

Исследование двухуровневого тонкослойного модуля для очистки сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности

Л.П. Москаленко, Ш. Юй

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Сточные воды целлюлозно-бумажной промышленности содержат различные загрязнения: органические вещества, мелкие взвешенные порошки, растворенные твердые вещества и проч. В настоящее время используются комплексные технологии очистки, в которых для удаления твердых загрязняющих частиц используются тонкослойные модули отстойников. В данной работе представлены результаты сравнения эффективности работы классического тонкослойного модуля с плоскими пластинами и тонкослойного модуля с двумя уровнями пластин, расположенными друг над другом в противоположных направлениях относительно друг друга, и обеспечивающими поворот потока воды внутри модуля. С помощью методов компьютерного моделирования показано, что модифицированная конструкция позволяет повысить эффект очистки от 8 до 30 % для диапазона скоростей входящего потока сточных вод от 0,0025 до 0,0125 м/с. Также были получены траектории движения частиц и поле скоростей, что наглядно показывает направление диктующего потока и зоны циркуляции в сооружении.

Ключевые слова: сточные воды, целлюлозно-бумажная промышленность, тонкослойный модуль отстойника, конструкция с поворотом потока, моделирование осаждения частиц.

Целлюлозно-бумажная промышленность занимает важное место в производстве Китая. Производственные сточные воды содержат органические загрязнения в высокой концентрации, мелкие взвешенные порошки, растворенные твердые вещества, ионные соединения металлов и другие примеси [1, 2]. Осаждение этих частиц является сложной задачей вследствие их крайне малого размера и наличия отталкивающих зарядов на их поверхности [3]. В настоящее время используются комплексные технологии очистки, которые предусматривают стадию флокуляции, отстаивания и фильтрации [4], позволяющие удалить твердые частицы из сточных вод. Кроме этого, ведутся исследования, позволяющие повысить эффективность работы тонкослойного модуля благодаря применению новых конструкций модуля и модификаций пластин. С этой точки зрения вызывает интерес работа [5], в которой предлагается применение ершовой загрузки в

межпластиночном пространстве и обосновано ее оптимальное расположение в тонкослойном модуле отстойника.

После флокуляции размер частиц в сточных водах увеличивается и обычно составляет от 50 мкм до 300 мкм [6], поэтому в работе рассматриваются частицы данного размера и проводится изучение эффективности осаждения с помощью моделирования с применением конечно-элементного анализа. Одновременное применение методов математического моделирования и классического проектирования очистных сооружений является частой практикой и позволяет выбирать наиболее оптимальную геометрию отстойника. В работах [7, 8] представлены конструкции пластинчатых отстойников и приведены результаты математического и численного моделирования, применяемые для получения оптимальной геометрии конструкции. В работе [9] представлена компьютерная гидродинамическая модель установки по очистке сточных вод. В работе [10] представлены принципы построения математической модели очистки сточных вод и предлагается модель работы устройства водоочистки с применением вертикальных фильтров.

Для повышения эффективности осаждения предлагается применение комбинированной конструкции тонкослойного модуля, состоящего из пластин с различной конфигурацией [11]. В отличие от классической конструкции в ней предусматривается устройство двух уровней пластин, которые располагаются друг над другом (рис. 1, а).

Пластины каждого уровня сориентированы в противоположном направлении относительно друг друга, что обеспечивает поворот потока воды внутри модуля. Согласно общепринятой практике и результатам экспериментальных исследований, угол наклона пластин составляет 60° , а полная высота тонкослойного модуля – 1500 мм [12].

