Испытание тонкослойного модуля новой конструкции для очистки сточных вод с высокой концентрацией взвешенных веществ

ЮЙ Шуайсянь
аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, yshuaixian@mail.ru

В данной статье представлены результаты очистки сточных вод с концентрацией взвешенных веществ от 2000 до 6000 мг/л с использованием новой конструкции тонкослойного модуля, обеспечивающей эффект эжектирования взвешенных частиц. Испытания проводились в деревне Иннолово Аннинского городского поселения Ломоносовского района Ленинградской области. В ходе испытания проводилось сравнение эффективности очистки сточных вод с помощью новой конструкции модуля, классической с гладкими пластинами и обычным отстаиванием без применения модуля. Оба варианта отстойника с модулем функционировали по противоточной схеме. По сравнению с другими вариантами использование нового модуля позволило повысить эффективность осаждения взвеси на 8–20 %. Результаты работы подтверждают эффективную работу модуля и могут быть использованы в инженерной практике при проектировании комплексных очистных сооружений.

Ключевые слова: тонкослойный модуль, взвешенные вещества, эжектирование.

Введение

Осаждение взвешенных веществ в производственных сточных водах носит актуальный характер поскольку влияет на эффективность удаления других загрязняющих веществ на последующих этапах очистки, определяя надежность функционирования всего комплекса очистных сооружений и экологическую безопасность окружающей среды. Содержание взвеси в производственном стоке может достигать концентраций от 2000 до 6000 мг/л [1], создавая значительную нагрузку на сооружения механической очистки. С целью интенсификации процесса осаждения долгое время эксплуатируются различные виды тонкослойных модулей, позволяющих снизить степень турбулизации потока воды и уменьшить глубину осаждения частиц. Отстойники с тонкослойным модулем являются предпочтительным вариантом поскольку характеризуются высоким эффектом очистки и компактностью конструкции сооружения [2]. Кроме этого, они могут быть объединены с другими сооружениями для создания комплексного очистного сооружения [3]. Однако поступление на очистку стока с высокой концентрацией взвеси может приводить к сбоям в работе классических вариантов модуля с плоскими или трубчатыми пластинами. Локальное накопление взвеси на пластинах модуля вызывает снижение пропускной способности и увеличение скорости движения сточных вод, снижая степень очистки [4]. Для решения данной проблемы и повышения эффективности осаждения в научной сфере востребованным направлением является оптимизация и совершенствование конструкций тонкослойных отстойников.

В работе [5] рассмотрена зависимость между количеством пластин в отстойнике и степенью осаждения частиц, проведено численное моделирование с использованием полноразмерной трехмерной модели, что позволило определить оптимальное количество пластин для увеличения эффективности осаждения. В работе [6] проведен ряд экспериментов и численных расчетов для изучения влияния параметров продольной структуры пластин и положения входного отверстия на эффективность осаждения. В работе сделан вывод о том, что структура тонкослойного модуля существенно влияет на эффективность осаждения частиц. В работе [7] углубленно рассматривается влияние различных углов наклона модуля на эффективность осаждения с использованием численного моделирования CFD, а также производится оценка осаждения частиц при различных режимах турбулентности потока. В работе [8] рассматривается эффективность работы отстойников с установкой *V*-образных пластин, обеспечивающих изменение направления движения потока. Кроме представленных работ существует множество других научных источников, освещающих преимущества и недостатки различных конструкций тонкослойных отстойников, что подтверждает актуальность данной темы для инженерной практики.

В данном исследовании автором предложена новая конструкция тонкослойного модуля (рис. 1), в которой проточная область между пластинами делится на два отдельных канала перфорированной стенкой. Один канал предназначен для движения сточных вод и обеспечения процесса осаждения взвеси как прежде, а другой, нижний канал, выполняет функцию удаления осадка. Канал осадка выполнен в виде замкнутого пространства и соединен в нижней части модуля с общей трубой выгрузки осадка, на которой располагается регулирующий клапан. С помощью перфорированной стенки между каналами осуществляется частичное перенаправление потока сточных вод в канал удаления осадка, что способствует увлечению взвешенных частиц и росту скорости их осаждения. Во время работы отстойника регулирующий клапан на трубе выгрузки осадка может варьировать увлекаемый расход сточных вод, оказывая влияние на скорость потока в канале осадка и воздействуя на частицы, побуждая их оседать и поступать в канал осадка для эффективного разделения.

