

УДК 628.515

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ В СИСТЕМАХ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

А. Я. ОЛЕЙНИК, Ю. И. КАЛУГИН, Н. Г. СТЕПОВАЯ, С. М. ЗЯБЛИКОВ

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Получено 03.06.2004

Приводится обоснование предпосылок и условий осаждения взвешенных частиц (макрохлопьев ила) во вторичных вертикальных отстойниках. В результате выполненного анализа и сравнительных оценок существующих моделей и методов расчета параметров осаждения предложена более совершенная гидродинамическая модель осаждения, которая учитывает особенности и механизмы осаждения взвесей по высоте отстойника. Модель реализована численными методами. Разработан алгоритм расчета технологических характеристик осаждения и конструктивных параметров отстойника.

Приведено обґрунтування передумов і умов осадження завислих речовин (макропластів іла) у вторинних вертикальних відстійниках. Внаслідок проведеного аналізу і порівняльних оцінок існуючих моделей і методів розрахунку параметрів осадження запропонована більш досконалі гідродинамічна модель осадження, яка враховує особливості і механізми осадження зависей по висоті відстійника. Модель реалізована чисельними методами. Розроблено алгоритм для розрахунку технологічних характеристик осадження і конструктивних параметрів відстійника.

Substantiation of solids (activated sludge makroflocks) sedimentation prerequisites and conditions in secondary vertical settlers is presented. A more complete hydrodynamic sedimentation model has been developed on the basis of the performed analysis and comprehensive examination of existing models and methods for calculating of sedimentation parameters. The model takes into account character properties and mechanisms of solids sedimentation over the settler depth. The calculation algorithm for operating characteristics of sedimentation process and settler design data has been developed. The model has been realized by using a numerical simulation.

## ВВЕДЕНИЕ

В системах биологической очистки городских и бытовых сточных вод от различных загрязнений одним из основных сооружений являются вторичные отстойники, которые служат для отделения активного ила от биологически очищенной воды, поступающей от различных биореакторов. Эффективность работы вторичных отстойников зачастую определяет конечный эффект очистки воды от взвешенных частиц. Вторичные отстойники бывают вертикальными, горизонтальными и радиальными, однако наибольшее распространение в инженерной практике получили вертикальные отстойники различной конструкции. В последнее время разработка методов расчета вторичных отстойников, анализу и обоснованию их работы посвящено много литературы, особенно иностранной [1–12]. С одной стороны, это связано с повышением требований к качеству общей очистки сточных вод, с другой стороны – с появлением более сложных моделей биологической очистки сточных вод в биореакторах, которые, в свою очередь, требуют использования более совершенных моделей вторичных отстойников. Как известно, моделирование процессов, которые происходят во вторичных отстойниках, используется при

проектировании, анализе и контроле распределения поступающих потоков активного ила, а также как часть общей модели, которая описывает процессы в сооружениях с активным илом и вместе с отстойниками представляют собой единый эксплуатационный блок. Как известно [8, 12 – 15], вторичные отстойники, как правило, выполняют две функции: функцию осветления сточных вод, которые поступают от реактора с активным илом, и функцию уплотнения ила, который осаждается в стесненных условиях. В отличие от первичных отстойников, предназначенных для удаления взвешенных веществ из сточной воды с возможным использованием более простых моделей осаждения, во вторичных отстойниках происходит осаждение преимущественно хлопьев активного ила в сложных условиях их трансформации и биофлокуляции. Сложные процессы и механизмы стесненного (зонного) и компрессионного (уплотненного) осаждения требуют для их описания более сложных моделей. В связи с этим разработка существующих методов расчета технологических характеристик и конструктивных параметров вторичных отстойников базировалась на использовании различных эмпирических, полуэмпирических и простых теоретических подходов и исследований. При этом разработка многих из них основывалась

