

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В ТОНКОСЛОЙНОМ ЭЛЕМЕНТЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Степан Эпоян, Александр Сыроватский, Светлана Бабенко

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40

E-mail: s.garbuz@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие описать движение суспензии в тонкослойном элементе усовершенствованной конструкции.

Ключевые слова: тонкослойный элемент, мелкодисперсные примеси, движение суспензии.

ВВЕДЕНИЕ

Рост требований к качеству питьевой воды, увеличение объемов сточных вод, которые направляются на очистку, недостаточная очистка поверхностно-ливневых вод усложняют проблему удаления одного из основных видов загрязнения природных и сточных вод, – нерастворимых примесей, или взвешенных веществ.

Основным методом выделения оседающих и всплывающих примесей из воды на водопроводных и канализационных станциях является отстаивание [2, 7, 8, 12, 19]. Однако, традиционные методы предварительного осветления воды, связанные с использованием отстойников, являются малоэффективными. Кроме того, они занимают значительные площади, требуют использования зачастую дорогостоящих реагентов и от эффективности их работы зависит работа последующих сооружений (фильтров, биоокислителей и др.).

В связи с этим актуальной является задача интенсификации работы подобных сооружений, которую можно решить с помощью использования тонкослойных отстойников [1, 5-7, 11]. В этих сооружениях за счет уменьшения высоты осадения примесей возможно значительно улучшить качество очищенной воды при минимальных эксплуатационных затратах.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

В зависимости от исходной воды концентрация взвешенных веществ в ней может колебаться от нескольких сотен мг/л (в основном поверхностные источники воды) до нескольких тысяч мг/л (поверхностно-ливневые и промышленные сточные воды). При этом сброс в водоемы недостаточно очищенного поверхностно-ливневого и промышленного стока является одним из основных источников ухудшения качества поверхностных вод. Поэтому их качественная очистка приводит к уменьшению нагрузки на водопроводные очистные сооружения.

Эффективность работы отстойных сооружений обусловлена концентрацией взвеси, гидравлической крупностью частиц, их гранулометрическим составом. Однако, учитывая непостоянство расхода, необходимость использования значительных площадей и дорогостоящих реагентов, а также то, что взвешенные вещества представлены мелкодисперсными частицами, то их извлечение в обычных отстойниках является недостаточно эффективным.

Использование тонкослойных отстойников позволяет сократить эффективное время отстаивания в 8-12 раз и повысить эффект задержания загрязнений до 80..90% [1, 7, 11, 18].

Тонкослойные отстойники – сооружения, в которых процесс отстаивания протекает в слое жидкости небольшой глубины (от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров). Вследствие уменьшения высоты слоя отстаиваемой жидкости в тонкослойных отстойниках сокращается продолжительность отстаивания. Это приводит к значительному увеличению производительности и уменьшению объема сооружения. Преимуществом данных отстойников является также более равномерное распределение потока, чем достигается повышение коэффициента использования их объема. [10, 13, 20].

Известны конструкции трубчатых и полочных тонкослойных отстойников непрерывного и циклического действия. В зависимости от направления движения отстаиваемой жидкости существуют прямоточные, противоточные, поперечные и комбинированные тонкослойные отстойники. В прямоточных - направление движения отстаиваемой жидкости совпадает с направлением выпадения осадка, в противоточных – жидкость движется в противоположном направлении. В поперечных – движение жидкости горизонтально, а тонкослойные элементы расположены под углом к горизонтальной плоскости [10].

Рассмотрим детальнее каждый из видов тонкослойных отстойников.

Отстойники циклического действия характеризуются небольшим наклоном секций (15° –

30°); накапливающийся в них осадок удаляется как, правило, промывкой обратным током осветленной жидкости. Эффективность работы таких отстойников значительно выше других конструкций тонкослойных модулей за счет небольшой высоты осаждения взвеси. Однако, вследствие интенсивного накопления осадка внутри секций, область использования данных отстойников несколько сужается. Поэтому их применяют для осветления вод от оседающих примесей, когда их концентрации имеют невысокие значения.

Отстойники непрерывного действия, работающие по прямоточной схеме, лучше всего использовать при очистке жидкостей, загрязненных преимущественно всплывающими примесями (например, нефтепродуктами) и сравнительно небольшим количеством тяжелых оседающих частиц. Угол наклона полок принимается от 35° до 50°, расстояние между ними 25-100мм. В таких отстойниках создаются благоприятные условия для удаления из них осадка, так как поток жидкости, совпадая с направлением сползания осадка, способствует его движению.

