

В. С. САРКИСЯН, А. Ж. ЧИТЧИАН, А. А. САРГСЯН

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ОХРАНЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Во многих регионах страны мощность действующих очистных сооружений намного меньше, чем количество образующихся сточных вод. Утилизация концентрированных стоков представляет сложную народнохозяйственную проблему и, к сожалению, уже вызывает нежелательные изменения качественных показателей водных объектов. Сбросы неочищенных и недостаточно очищенных сточных вод в открытые водные объекты повсеместно приводят к прогрессирующему загрязнению рек, водохранилищ, а также подземных вод, которые широко используются в различных отраслях народного хозяйства, а в некоторых случаях являются единственным источником водоснабжения. Многие источники воды стали непригодными для хозяйственного, бытового, промышленного водоснабжения и орошения сельскохозяйственных земель.

Степень очистки сточных вод механическими и биологическими очистными станциями не превышает 80—90%. Растворенные минеральные соли и биогенные вещества удаляются в незначительной степени. Содержание азота уменьшается в среднем на 40%, фосфатов—30%, калия—20%, а другие минеральные соли практически полностью проходят через очистные сооружения. Несравненно более высокие результаты при значительно меньших затратах достигаются при очистке, а в некоторых случаях при доочистке сточных вод в естественных условиях (степень очистки составляет 95—99%) [2, 3].

Из всего многообразия естественной очистки остановимся на тех, которые протекают в почвогрунтах зоны аэрации.

Перспективным направлением является использование после их предварительной подготовки сточных вод и жидких навозов на сельскохозяйственных полях орошения (ЗПО) или очистки и доочистки на полях фильтрации (ПФ).

ЗПО и ПФ представляют собой спланированные с незначительным уклоном карты (емкости), разделенные земляными оградительными валиками. Сточные воды распределяются по картам, где они фильтруются через грунты зоны аэрации и попадают в грунтовые воды или отводятся осушительной дренажной сетью. При этом эмульгированные и растворенные вещества поглощаются почвогрунтом. Однако поглощательная способность почвогрунтов со временем уменьшается, и концентрация фильтрата, попадающая в грунтовые воды, увеличивается и через некоторое время достигает предельно допустимого значения (годность сооружения практически исчерпана). Содержащиеся в сточной воде взвешенные вещества образуют на полях фильтрации или накопителях ЗПО осадок (илистый слой), мощность которого со временем возрастает и требуется его очистка от ила. Здесь возникает необходимость создать цикл технологических процессов очистки сточных вод на ЗПО и ПФ, изучить количественные и качественные характеристики сточных вод, почвогрунтов данного региона, составить карты залегания грунтовых вод, выбрать территорию для полива и накопителя, установить норму, режим полива и т. д.

Очистка сточных вод на ЗПО и ПФ происходит за счет фильтрации этих жидкостей через пористую среду с поглощением и переносом веществ, которые подчиняются уравнениям фильтрации материального баланса вещества и кинетики поглощения [1].

В работах [4, 5] рассмотрены процессы массопереноса и массообмена при линейной кинетике поглощения вещества и постоянной исходной концентрации сточной воды. Однако в большинстве случаев концентрация сточных вод во времени колеблется и процессы массообмена происходят по нелинейной кинетике поглощения.

Рассмотрим одномерную фильтрацию сточных вод через однородную пористую среду. Если пренебречь диффузионным переносом веществ по сравнению с конвективным, то дифференциальное уравнение материального баланса примет вид:

$$v \frac{\partial c}{\partial x} + n_0 \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial b}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где v — скорость фильтрации, c — объемная концентрация веществ в водной среде, b — удельное объемное поглощение веществ пористой средой, n_0 — начальная пористость среды, x — координата, t — время.

Нелинейную кинетику поглощения веществ можно представить в виде:

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \alpha (b_0 - b) c, \quad (2)$$

здесь b_0 — предельное объемное поглощение, α — коэффициент скорости поглощения.

Если изменение концентрации сточных вод во времени аппроксимировать по закону косинуса, то крайевые условия для решения (1) — (2) будут

$$b\left(\frac{vt}{n_0}, t\right) = 0, \quad c = \frac{c_0}{2} (1 + \cos \omega t), \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (3)$$

где c_0 — максимальная концентрация, ω — циклическая частота, T — периодичность изменения концентрации.