на изучении осаждения хлопьев активного ила в статических условиях, при которых седиментационные свойства иловых смесей оценивались в соответствии с кривой кинетики снижения высоты границы раздела фаз во времени (так называемой кривой Кинша [12, 13, 15]); и только в последнее время изучение этих процессов осуществляется в проточном режиме работы вторичных отстойников с учетом разных гидродинамических факторов. При этом преимущественно рассматриваются одномерные простые вертикальные модели, в которых скорость осаждения описывается различными функциями, а гидравлические скорости движения потока в отстойнике принимаются постоянными. Для реализации таких моделей отстойник по высоте разбивается на отдельные горизонтальные слои и для каждого слоя составляется и решается уравнение материального баланса вещества. Однако для более глубокого изучения и анализа потокораспределения и процессов осаждения внутри отстойника с учетом гидродинамического режима, в частности турбулентности потока, необходимо разрабатывать более сложные одномерные модели, а также двумерные и даже трехмерные модели турбулентного переноса взвешенных частиц и процессов осаждения в этих условиях. Последние рекомендуется разрабатывать для горизонтальных и радиальных отстойников, что позволяет учесть некоторые особенности гидродинамики переноса частиц в этих отстойниках, в частности, возможный отрыв и всплыивание частиц за счет формирования значительного придонного течения под слоем осадка. Сложности в реализации таких моделей состоят, прежде всего, в необходимости знания большой исходной информации. Более подробно анализ существующих моделей и методов расчета вторичных отстойников приведен в работах [16, 17].

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРЕДПОСЫЛКИ К РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛЕЙ

Распределение составляющих фракций частиц в сточной жидкости, поступающей в отстойник из реактора-аэротенка, в котором биологические процессы проходят в соответствии с известной моделью активного ила 1, приведено в работах [2, 4, 6]. Рассматривается модель отстойника, которая состоит из трех фракций: растворенных веществ (в дисперсном состоянии), микрочастиц (первичных частиц 0,5–5 мкм), которые практически не осаждаются, и макрочастиц (макрохлопьев 10–5000 мкм), которые осаждаются. Растворенные вещества, которые обычно присутствуют

в модели отстойника, будут такими же растворенными веществами, что и в модели активного ила 1, и не будут осаждаться ни при каких обстоятельствах [4]. Поэтому в дальнейшем можно рассматривать присутствие в отстойниках двух фракций. Количество частиц каждой фракции зависит от процессов флокуляции и диспергирования, которые в свою очередь зависят от уровня турбулентности (перемешивания жидкости в реакторе). Однако, если учесть, что фракция микрочастиц в реальных условиях составляет не более 1% от фракции макрохлопьев, а средняя скорость их осаждения не превышает 0,01...0,05 м/час, то многими авторами, учитывая реальную продолжительность пребывания ила в отстойнике (до 5–6 часов), эта мелкая фракция отдельно не выделяется, и рассматривается однокомпонентная модель осаждения. Более подробно процессы образования и распада хлопьев и влияние на эти процессы различных факторов описано в специальной литературе, в частности [12, 13].

Большинство указанных моделей базируется на известных функциях, которые устанавливают зависимость между скоростью стесненного осаждения и концентрацией взвешенных веществ (хлопьев ила) в данной точке и которые в общем случае имеют вид

$$V_S = V_{S0} f(n, X). \quad (1)$$

В работах [8, 9] проанализированы значения функции  $f(n, X)$  вида  $e^{-nX}$ ,  $e^{-nX}/X$ ,  $(1 - nX)^3/X$ ,  $(1 - nX)^4/X$  и установлено, что при низких концентрациях  $X$ , что имеет место при осаждении ила, наиболее удовлетворительные результаты дает следующая зависимость для определения скорости осаждения:

$$V_S = V_{S0} e^{-nX}. \quad (2)$$

В некоторых работах [6, 7] с целью более детального изучения концентрации  $X_c$  на выходе из отстойника рассмотрены модели, в которых учитываются процессы осаждения с низкой концентрацией. В этом случае в работе [7] при использовании функции осаждения выделяются четыре зоны (рис. 1) и скорость осаждения в дальнейшем в общем виде описывается удвоенной экспоненциальной зависимостью

$$V_S = V_{S0} e^{-n_A(X-X_1)} - V_{S0} e^{-n_B(X-X_1)}, \quad (3)$$

которая справедлива для зон II и III, где  $X_1$  – концентрация неосаждаемой фракции (зона I). Функция (3) в зоне III ограничивается максимальной скоростью осаждения  $V_{Smax}$  [7], при этом

