
ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ОТСТОЙНИКА ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ФРАКЦИЙ

С.В. Василенков, О.Н. Демина

ФГОУ ВПО «Брянская государственная сельскохозяйственная академия»
с. Кокино, Выгоничский р-н, Брянская обл., Россия, 243365

Представлена модель заиления отстойника. Приведены методики определения параметров модели по экспериментальным данным. Рассмотрены факторы и необходимые условия их оптимизации, определяющие максимальную производительность отстойника.

Ключевые слова: поверхностный сток, самоочищение воды, осаждение наносов, мутность потока, заиление, производительность отстойника.

Основной поставщик загрязняющих веществ в водные объекты в условиях городского ландшафта — поверхностный сток, образующийся на водосборных территориях промышленных площадок, временных снегосвалок, дорожных покрытий и обочин дорог. Зачастую отведение этих вод не организуется, поэтому они, напрямую попадая в поверхностные источники, приводят к ухудшению качества воды в них по большинству показателей. Кроме этого, двигаясь по обочинам дорог и оврагам, поверхностный сток насыщается взвешенными веществами эрозийного характера, повышая мутность водных объектов, приводя к заилению водоемов и нарушению экологического равновесия в водной системе, вызывая загрязнение всей трофической цепи экосистемы.

Для понижения техногенной нагрузки на водные объекты необходимо в первую очередь осуществить проведение природоохранных мероприятий, направленных на снижение загрязнения талого стока, поступающего с водосбора. Необходимо создать систему эффективного управления этим стоком для осуществления максимально возможного осаждения загрязняющих веществ перед поступлением этих вод в водные объекты. При этом надо учитывать возможность самоочищения воды, когда концентрация загрязняющих веществ в поверхностном стоке может снижаться в результате действия механизмов расщепления загрязняющих веществ, процессов разбавления, осаждения, сорбции [2]. Кроме этого, необходима оптимизация работы отстойника для осаждения тонких фракций талого стока.

Таким образом, организовав поверхностный сток, используя каналы и зарегулированные русла для его отвода в отстойники, можно добиться того, что в водные объекты будет попадать вода с ПДК загрязняющих веществ, соответствующих нормам выпуска сточных вод.

Отстойники являются широко распространенным на практике сооружением, служащим для осаждения в воде грубо- и тонкодисперсных частиц. В отстойнике примеси попадают в область пониженных скоростей потока и транспортирующая способность его резко уменьшается, отметки дна отстойника повышаются вследствие заиления на всем его протяжении. Толщина слоя заиления уменьшается от места впадения потока в отстойник к выходному сечению, так как уменьшаются скорости течения. Взвешенные наносы состоят из зерен разной крупности,

часть из которых осаждается, не доходя до конца отстойника, часть имеет длину осаждения, равную его длине, часть наносов выносится за пределы отстойника. Важно, чтобы выходящие наносы, попадая в водоприемник, не изменяли его мутность сверх допустимых норм. В соответствии с требованиями к составу и свойствам воды водных объектов у пунктов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения содержание взвешенных веществ в результате спуска сточных вод не должно увеличиваться соответственно более чем на $0,25 \text{ мг/дм}^3$ и $0,75 \text{ мг/дм}^3$. Для водоемов, содержащих в межень более 30 мг/дм^3 природных минеральных веществ, допускается увеличение концентрации взвешенных веществ в воде в пределах 5% [1]. Поэтому особенно возрастают требования к проектированию отстойников, в которых осаждаются преимущественно тонкие фракции, как, например, в цементной пыли, содержащей от 75—90% частиц с размерами менее 50 мкм. При осаждении наносов, содержащих радионуклиды, также приходится уделять особое внимание трудноосаждаемым тонким фракциям, имеющим незначительную массу в потоке воды, но огромную суммарную поверхность, на которой преимущественно и адсорбируются радионуклиды.