В отстойниках, работающих по противоточной схеме, угол наклона полок уже больше – 45°-60°, расстояние между полками также может увеличиваться из-за повышения вероятности заполнения осадком межполочного пространства. Поэтому данный тип тонкослойных отстойников целесообразно применять для очистки вод, в загрязнении которых преобладают оседающие грубодисперсные примеси невысокой концентрации и гидравлической крупности.

В отстойниках с поперечным наклоном секций, как правило, входное сечение перпендикулярно направлению движения потока, а сползание выпавшего осадка обеспечивается за счет наклона полок к горизонту под углом, принимаемым от 45° до 60°. Данные отстойники являются универсальными и пригодны для выделения как всплывающих, так и оседающих примесей.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе внимание уделено взвешенным крупно- и мелкодисперсным примесям, поэтому в дальнейшем рассматривается противоточная схема движения загрязненной воды и осадка, как наиболее подходящая для выделения такого вида загрязнений [16].

Большое влияние на эффект очистки в тонкослойном отстойнике оказывают конструктивные и технологические параметры осветляющего устройства. Под конструктивными параметрами подразумеваются размеры тонкослойного элемента: длина и высота, угол

наклона элемента к горизонтали и условия подвода и отвода осветляемой воды. Под технологическими – пропускная способность элемента, гидравлическая крупность, концентрация загрязнений, скорость движения исходной воды.

Целью данной работы является проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание таких конструктивных и технологических параметров тонкослойного элемента, при которых эффект очистки был бы максимальным при минимальных эксплуатационных затратах.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Описание движения суспензии по наклонной поверхности является достаточно сложной задачей, т.к. зависит от многих параметров. В последнее время все больше появилось способов численного моделирования движения различных материалов по наклонной поверхности, однако они являются или достаточно сложными, или учитывают не все факторы, влияющие как на движущуюся загрязненную воду, так и на сползающий осадок [14].

Как известно, эффект очистки воды зависит от высоты слоя отстаивания, которая, в свою очередь, зависит от угла наклона, поэтому чем меньше будет высота, тем выше должен быть эффект [20]. Однако, проведенные нами эксперименты показывают, что это не совсем соответствует действительности, в особенности при малых углах наклона осветляющего элемента.

Экспериментальные исследования проводили на лабораторной установке, представленной на рис. 1.

Эта установка состоит из центральной колонны (7), к которой присоединен трубчатый тонкослойный элемент (12). Он выполнен в виде стеклянной трубки диаметром $D = 40$ мм и длиной $L = 1.1$ м. Угол наклона стеклянной трубки меняли с помощью опорной стойки (9) и подвижного тройника (10).

Принцип работы лабораторной установки следующий: исходная загрязненная вода подается в установку из бака (1). Из него с помощью погружного насоса (2) вода по шлангу (3) под напором попадает в центральную колонну (7), при этом клапан (4) находится в открытом положении, а клапан (5) на шланге (6) – в закрытом. Шланг (6) служит для опорожнения установки. Для циркуляции воды предусмотрен перелив (8). Для сбора осадка в осветляющем элементе предназначено устройство (11).

Сбор очищенной воды (16) производится в мерном баке (14), который имеет перелив (15).