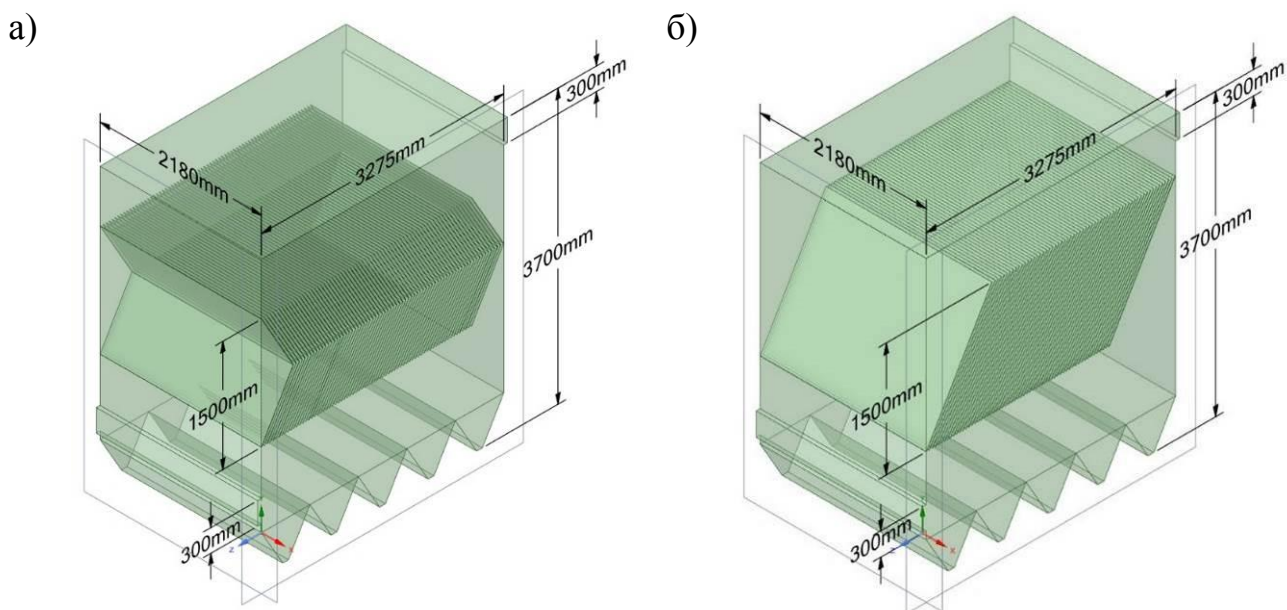


Рис. 1. – Геометрические размеры отстойника с тонкослойным модулем:

а) конструкция с поворотом потока; б) классическая конструкция

Также для оценки эффективности была рассмотрена работа классического модуля высотой 1500 мм с плоскими пластинами, располагающимися под углом 60° к горизонту (рис. 1, б).

Оба варианта конструкции отстойника работали по противоточной схеме движения потока.

Для изучения процесса осаждения частиц в представленных вариантах тонкослойных модулей использовалось программное обеспечение *ANSYS FLUENT*. В данной программе используется моделирование методом конечных элементов, которое традиционно используется для решения задач, связанных с изучением процессов, протекающих в системах транспортировки и очистки питьевой и сточной воды. На рис. 1 представлены размеры расчетной области модели по двум вариантам, которые заданы с учетом рекомендаций [13] для производительности $50 \text{ м}^3/\text{час}$. Для обеспечения требуемой точности моделирования расчет необходимого размера ячейки сетки выполнялся с учетом скорости движения потока в тонкослойном

модуле. Размер ячейки в зоне межпластиночного пространства составил 50 мм. При этом для обеспечения высокого качества моделирования пограничного слоя выполнялось умельчение сетки вблизи поверхности пластин до 1,46 мм.

Моделирование осаждения частиц осуществлялось по следующему алгоритму. Через входное граничное условие поток воды заполняет расчетную область отстойника и покидает сооружение через выходное граничное условие. После достижения установившегося движения потока в расчетную область через входное граничное условие осуществляется инъецирование частиц, которые распределяются в области отстойника в зависимости от сформировавшегося поля скоростей. Общее количество запущенных частиц задавалось равным 5000 шт., по 500 штук различной фракции: 50-75 мкм, 75-100 мкм, 100-125 мкм, 125-150 мкм, 150-175 мкм, 175-200 мкм, 200-225 мкм, 225-250 мкм, 250-275 мкм, 275-300 мкм.

Для обеспечения осаждения частиц в модели учитывался эффект гравитации: по вертикальной оси было задано значение ускорения свободного падения $9,81 \text{ м}^2/\text{с}$.