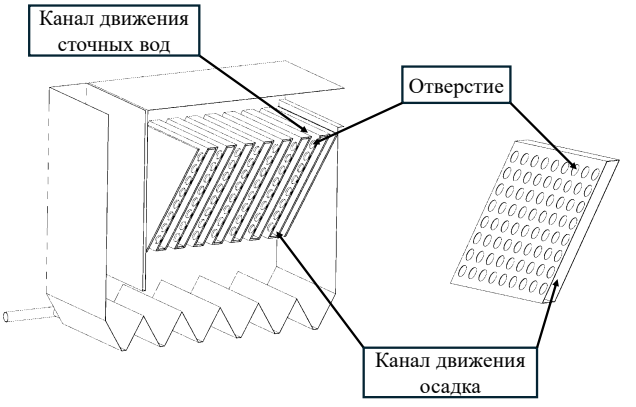


Рис. 1. Конструкция тонкослойного модуля

На сегодняшний день получены результаты математического моделирования и проведен лабораторный эксперимент по оценке эффективности представленной конструкции модуля. В работе [9] на основе анализа сил, действующих на взвешенные частицы, получены зависимости для определения скорости осаждения частиц и траектории их движения, которые теоретически показали возможность сокращения пути движения частицы до поверхности пластины и повышения эффективности очистки. Численное моделирование потока [10,11] показало эффект эжектирования частиц и увлечение их в отверстия перфорированной стенки. В сравнение с классической конструкцией модуля был отмечен рост степени осаждения взвешенных частиц на 31,53 %. Однако для получения достоверных практических данных, учесть наличие в воде дополнительных примесей, оказывающих воздействие на адгезионные свойства частиц, было принято решение провести экспериментальные испытания на полупроизводственной установке тонкослойного отстойника с очисткой стока близкого по составу к производственному.

Методы

Полупроизводственная модель тонкослойного отстойника была размещена в деревне Иннолово Аннинского городского поселения Ломоносовского района Ленинградской области. Конструкция сооружения показана на рис. 2. Емкость отстойника и тонкослойный модуль были выполнены из ориентированно-стружечной плиты, внутренняя поверхность которой дополнительно защищена гидроизоляционным покрытием. Габаритные размеры модуля составили: 1900×1000×1000 мм (длина×ширина×высота). Межпластинчатое расстояние принималось равным 50 мм [12]; ширина входного канала равнялась 250 мм, а выходного – 200 мм. В разделительной стенке предусматривалось 9 рядов отверстий диаметром 32 мм.

Для обеспечения эжектирования взвешенных частиц к каналу отведения осадка осуществлялось подключение трубопровода диаметром 25 мм, на котором был смонтирован насос. Регулирования скорости увлекаемого потока на трубопроводе выполнялось с помощью шарового крана. Учитывая разницу гидравлических сопротивлений в отдельных трубопроводах, локальная скорость увлечения может варьироваться в различных частях модуля, поэтому на практике регулирующая арматура может быть предусмотрена для каждой трубы отдельно.



Рис. 2. Фотографии полупроизводственной установки отстойника с тонкослойным модулем новой конструкции



Рис.3. Загрязненные подземные воды

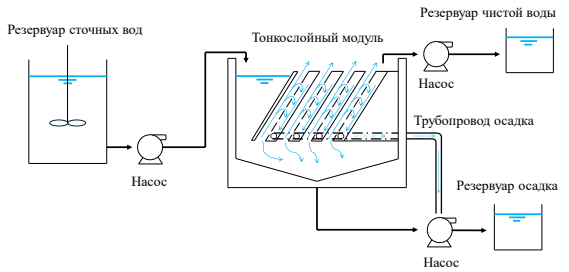


Рис. 4. Схема полупроизводственной установки отстойника

В процессе эксперимента проводилась оценка работы отстойника с тонкослойным модулем новой конструкции, модулем классической конструкции с гладкими пластинами и просто отстаивающей емкости сооружения без модуля.

