



МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ФОРМУВАННЯ ЗВАЖЕНОГО ШАРУ ОСАДУ В МУЛОВІДДІЛЮВАЧІ

В. І. Нездоймінов, В. І. Зятіна, В. С. Рожков, В. І. Лесной

Донбаська національна академія будівництва і архітектури,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, 86123.

E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.ru

Отримана 22 лютого 2016; прийнята 22 квітня 2016.

Анотація. Наведено математичний опис процесу формування зваженого шару мінералізованого активного мулу у разі муловідділення. Виконано класифікацію основних зон зваженого шару в муловідділювачі зі зваженим шаром мінералізованого активного мулу. Введено безрозмірний коефіцієнт перерахунку висоти зваженого шару при різних значеннях пористості зваженого шару, введено поняття «уявної» пористості шару активного мулу, яка може бути визначена експериментально за непрямими параметрами і при підставленні у відомі залежності покаже адекватні результати розрахунків. Отримані залежності є теоретичною основою для наступних експериментальних досліджень з метою отримання напівемпіричних залежностей для висоти шару зваженого мулу, його пористості і допустимого навантаження на муловідділювач залежно від концентрації і характеристик активного мулу, що надходить. Отримані теоретичні положення можуть бути застосовані не тільки для мінералізованого активного мулу, але й для будь-якого осаду стічних вод (первинного, вторинного, збродженого тощо).

Ключові слова: муловідділення, зважений шар активного мулу, висота зваженого шару, пористість зваженого шару.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ ОСАДКА В ИЛОУДЕЛИТЕЛЕ

В. И. Нездойминов, В. И. Зятина, В. С. Рожков, В. И. Лесной

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

2, ул. Державина, г. Макеевка, 86123.

E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.ru

Получена 22 февраля 2016; принята 22 апреля 2016.

Аннотация. Приведено математическое описание процесса формирования взвешенного слоя минерализованного активного ила при илоотделении. Выполнена классификация основных зон взвешенного слоя в илоотделителе со взвешенным слоем минерализованного активного ила. Введен безразмерный коэффициент пересчета высоты взвешенного слоя при различных значениях пористости взвешенного слоя, введено понятие «мнимой» пористости слоя активного ила, которая может быть определена экспериментально по косвенным параметрам и при подстановке в известные зависимости покажет адекватные результаты расчетов. Полученные зависимости являются теоретической основой для последующих экспериментальных исследований с целью получения полуэмпирических зависимостей для высоты слоя взвешенного ила, его пористости и допустимой нагрузки на илоотделители в зависимости от концентрации и характеристик поступающего активного ила. Полученные теоретические положения могут быть

применены не только для минерализованного активного ила, но и для любого осадка сточных вод (первичного, вторичного, сброженного и т. д.).

Ключевые слова: илоотделение, взвешенный слой активного ила, высота взвешенного слоя, пористость взвешенного слоя.

THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE MAIN FACTORS INFLUENCING ON THE FORMATION OF SUSPENDED SEDIMENT LAYER IN DESILTER

Viktor Nezdoyminov, Vitaly Zyatina, Vitaly Rozhkov, Vyacheslav Lesnoy

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makiyivka, 86123.

E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.ru

Received 22 February 2016; accepted 22 April 2016.

Abstract. The mathematical description of the process of forming of suspended mineralized bed of activated sludge at desilters has been given. A classification of the main zones of suspended layer desilter, having suspended bed of mineralized activated sludge has been done. We introduced the dimensionless scaling factor weighted height layer for different values of porosity weighted layer, introduced the concept of «imaginary» layer of activated sludge porosity, which can be determined experimentally by indirect parameters and by substituting the known dependence show adequate results of calculations. Obtained dependences are the theoretical basis for the subsequent experimental studies to obtain a semi-empirical relationships for floating sludge bed height, its porosity and carrying capacity of the desilters depending on the concentration and characteristics of the activated sludge inlet. The theoretical position can be applied not only to the active mineralized sludge, but for any of sewage sludge (primary, secondary, fermented, etc.).

Keywords: desilting, weighted layer of activated sludge, the height of the weighted layer, the porosity of suspended layer.