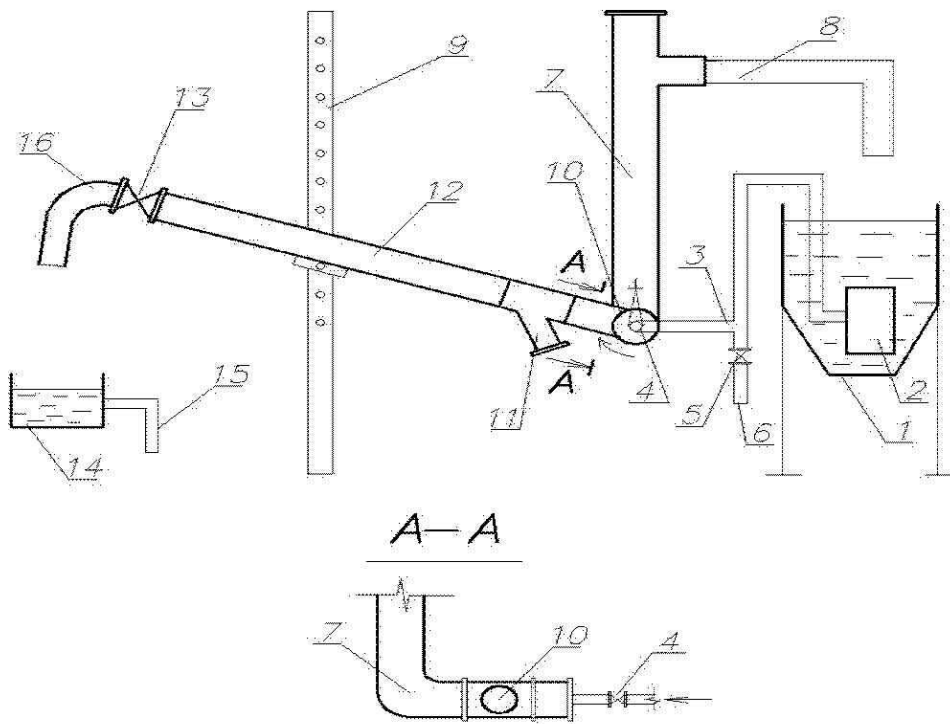


Рис. 1. Схема лабораторной установки
Fig. 3. Scheme of the experimental setup

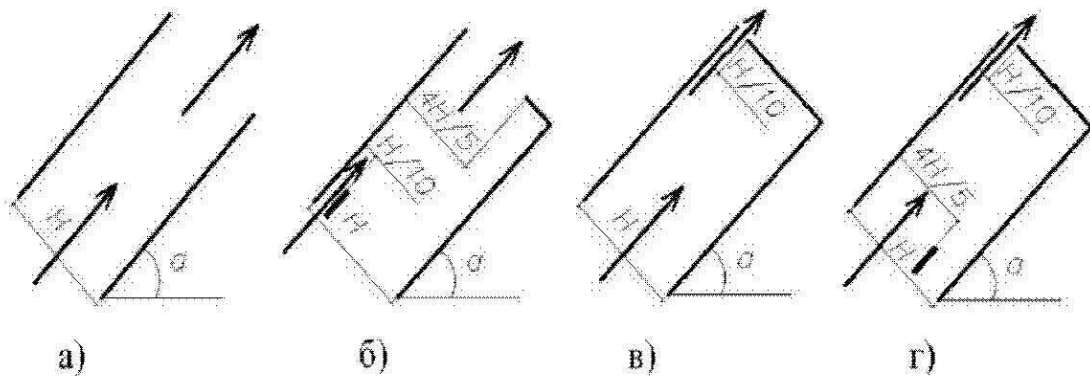


Рис. 2. Варианты различных условий подвода и отвода воды
Fig. 2. Variants of different conditions of water supply and discharge

Как показано выше, при малых углах наклона тонкослойного элемента эффект очистки, который получали при испытании лабораторной установки, оказывался меньше, чем теоретический эффект. Данное явление мы можем объяснить наличием выноса уже осевших частиц из рабочего пространства тонкослойного элемента. Для предотвращения этого явления нами были исследованы различные конструктивные условия подвода и отвода осветляемой воды с помощью численного моделирования. Некоторые из них представлены на рис. 2.

Рассмотрим следующие варианты условий подвода и отвода воды:

- когда исходная вода как подводится, так и отводится по всей высоте межполочного пространства (вариант а);

- когда на входе в тонкослойный элемент установлена перегородка, образующая щель, высотой, равной $1/10$ всей высоты межполочного пространства, а на выходе – перегородка, образующая щель, равную $4/5$ от высоты межполочного пространства (вариант б);

- когда вода подводится по всей высоте межполочного пространства, а отвод происходит через щель, равную 1/10 высоты межполочного пространства (вариант в);

- когда подвод исходной воды происходит через щель, высотой, равной 4/5 от высоты межполочного пространства, а на выходе установлена перегородка, образующая щель, равной 1/10 от высоты межполочного пространства, через которую отводится осветленная вода.

Для решения поставленной задачи движение вязкой жидкости описали с помощью системы двумерных уравнений переноса импульса (1)-(2) и уравнения неразрывности потока (3) [3]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} = P_x + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = P_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где t – время,

x, z – координаты,

v, w – продольная и поперечная проекции скорости,

P_x, P_z – проекции суммы массовых сил и сил давления,

ν – коэффициент кинематической вязкости,

α – угол наклона тонкослойного элемента к горизонту.