Кроме емкости отстойника производственная установка включала накопительный резервуар с мешалкой, резервуар чистой воды и резервуар осадка. В приемном резервуаре с мешалкой обеспечивалось приготовление производственных сточных вод. Для приготовления сточных вод использовался загрязненный подземный сток, имеющий в своем составе органические загрязнения (рис. 3). Степень загрязнения сточных вод взвешенными веществами определялась на основании данных работы [13] для предприятий пищевой промышленности. Для получения высоких концентраций взвешенных веществ использовался кукурузный крахмал.

На рис. 4 представлена технологическая схема полупроизводственной установки. Из накопительного резервуара насосом сточная вода подавалась в распределительный канал отстойника, проходила процесс отстаивания и удалялась насосом в резервуар очищенной воды. Вода из канала осадка перекачивалась в резервуар осадка. Работа тонкослойных модулей осуществлялась по противоточной схеме.

Методика исследования основывалась на определении концентрации взвешенных веществ и органических загрязнений в исходной сточной воде до отстаивания и после очистки. Измерение мутности сточных вод проводилось с использованием портативного мутномера 2100Q IS. Для определения значений ХПК применялся колориметр Rocker LEI-5000. Концентрация взвешенных веществ фиксировалась в приемном резервуаре сточных вод и в резервуаре очищенной воды, что позволило вычислить количество взвешенных веществ, осевших в отстойнике.

В ходе эксперимента были смоделированы концентрации взвешенных веществ от 2000 до 6000 мг/л. Опыты были разделены на пять серий в зависимости от исходной концентрации. Параметры серий эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1
Параметры эксперимента

№ серия опытов	Концентрация входящих взвешных веществ, мг/л	ХПК, мг/л	Расход, л/с	Время измерения, мин.
1	2000	3163	3,8 ~ 19,0	30
2	3000	4087		
3	4000	5058		
4	5000	6086		
5	6000	6878		

Первоначально измерение концентрации проводилось без тонкослойного модуля, затем устанавливались классический и новый модули, после чего серия измерений повторялась. Наблюдение за работой отстойника происходило в течении 30 минут после наступления установившейся работы сооружения. В процессе очистки производилось непрерывное измерение концентрации взвеси и ХПК каждые 1,5 минуты.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов представлены на рис. 5-6. На графиках отражены зависимости эффекта очистки взвешенных веществ и ХПК от пропускной способности сооружения в течении времени эксперимента для различных конструкций отстойника.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при исходной концентрации взвешенных веществ от 2000 до 6000 мг/л использование тонкослойных модулей в отстойниках способствует существенному повышению эффективности очистки. Предложенный в данном исследовании новый тонкослойный модуль демонстрирует значительные преимущества по сравнению с классическим. По сравнению с отстойниками без тонкослойного модуля эффективность очистки повышалась на 20–31 %, а по сравнению с классическим тонкослойным модулем — на 8–20 %. Следует отметить, что новый тонкослойный модуль позволяет значительно повысить степень очистки во всем диапазоне исходных концентраций взвешенных веществ.