Введение

Осадки станций биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод населенных мест образуются в значительных количествах. Суммарный объем этих осадков составляет 0,6–1,0 % общего объема очищаемых сточных вод при соотношении осадков первичных отстойников к избыточному активному илу (для городских сточных вод) 1:(0,8–2,0) по объему и 1:(0,1–1,0) по сухой массе [1].

При отсутствии обработки осадки представляют собой большой источник загрязнения окружающей среды. Но даже при условии их своевременной систематической обработки они накапливаются на территории очистной станции.

На сегодняшний день наибольшее распространение получил биологический метод обра-

ботки осадков, в результате которого осадок подвергается стабилизации в аэробных или в анаэробных условиях [2]. Длительная (несколько суток) аэробная аэрация избыточного активного ила либо в смеси с сырым осадком приводит к улучшению основных свойств осадка, повышается устойчивость осадка к загниванию и улучшается влагоотдача. Иной метод обработки осадков – анаэробный, получивший большое распространение в Европе из-за возможности получения альтернативных источников энергии. В Украине метод анаэробной обработки осадков, на данный момент, на низком уровне развития из-за высокой стоимости и сложности технологических процессов.

При аэробной стабилизации микроорганизмы первоначально окисляют доступные раство-

ренные в воде органические загрязнения, а затем происходит самоокисление бактериальных клеток ила. Вследствие этого из бактериальных клеток выделяются органические компоненты распада, которые впоследствии являются доступным эндогенным субстратом для других бактерий [3, 4].

Для избыточного активного ила максимальный распад беззольной части принимается 20–40 % в соответствии со СНиП 2.04.03.85. Время обработки для избыточного активного ила 2...5 суток, для смеси сырого осадка и уплотненного активного ила – 8...12 суток.

В минерализаторе со встроенным илоотделителем достигнута 90 % степень распада беззольной части осадка [5]. В илоотделителе со взвешенным слоем происходит фракционное разделение активного ила. Мелкодисперсный ил с повышенной зольностью потоком жидкости выносится из сооружения вверх, а крупнодисперсный ил уплотняется и оседает в нижнюю часть, откуда постоянно возвращается в минерализатор. Такое разделение позволяет в минерализаторе поддерживать высокий возраст ила, ослабить процессы денитрификации в илоотделителе, которые негативно влияют на формирование взвешенного слоя. Концентрация взвешенных веществ в осветленной иловой воде после илоотделителя не превышает 400 мг/дм³, с зольностью 50 %.

Однако на сегодняшний день отсутствуют теоретические основы и методы расчета формирования взвешенного слоя в илоотделителе для высокоминерализованного активного ила.

Основная часть

Целью данной работы является математическое описание процессов формирования взвешенного слоя осадка в илоотделителе [10, 11, 12].

К основным факторам, влияющим на формирование взвешенного слоя осадка, относятся: высота взвешенного слоя, скорость стесненного осаждения флоккул ила; пористость во взвешенном слое осадка, иловый индекс активного ила и др.

Процессы, проходящие в осветлителе со взвешенным слоем осадка, для отделения минерализованного активного ила от жидкости описываются законами стесненного осаждения. Кон-

струкция илоотделителя условно разделена по высоте на три основных зоны, к которым применимы различные гидродинамические зависимости и режимы движения (рис. 1).

В верхней зоне 1 при фильтрации воды снизу вверх в неподвижном слое, где теоретически сила тяжести шарообразной твердой частицы ила G равна силе сопротивления стесненному осаждению R (рис. 2).

В средней зоне 2 происходит прямой выход смеси в большой объем из маленького отверстия трубопровода подачи минерализованного активного ила на илоотделение, в котором происходит распределение подаваемой смеси и успокоение потока жидкости.

Нижняя зона 3 отводит избыточное количество активного ила под действием сил гравитации, осаждая и уплотняя его.

В верхней части илоотделителя со взвешенным слоем активного ила находится защитный слой осветленной воды для исключения выноса активного ила со взвешенного слоя.