Траекторию осаждения частиц находили из уравнения:

$$\frac{\partial x}{v - u \sin \alpha} = \frac{\partial z}{w + u \cos \alpha}, \quad (4)$$

где u – расчетная гидравлическая крупность,

α – угол наклона элемента к горизонту (рис. 3).

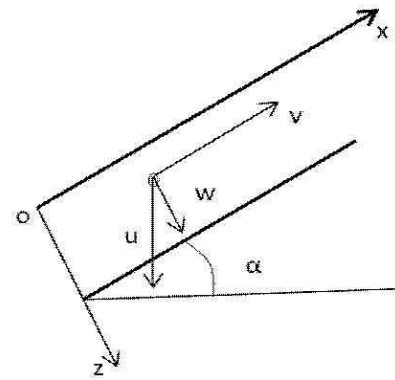


Рис. 3. Схема тонкослойного элемента
Fig. 3. Scheme of a thin-layer

В результате решения уравнений (1-4) численным способом с помощью продольно-поперечной прогонки, сделан вывод, что целесообразнее использовать схему (г), в которой подвод воды осуществлялся не по всей высоте межполочного пространства, а через щель, равную 4/5 от высоты межполочного пространства, чтобы исключить смыв заранее осевшего осадка, и, соответственно, увеличить отстойную зону.

Это предположение было подтверждено экспериментально и, в результате, конструкция осветляющего элемента была усовершенствована путем установки перегородок, образующих щели, через которые соответственно, подавалась и отводилась вода (рис. 2) [9, 15].

Также, как показали проведенные экспериментальные исследования [9], при увеличении производительности осветляющего устройства и, следовательно, скорости движения очищаемой жидкости, наблюдается вынос осевших на поверхности осаждения взвешенных частичек, особенно при малых углах наклона элемента, что отрицательно сказывается на эффекте осветления.

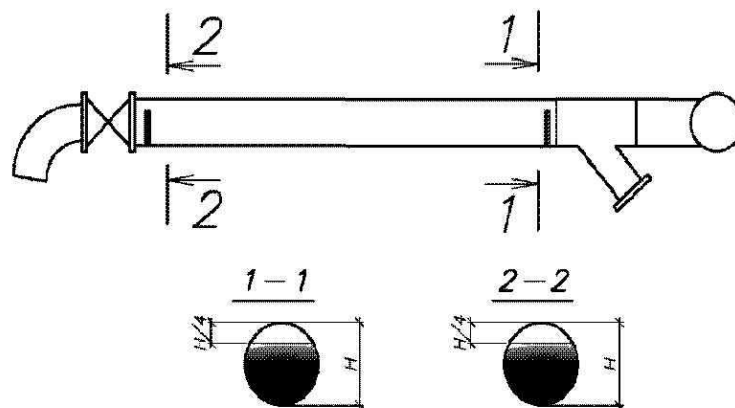


Рис. 4. Схема перегородок в тонкослойном элементе
Fig. 4. Location scheme of baffles in the thin layer element

Таким образом, возникла необходимость во внесении таких конструктивных изменений в осветляющее устройство, при которых возможный вынос загрязнений был бы сведен к минимуму.

Поэтому, был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение распределения осадка вод, содержащих мелкодисперсную взвесь, по поверхности осаждения.

Эти исследования [21] показали, что большая часть загрязнений выпадает в первой трети-четверти тонкослойного элемента. Здесь происходит наиболее интенсивное выпадение содержащейся в воде взвеси, в том числе наиболее крупных и тяжелых фракций, поэтому на этом участке происходит большее накопление осадка.

Кроме того, были получены зависимости для определения концентрации взвешенных частиц в воде, прошедшей очистку в усовершенствованном устройстве:

$$C_2 = C_1 \cdot [1 - \mathcal{E}_1(u_1)] \cdot [1 - \mathcal{E}_2(u_2)], \quad (5)$$

где C_1 – концентрация взвешенных веществ после первой ступени очистки, мг/л;

C_2 – концентрация взвешенных веществ после второй ступени очистки, мг/л;

\mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 – эффект очистки соответственно после первой и второй ступеней очистки;

u_1 и u_2 – гидравлическая крупность соответственно после первой и второй ступеней очистки, мм/с.