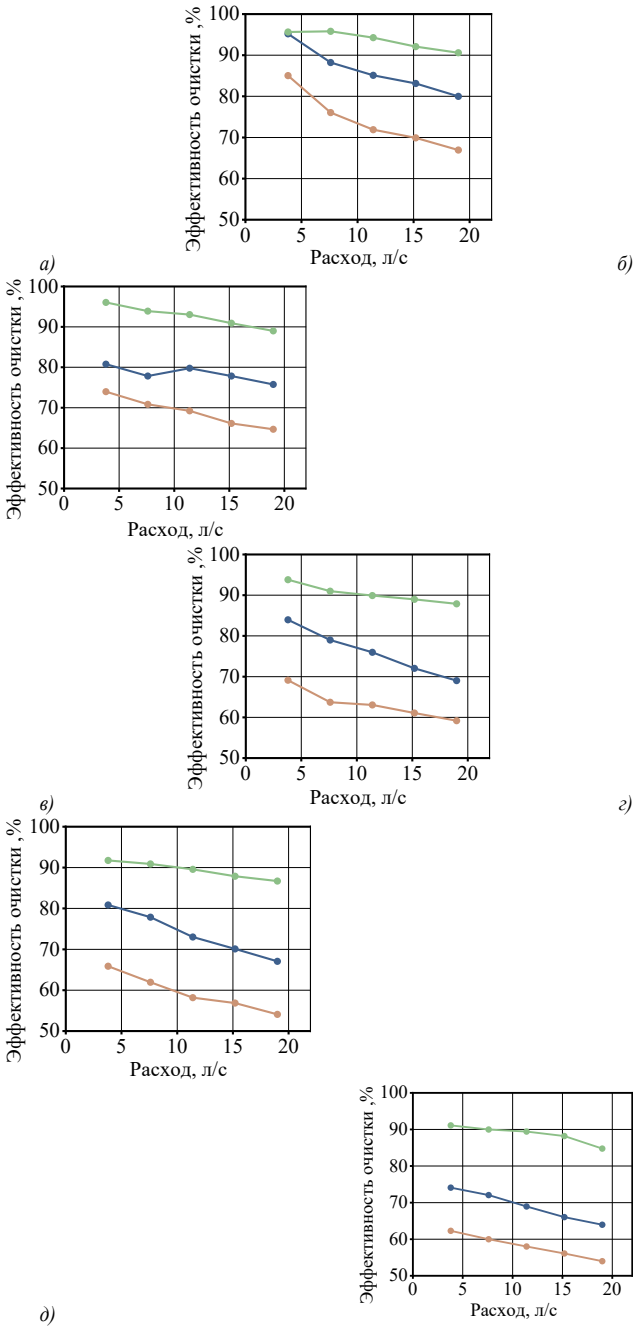


Рис. 5. Зависимость эффективности очистки взвешенных веществ от расхода воды с исходной концентрацией взвешенных веществ:

а) 2000 мг/л; б) 3000 мг/л; в) 4000 мг/л; г) 5000 мг/л; д) 6000 мг/л.