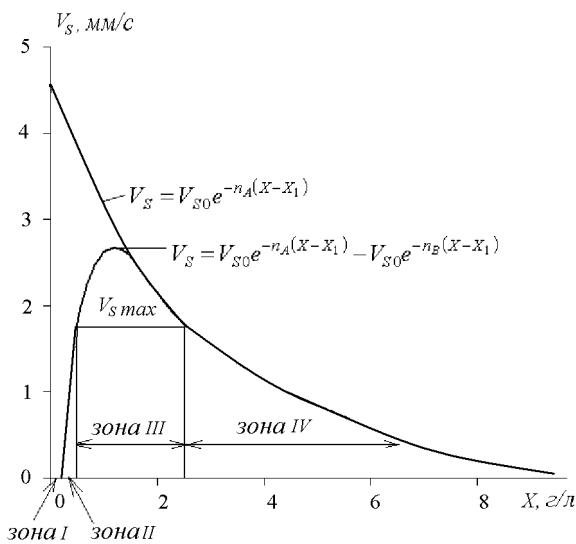


Рис. 1. Функція осаждення согласно роботи [7]

для скорости осаждения справедливо неравенство  $V_S < V_{Smax}$ . Зона IV описывается выражением  $V_{S0}e^{-n_A(X-X_1)}$  и соответствует классической теории осаждения. В зоне низких концентраций II второй член  $V_{S0}e^{-n_B(X-X_1)}$  становится значащим и его необходимо учитывать в расчетах. Доминирование того или иного экспоненциального члена в зависимости (3) зависит от параметра  $n_B$ , который обычно на порядок больше, чем параметр  $n_A$ . Таким образом, для реализации приведенной модели должны быть известны пять параметров  $V_{S0}$ ,  $V_{Smax}$ ,  $X_1$ ,  $n_A$ ,  $n_B$ , которые определяются опытным путем [7]. Полученные таким образом осредненные значения этих параметров приведены в табл. 1.

Табл.1. Значення исходних параметров в формулі (3)

$V_{S0}$ м/час	$V_{Smax}$ м/час	$n_B$	$n_A$	$X_1$ г/л
8,9	6,25	5,7	0,36	$1,23 \cdot 10^{-3}$

Однако проведенный нами анализ показал, что в большинстве практических случаев в качестве расчетной можно принимать зависимость (2), в которой начальная скорость осаждения  $V_{0S}$  и параметр  $n$  принимаются индивидуально для каждого осадка (ила) и в основном зависят от величины илового индекса  $I$  в установке. Как известно [12, 13], иловый индекс характеризует седиментационные свойства ила. В работах [1, 2, 7] предложен ряд опытных зависимостей  $V_{0S} = f(I)$  и  $n = f(I)$ , однако для расчетов многие авторы используют

зависимости

$$V_{S0} = 17.4e^{-0.0113I} + 3.931 \quad (\text{м/час}), \quad (4)$$

$$n = 1.043 - 0.938e^{-0.00581I} \quad (\text{л/г}), \quad (5)$$

в которых иловый индекс  $I$  имеет размерность  $\text{см}^3/\text{г}$  и принимается в среднем  $I = 80 \dots 150 \text{ см}^3/\text{г}$  в зависимости от вида сточных вод.

Считается, что концентрация взвешенных частиц, которые не успевают осесть за время работы отстойника, составляет в среднем  $X_c \leq 10 \text{ мг/л}$ . В работе [4] к таким частицам относят микрохлопья ила, которые не осадут из-за денитрификации, гидравлической нагрузки и характеристики ила (высоких значений  $I$ ). На основании проведенного анализа опытных данных для определения концентрации мелких частиц  $X_c$ , которые поступают с потоком, но не осадут в отстойнике, предлагается зависимость

$$X_c = X_{min} + X_{NO_3} \frac{X_{NO_3}}{K_{NO_3} + X_{NO_3}} + \quad (6)$$

$$+ X_h \frac{X_e I \frac{Q_a}{A}}{K_h + X_e I \frac{Q_a}{A}}.$$

Обозначения приведенных в формуле (6) параметров даны в работах [4, 16].

Для инженерных расчетов вертикальных отстойников в случае бытовых сточных вод рекомендуется принимать значения согласно табл. 2.