Учитывая вышеизложенное, для повышения эффективности осаждения взвеси в тонком слое было решено усовершенствовать

конструкцию тонкослойного элемента путем его разделения на две ступени. При этом, первая ступень должна иметь больший угол наклона к горизонту ($\alpha = 35^\circ - 60^\circ$), что будет способствовать беспрепятственному отведению основной массы выпавшего осадка. Угол наклона к горизонту второй ступени β должен составлять до 30° и обеспечивать нормальные условия осаждения наиболее мелкой взвеси.

Для проверки данной гипотезы был проведен комплекс экспериментальных исследований на лабораторной установке усовершенствованной конструкции (рис. 3) [17]. Установка также состоит из центральной колонны, но к которой присоединен трубчатый тонкослойный элемент, состоящий из двух ступеней очистки с разными углами наклона к горизонту (α и β).

Диаметры трубок элемента первой и второй ступени очистки одинаковы и равны 40 мм, длина первой ступени составляет 0,48 м, длина второй – 1,1 м.

Эксперименты проводили на искусственно замутненной воде, в качестве замутнителя которой использовали красную глину. Концентрацию взвешенных веществ в воде определяли оптическим методом с помощью фотоэлектроколориметра.

При проведении экспериментов изменяли скорость движения осветляемой воды (в диапазоне 1-8 мм/с), а также углы наклона первой и второй ступени очистки. Угол наклона первой ступени очистки варьировали в пределах $30^\circ - 55^\circ$, второй – в пределах $10^\circ - 35^\circ$.

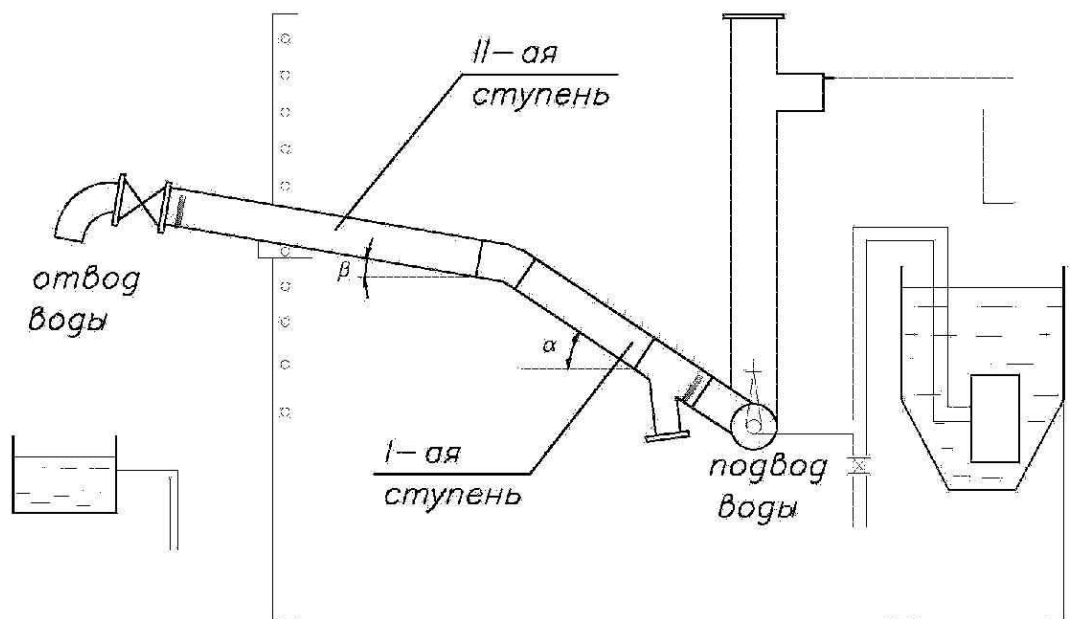


Рис.3. Схема усовершенствованной экспериментальной установки

Fig. 3. Scheme of the advanced experimental setup

Концентрация взвешенных веществ в исходной воде колебалась от 200 до 800 мг/л.

Экспериментальное значение эффекта осветления находили по концентрации взвешенных веществ на входе и выходе из тонкослойного элемента. Теоретическое значение эффекта осветления определяли по формуле:

$$\mathcal{E}_{теор} = \frac{1}{1 + a_1 \cdot u^{a_2}} \quad (6)$$

где u – гидравлическая крупность взвешенных частиц, мм/с;

a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты, определяемые по кривым кинетики осаждения взвеси в ходе экспериментов.