Зерна наносов опускаются на дно под действием силы тяжести, и за время dt проходят на глубину dh со скоростью, соответствующей гидравлической крупности зерен ω :

$$dt = \frac{dh}{\omega}.$$

Вдоль отстойника зерна проходят путь $d\ell$ за время dt со средней скоростью потока v на данном отрезке пути

$$dt = \frac{dh}{\omega} = \frac{d\ell}{v}.$$

Для любого сечения потока, таким образом, соблюдается равенство

$$v \cdot H = \omega \cdot \ell.$$

В отстойник входит поток с мутностью $\rho_{\text{вх}}$. Расход входящих наносов $\rho_{\text{вх}} \cdot Q$, где Q — расход чистой воды. Из отстойника выходит расход наносов с меньшей мутностью $\rho_{\text{вых}} \cdot \rho_{\text{вых}} \cdot Q$.

Тогда $\frac{\rho_{\text{вх}} \cdot Q}{m}$, $\frac{\rho_{\text{вых}} \cdot Q}{m}$ — объем входящих и выходящих наносов в единицу времени, где m — плотность наносов в отложениях.

Объем заиления отстойника от входного створа 1—1 до рассматриваемого створа 2—2 (рис. 1) на 1 м ширины отстойника за время dt выражается следующим уравнением материального баланса:

$$\varphi dW \cdot \ell = \left(\frac{\rho_{\text{вх}} \cdot q_1}{m} - \frac{\rho_{\text{вых}} \cdot q_2}{m} \right) dt, \quad (1)$$

где dW — приращение слоя заиления в рассматриваемом сечении 2—2, считая от входного сечения 1—1, q_1 , q_2 — удельный расход чистой воды на 1 п.м в первом и во втором сечениях.

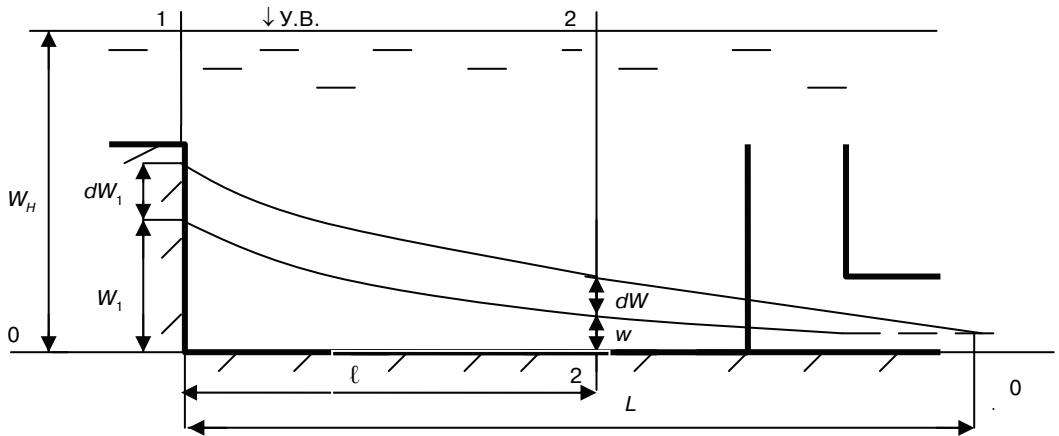


Рис. 1. Схема процесса заиления отстойника

На входе $\frac{\rho_{\text{вх}} \cdot q_1}{m} = \frac{\rho_{\text{вх}} \cdot h_{\text{вх}} \cdot W_1}{m}$.

Слой заиления на входе найдем из пропорции

$$\frac{W_1}{W} = \frac{L}{L - \ell}; \quad W_1 = \beta_1 \cdot W.$$

Тогда $\frac{\rho_{\text{вх}} \cdot h_{\text{вх}} \cdot W_1}{m}$ будет равно $\frac{\beta_1 \cdot h_{\text{вх}} \cdot W}{m}$ при условии, что мутность на входе

постоянна.

Глубина воды на входе в отстойник определяется отметкой порога аванкамеры, которая конструктивно выше дна отстойника. Здесь отлагается максимальное количество наносов на коротком участке. По сравнению со временем заиления всего отстойника начальный участок заполняется илом быстрее, и слой ила достигает отметки входного порога или отметки ниже входного порога, которая соответствует размывающей способности входной скорости потока.