Для настройки входного граничного условия применялась величина скорости входящего потока сточных вод (рис. 2). Величина скорости изменялась в диапазоне от 0,001 до 0,0125 м/с.

Выходное граничное условие задавалось с помощью величины избыточного давления, которое принималось равным нулю. Все остальные грани расчетной области принимались твердыми непроницаемыми стенками из бетона, для которых задавался коэффициент шероховатости 0,0001 м. В модели использовались два вида твердых стенок: для стенок бункера для осадка использовалась настройка, учитывающая удаление частиц из расчетной модели после контакта; для вертикальных стенок сооружения и

стенки тонкослойного модуля задавалась настройка, учитывающая отскок частицы после контакта.

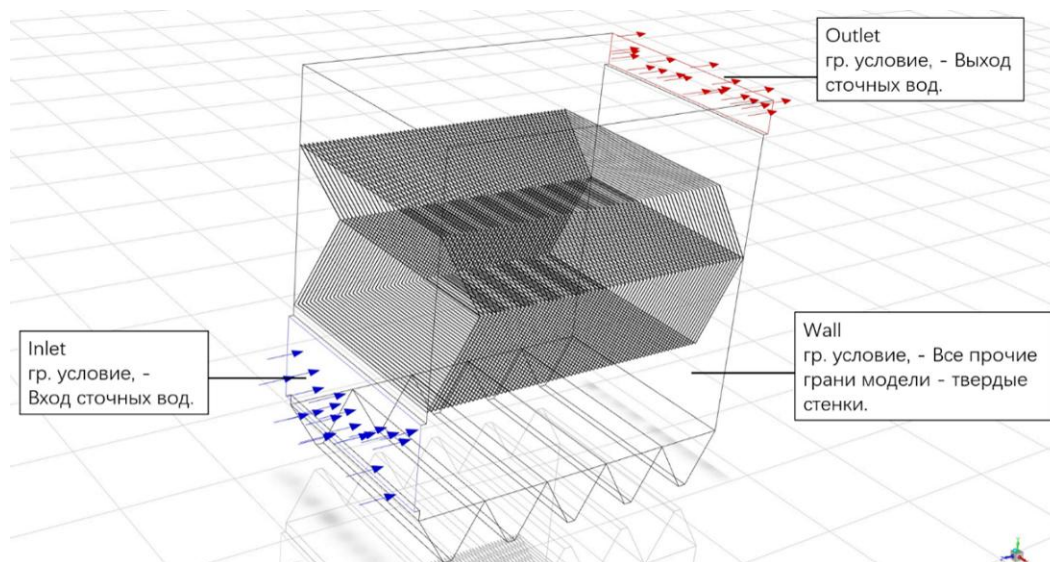


Рис. 2. – Граничные условия, заданные в *ANSYS FLUENT*

В качестве основной жидкой фазы в модели была выбрана вода с плотностью $998,2 \text{ кг/м}^3$. Для создания взвешенных частиц в модели создавался второй материал твердой фазы с плотностью 1100 кг/м^3 [14]. Учет сопротивления между твердой и жидкой фазами обеспечивался за счет метода Шиллера-Науманна (*Schiller-Naumann*), а для моделирования скольжения между фазами был выбран метод Маннинена (*Manninen-et-al*) [15]. Учитывая результаты работы [16], модель была настроена таким образом, чтобы частицы, подвергающиеся осаждению после попадания в отстойную часть, прилипали при столкновении со стенкой или дном, после чего удалялись из расчетной области.

В результате моделирования были получены траектории движения частиц и поле скоростей, что наглядно показывает направление диктующего потока и зоны циркуляции в сооружении. На рис. 3, а) представлены

результаты для модуля с поворотом потока, демонстрирующие распределение большей части частиц в зоне приемка отстойника.

Концентрация и скорость частиц в зоне чистой воды над тонкослойным модулем значительно ниже, чем в зоне расположения приемка. Следует отметить, что после прохождения потока через тонкослойный модуль часть частиц подвергается свободному осаждению, попадая в бункер, а другая часть выносится из отстойника вместе со сточной водой. Между пластинами модуля наблюдается линейное движение потока со скоростями, обеспечивающими ламинарный режим движения, что способствует эффективному осаждению частиц (рис. 3, б). Полученные в результате моделирования расчеты и эффект очистки соответствуют ожиданиям и качественно отражают изучаемый процесс [7 – 9].