На первой ступени происходило наиболее интенсивное выделение грубодисперсной взвеси и, соответственно, накопление осадка, а угол наклона способствовал беспрепятственному его отведению. На второй ступени очистки за счет уменьшения угла и увеличения длины элемента создаются оптимальные условия для выделения тонкодисперсной взвеси. [4, 17].

Проведенные исследования на усовершенствованной лабораторной установке показали целесообразность использования предложенной конструкции тонкослойного элемента для очистки вод (рис. 5). Эффект осаждения в этом случае удалось повысить на 10-15% (при безреагентной обработке воды) по сравнению с эффектом, полученным при испытании тонкослойного элемента начальной конструкции (рис. 1).

Помимо исследований, направленных на изучение движения суспензии в тонкослойном элементе, велись также наблюдения за движением выпавшего осадка.

Изучив влияние каждой из сил, действующих на частичку взвеси, осевшую на поверхности осаждения, на процесс отрыва частицы от поверхности тонкослойного элемента, нами было установлено, что существенное влияние на отрыв частички взвеси от поверхности тонкослойного элемента оказывает величина силы тяжести. Она, в свою очередь, в основном зависит от угла наклона элемента. В результате расчетов нами обоснован угол наклона элемента в пределах 50° - 60° [23].

В литературных данных упоминается о скачкообразном (или лавинообразном) процессе сползания образующегося осадка по поверхности тонкослойного элемента. То есть осадок сползает периодически при достижении им определенного объема (массы). Для подтверждения данного мнения проводили как визуальные, так и экспериментальные наблюдения. Однако, было установлено, что такой скачкообразный процесс происходит при маленьких углах наклона тонкослойного элемента, а также на начальном этапе отстаивания при больших углах. При высоких углах с течением времени процесс в основном имеет установившийся характер.

На процесс сползания осадка по поверхности тонкослойного элемента влияют следующие факторы:

- скорость движения осветляемой суспензии

(v);

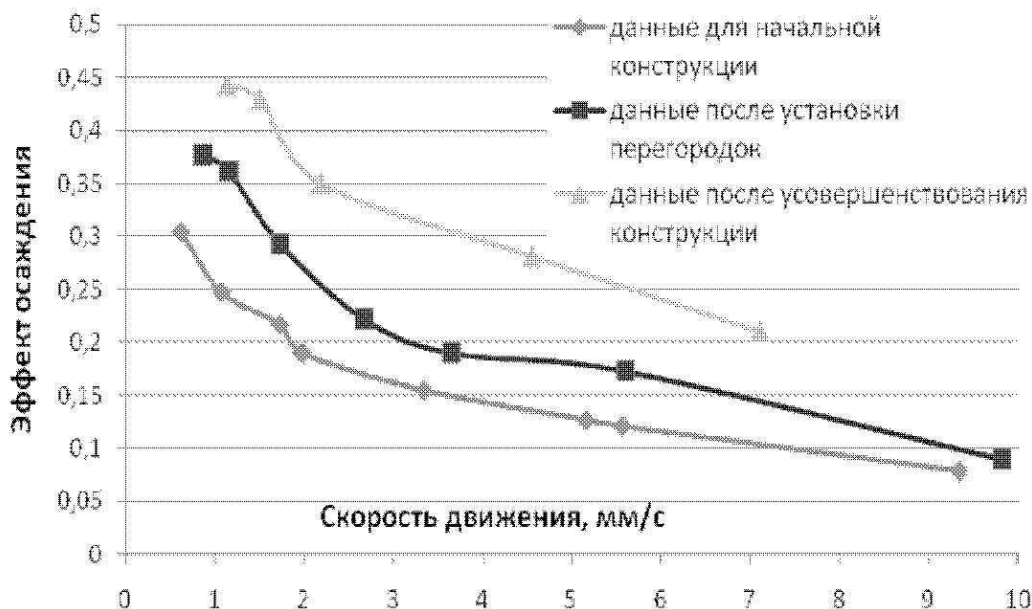


Рис. 5. Зависимость эффекта осаждения взвеси от скорости движения осветляемой воды
Fig. 3. Dependence of the slurry sedimentation effect on the motion speed of water

- угол наклона тонкослойного элемента к горизонтали (α);

- концентрация взвешенных веществ в осветляемой воде (исходная мутность, $C_{исх}$).