Табл.2. Значення исходних параметров согласно роботи [2]

$X_{min}$ г/л	$X_{NO_3}$ г/л	$K_{NO_3}$ г/л	$X_h$ г/л
$5 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$
$K_h$ $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{сутки})$	$I$ $\text{см}^3/\text{г}$	$V_{S0}$ м/час	$n$ л/час
1,5	150	5,71	0,37

В работе [6] для определения концентрации первичных частиц (микрохлопьев)  $X_c$ , которые поступают в отстойник и не успевают осесть, предлагается зависимость

$$X_c = X_{min} + a_1 \left( \frac{Q_c}{A} \right)^{a_2}, \quad (7)$$

в которой для бытовых сточных вод принимается  $X_{min} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ г/л}$ ,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 3$ .

## 2. ПОСТРОЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОСАЖДЕНИЯ ВО ВТОРИЧНОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ

Для изучения и анализа процессов, которые происходят в вертикальном отстойнике, работающем в системе сооружений биологической очистки, для дальнейшей реализации на основании проведенного анализа предлагается приведенная ниже более совершенная гидродинамическая одномерная модель осаждения. Применительно к вторичным вертикальным отстойникам вне зависимости от принятой технологической схемы подвода (впуска) сточной жидкости в отстойник в условиях проточного режима его работы обычно выделяют три характерные зоны, которые имеют свои особенности в протекании процессов осаждения. С учетом этих особенностей и наблюдаемых механизмов для каждой зоны в дифференциальной форме составляется уравнение материального баланса, описывающее изменение концентрации осаждающих взвешенных частиц в пределах этой зоны. Так, применительно к наиболее распространенной схеме вертикального отстойника, приведенного на рис. 2, общая математическая модель изменения концентрации макрохлопьев  $X$  по высоте отстойника с достаточным физическим обоснованием можно описать следующей системой уравнений:

а) в зоне осветления и осаждения ( $h_b - \frac{1}{2}h \geq z > 0$ )

$$\frac{\partial X}{\partial t} = V_b \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{\partial(V_S X)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial X}{\partial z} \right) + R(X), \quad (8)$$

б) в зоне питания (разбавления) ( $h_b + \frac{1}{2}h \geq z \geq h_b - \frac{1}{2}h$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} = & (V_b + V_H) \frac{X_e}{h} - (V_b - V_H) \frac{\partial X}{\partial z} - \\ & - \frac{\partial(V_S X)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial X}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

в) в зоне стесненного осаждения и уплотнения ( $H > z \geq h_b + \frac{1}{2}h$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} = & -V_H \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{\partial(V_S X)}{\partial z} + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial X}{\partial z} \right) + R(X). \end{aligned} \quad (10)$$

В уравнениях (8)–(10) и на рис. 2 имеем  $V_b = Q_c/A$ ,  $V_H = (Q_r + Q_w)/A$ ,  $V_b + V_H = Q_a/A$  –

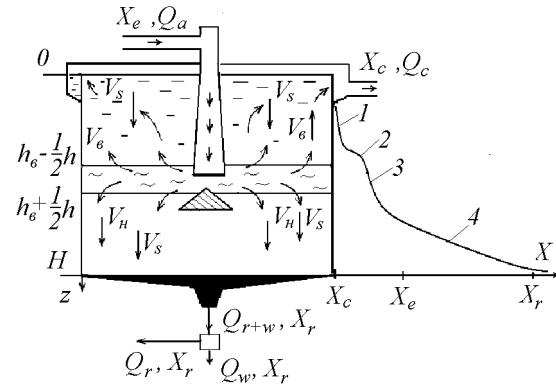


Рис. 2. Схема вторичного вертикального отстойника:  
1 – зона осветления;  
2 – зона стесненного осаждения;  
3 – зона разбавления;  
4 – зона стесненного осаждения и уплотнения

соответственно средние скорости гидравлического потока в верхней и нижней зонах отстойника;  $Q_c = Q(1 - w)$ ,  $Q_a = Q(1 + r)$ ,  $Q_{r+w} = Q(r + w)$ ,  $Q_r = Qr$ ,  $Q_w = Qw$ ,  $Q$  – расход сточной жидкости, которая поступает на очистные сооружения;  $A$  – рабочая площадь отстойника;  $r$  и  $w$  – соответственно коэффициенты рециркуляции и избыточного ила;  $D$  – коэффициент конвективной диффузии, который учитывает турбулентную диффузию и дисперсию;  $R(X)$  – член, который учитывает дополнительные процессы, происходящие в отстойнике и влияющие на баланс концентрации  $X$  (биореакции, флокуляция и агломерация частиц и хлопьев за счет турбулентности и др.).