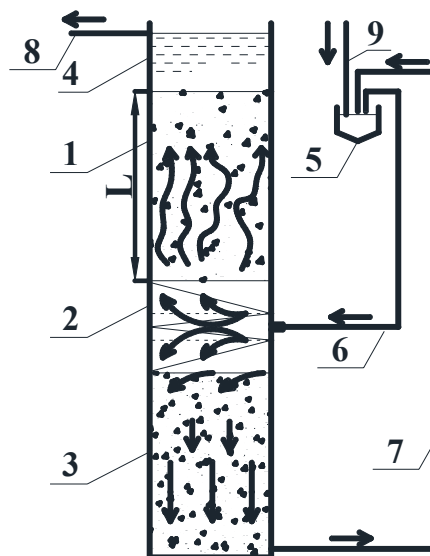


Рисунок 1. Схема разделения иловой смеси во взвешенном слое: 1 – зона взвешенного слоя минерализованного активного ила; 2 – зона ввода и распределения потоков в илоотделителе; 3 – зона осаждения и отвода минерализованного активного ила; 4 – защитный слой илоотделителя; 5 – сооружение минерализации активного ила; 6 – подача активного ила на минерализацию; 7 – рециркуляция активного ила; 8 – отвод осветленной воды перед аэротенками; 9 – подача активного ила на минерализацию.

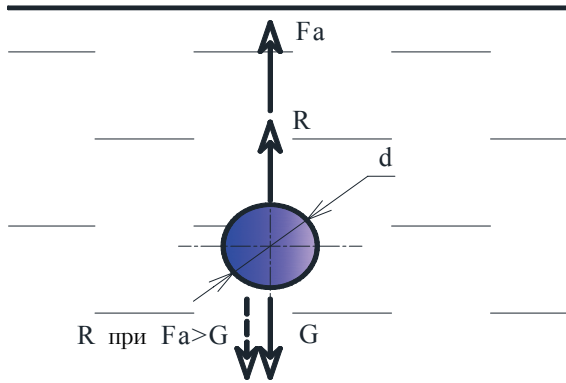


Рисунок 2. Схема действия основных сил при свободном движении частицы: d – условный диаметр флоккулы ила; F_a – сила Архимеда.

Согласно известным законам движения жидкости в слое взвешенного осадка [6, 7, 8, 13–16], систему необходимо рассматривать как гетерофазную. Взвешенные флоккулы активного ила находятся в постоянном движении.

Основное уравнение гетерофазной системы – это уравнение падения гидродинамического давления во взвешенном слое, которое равно массе в жидкости этого слоя с единичной площадью основания:

$$P = (\rho_2 - \rho_1)g(1-m)L, \quad (1)$$

где P – потери гидродинамического давления слоя, Па;

ρ_1 и ρ_2 – соответственно плотность частиц и плотность жидкости, кг/м³;

m – пористость слоя, определяемая как отношение объема пустот во взвешенном слое к общему его объему;

L – высота взвешенного слоя, м.

По Д. М. Минцу, движение воды через взвешенный слой в потоке слоя флоккул ила рассматривается как движение через пористую зернистую среду, закономерности которой устанавливаются в виде функциональной зависимости между безразмерными числами: коэффициентом сопротивления ψ и числом Рейнольдса Re .

Падение гидродинамического давления во взвешенном слое равно массе в жидкости этого слоя с единичной площадью основания.

Исследования Д. М. Минца и С. А. Шуберта показали, что зависимость между коэффициентом сопротивления и числом Рейнольдса выражается соответствующей зависимостью:

$$\beta = \frac{v}{u}, \quad (2)$$

$$\psi Re = \psi_{np} Re + \varepsilon. \quad (3)$$

Поэтому введением в уравнение (3) коэффициента β , выраженного уравнением (2) и отношению скорости восходящего потока жидкости v (или скорости стесненного осаждения) к скорости свободного осаждения u (или к гидравлической крупности флоккул активного ила), получим зависимость (4).

Данная зависимость имеет линейный вид и является справедливой для взвешенных слоев любой крупности флоккул независимо от материала. Варьируются лишь параметры уравнения (3): тангенс угла наклона прямой ψ_{np} и отрезок ε , отсекаемый прямой на оси ординат:

$$\psi = \psi_3 \frac{m^2}{\chi \beta^2}; Re = Re_3 \frac{\beta}{6(1-m)}. \quad (4)$$

Выражение (4) можно преобразовать следующим образом:

$$\psi_3 \frac{m^3}{\pi \beta^2} = \frac{6\varepsilon(1-m)}{\beta Re_3} + \psi_{np}. \quad (5)$$