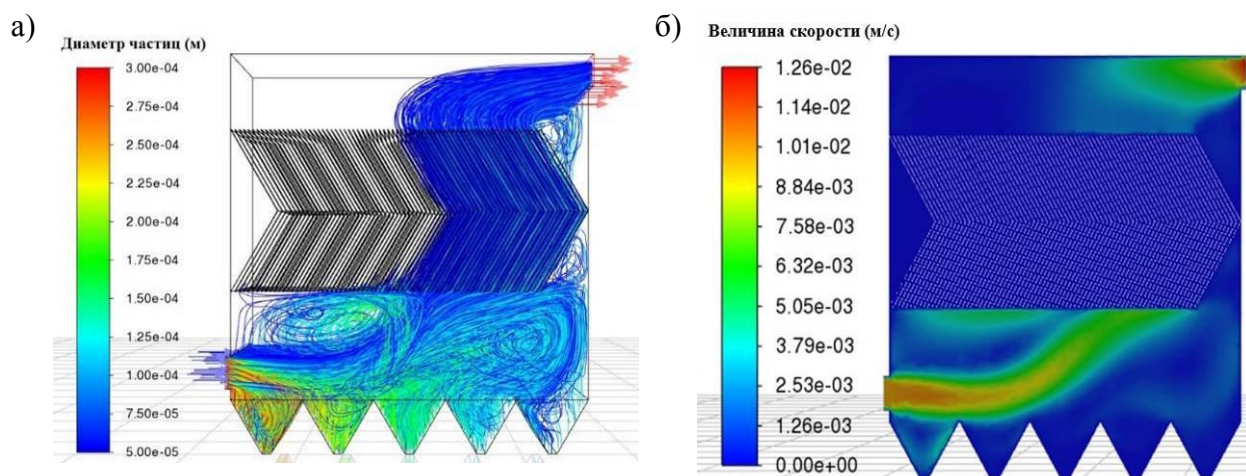


Рис. 3. – Распределение частиц в отстойнике

а) диаметр частиц и траектории; б) поле скоростей потока в сооружении

Аналогичные результаты расчета были получены для классического тонкослойного модуля. Сравнивая условия работы двух вариантов, отметим влияние поворота пластин на эффективность осаждения (рис. 4). На графике показано, что в тонкослойном модуле с поворотом пластин обеспечивается

задерживание частиц диаметром 300 мкм в зоне поворота (рис. 4, а). В тонкослойном модуле классической конструкции напротив: наблюдается вынос частиц данного диаметра из модуля (рис. 4, б). Наличие поворота создает дополнительное сопротивление, которое выражается в формировании зоны циркуляции сразу за вершиной стыковки пластин с различным направлением. В данной зоне обеспечивается накопление взвешенных частиц. Аналогичный эффект был отмечен в работе [9], в которой отмечалось влияние на работу отстойника конфигурации перегородок и скорости движения потока.

