

© Лю Сюэлян, аспирант

© Liu Xueliang, post-graduate student

© С. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент

© S. V. Fedorov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© Р. А. Гурдин, аспирант

© R. A. Gurdin, post-graduate student

© А. В. Кудрявцев, канд. техн. наук, доцент

© A. V. Kudryavtsev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: liuxueliang6@yandex.ru, svyatoslavfedorov@mail.ru,

E-mail: liuxueliang6@yandex.ru, svyatoslavfedorov@mail.ru,

22002050@edu.spbgasu.ru, argo14@mail.ru

22002050@edu.spbgasu.ru, argo14@mail.ru

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОСЛОЙНОГО МОДУЛЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS FLUENT

### CALCULATION OF THIN-LAYER MODULE PARAMETERS USING MODELING IN ANSYS FLUENT

Рассматривается возможность применения программы конечно-элементного анализа для определения конструктивных характеристик пластинчатого тонкослойного модуля, а также проводится сопоставление теоретических результатов с данными моделирования. Основная цель исследования заключается в разработке зависимостей для точного определения общих параметров типового пластинчатого тонкослойного модуля и их применения к новому типу изучаемого модуля. В работе применяется стандартная расчетная формула для традиционного пластинчатого тонкослойного модуля для определения его основных параметров. Для решения поставленной задачи, а именно — определения предельной скорости потока в модуле, используется формула Стокса с учетом предельного числа Рейнольдса. Эти методы применяются для вычисления расстояния между пластинами модуля ( $h_{ii}$ ), соответствующего скорости оседания частиц (гидравлическая крупность)  $U_p$ , а также для визуализации скоростей оседания частиц при различных конструктивных параметрах модуля. Сравнение полученных расчетных результатов с теоретическими значениями, полученными в ходе имитационного анализа в программе ANSYS FLUENT, позволяет подтвердить обоснованность расчетных формул на теоретическом уровне.

*Ключевые слова:* отстойник, тонкослойный модуль, компьютерное моделирование, ANSYS FLUENT, гидравлическая крупность.

The paper considers the possibility of using the finite element analysis program to determine the design characteristics of a plate thin-layer module and compares theoretical results with the simulation data. The main purpose of the study is to develop dependencies for an accurate determination of the general parameters of a typical thin-layer plate module and apply them to a new type of the module under study. In this paper, the standard calculation formula for a conventional plate thin-layer module is applied to determine its basic parameters. To solve the problem at hand, namely, determining the limiting flow velocity in the module, the Stokes formula is used, taking into account the limiting Reynolds number. These methods are used to calculate the distance between the plates of the module ( $h_{ii}$ ), corresponding to the settling velocity of particles (hydraulic coarseness)  $U_p$ , as well as to visualize the settling velocity of particles at different design parameters of the module. Comparison of the obtained calculated results with theoretical values obtained during simulation analysis in ANSYS FLUENT program allows confirming the validity of the calculated formulas at the theoretical level.

*Keywords:* settling tank, thin-layer module, computer modeling, ANSYS FLUENT, hydraulic coarseness.

#### Введение

Тонкослойный модуль является эффективным инструментом для повышения степени осаждения взвешенных частиц

в отстойнике, позволяющим значительно уменьшить площадь сооружения, и широко применяется на очистных сооружениях по всему миру [1]. При расчете тонкослой-

ного модуля можно выделить следующие основные характеристики: высота пластин, ширина и длина модуля, расстояние между пластинами и угол их наклона [2]. Вычисление параметров классического модуля с гладкими пластинами можно осуществлять, пользуясь нормативной документацией [3], руководствуясь гидравлической крупностью и задавая расстояние между пластинами. Кроме классической конструкции, в настоящее время используются модули с модифицированным профилем [4], подбор которого, как правило, осуществляется на основе обобщенных эмпирических данных, полученных производителем очистных сооружений из опыта эксплуатации. Такой подход позволяет достаточно быстро определять конкретные размеры тонкослойного модуля в сортаменте производителя в зависимости от расчетного расхода сточных вод и концентрации загрязняющих веществ<sup>1</sup>.