Возрастание скорости восходящего потока v , когда она приближается к скорости свободного осаждения, делает долю свободного объема взвешенного слоя приближающейся к единице и соответственно объемная концентрация зерен в слое C_0 приближается к нулю. При $v = u$, ($\beta = 1$, $m = 1$; $1 - m = 0$) из равенства (5) получаем $\psi_{np} = \psi_3 / \pi$. Отсюда видно, что тангенс угла наклона прямых, уравнения которых представлены выражением (3), выражается через коэффициент сопротивления свободно падающей частицы и может быть вычислен по экспериментальным данным зависимости $\psi_3 = f(Re_3)$. Решая уравнение (5) относительно P , получим:

$$\beta = \varepsilon' (1-m) + ((\varepsilon' (1-m))^2 + m^3)^{0.5}, \quad (6)$$

где ε' – безразмерная гидродинамическая характеристика частиц, которая сохраняет постоянное значение (зависящее только от формы частиц) при малых числах $Re_3 < 1$, т. е. при ламинарном режиме свободного осаждения и при очень больших числах Re_3 , соответствующих турбулентному режиму свободного осаждения. Поэтому для мелких частиц, так

же как и для крупных, отношение скорости стесненного осаждения к скорости свободного осаждения зависит только от их концентрации в слое и не зависит от их размера. Однако размер частиц существенно влияет в переходной области (от ламинарного к турбулентному режиму) обтекания, где значение ε' меняется с изменением крупности частиц. Вследствие равенства сил G и R скорость стесненного осаждения частицы может быть найдена из выражения расчета скорости осаждения твердых частиц в стесненных условиях двухфазной смеси [9]:

$$v = \frac{d_s^2 \cdot m \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2)}{18 \cdot \rho \cdot \mu_m \cdot a_f}, \quad (7)$$

где d_s – эквивалентный диаметр частиц, имеющих отличную от шара форму, но равный ему объем, м;

m – пористость взвешенного слоя;

g – ускорение свободного падения, см/с²;

ρ_1 и ρ_2 – соответственно плотность частицы и воды, кг/м³;

μ_m – молярная вязкость;

a_f – коэффициент формы частицы, $a_f \approx 1$.

Молярную вязкость μ_m гетерофазной системы можно определить:

$$\mu_m = \mu_o \left(1 + 2C_o \left(\frac{1 + C_o}{1 - C_o} \right)^2 \right), \quad (8)$$

где μ_m – молярная вязкость;

μ_o – динамическая вязкость жидкого компонента гетерофазной системы, м²/с;

C_o – объемная концентрация твердой фазы в системе, %.

Таким образом, для расчета стесненного осаждения необходимо знать две величины, характеризующие осаждающиеся частицы: их гидравлическую крупность и гидродинамическую характеристику ε' . Когда эти параметры известны, можно рассчитать скорость стесненного осаждения или скорость восходящего потока при любой концентрации взвешенного слоя или осаждающихся частиц.

В случае осаждения частиц, для которых заранее не известны их гидравлическая крупность и гидродинамическая характеристика, эти величины определяют опытным путем. Методика их экспериментального определения основана на использовании линейной зависимости (3) – минимально по двум значениям скорости вос-

ходящего потока и соответствующих им двум значениям объемной концентрации взвешенного слоя C_v . После подстановки в уравнение (3) выражения (4) $\psi_{np} = \psi_3 / \pi$ и деления правой и левой частей уравнения на постоянные множители получим:

$$\frac{m^3}{v(1-m)} = \frac{1}{u^2} \frac{v}{1-m} + \frac{2\varepsilon'}{u}. \quad (9)$$

Фиксируя на графике по оси ординат экспериментальные значения чисел $y = m^3 / (v(1-m))$ и по оси абсцисс $\chi = v / (1-m)$, получим прямую линию, тангенс угла наклона которой равен $1/u^2$, а отрезок, отсекаемый на оси ординат, $2\varepsilon' / u$. Следовательно, из опыта по стесненному осаждению массы частиц можно определить среднюю скорость их свободного осаждения u и гидродинамическую характеристику частиц ε' .

Данный метод определения гидравлической крупности частиц и их гидродинамической характеристики имеет важное значение для случаев, когда частицы имеют неопределенную форму и размер и когда изучить закономерности их свободного осаждения в виде зависимости $\psi = f(Re)$ невозможно. При рассмотрении стесненного осаждения хлопьев минерализованного активно-го или имеет место именно такой случай.