Как показал проведенный нами, а также в работах [18, 19] математический анализ, неучет в приведенных уравнениях диффузионного члена не позволяет получить нужное общее решение этой задачи.

Общая модель реализуется численными методами при следующих начальных и граничных условиях:

начальное условие

$$t = 0, \quad z > 0 \quad X = X_0; \quad (11)$$

на верхней границе

$$z = 0, \quad t > 0 \quad V_b X - V_S X + D \frac{\partial X}{\partial z} = 0; \quad (12)$$

на нижней границе

$$z = H, \quad t > 0 \quad -V_H X - V_S X + D \frac{\partial X}{\partial z} = 0; \quad (13)$$

на границах  $z = h_b - \frac{1}{2}h$  и  $z = h_b + \frac{1}{2}h$  непосредственно реализуются известные условия сопряжения, выражющие непрерывность изменения кон-

центраций и баланса потоков частиц через эти границы.

Запишем краевую задачу (8)–(13) в безразмерных единицах

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{X}{X_e}, \quad \bar{z} = \frac{z}{H}, \quad \bar{t} = \frac{V_{S0}}{H} t, \quad \bar{V}_S = \frac{V_S}{V_{S0}}, \\ \bar{V}_b &= \frac{V_b}{V_{S0}}, \quad \bar{V}_H = \frac{V_H}{V_{S0}}, \quad \bar{h}_b = \frac{h_b}{H}, \quad \bar{h} = \frac{h}{H}, \quad (14) \\ \bar{n} &= n X_e, \quad \bar{X}_0 = \frac{X_0}{X_e}, \quad \bar{D} = \frac{D}{V_{S0} H}.\end{aligned}$$

В результате очевидных преобразований при  $R(X) = 0$  получаем:

в верхней зоне ( $0 \leq \bar{z} \leq \bar{h}_b - \frac{1}{2}\bar{h}$ )

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( \bar{V}_b \bar{X} - \bar{V}_S \bar{X} + \bar{D} \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{z}} \right) \quad (15)$$

$$\text{при } \left( \bar{V}_b \bar{X} - \bar{V}_S \bar{X} + \bar{D} \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{z}} \right) |_{\bar{z}=0} = 0; \quad (16)$$

в нижней зоне ( $\bar{h}_b + \frac{1}{2}\bar{h} \leq \bar{z} \leq 1$ )

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( - \bar{V}_H \bar{X} - \bar{V}_S \bar{X} + \bar{D} \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{z}} \right) \quad (17)$$

$$\text{при } \left( - \bar{V}_H \bar{X} - \bar{V}_S \bar{X} + \bar{D} \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{z}} \right) |_{\bar{z}=1} = 0; \quad (18)$$

в средней зоне ( $\bar{h}_b - \frac{1}{2}\bar{h} \leq \bar{z} \leq \bar{h}_b + \frac{1}{2}\bar{h}$ )

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{t}} &= (\bar{V}_b + \bar{V}_H) \frac{\bar{X}_e}{\bar{h}} - \\ &- \frac{\partial}{\partial \bar{z}} (\bar{V}_b + \bar{V}_H + \bar{V}_S \bar{X} + \bar{D} \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{z}}).\end{aligned} \quad (19)$$

В дальнейшем для простоты изложения черточки над переменными опускаем, однако помним, что связь с реальными переменными осуществляется через приведенные выше соотношения (14). Численное решение производится известным методом Коши-Эйлера с итерациями.

В качестве примера на рис. 3, 4 приведены некоторые результаты численного эксперимента. Так, на рис. 3 приведены характерные кривые изменения во времени  $\bar{t}$  концентрации  $\bar{X}$  по высоте отстойника  $\bar{z}$ , полученные при следующих значениях безразмерных параметров:  $\bar{X}_0 = 0.1$ ,  $\bar{n} = 1.2$ ,  $\bar{D} = 0.025$ ,  $\bar{V}_b = \bar{V}_H = 0.08$ ,  $\bar{h} = 0.2$ , а на рис. 4 соответственно при  $\bar{X}_0 = 0.1$ ,  $\bar{n} = 1.0$ ,  $\bar{D} = 0.05$ ,  $\bar{V}_b = \bar{V}_H = 0.05$ ,  $\bar{h} = 0.2$ . Как видно из этих рисунков, по высоте отстойника четко прослеживается формирование трех отмеченных зон осаждения, причем формирование средней зоны разбавления стабилизируется на конец расчетного периода отстаивания, который при достаточно удачном выборе значений исходных параметров наступает где-то при  $\bar{t} = 4 - 5$ .

