, что при большой продолжительности фильтрования слой «зарабатывается» и перестает осветлять воду. Естественно, вначале это происходит в первых по ходу воды слоях загрузки.

Система дифференциальных, интегральных и алгебраических уравнений (1)-(8) с начальными и граничными условиями (9) является математической моделью работы скорого фильтра с переменной скоростью фильтрования. В этой системе 8 неизвестных — $C(x,t)$, $\rho(x,t)$, $m(x,t)$, $I(x,t)$, $h(t)$, $V_1(t)$, $V(t)$, $H(t)$, что соответствует числу уравнений. Следовательно, система уравнений замкнута и, в принципе, разрешима. Однако сложность этой системы не дает оснований надеяться на получение аналитических решений. Единственный выход — использование численных методов.

Представим уравнения в конечно-разностной форме, при этом, как показано во многих работах, первым членом уравнения (1) можно пренебречь (его значение не превышает 1% остальных членов). Таким образом:

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta t} = V \frac{\Delta C}{\Delta x}, \quad (1')$$

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

Из (1') и (2') получаем рекуррентные соотношения для расчета ρ и C :

$$\rho_{i,j+1} = \rho_{ij} - V_{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x} (C_{i-1,j} - C_{ij}), \quad (10)$$

$$C_{i+1,j} = C_{ij} + \Delta x (-bC_{ij} + \frac{a}{V_j} \rho_{ij}), \quad (11)$$

где Δx и Δt — шаг счета по глубине слоя и во времени; i — номер слоя по глубине; j — номер «временного» слоя.

Потеря напора в слое, исходя из уравнения (5), равна

$$h_c = \Delta x \sum_0^L I(x, t). \quad (12)$$

Изменение уровня воды в фильтре рассчитывается по соотношению, получаемому из (6) —

$$V_1 - V = \frac{\Delta H(t)}{\Delta t},$$

откуда

$$H_{j+1} = H_j + \Delta t (V_{ij} - V_j). \quad (13)$$

Подача воды в фильтр и скорость фильтрования определяются по формулам, следующим из (7) и (8):

$$V_{1j} = [(Z_1 - H_j) / S_1]^{0.5}, \quad (14)$$

$$V_{j+1} = \sqrt{(H_j - Z_2 - h_{cj}) / S_2}. \quad (15)$$

Потеря напора в элементарном слое толщиной Δx равна —

$$h_{ij} = \Delta x F(V_j, m_{ij}), \quad (16)$$

где F — правая часть в формуле (4).

Пористость вычисляется по формуле

$$m_{ij} = m_0 - \frac{\rho_{oi}}{\gamma_0} - \frac{\rho_{ij} - \rho_{oi}}{\gamma}, \quad (17)$$

где m_0 — пористость чистой загрузки; ρ_{oi} — остаточная концентрация осадка в загрузке после промывки в i -м слое; ρ_{ij} — концентрация «свежего» осадка в загрузке; γ_0 и γ — массовая концентрация твердых частиц в единице объема осадка соответственно после промывки и в процессе фильтрования.

Необходимость введения разных значений γ в (17) обусловлена тем, что осадок, оставшийся в поровом пространстве после промывки, имеет не такую же плотность, 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 куда большие, чем те, которые воздействуют на частицы осадка при фильтровании.

Для определения остаточных загрязнений по глубине слоя используется соотношение, полученное из предположения об одинаковом эффекте промывки каждого слоя по глубине фильтра—

$$\rho_{oi} = (1 - \varepsilon) \rho_{ijk}, \quad (18)$$

где ε — эффект промывки, т.е. отношение массы загрязнений, вымытых при промывке, к массе задержанных за фильтроцикл загрязнений; ρ_{ijk} — концентрация осадка в загрузке в i -м слое в момент окончания фильтрования ($j=j_k$).

При разработке методики расчетов использована технология послойно-пошагового счета, апробированная на задаче фильтрования с постоянной скоростью [10].

Алгоритм расчетов:

1. Задают исходные данные — C_α , C_ϕ , L_α , Δx , Δt , $\rho_0(x)$, d_s , t_s , a , b , m_α , γ , γ_0 , Z_1 , Z_2 , H_0 .
2. Вычисляют V_{10} и V_0 .
3. Принимают $t=0$ и производят послойный расчет $\rho(x,0)$, $C(x,0)$, $m(x,0)$, $h(x,0)$ до значения $x=L$.
4. Находят суммарную потерю напора в загрузке фильтра $h_c(0)$.
5. Переходят к следующему моменту времени $t_{j+1}=t_j+\Delta t$, для которого последовательно определяют новые значения H , V_1 , V и V_π .
6. При найденном значении скорости фильтрования V проводят послойный расчет ρ , C , m , h .

7. Расчеты повторяют до достижения заданной величины продолжительности фильтрования (обычно не более 48 ч).

Описанный алгоритм был реализован с помощью программы Microsoft Excel с использованием макросов. Произведен ряд расчетов, показавших полное соответствие их результатов физическим представлениям о процессах, происходящих при фильтровании с падающей скоростью. В качестве примера на рис.2. показана динамика изменения скорости фильтрования, потерь напора в загрузке и уровня воды в фильтре. Здесь видно, что в начале фильтрования уровень воды в фильтре и потери напора в загрузке быстро возрастают, а затем прирост их замедляется. Скорость фильтрования также быстро растет, а затем, достигнув максимума, медленно убывает. Объясняется это тем, что вначале отметка уровня в фильтре низкая (она соответствует отметке кромки желобов). Поэтому скорость подачи воды в фильтр большая (перепад $Z_1 - H_0$ большой), скорость фильтрования низкая, в результате чего фильтр быстро наполняется.