Пористость взвешенного слоя при работе илоотделителя колеблется в зависимости от ряда параметров и имеет свойство постоянно меняться. Поэтому пористость взвешенного слоя можно считать условным понятием, именуемым мнимой пористостью.

Мнимую пористость взвешенного слоя в конкретных начальных условиях можно рассчитать из формулы:

$$m = 1 - \frac{C_o}{\rho_1}, \quad (10)$$

где C_o – концентрация взвешенных веществ подаваемых на обработку во взвешенный слой, г/м³;

ρ_1 – расчетная плотность частиц взвесей, в данных условиях, кг/м³.

Поэтому на основании ранее полученных зависимостей можно рассчитать координаты точек осей абсцисс и ординат, предварительно построив график зависимости средней скорости свободного осаждения частиц u и гидродинамической характеристики частиц ε' , по которым и определяется скорость свободного осаждения частиц u .

Согласно принятому утверждению, взвешенный слой корректно работает только в области «равновесной» потери напора, которая представляет сбалансированное возрастание потерь напора к увеличению высоты слоя, что действительно лишь в пределах существования взвешенного слоя, но не корректно в момент его формирования либо же размыва. Поэтому можно сделать предположение о том, что при приравнивании составных частей тождества (1) для различных значений концентрации взвешенных веществ они будут равными.

Тогда, зная коэффициент отношения скорости восходящего потока жидкости v (или скорости стесненного осаждения) к скорости свободного осаждения u (или к гидравлической крупности зерен), применив формулу (4), можно определить v , м/с.

Утверждение о тождестве гидродинамических давлений позволяет установить, что потери гидростатического давления на всем протяжении существования взвешенного слоя равномерно распределяются и согласно (1) зависят от расчетной пористости m и высоты взвешенного слоя L , м. Поэтому справедливо будет приравнять правые части уравнения (1), после чего получим безразмерный коэффициент пересчета высоты взвешенного слоя при различных значениях пористости:

$$\delta = \frac{(1 - m_1)L_1}{(1 - m_2)L_2}. \quad (11)$$

Согласно данному коэффициенту пересчета можно найти предельную высоту взвешенного слоя для средней концентрации взвешенных веществ и скорости свободного осаждения частицы этой же концентрации. Предельная высота взвешенного слоя определяется из пропорции в

зависимости от исходных параметров экспериментального слоя.

Начальные показатели мнимой пористости и высоты взвешенного слоя могут быть определены только опытным путем и не остаются постоянными. Их изменения связаны с колебаниями качества исходной воды и с режимом обработки перед подачей в илоотделитель и т. д.

Данная скорость свободного осаждения частицы активного ила u является максимально допустимой скоростью восходящего потока. Считается корректной именно для конкретной смеси подаваемой в илоотделитель, т. е. смеси с одинаковыми входными параметрами, такими как концентрация взвешенных веществ, начальная пористость слоя и т. д. Превышение данной скорости в восходящем потоке жидкости будет приводить к расширению слоя взвешенного осадка выше критического уровня, а соответственно к его размыву.

Заключение

В данной работе выполнено математическое описание процессов формирования взвешенного слоя осадка в илоотделителе. А именно установлены основные факторы, влияющие на формирование и работу взвешенного слоя.

Введен безразмерный коэффициент пересчета высоты взвешенного слоя при различных значениях. Данное значение высоты взвешенного слоя является максимальным в зоне тождества гидростатических давлений, дальнейшее увеличение параметров приведет к смене характеристик движения слоя и неконтролируемому его размыву.

Перспективой является практическое подтверждение приведенного коэффициента в лабораторных и промышленных условиях.

Литература

1. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения [Текст] / С. В. Яковлев, И. В. Скирдов, В. Н. Швецов [и др.]; Под ред. С. В. Яковлева. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.
2. Chen, Ying Ming. Solid Distribution in Clarifier Blanket: Numerical Modeling and Experimental Measurement [Электронный ресурс] / Ying Ming Chen, Li Qing Zhang // *Advanced Materials Research*

References

1. Yakovlev, S. V.; Skirdov, I. V.; Shvetsov, V. N. et al.; Edited by Yakovlev, S. V. *Biological purification of industrial sewage: process, devices and constructions*. Moscow: Stroizdat, 1985. 208 p. (in Russian)
2. Chen, Ying Ming; Zhang, Li Qing. Solid Distribution in Clarifier Blanket: Numerical Modeling and Experimental Measurement. In: *Advanced Materials Research*, 2013, Vol. 663, pp. 729–735. Accessed at: www.scientific.net/AMR.663.729.