Следует отметить, что используемые в инженерной практике подходы при расчете допускают определенную вариативность при

<sup>1</sup> URL: <http://www.armatech.ru/products/biologicheskiye-zagruzki/tonkosloynnye-moduli/>

назначении характеристик модуля, что делает результат подбора менее точным. В дальнейшем такой расчет может привести к менее эффективной работе отстойника и увеличению эксплуатационных затрат на техническое обслуживание очистных сооружений [5].

Данное исследование выполнялось для уточнения расчетных зависимостей с учетом возможности подбора новых модификаций пластин тонкослойного модуля, например с П-образными полками на пластине [6].

С точки зрения функционирования существуют три основные схемы: прямоточная, противоточная и перекрестная. Рассмотрим зависимости, применяемые для расчета тонкослойного модуля при различных схемах (таблица).

Представленные в таблице зависимости позволяют установить конструктивные размеры модуля. При этом отсутствует формула, которая позволяет рассчитать высоту яруса в зависимости от гидравлических характеристик потока. Исследование направлено на получение данной зависимости с помощью результатов моделирования в ANSYS FLUENT.

**Зависимости, применяемые для расчета тонкослойного модуля при различных схемах**

Характеристика	Схема функционирования		
	Перекрестная	Прямоточная	Противоточная
Длина яруса $L_{bl}$ , м	$L_{bl} = \frac{v_w n_{ii}}{U_0} K_{dis}$	$L_{bl} = \frac{V_w h_{ii}}{U_0}$	
Производительность отстойника $q_{set}$ , м <sup>3</sup> /с	$q_{set} = \frac{7,2 K_{set} H_{bl} L_{bl} U_0}{K_{dis} h_{ii}}$	$q_{set} = 3,6 K_{set} v_w B_K L_b$	
Высота тонкослойного блока, $H_{bl}$	$H_{bl} = n_{ii} b_n$		
Расстояние между пластинами $b_n$	$b_n = h_{ii} \cos \theta$		
Высота яруса $h_{ii}$	0,025–0,2		

*Примечание.*  $V_w$  — скорость потока воды в ярусе отстойника, мм/с, применяемая по СНиП 2.04.03–85 (при высоких концентрациях загрязнений рекомендуется принимать большие значения);  $K_{dis}$  — коэффициент сноса выделенных частиц (при плоских пластинах  $K_{dis} = 1,2$ ; при рифленых пластинах  $K_{dis} = 1$ );  $U_0$  — гидравлическая крупность задерживаемых частиц, которую рекомендуется определять в слое, равном высоте яруса  $h_{ii}$ ;  $H_{bl}$  — высота тонкослойного блока, м;  $h_{ii}$  — высота яруса тонкослойного блока (модуля), м;  $L_b$  — длина расположения тонкослойных модулей, м;  $n_{ii}$  — количество ярусов в блоке, которое назначается из конструктивных соображений;  $\theta$  — угол наклона тонкослойного модуля.

### Методы

Рассмотрим процесс осаждения частиц в тонкослойном элементе, изображенном на рис. 1. Предположим, что продольная ось элемента  $z$  наклонена к горизонту под углом  $\theta$ , а поперечная ось  $x$  — под углом  $\alpha$ . Кроме того, входное сечение  $N-N$  в общем случае не совпадает с плоскостью живого сечения элемента и наклонено к оси  $z$  на угол  $\gamma$ . Для упрощения решения задачи мы будем рассматривать движение частицы в проекции на плоскость  $zoу$ .

Путем разложения абсолютной скорости движения частицы  $u$  на составляющие скорости  $u_z, u_y, u_x$  в направлении соответствующих осей координат  $x, y, z$  и выражения их через гидравлическую крупность частицы ( $U_0$ ) и скорость потока  $v$ , мы можем описать движение частицы в плоскости  $zoу$ , как описано в работе [7]:

$$u_z = \frac{dz}{dt} = v \pm U_0 \sin \theta; \quad (1)$$

$$u_y = \frac{dy}{dt} = v \pm U_0 \cos \theta; \quad (2)$$

$$u_x = \frac{dx}{dt} = 0. \quad (3)$$

В процессе осаждения координата  $x$  остается постоянной, поскольку движение частицы рассматривается в проекции на плоскость  $zoу$ .