Вряд ли слой наносов поднимется выше порога, так как скорость течения здесь возрастают так, что даже крупные наносы уносятся потоком. Если все же дно на пороге будет повышаться, то поднимется и уровень воды, поэтому глубина воды на входном пороге останется постоянной, т.е. $h_{\text{вх}} = \text{const}$.

Для сечения 2—2 можно записать:

$$\frac{\rho_{\text{вых}} \cdot q_2}{m} = \frac{\rho_{\text{вых}} \cdot v \cdot h}{m} = \frac{\rho_{\text{вых}} v (W_H - W)}{m}. \quad (2)$$

По данным работы С.В. Василенкова [2] и скорость потока, и его мутность обратно пропорциональны корню квадратному из слоя заиления W в рассматриваемом сечении.

Поэтому уравнение баланса можно представить в виде

$$\varphi \cdot \ell \frac{dW}{dt} = \frac{\beta_1 \cdot h_{\text{вх}} \cdot W}{m} - \frac{KW (W_H - W)}{m}, \quad (3)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\beta_1 \cdot h_{\text{вх}} \cdot W}{m \cdot \varphi \cdot \ell} - \frac{KW(W_H - W)}{m \cdot \varphi \cdot \ell}. \quad (4)$$

В уравнение баланса введем обобщенные параметры

$$N = \frac{\beta_1 h_{\text{вх}}}{m \cdot \varphi \cdot \ell}, \quad \mu_1 = \frac{K}{m \cdot \varphi \cdot \ell}.$$

Как показывают ранее проведенные исследования разных природных явлений в разных средах, сопротивление, торможение процессам оказывают продукты этих процессов, причем скорость торможения процесса прямо пропорциональна квадрату количества продукта:

$$\frac{dW}{dt} = NW - \mu_1(W_H - W)W + \mu_2 W^2. \quad (5)$$

Найдем коэффициент μ_2 из условия прекращения поступления наносов во входной створ $NW = 0$:

$$\frac{dW}{dt} = \mu_2 W^2 - \mu_1(W_H - W)W. \quad (6)$$

При равновесии $\frac{dW}{dt} = 0$ обозначим равновесный слой заиления через W_∞ :

$$\mu_2 = \frac{\mu_1(W_H - W_\infty)}{W_\infty}.$$

С учетом выражения для μ_2 запишем уравнение баланса:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\mu_1 W_H}{W_\infty} (W - W_\infty)W. \quad (7)$$

Интегрирование уравнения при начальных значениях $t = 0$, $W = W_0$ дает аналитическое выражение, описывающее S-образные кривые изменения слоя заиления во времени в любом створе отстойника:

$$W = \frac{W_{\text{ст}}}{1 + \frac{W_{\text{ст}} - W_0}{W_0} e^{(\mu_1 W_H - N)t}}, \quad (8)$$

где $W_{\text{ст}}$ — стационарный слой заиления отстойника в рассматриваемом слое.

Перейдя от временной координаты t к пространственной ℓ , получим уравнение изменения слоя заиления по длине отстойника на определенный момент времени:

$$\frac{dW}{d\ell} = NW + \frac{\mu_1 W_H}{W_\infty} (W - W_\infty)W. \quad (9)$$

После интегрирования при начальных значениях $\ell = 0$, $W = W_0$ получаем

$$W = \frac{W_{\text{ст}}}{1 + \frac{W_{\text{ст}} - W_0}{W_0} e^{(\mu_1 W_H - N)\ell}}. \quad (10)$$

Для нахождения параметров $W_{ст}$, $\mu_1 W_H - N$ проведем преобразования. Уравнение (9) можно записать так:

$$\frac{dW}{d\ell} \cdot \frac{1}{W} = \frac{d \ln W}{d\ell} = N + \frac{\mu_1 W_H}{W_\infty} (W - W_\infty).$$

Среднее изменение заиления для конечного отрезка длины отстойника:

$$\frac{\Delta \ln W}{d\ell} = \frac{\ln W_{\ell+\Delta\ell} - \ln W_\ell}{\Delta\ell}, \quad (11)$$

где W_ℓ , $W_{\ell+\Delta\ell}$ — слой заиления на концах отрезков длиной ℓ и $\ell + \Delta\ell$.