- arch. 2013. Vol. 663. P. 729–735. – Режим доступа : www.scientific.net/AMR.663.729. – Загл. с экрана.
3. Яковлев, С. В. Биохимические процессы в очистке сточных вод [Текст] / С. В. Яковлев, Т. А. Карюхина. – М. : Стройиздат, 1980. – 200 с.
 4. Ковальчук, В. А. Очистка стічних вод [Текст] / В. А. Ковальчук. – Рівне : ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. – 622 с.
 5. Пат. 94152 України, МПК C02F 11/00, C02F 11/02, C02F 11/06, C02F 3/00. Спосіб обробки осадів міських стічних вод [Текст] / Чернишев В. М., Нездоймінов В. І., Кіжаєв В. Ф., Нудненко А. М.; власник Донбаська національна академія будівництва і архітектури. – № а200909239; заявл. 08.09.2009; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7. – 2 с.
 6. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдооживления [Текст] / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша; Под ред. Н. И. Гельперина. – М. : Химия, 1967. – 664 с.
 7. Романков, П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии [Текст] / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – 3-е изд., пер. – Л. : Химия, 1982. – 288 с.
 8. Грабовский, П. А. Математическая модель фильтрования воды через зернистый слой с убывающей скоростью [Электронный ресурс] / П. А. Грабовский, Н. А. Гуринчик // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К. : Техніка, 2007. – Вып. 74. – С. 230–237. – (Серия «Технические науки и архитектура»). – Режим доступа : http://eprints.kname.edu.ua/4103/1/230-237_%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%91%D0%9E%D0%92%D0%A1%D0%9A%D0%98%D0%99_%D0%9F.%D0%90.pdf.
 9. Фрог, Б. Н. Водоподготовка [Текст] : Учебное пособие для вузов / Б. Н. Фрог, А. П. Левченко. – М. : Издательство МГУ, 1996. – 680 с.
 10. Research of Processes of a Deep Aerobic Mineralization of Activated Sludge [Текст] / V. Nezdoinov, V. Ziatina, V. Rozhkov, D. Nemova // Procedia Engineering. 2015. Volume 117. P. 1022–1027.
 11. Чернышев, В. Н. Исследование илоотделения во взвешенном слое осадка в условиях повышенных концентраций активного ила [Текст] / В. Н. Чернышев, В. И. Зятин // Науковий вісник будівництва. Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2014. № 75. С. 95–100.
 12. Пат. 101528 Україна, МПК C02F 11/02. Спосіб муловідділення для мінералізованого активного мулу [Текст] / Зятин В. І., Дмитров П. О., Нездоймінов В. І., Голдін І. С., Чернишев В. М.; власники Зятин В. І., Дмитров П. О., Нездоймінов В. І., Голдін І. С., Чернишев В. М. – № u 2014 05525; заявл. 23.05.2014; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18. – 4 с.
 13. Чернова, З. В. Исследование некоторых закономерностей осветления воды в слое взвешенного осадка [Текст] : дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / З. В. Чернова. – М., 1960. – 168 с.
 3. Yakovlev, S. V.; Kariuhina, T. A. Biochemical process during sewage purification. Moscow: Stroiizdat, 1980. 200 p. (in Russian)
 4. Kovalchuk, V. A. Sewage purification. Rivne: VAT «Rivne printing», 2002. 622 p. (in Ukrainian)
 5. Pat. 94152 Ukraine, MPK C02F 11/00, C02F 11/02, C02F 11/06, C02F 3/00. Process for the treatment of sludges of municipal waste water / Chernyshev, V. M.; Nezdoinov, V. I.; Kizhaiev, V. F.; Nudnenko, A. M.; proprietor Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. No. a200909239; declaration 08.09.2009; published 11.04.2011, Bul. No. 7. 2 p. (in Ukrainian)
 6. Gelperin, N. I.; Ainshtein, V. G.; Kvasha, V. B.; Edited by Gelperin, N. I. Fundamental techniques of fluidization. Moscow: Chemistry, 1967. 664 p. (in Russian)
 7. Romankov, P. G.; Kurochkina, M. I. Hydraulic-mechanical process of industrial chemistry. The 3rd edition, revised. Leningrad: Chemistry, 1982. 288 p. (in Russian)
 8. Grabovskii, P. A.; Gurinchik, N. A. Mathematical model of water filtration through granular layer with decreasing speed. In: *Municipal services of cities*, 2007, Issue 74, pp. 230–237. Accessed at: http://eprints.kname.edu.ua/4103/1/230-237_%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%91%D0%9E%D0%92%D0%A1%D0%9A%D0%98%D0%99_%D0%9F.%D0%90.pdf. (in Russian)
 9. Frog, B. N.; Levchenko, A. P. Water conditioning: College-level text edition. Moscow: Publisher MSU, 1996. 680 p. (in Russian)
 10. Nezdoinov, V.; Ziatina, V.; Rozhkov, V.; Nemova, D. Research of Processes of a Deep Aerobic Mineralization of Activated Sludge. In: *Procedia Engineering*, 2015, Volume 117, pp. 1022–1027. (in Russian)
 11. Chernyshev, V. N.; Ziatina, V. I. Researches of desilting at sludge blanket under the conditions of elevated concentration of activated sludge. In: *Scientific mercury of construction*, 2014, No. 75, pp. 95–100. (in Russian)
 12. Pat. 101528 Ukraine, MPK C02F 11/02. Modeling technique of mineralized activated sludge. Ziatina, V. I.; Dmitrov, P. O.; Nezdoinov, V. I.; Goldin, I. S.; Chernishev, V. M. No. u 2014 05525; declaration 23.05.2014; published 25.09.2015, Bul. No. 18. 4 p. (in Ukrainian)
 13. Chernova, Z. V. Researches of some regularity of water clarification at the measured draft level: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Moscow, 1960. 168 p. (in Russian)
 14. Kurgae, E. F. Foundations of the theory of brightening agent design. Moscow: Gosstroizdat, 1962. 164 p. (in Russian)
 15. Zhang, Chun; Deng, Jie; Zhang, Wei. Dewatering and mineralization of sludge from secondary sedimentation tank in a constructed sludge drying reed bed. In: *Applied Mechanics and Materials*, 2012, Vols. 209–211,