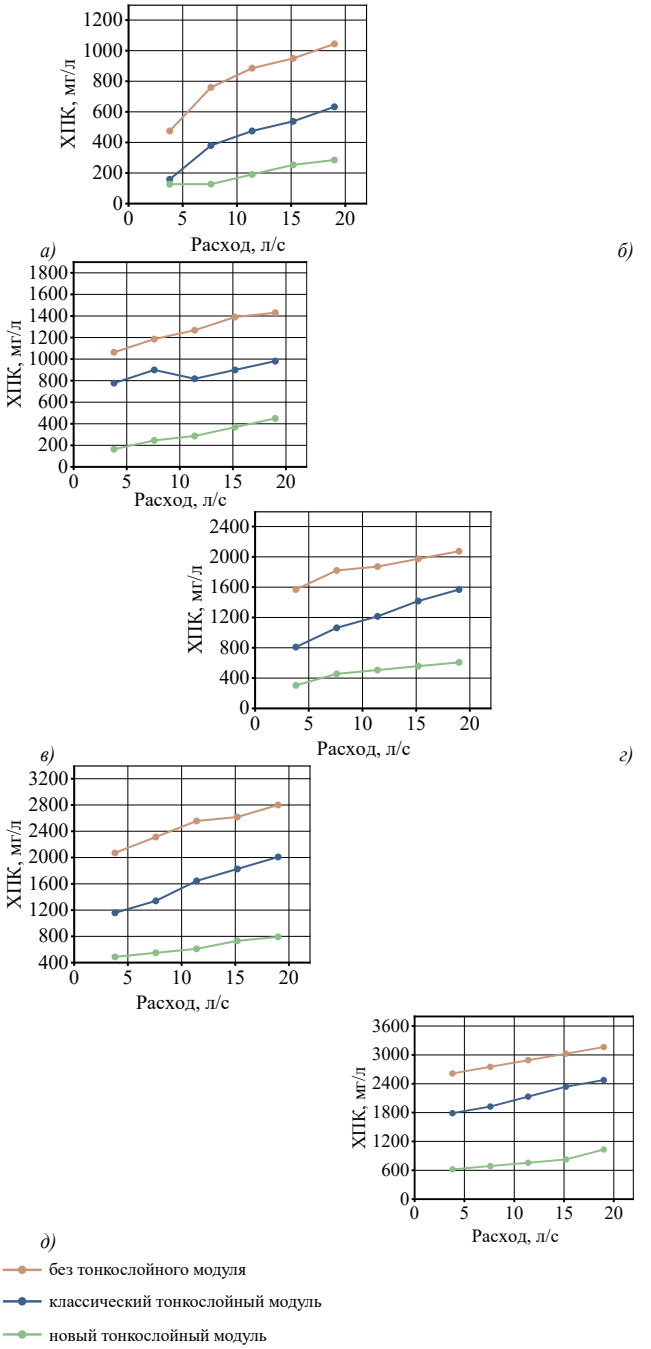


Рис. 6. Зависимость ХПК от расхода воды

а) ХПК=3163 мг/л; б) ХПК=4087 мг/л; в) ХПК=5058 мг/л; г) ХПК=6086 мг/л; д) ХПК=6878 мг/л.

Выводы

В данном исследовании проведено испытание новой конструкции тонкослойного модуля для оценки эффекта очистки сточных вод близких по составу к реальному стоку. По сравнению с классическим тонкослойным модулем новая конструкция показала увеличение эффекта очистки на 8–20 %. Во всем диапазоне расхода новая конструкция показала наиболее высокую степень очистки. Данный результат позволяет сделать заключение о возможности применения подобной технологии при разработке комплексных очистных сооружений и может быть рекомендована для дальнейшего внедрения на производстве. Представленные в статье результаты могут быть полезны для применения в практике проектирования тонкослойных отстойников по очистке производственных сточных вод с высокой концентрацией взвешенных веществ.

Литература

1. Rosenwinkel K. H. et al. Suspended solids from industrial and municipal origins //Ecotoxicology and environmental safety. – 2001. – Т. 50. – №. 2. – С. 135-142.
2. Acrivos A., Herbolzheimer E. Enhanced sedimentation in settling tanks with inclined walls //Journal of fluid mechanics. – 1979. – Т. 92. – №. 3. – С. 435-457.
3. Huang X., Lu K. Exploration and implementation of integrated wastewater treatment facilities in older campus laboratories //Experimental Technology & Management. – 2026. – Т. 43. – №. 6. – С. 280.

4. Zha Y. et al. Effect of Inclined-Tube on the Removal Performance of Fine Sediment in a Gravity Sedimentation Tank //Irrigation and Drainage. – 2026. – Т. 75. – №. 1. – С. 159-172.
5. Xing C. H., Yamamoto K., Fukushi K. Performance of an inclined-plate membrane bioreactor at zero excess sludge discharge //Journal of Membrane Science. – 2006. – Т. 275. – №. 1-2. – С. 175-186.
6. Hirom K., Devi T. T. Determining the optimum position and size of lamella packet in an industrial wastewater sedimentation tank: A computational fluid dynamics study //Water, Air, & Soil Pollution. – 2022. – Т. 233. – №. 7. – С. 261.
7. Fouad H., Elhefny R., Marei A. Evaluating the use of tube settlers and lamella plates in increasing the efficiency of sedimentation tanks //Journal of Applied Life Sciences International. – 2016. – Т. 7. – №. 4. – С. 1-8.
8. Wu X. et al. Effects of inclined plate structure on small granular sludge sedimentation in vertical sedimentation tanks without flocculants: a CFD-DPM simulation study //Powder Technology. – 2026. – С. 122928.
9. Юй Ш., Федоров С. В. Моделирование осаждения частиц в тонкослойном модуле // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – № 4(111). – С. 108-116. – DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-4-108-116.
10. Юй Ш., Федоров С. В., Феофанов Ю. А., Черников Н. А. Оценка эффективности осаждения в тонкослойном модуле // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 4(796). – С. 109-119. – DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-109-119.
11. Юй Ш. Влияние конструкции тонкослойного модуля на эффективность осаждения // Промышленное и гражданское строительство. 2026. № 1. С. 56-62. doi: 10.33622/0869-7019.2026.01.56-62
12. Stewart M., Arnold K. Produced water treatment field manual. – Gulf Professional Publishing, 2011.
13. Valta K. et al. Overview of water usage and wastewater management in the food and beverage industry // Desalination and Water Treatment. – 2015. – Vol. 53, № 12. – С. 3335–3347. – DOI: 10.1080/19443994.2014.934100.