Подставляем в уравнение (11) выражение для W_ℓ и $W_{\ell+\Delta\ell}$ из уравнения (10).

Затем обе части полученного уравнения умножаем на $\Delta\ell$ и потенцируем, имея ввиду, что

$$\Delta \ln W = \ln \frac{W_{\ell+\Delta\ell}}{W_\ell}.$$

Приходим к выражению

$$\frac{W_{\ell+\Delta\ell}}{W_\ell} = e^{(\mu_1 W_H - N)\Delta\ell} + \frac{W}{W_{ст}} \left[1 - e^{(\mu_1 W_H - N)\Delta\ell} \right]$$

или
$$\varphi = \frac{W_{\ell+\Delta\ell} - W_\ell}{W_{\ell+\Delta\ell}} = \left[1 - e^{(\mu_1 W_H - N)\Delta\ell} \right] \cdot \left(1 - \frac{W}{W_{ст}} \right). \quad (12)$$

При постоянном значении $\Delta\ell$ уравнение (12) линейно.

Если по ординате графика откладывать φ , а по абсциссе W_ℓ , то прямая отсечет на оси ординат отрезок, равный $1 - e^{(\mu_1 W_H - N)\Delta\ell}$, а на оси абсцисс — отрезок, равный $W_{ст}$. Зная длину отрезка $\Delta\ell$, можно найти $\mu_1 W_H - N$:

$$\mu_1 W_H - N = \ln \frac{(1 - \varphi_M)}{\Delta\ell}, \quad (13)$$

где φ_M — длина отрезка, отсекаемого на оси ординат.

Для нахождения W_0 нужно задаться сначала значением W_0 близким к нулю, а затем, постепенно увеличивая его методом последовательных приближений, добиться на графике линейной зависимости $\varphi = \frac{W_{\ell+\Delta\ell} - W_\ell}{W_{\ell+\Delta\ell}}$ от W_ℓ .

Это значение W_0 используется в расчетах по уравнению (10). Предложенную выше модель можно использовать для определения изменения объема заиления по длине отстойника на определенный момент времени, заменив параметр W (слой заиления) на Y (объем заиления):

$$Y = \frac{Y_{ст}}{1 - \frac{Y_{ст} - Y_0}{Y_0} e^{(\mu_1 W_H - N)\ell}}.$$

Используя изложенную выше методику, на основании экспериментальных данных (в данном случае данные по заилению 1-й секции горизонтального отстойника, принимающего технологическую воду цементного предприятия, находящегося в г. Фокино Брянской области), определяют следующие параметры модели (рис. 2):

$$Y_0 = 7 \text{ м}^3, Y_{\text{ст}} = 50 \text{ м}^3, \varphi = 0,42, \mu_1 W_H - N = -0,15 \frac{1}{\text{м}}.$$