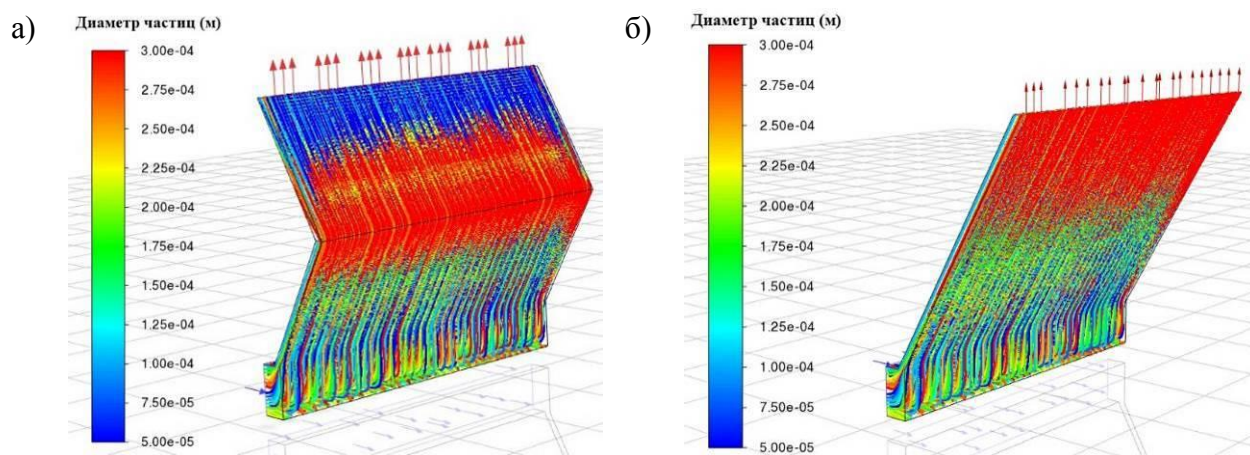


Рис. 4. – Траектория движения твердых частиц при скорости потока $V = 0,01$ м/с: а) модуль с поворотом потока; б) классический модуль

Для более детального анализа на выходном граничном условии осуществлялась фиксация количества выносимых из сооружения частиц. С помощью функции *ANSYS FLUENT* для отслеживания частиц было определено, что из общего количества запущенных в отстойник 5000 частиц, значительная часть осела.

На рис. 5 представлены графики зависимости количества задержанных в отстойнике частиц от их диаметров. Графики показывают, что обе конструкции модуля наиболее эффективно задерживают частицы с

диаметром более 225 мкм. Также по всем диапазонам диаметров частиц отмечается превалирование эффекта очистки тонкослойного модуля с поворотом потока.

По мере увеличения скорости эффект очистки в обоих случаях снижается. У конструкции с поворотом снижение составляет 4%, а у классической – 13%. Полученный результат позволяет сделать вывод, что тонкослойный модуль с поворотом потока работает более устойчиво в условиях меняющейся нагрузки на очистные сооружения.