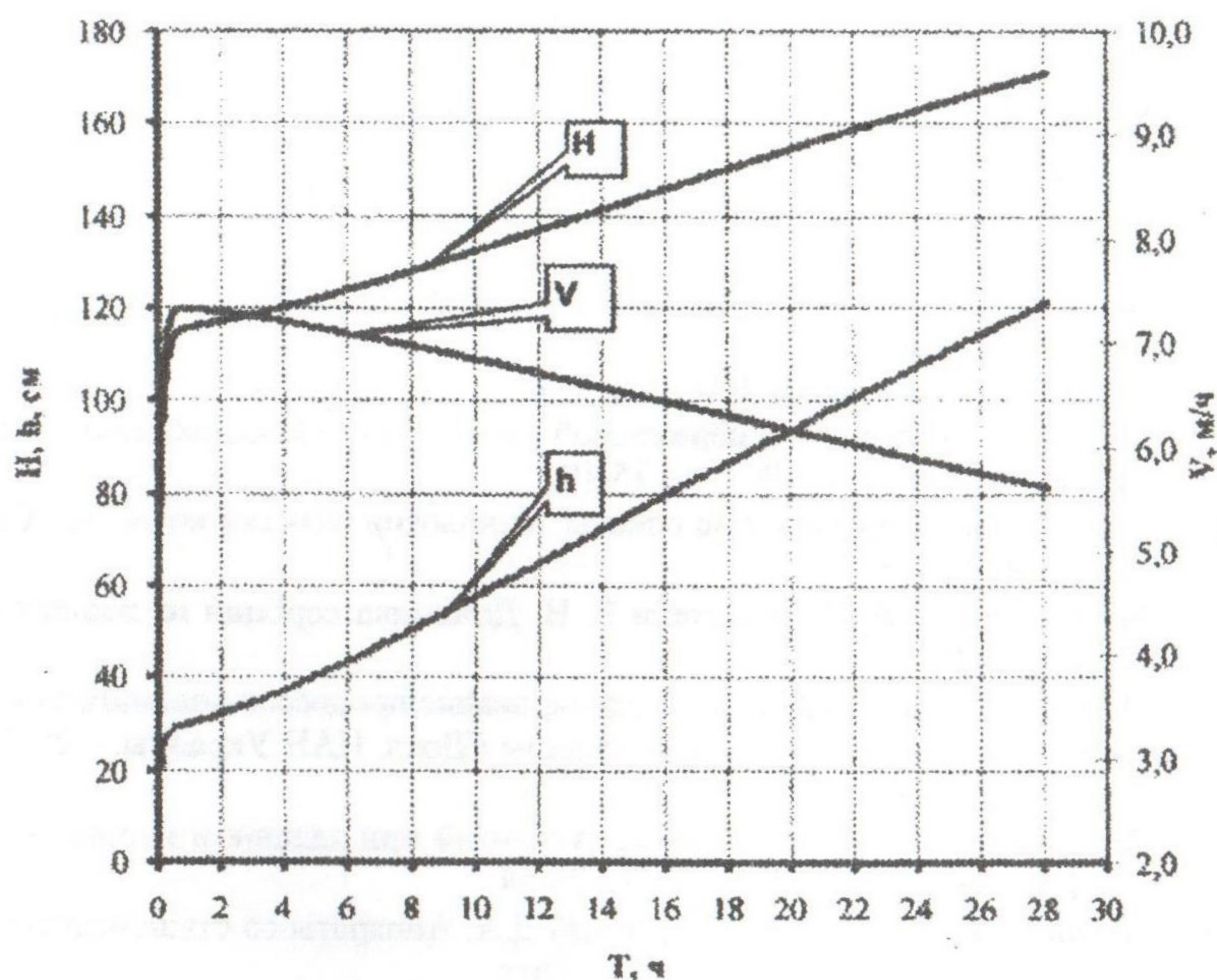


Рис. 2. Динамика фильтрования

Выводы

1. Получена математическая модель скорого водоочистного фильтра, работающего с падающей скоростью.
2. Разработан алгоритм численной реализации модели.
3. Произведены расчеты, показавшие полное соответствие их результатов физическим представлениям о процессах фильтрования с падающей скоростью.
4. Основными задачами последующих исследований являются:
 - изучение влияния технологических параметров (начальной скорости, высоты слоя, крупности зерен и т.п.), а также кинетических коэффициентов на динамику фильтрования с переменной скоростью;
 - разработка методики определения коэффициентов a , b , γ_0 и γ ;
 - экспериментальная апробация полученной математической модели.

Литература

1. Клячко В.А., Апелцин И.Э. Очистка природных вод. М.: Стройиздат, 1971. – 579 с.
2. Hudson H.E. Declining rate filtration //JAWWA. Vol.51, №11, 1959. – p. 42-50.
3. Cleasby J.L. Water filtration through deep granular media/ //Public Works, №6, 1970. – p.36-45.
4. Сысоев М.Н., Казакова Л.П., Богданова С.И., Круглов Л.С. Работа фильтрующих сооружений с переменной скоростью// Водоснабжение и санитарная техника, №2, 1968. – с.15-19.
5. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. М.: Стройиздат, 1964. – 156 с.
6. Венецианов Е. В., Рубинштейн Р. Н. Динамика сорбции из жидких сред. М.: Наука, 1983. – 237 с.
7. Олейник А. Я., Тугай А. М. Моделирование процессов кольматажа и суффозии в прифильтровой зоне скважины //Докл. НАН Украины. – 2001. – N 9. – с. 190 – 194.
8. Поляков В. Л. О фильтровании суспензий при заданном напоре // Докл. НАН Украины. – 2005. – N 4. – С. 48-54.
9. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
10. 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.