Testing a new thin-layer module design for wastewater treatment with a high concentration of suspended solids

YU Shuaixian
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

This article presents the results of wastewater treatment with a suspended solids concentration ranging from 2,000 to 6,000 mg/L using a new thin-layer module design that provides an ejection effect on suspended particles. The tests were conducted in the village of Innolovo, Anninskoye urban settlement, Lomonosovsky District, Leningrad Region. During the testing, the efficiency of wastewater treatment was compared among the new module design, a classic module with smooth plates, and conventional settling without the use of a module. Both variants of the settling tank equipped with a module operated using a counter-flow scheme. Compared to the other methods, the use of the new module increased the sedimentation efficiency of suspended matter by 8–20%. The results of this study confirm the effective operation of the module and can be applied in engineering practice for the design of comprehensive wastewater treatment facilities.

Keywords: lamella module, suspended solids, ejection.

References

1. Rosenwinkel K. H. et al. Suspended solids from industrial and municipal origins // Ecotoxicology and environmental safety, 2001, T. 50, №. 2, pp. 135-142.
2. Acrivos A., Herbolzheimer E. Enhanced sedimentation in settling tanks with inclined walls // Journal of fluid mechanics, 1979, T. 92, №. 3, pp. 435-457.
3. Huang X., Lu K. Exploration and implementation of integrated wastewater treatment facilities in older campus laboratories // Experimental Technol-ogy & Management, 2026, T. 43, №. 6, pp. 280.
4. Zha Y. et al. Effect of Inclined-Tube on the Removal Performance of Fine Sediment in a Gravity Sedimentation Tank // Irrigation and Drainage, 2026, T. 75, №. 1, pp. 159-172.
5. Xing C. H., Yamamoto K., Fukushi K. Performance of an inclined-plate membrane bioreactor at zero excess sludge discharge // Journal of Membrane Science, 2006, T. 275, №. 1-2, pp. 175-186.
6. Hirom K., Devi T. T. Determining the optimum position and size of lamella packet in an industrial wastewater sedimentation tank: A computational fluid dy-namics study // Water, Air, & Soil Pollution, 2022, T. 233, №. 7, pp. 261.
7. Fouad H., Elhefny R., Marei A. Evaluating the use of tube settlers and la-mella plates in increasing the efficiency of sedimentation tanks // Journal of Applied Life Sciences International, 2016, T. 7, №. 4, pp. 1-8.
8. Wu X. et al. Effects of inclined plate structure on small granular sludge sedimentation in vertical sedimentation tanks without flocculants: a CFD-DPM simulation study // Powder Technology, 2026, pp. 122928.
9. Yu Sh., Fedorov S. V. Modeling of particle sedimentation in a thin-layer module // Bulletin of Civil Engineers, 2025, No. 4(111), pp. 108-116. (In Russ.) DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-4-108-116.
10. Yu S., Fedorov S. V., Feofanov Yu. A, Chernikov N. A. Evaluation of deposition efficiency in a thin-layer module // News of Higher Educational Institutions. Construction, 2025, No. 4(796), pp. 109-119. (In Russ.) DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-109-119.
11. Yu Sh. The Effect of the Thin-Layer Module Design on Deposition Efficiency. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering], 2026, no. 1, pp. 56-62. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2026.01.56-62
12. Stewart M., Arnold K. Produced water treatment field manual // Gulf Professional Publishing, 2011.
13. Valta K. et al. Overview of water usage and wastewater management in the food and beverage industry // Desalination and Water Treatment, 2015, Vol. 53, № 12, pp. 3335–3347. DOI: 10.1080/19443994.2014.934100.