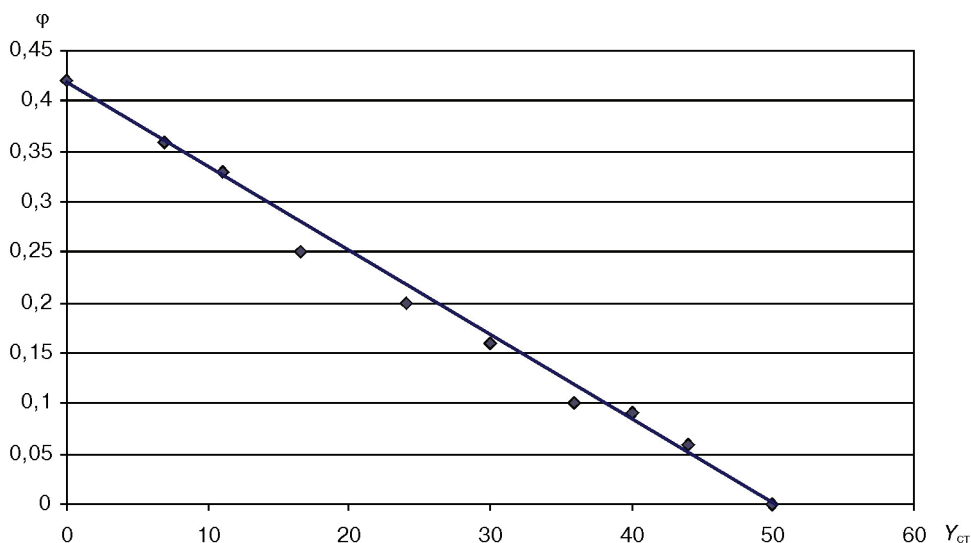


Рис. 2. График линейной зависимости $Y_{\text{ст}}$ от φ .
Отстойник в г. Фокино Брянской области

Экспериментальные данные (ромбики) и рассчитанные по уравнению (10) (квадратики) нанесены на график (рис. 3). Соответствие результатов расчета и экспериментальных данных дает все основания для практического использования математической модели при прогнозировании заиления отстойников.

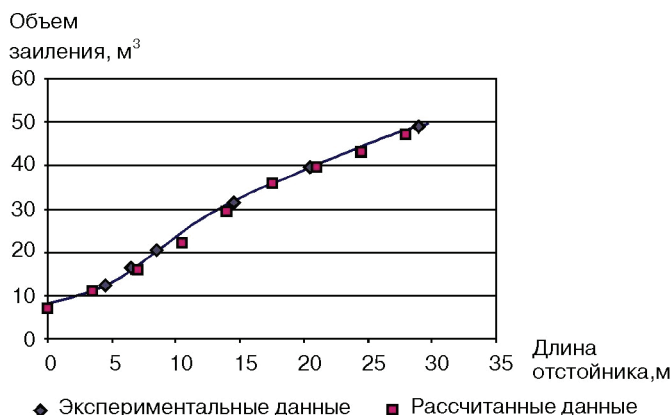


Рис. 3. График кривой, описывающей заиление отстойника
в г. Фокино Брянской области

Уравнения (8) и (10) дают в общем случае S-образные кривые нарастания слоя заиления во времени и по длине отстойника. Процесс заиления начинается с откладывания наносов крупных фракций в начале отстойника. Если таких фракций много в составе наносов, то пологого участка в начале S-образной кривой не будет. Если же во фракционном составе наносов преобладают тонкодисперсные частицы, или если (как предлагается в работе) крупные частицы выпадут в организованных руслах и каналах до входа в отстойник, то кривая заиления по длине отстойника будет строго соответствовать по форме S-образной кривой.

В конце отстойника слой заиления приближается к стационарному состоянию, если это позволяет длина отстойника, кинетическая кривая снова становится полой. Длина полой части, кроме экономических соображений по строительной стоимости отстойника определяется также по требованиям сброса в водоприемник воды нормативной мутности.

Таким образом, опораживаемый при очистках объем отстойника должен располагаться между начальным и конечным участком.

Если принять за производительность отстойника q количество наносов, изымаемое с единицы длины рабочего объема отстойника, то

$$q = \frac{W_k \cdot V}{\ell \cdot V_p},$$

где ℓ — длина отстойника, W_k — слой заиления в конце цикла отстаивания перед полой частью S-образной кривой; V — объем изымаемых наносов в конце цикла отстаивания; V_p — рабочий объем отстойника.