Из решения (1) — (3) получим:

$$c = \frac{c_0 \varphi (1 + \psi) (1 + \cos \omega t)}{2\psi (1 + \varphi)}, \quad (4)$$

$$b = \frac{b_0 \varphi}{1 + \varphi}, \quad (5)$$

здесь

$$\varphi = \psi \exp\left(-\alpha \frac{b_0}{v} x\right), \quad \psi = \exp\left[\frac{\alpha c_0}{2\omega} (\omega \tau + \sin \omega \tau)\right] - 1, \quad \tau = t - \frac{n_0}{v} x.$$

Если полагать, что $c = c_*$ при $x = l$, из уравнения (4) методом подбора можно определить срок службы ЗПО или ПФ. Здесь c_* — предельно-допустимая концентрация фильтрующихся сточных вод на подходе к — глубина залегания грунтовых вод.

При относительно высоких концентрациях сточных вод и больших размерах взвешенных веществ, через некоторый момент времени t_* дальнейшее проникновение дисперсных и коллоидных частиц вглубь пористой среды прекращается и начинается процесс образования осадка (пленки) над фильтрующей средой (6). Критическое значение удельного объемного поглощения задержанных средой веществ b_* можно определить из граничного условия

$$b(x, t) = b_*. \quad (6)$$

Тогда из (5) и (6) имеем

$$b_* = b_0 \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{\alpha c_0}{2\omega} (\omega t_* + \sin \omega t_*)\right] \right\}. \quad (7)$$

Толщина осадка $\delta(t)$ определяется из следующего балансового уравнения.

$$(1 - n_*) \frac{d\delta}{dt} = \frac{c_0 v}{2} (1 + \cos \omega t), \quad (8)$$

при условии $\delta(t_*) = 0$.

После интегрирования (8), получим:

$$\delta(t) = \frac{c_0 v}{2\omega(1 + n_*)} [\omega(t - t_*) + \sin \omega(t - t_*)]. \quad (9)$$

Отложения загрязнений в пористой среде приводят к изменению ее пористости, а, следовательно, и проницаемости. Следуя Д. М. Минцу, изменение проницаемости пористой среды можно представить в виде:

$$k = k_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^3, \quad n = n_0 - b, \quad (10)$$

где k_0 — исходное значение проницаемости.

Уменьшение k и образование осадка приводят к увеличению давления в пористой среде, которое в случае напорной фильтрации можно определить из уравнения:

$$a \frac{\partial^2 p_i}{\partial x^2} = \frac{\partial p_i}{\partial t}, \quad a = \frac{k}{\mu \beta^*}, \quad \beta^* = \beta_0 n_0 + \beta_1 (1 - n), \quad (11)$$

где a — пьезопроводность, p — избыточное давление, μ — динамический коэффициент вязкости, β_1 и β_2 — коэффициенты упругости жидкости и пористой среды, $i = 1, 2$ — порядок стадии (до и период образования осадка).

Уравнение (11) до образования осадка решается при условии

$$p_1(0, t) = p_0, \quad p_1(x, 0) = 0, \quad n_0 \frac{dl}{dt} = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p_1(l, t)}{\partial x} = v(t). \quad (12)$$

Решение (11) и (12) является автомодельным и имеет вид:

$$p_1 = p_0 \operatorname{erfc} \xi, \quad (13)$$

где $\operatorname{erfc} \xi = 1 - \operatorname{erf} \xi$, $\operatorname{erf} \xi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \exp(-u^2) du$ —

— интеграл вероятности, $\xi = \frac{x}{2\sqrt{at}}$.

Определяя из (13) $\partial p_1(l, t) / \partial x$ и вводя в (12), находим значение

$$v(t) = \frac{kp_0}{\mu \sqrt{\pi a t}} \exp(-\lambda^2), \quad \lambda = \frac{l}{2\sqrt{at}}. \quad (14)$$

где l — координата фронта промачивания.