Экспериментальные исследования, проведенные в [22] подтвердили вышеизложенные теоретические данные. Поэтому, угол наклона первой ступени усовершенствованной конструкции тонкослойного элемента должен быть не в пределах $45-60^{\circ}$, как упоминалось выше, а в пределах $50-60^{\circ}$.

ВЫВОДЫ

Таким образом, приведенные математические зависимости позволяют описать движение суспензии в тонкослойном элементе усовершенствованной конструкции, рассчитать эффективность удаления взвешенных веществ и подобрать рациональные значения его конструктивных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

- Абитаев М.Т., Евсеева Л.А., Евсеева О.Я., 1983. Очистка природных и сточных вод в больших городах с применением тонкослойных отстойников. Проблемы больших городов: [обзорная информация]. – М.: МГЦНТИ. – Вып. 7. – 29.
- Арцимович П.М., Казарян В.А., 1981. Качественный состав поверхностного стока с селитебных территорий крупных городов. Матер. семин. «Очистка и использование поверхностного стока с территорий городов и промплощадок». – М.: МДНТП. – 42–45.
- Бабенко С.П., Карагяур А.С., Сыроватский О.А., 2013. Тонкошаровый элемент. Пат. України № 102157, опубл. 10.06.2013, Бюл. №11.
- Бабенко С.П., 2011. Модель осаждения взвешенных веществ в тонком слое. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 63. – 485-489.
- Гоухберг М.С., Медведев Г.П., Алексеев М.И., 1997. Проблемы отведения и очистки поверхностного стока в Санкт-Петербурге. Водоснабжение и санитарная техника. – №1. – 20–21.
- Дегремон. Технический справочник по обработке воды. в 2-х т. Т.1: пер. с фр. – СПб.: Новый журнал, 2007. – 816.
- Дикаревский В.,С., Курганов А.М., Нечаев А.П., Алексеев М.И., 1990. Отведение и очистка поверхностных сточных вод: [учеб. пособие для вузов] – Л.: Стройиздат. – 224.
- Казарян В.А., Залетова Н.А., Арцимович П.М., 1980. Очистка поверхностного стока с территории больших городов. Проблемы больших городов: [обзорная информация]. – М.: ГОСИНТИ. – Вып. 20. – 29.
- Карагяур А.С., Сыроватский А.А., Бабенко С.П., 2011. Тонкослойный отстойник с усовершенствованными устройствами подвода - отвода воды. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 65. – 349-353.
- Кедров Ю. В., 1974. Исследование особенностей гравитационного выделения грубодиспергированных примесей в тонком слое. Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук.- М.- 31.
- Лихачев Н.И., Ларин И.И., Хаскин С.А. и др., 1981. Канализация населенных мест и промышленных предприятий]; под общ. ред. В. Н. Самохина. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Стройиздат. – 639.
- Молоков М.В., Шифрин В.Н., 1977. Очистка поверхностного стока с территорий городов и промышленных площадок. – М.: Стройиздат. – 104.
- Непаридзе Р. Ш., Разумовский Р.С., Исаева Н.В., 1981. Результаты эксплуатационных испытаний установок заводского изготовления для очистки сточных вод с применением тонкослойных модулей. Технологические процессы и конструкции сооружений для очистки городских сточных вод: науч. труды АКХ. – М. – вып. 118. – 35–40.
- Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 916.
- Сыроватский А.А., Бабенко С.П., Бойко О.А., Халина Д.А., 2011. Совершенствование конструкций элементов тонкослойных отстойников. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 66. – 346-350.
- Сыроватский А.А., Гарбуз С.П., 2010. Совершенствование схемы очистки поверхностно-ливневого стока с использованием тонкослойных отстойников. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА. – Вып. 57 – 407-410.
- Сыроватский А.А., Бабенко С.П., 2012. Совершенствованная конструкция тонкослойного элемента. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 67. – 246-250.
- Тугай А. М. Водоснабжение. Курсовое проектирование : [учеб. пособие для вузов] / А. М. Тугай, В. Е. Терновцев. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 208.
- Тугай А.М., Орлов В.О., 2009. Водопостачання: [підручник] – К.: Знання. – 735.
- Шпаковский Э.П., 1975: Исследование процессов седиментации грубодисперсных примесей в тонкослойных отстойниках: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М., 1975. – 26.