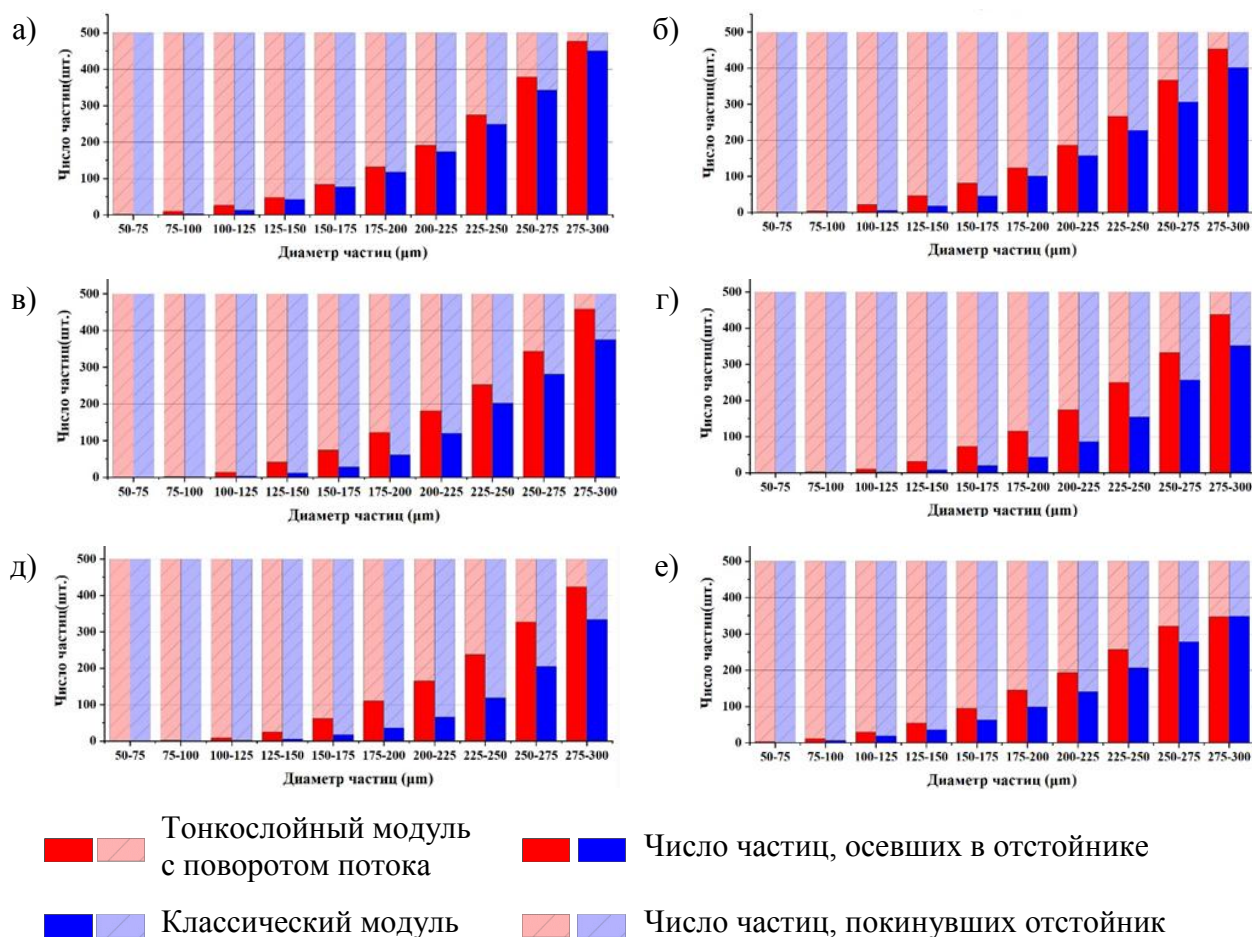


Рис. 5. Количество частиц, задержанных в расчетной области модели в зависимости от величины входной скорости:

а) 0,001 м/с; б) 0,0025 м/с; в) 0,005 м/с; г) 0,0075 м/с; д) 0,01 м/с; е) 0,0125 м/с

С помощью применения численного моделирования, в работе выполнена оценка эффективности осаждения взвешенных веществ в тонкослойном модуле отстойника, обеспечивающим поворот потока по высоте. Данная конструкция по сравнению с классической позволяет повысить эффект очистки от 8 до 30 % для диапазона скоростей входящего потока сточных вод от 0,0025 до 0,0125 м/с. Наиболее эффективно подвергаются осаждению частицы с диаметром более 225 мкм. Полученные результаты позволяют рекомендовать данную конструкцию модуля для применения в отстойниках.

Литература

1. Liu T.Z., Duan X.L., Duan W.J., Hu H.R. Adsorption & flocculation treatment of low concentration waste water of pulp & paper mills by bentonite // China Pulp & Paper. 2010. №29 (1). p. 43.
2. Ганичева Л.З. Оценка состояния поверхностных вод в промышленных городах Ростовской области // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1702.
3. Divakaran R., Sivasankara Pillai V.N. Flocculation of kaolinite suspensions in water by chitosan // Water Research. 2001. №35 (16). pp. 3904-3908.
4. Shang, W., Tu Q., Sun M. A study on advanced treatment of paper mill effluent by different flocculants // Paper and Papermaking. 2012. №31 (12). pp. 55-57.
5. Рововозова Т.И., Марьяш С.А., Мильченкова Д.В., Картузова Т.Д. Очистка воды от взвешенных веществ с помощью модифицированного тонкослойного отстойника с ершовой загрузкой // Материалы II Международной научно-практической интернет-конференции: Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата. Новочеркасск: ООО "Лик". 2021. С. 212-219.

6. Cheng Lin. Research progress of paper wastewater treatment technology // Chemical Engineer. 2021. №35(05). pp. 60-62.

7. Robescu D., Mandiș C., Robescu D. Design lamellar secondary settling tank using numerical modeling // U.P.B. Sci. Bull. Series D. №72 (4). 2010. pp. 211-216.

8. Kołodziejczyk K., Banaś M., Warzecha P. Flow modeling in a laboratory settling tank with optional counter-current or cross-current lamella // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. №53 (1). 2012. pp. 28-36.

9. Баринов А.М. Компьютерное моделирование потока воды в емкостных сооружениях во время пусконаладочных работ и эксплуатации // Градостроительство и архитектура. 2015. Т. 5. №1. С. 48-51.