Для определения $v(t)$ по выражению (14) должны иметь значения $l(t)$ или λ . Из условия (12) имеем

$$v(t) = n_0 \frac{dl}{dt} = n_0 \lambda \sqrt{\frac{a}{t}}. \quad (15)$$

Сравнивая значение $v(t)$ по (14) и (15), получим:

$$\lambda \exp(-\lambda^2) = \frac{kp_0}{\sqrt{\pi \mu a n_0}}. \quad (16)$$

Из трансцендентного уравнения (16) λ определяется методом подбора.

Если происходит образование осадка второй стадии фильтрации над поверхностью земли, то уравнение (11) решается при условиях

$$p_{22}(0, t) = p_0, \quad p_{22}(\delta + l, t) = 0, \quad p_{21}(x, t_*) = p_1(x, t_*),$$

$$k_* \frac{\partial p_{22}(\delta, t)}{\partial x} = k \frac{\partial p_{21}(\delta, t)}{\partial x}, \quad (17)$$

где p_{22} и p_{21} — соответственно давления в областях осадка и грунта, k_* и n_* — проницаемость и пористость осадка. Началом координат во время второй стадии фильтрации принята верхняя поверхность осадка.

Решая (11) при условии (17), находим

$$p_{21} = p_0 \left[\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{at_*}} - \frac{k_*}{k_1} \left(\operatorname{erf} \xi - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{at_*}} \right) / \operatorname{erf} \frac{(l+\delta)}{2\sqrt{at}} \right], \quad (18)$$

$$p_{22} = p_0 \left[1 - \operatorname{erf} \xi / \operatorname{erf} \frac{(l+\delta)}{2\sqrt{at}} \right]. \quad (19)$$

Во время второй стадии значения в l определяются из следующего кинематического уравнения

$$n_0 \frac{dl}{dt} + n_* \frac{d\delta}{dt} = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p_{21}(l, t)}{\partial x}. \quad (20)$$

В уравнение (20) положив значение $n_* \frac{d\delta}{dt}$ из уравнения (8)

$l = 2\sqrt{at}$ и значение $\partial p_{21}(l, t) / \partial x$ из уравнения (18), получим:

$$\frac{c_0 n_* v}{2n_0(1-n_*)} \sqrt{\frac{t}{a}} (1 + \cos \omega t) = \frac{k p_0 \exp(-\lambda^2)}{\sqrt{\pi \mu a} \operatorname{erf}(\lambda + \theta)} - \lambda, \quad (21)$$

где

$$\theta = \frac{c_0 v}{4\omega(1-n_*)\sqrt{at}} [\omega(t-t_*) + \sin \nu(t-t_*)].$$

Для конкретного момента t можно из (21) методом подбора определить значение λ , которое дает возможность определить значение $l(t)$ и $\nu(t)$.

Для инженерных расчетов по прогнозу изменения концентрации жидких и твердых фаз необходимо знать параметры α , b_0 , b_* , n_0 , n_* , k_* и k_0 , методика определения которых подробно освещена в работах [4, 5, 6].

Ереванский политехнический институт,
НПО «Мелиорация» Минводхоза Армении,
НИИ водных проблем и гидротехники
Минводхоза Армении

Поступила 12 VI.1990.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веригин Н. Н., Васильев С. В., Саркисян В. С., Шержуков Б. С. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М.: Недра, 1977, 270 с.
2. Львович А. И. Защита под от загрязнения. Л.: Гидрометиздат, 1977, 166 с.
3. Марьмов В. И. Использование промышленных сточных вод для орошения. М.: Колос, 1982, 72 с.
4. Саркисян В. С., Читчян А. Ж., Саргсян А. А. Основные закономерности процесса осветления суспензии на водоочистных фильтрах. — Изв. АН АрмССР, сер. ТН. 1986, т. XXXIX, №5, с. 39—42.
5. Саркисян В. С., Саргсян А. А. Массообмен при фильтрации жидкости, содержащей взвешенные, эмульгированные и растворенные вещества, через двухслойную пористую среду. — Изв. АН АрмССР, сер. ТН, 1989, с. 23—27.
6. Саркисян В. С., Читчян А. Ж. Закономерности фильтрования с образованием осадка на пористом патроне. М.: Химия и технология воды, 1981, т. 3, №5, с. 435—