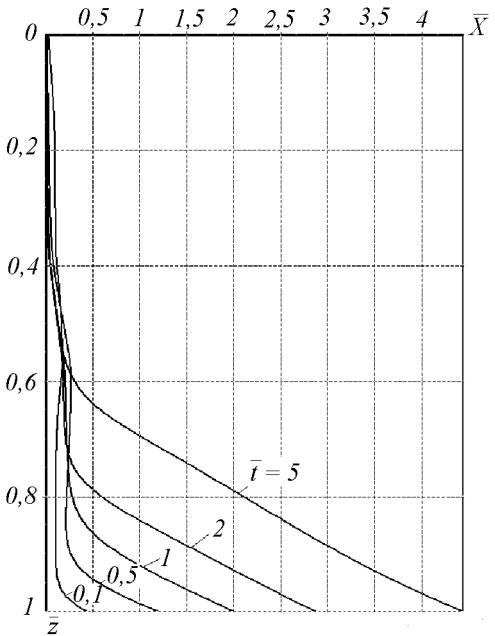


Рис. 3. Изменение концентрации  $\bar{X}$  по высоте отстойника  $\bar{z}$  и во времени  $\bar{t}$

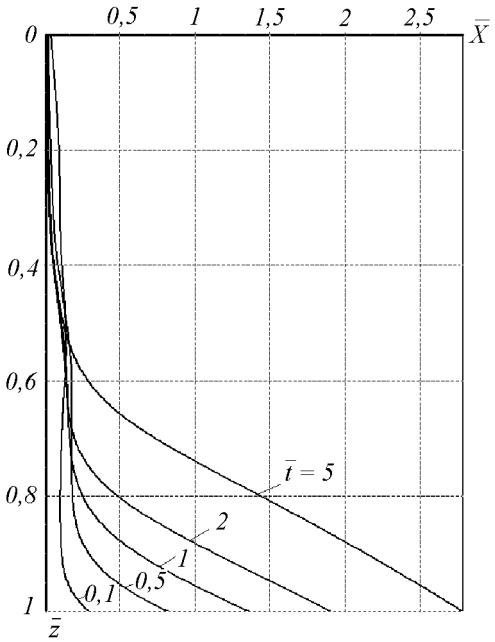


Рис. 4. Изменение концентрации  $\bar{X}$  по высоте отстойника  $\bar{z}$  и во времени  $\bar{t}$

В этих условиях, как показал предварительный анализ результатов численного эксперимента, для принятых типовых размеров вертикальных вторичных отстойников можно рассчитать и обосновать необходимые технологические характеристики отстойника, а именно, концентрацию в освещен-

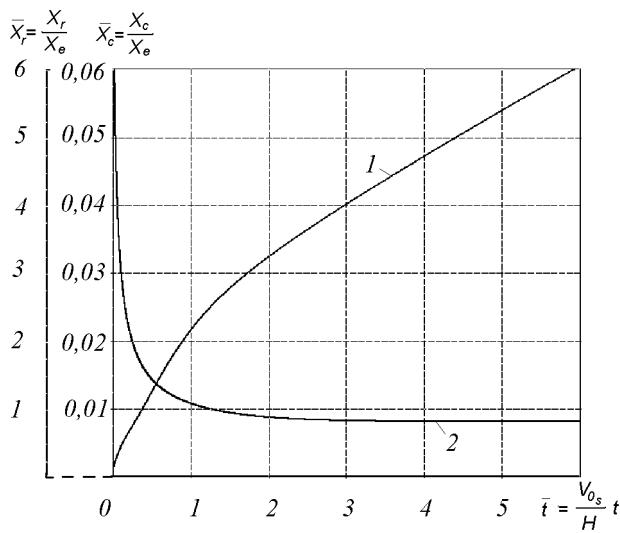


Рис. 5. Графики изменения концентраций  $\bar{X}_r$  (кривая 1) и  $\bar{X}_c$  (кривая 2) в зависимости от времени  $\bar{t}$  для случая  $\bar{D} = 0,025$ ,  $\bar{U}_c = \bar{U}_H = 0,10$ ,  $\bar{n} = 1,2$