10. Бобылева Т.Н. Моделирование очистки сточных вод на вертикальных фильтрах // Инженерный вестник Дона. 2020. №10 (70). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6643.

11. The-Anh N., Bing L., Nguyet D., Mitsuharu T., Hidenari Y. Computational fluid dynamics study on attainable flow rate in a lamella settler by increasing inclined plates // Journal of water and environment technology. 2019. №17 (2). pp. 76-88.

12. Wang Yilin, Ma Lishan, Wang Qiang, Yang Guoli, Fan Shuming, Chen Enhan. CFD-based simulation study of hydraulic characteristics of inclined plate sedimentation tank // Journal of Hebei College of Construction Engineering. 2021. №39 (04). pp. 121-128.

13. Справочное пособие к СНиП 2.04.03-85 Проектирование сооружений для очистки сточных вод. URL: files.stroyinf.ru/Data2/1/4294850/4294850580.pdf (дата обращения: 15.02.2023).

14. Zhao Jing. Three-dimensional numerical simulation of inclined tube sedimentation tank with countercurrent flow // Engineering and Construction. 2015 №29 (02). pp. 158-160.

15. Миньков, Л.Л., Дик И.Г., Пикущак Е.В. Моделирование турбулентного течения полидисперсной суспензии в гидроциклоне с инжектором // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. №1 (21). С. 75-83.

16. Wang Yilin, Ma Lishan, Wang Qiang, Yang Guoli, Fan Shuming, Chen Enhan. Simulation research on hydraulic characteristics of inclined plate sedimentation tank based on CFD // Journal of Hebei Institute of Architecture and Engineering. 2021. №39 (04). pp. 121-128.

References

1. Liu T.Z., Duan X.L., Duan W.J., Hu H.R. China Pulp & Paper. 2010. №29 (1). pp. 43.

2. Ganicheva L.Z. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2 (25) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1702.

3. Divakaran R., Sivasankara Pillai V.N. Water Research. 2001. №35 (16). pp. 3904-3908.

4. Shang, W., Tu Q., Sun M. Paper and Papermaking. 2012. №31 (12). pp. 55-57.

5. Rovovozova T.I., Mar'yash S.A, Mil'chenkova D.V., Kartuzova T.D. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii: Melioratsiya kak drayver modernizatsii APK v usloviyakh izmeneniya klimata. Novoчеркассk: ООО "Лик", 2021, pp. 212-219.

6. Cheng Lin. Chemical Engineer. 2021. №35 (05). pp. 60-62.

7. Robescu D., Mandiș C., Robescu D. U.P.B. Sci. Bull. Series D. №72 (4). 2010. pp. 211-216.

8. Kołodziejczyk K., Banaś M., Warzecha P. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. №53 (1). 2012. pp. 28-36.
9. Barinov A.M. Gradostroitel'stvo i arkhitektura. 2015. T. 5. №1. pp. 48-51.
10. Bobyleva T.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №10 (70) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6643.
11. The-Anh N., Bing L., Nguyet D., Mitsuharu T., Hidenari Y. Journal of water and environment technology. 2019. №17 (2). pp. 76-88.
12. Wang Yilin, Ma Lishan, Wang Qiang, Yang Guoli, Fan Shuming, Chen Enhan. Journal of Hebei College of Construction Engineering. 2021. №39 (04). pp. 121-128.
13. Spravochnoe posobie k SNIП 2.04.03-85 Proektirovanie sooruzheniy dlya ochistki stochnykh vod. [Design of wastewater treatment facilities]. URL: files.stroyinf.ru/Data2/1/4294850/4294850580.pdf
14. Zhao Jing. Engineering and Construction. 2015 №29 (02). pp. 158-160.
15. Min'kov, L.L., Dik I.G., Pikushchak E.V. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2013. №1 (21). pp. 75-83.
16. Wang Yilin, Ma Lishan, Wang Qiang, Yang Guoli, Fan Shuming, Chen Enhan. Journal of Hebei Institute of Architecture and Engineering. 2021. №39 (04). pp. 121-128.