14. Кургаев, Е. Ф. Основы теории расчета осветлителей [Текст] / Е. Ф. Кургаев. – М. : Госстройиздат, 1962. – 164 с.
15. Zhang, Chun. Dewatering and mineralization of sludge from secondary sedimentation tank in a constructed sludge drying reed bed [Электронный ресурс] / Chun Zhang, Jie Deng and Wei Zhang // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vols. 209–211. P. 1111–1115. – Режим доступа : www.scientific.net/AMM.209-211.1111. – Загл. с экрана.

Нездойминов Віктор Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: біологічна очистка стічних вод, моделювання гідродинамічних процесів.

Зятин Віталій Ілліч – асистент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: теорія зваженого шару в очищенні стічних вод, біологічні процеси очищення стічних вод.

Рожков Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: моделювання біохімічних процесів в очищенні стічних вод, системи оборотного водопостачання, очищення стічних вод від біогенних елементів.

Лесной В'ячеслав Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: моделювання гідродинамічних процесів, відновлення дебіту підземних водозаборів.

Нездойминов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: биологическая очистка сточных вод, моделирование гидродинамических процессов.

Зятин Виталий Ильич – ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: теория взвешенного слоя в очистке сточных вод, биологические процессы очистки сточных вод.

Рожков Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: моделирование биохимических процессов в очистке сточных вод, системы оборотного водоснабжения, очистка сточных вод от биогенных элементов.

Лесной Вячеслав Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: моделирование гидродинамических процессов, восстановление дебита подземных водозаборов.

Nezdoyminov Viktor – D.Sc. (Engineering), Professor; Head of Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological wastewater treatment, modeling of hydrodynamic processes.

Zyatina Vitaly – assistant, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the theory of weighted layer in wastewater treatment, biological wastewater treatment process.

Rozhkov Vitaly – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: modeling of biochemical processes in sewage treatment, water recycling system, waste water from nutrients.

Lesnoy Vyacheslav – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: modeling of hydrodynamic processes, restoration of flow rate of underground water intakes.