Считаем, что извлекать слой наносов на начальном участке W_0 нецелесообразно.

$$\frac{W_0}{W_k} = \frac{V_p - V}{V_p}, \quad \frac{V}{V_p} = \frac{W_k - W_0}{W_k}.$$

Согласно уравнению (10)

$$\ell = \frac{1}{\mu_1 H_B - N} \ell n \frac{W_k (W_0 - W_{ст})}{W_k - W_{ст}},$$

$$\text{Следовательно, } q = \frac{(\mu_1 W_H - N)(W_k - W_0)}{\ell n \frac{W_k \cdot (W_0 - W_{ст})}{W_0 \cdot (W_k - W_{ст})}}$$

или

$$q = X \cdot W_{ст} \cdot (\mu_1 W_H - N), \tag{14}$$

$$\text{где } X = \frac{\frac{W_k}{W_{ст}} - \frac{W_0}{W_{ст}}}{\frac{W_k}{W_{ст}} \cdot \left(\frac{W_0}{W_{ст}} - 1 \right) - \frac{W_0}{W_{ст}} \cdot \left(\frac{W_k}{W_{ст}} - 1 \right)}, \quad W_{ст} = W_H \cdot \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2}.$$

Как следует из уравнения (14), производительность отстойника в циклическом режиме работы тем больше, чем больше мутность потока на входе в отстойник и пропорциональный ей максимально возможный слой заиления W_H ,

коэффициент полноты осаждения $\frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2}$, а также максимальная удельная ско-

рость осаждения наносов $\mu_1 W_H - N$. Для достижения максимальной производительности отстойника, указанные параметры должны быть оптимальными. При фиксированных значениях этих параметров, максимальная производительность отстойника определяется оптимальным значением фактора X , зависящим от соотношения W_0 и W_k , которое меняется при изменении времени цикла между чистками отстойника и в зависимости от длины отстойника.

Величина полноты осаждения $\frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2}$ полностью зависит от условий осаж-

дения, т.е. от температуры воды, рН, гидродинамики, из которых два последних не сложно оптимизировать.

Параметры W_H и $\frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2}$ определяют только величину стационарного слоя

заиления в конце отстойника. Однако длина, на которой достигается стационарная толщина слоя заиления, зависит только от величины параметра $\mu_1 W_H - N$, характеризующего предельно возможную интенсивность осаждения наносов в конкретных условиях. Очевидно, что значение этого фактора связано и с мутностью входящего потока воды, и с особенностями фракционного состава наносов, и с условиями осаждения.

Если установлено, что коэффициент полноты осаждения мал, то первым этапом оптимизации должен быть поиск оптимальных физико-химических условий: гидродинамики, рН, содержания CO_2 , содержание солей (коагулянтов). Регулировать в этом случае нужно по разным каналам.

Для оптимизации важен выбор режима осаждения наносов, т.е. длительности цикла осаждения, объема изымаемых наносов, длины отстойника, на которой производится очистка. Возможно, достижение требуемой полноты осаждения за счет удлинения отстойника окажется экономически менее целесообразным, чем доочистка воды с помощью установленных в конце отстойника цеолитовых кассет.

Таким образом, вопрос о факторах, определяющих максимальное осаждение наносов при минимальных строительных и эксплуатационных затратах, является весьма сложным, но все же технически разрешимым. Без его решения, каким бы сложным он ни был, говорить о подлинном управлении процессами осаждения наносов в отстойниках невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.5.980-00 «2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод».

- [2] *Василенков С.В. Математическая модель заиления прудов // Материалы научно-практической конференции «Проблемы энергетики, природопользования, экологии». — Брянск: Изд-во БГСХА, 2007. — С. 7—18.*

THE PRINCIPLES OF MODELING AND OPTIMIZATION OF THE WORK OF THE SETTLING POOL FOR SILTING OF THING FRACTIONS

S.V. Vasilenkov, O.N. Demina

The Bryansk State Agricultural Academy
v. Kokino, Vigonichi district, Bryansk region, Russia, 243465

The model of silting of the settling pool is offered here. The methods of definition of parameters of the model by experimental figures are reduced. The factors, determined the maximal productivity, and necessary conditions of their optimization are considered.

Key words: surface run-off, water self-clarification, sedimentation, turbidity of stream, silting, settling capacity.