тленной воде  $X_c$  и концентрацию возвратного ила  $X_r$ . Для этого на основании численных расчетов построены расчетные графики для определения концентраций  $X_c$  и  $X_r$  в зависимости от принятых основных исходных параметров, один из которых в качестве примера приведен на рис. 5. Методика расчета позволяет также при заданных концентрациях  $X_c$  и  $X_r$  определить основные конструктивные характеристики отстойника (площадь поперечного сечения  $A$ , высоту  $H$  отстойника и продолжительность пребывания ила в отстойнике  $t$ ), обеспечивающие нормальные условия его работы.

Также установлено, что при  $\bar{D} > 0,005$ , т.е. в большинстве практических случаев, вполне можно ограничиться принятием скорости осаждения согласно зависимости (2).

Приведенная модель реализуется совместно с известными моделями активного ила в системах биологической очистки. Для этого прежде всего, если необходимо, компоненты, которые рассматриваются и измеряются в моделях активного ила (БПК или ХПК), следует согласовать и связать с компонентами (взвешенными частицами), которые рассматриваются и измеряются в отстойниках [4, 5, 19].

1. Hartal L., Popel H.I. A dynamic secondary clarifier model including processes of sludge thickening // Wat.Sci.Tech.– 1992.– 25, 6.– P. 267–284.
2. Otterpohl R., Freund M. Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows // Wat.Sci.Tech.– 1992.– 26, 5-6.– P. 1391–1400.
3. Krebs P. Success and shortcomings of clarifiers modeling // Wat.Sci.Tech.– 1995.– 31, 2.– P. 181–191.
4. Dupont R., Henze M. Modeling of the secondary clarifiers combined with the activated sludge model 1 // Wat.Sci.Tech.– 1992.– 25, 6.– P. 285–300.
5. Krebs P. The hydraulics of final settling tanks // Wat.Sci.Tech.– 1991.– 23, 2.– P. 1037–1046.
6. Dupont R., Dahl C. A one-dimensional model for a secondary settling tank including density current and short-circuiting // Wat.Sci.Tech.– 1995.– 31, 2.– P. 215–224.
7. Takacs I., Patry G.G., Nolasso D. A dynamic model of the clarifiers-thickening process // Wat.Res.– 1991.– 25, 10.– P. 1263–1271.
8. Cho S.H., Colin F., Sardin M., Prost C. Settling velocity model of activated sludge // Wat.Res.– 1993.– 27, 7.– P. 1237–1242.
9. Cho S.H., Chang H.N., Prost C. Steady state analysis of the coupling aerator and secondary settling tank in activated sludge process // Wat.Res.– 1996.– 30, 11.– P. 2601–2608.
10. Giokas D.L., Kim Y., Paraskevas P.A., Paleologos E.K., Lekkas T.D. A simple empirical model for activated sludge thickening in secondary clarifiers // Wat.Res.– 2002.– 36, 13.– P. 3245–3252.
11. Roche N., Vaxelaire I., Prost C. A simple empirical model for hindered settling in activated sludge clarifiers // Wat.Environ.Res.– 1995.– 65, 5.– P. 775–780.
12. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод.– М.: АСВ, 2002.– 704 с.
13. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом.– М.: Наука, 1979.– 119 с.
14. Horan N.I. Biological Waste treatment systems.– Department of Civil Engineering University of Leeds: Leeds, England, 1990.– 309 p.
15. Ковальчук. Очистка сточных вод.– Рівне: ВАТ "Рівненська друкарня", 2002.– 622 с.
16. Олійник О.Я., Зябліков С.М., Степова Н.Г. До розрахунку вторинних відстійників // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідрравліки.– 2004.– N 3.– С. 44–55.
17. СНиП. 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения.– Госстрой СССР-М.: Стройиздат, 1985.– 73 с.
18. Dienl S., Jeppsson U. A model of the settler coupled to the biological reactor // Water Res.– 1998.– 32, N2.– P. 331–342.
19. Hamilton By I., Iain R., Antoniou P., Svoronos S.A., Koopman B. Modeling and pilot-scale experimental verification for pre-denitrification process // I.Envir. Engro.– 1992.– 118, 1.– P. 267–284.