Из уравнений (1)–(3) можно вывести скорости частиц, учитывающие их движение во всех направлениях (боковое перемещение и вертикальное оседание) при установившемся движении. Однако для получения фактической скорости осаждения в ярусе необходимо учесть скорость потока воды  $v$  в модуле. Значение скорости изменчиво, что может сказаться на точности расчета. Решение этой проблемы заключается в использовании критической скорости ламинарного потока, рассчитанной на основе критического числа Рейнольдса, для определения значения скорости потока  $v$  в модуле.

Поскольку турбулентность повышает транспортную способность потока, режим течения в отстойнике должен быть ламинарным, что означает, что число Рейнольдса  $Re$  не должно превышать 500 [8].

Пользуясь уравнением (4), можно оценить максимальную скорость движения воды при ламинарном режиме [9]:

$$Re = \frac{R_G V}{\nu}, \quad (4)$$

где  $Re$  — критерий Рейнольдса;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости;  $R_G$  — гидравлический радиус яруса тонкослойного модуля;  $V$  — максимальная скорость потока.

Гидравлический радиус полок тонкослойного модуля можно записать в следующем виде:

$$R_G = \frac{F}{\chi}, \quad (5)$$

где  $F = 2h_{ii} \cos \theta b$  — площадь живого сечения яруса тонкослойного модуля;  $\chi = 2(h_{ii} \cos \theta + b)$  — смоченный периметр;  $h_{ii}$  — высота яруса (расстояние между пластинами тонкослойного модуля);  $b$  — ширина полок яруса.

Объединив уравнения (4) и (5), получим выражения для расчета максимального значения  $h_{ii}$  и рабочего расхода воды тонкослойного модуля  $q$ :

$$h_{ii} = \frac{\nu Re}{(bV - 2b\nu Re) \cos \theta}; \quad (6)$$

$$q = nbVh_{ii} \cos \alpha, \quad (7)$$

где  $n$  — количество ярусов тонкослойного модуля;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости.

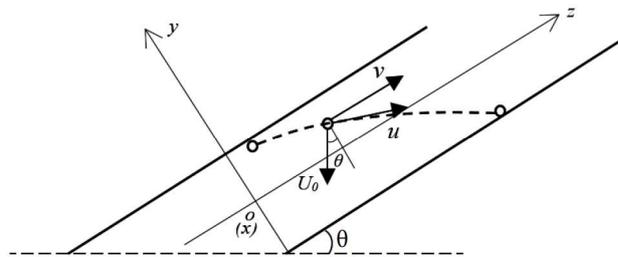


Рис. 1. Схема осаждения частицы в тонкослойном элементе

Ширина полок яруса ( $b$ ) на практике обычно фиксирована и составляет 1 м. Для обеспечения ламинарного режима потока в тонкослойном модуле, где  $Re \leq 500$ , мы можем использовать значение кинематической вязкости жидкости  $\nu = 0,000001307 \text{ м}^2/\text{с}$  при  $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  согласно [10]. На основе этих данных построен график зависимости (рис. 2) максимальной скорости потока от расстояния между пластинами тонкослойного модуля для различных углов наклона модуля ( $45\text{--}60 \text{ }^\circ$ ).

Однако при реальной эксплуатации тонкослойного модуля из-за образования биопленки на поверхности яруса, высокой вязкости частиц, высокого коэффициента шероховатости пластин тонкослойного модуля или увеличения концентрации взвешенных веществ в поступающих сточных водах частицы будут прилипать к пластине и постепенно накапливаться, как показано на рис. 2.

Вследствие накопления частиц на пластине уменьшение расстояния между пластинами приводит к увеличению скорости потока воды, при этом формула расхода воды для тонкослойного модуля имеет вид:

$$q = bV(1 - K_{\text{нак}})h_{\text{п}} \cos \alpha, \quad (8)$$

где  $K_{\text{нак}}$  — коэффициент накопления частиц в ярусе тонкослойного модуля, %, равен отношению площади накопления частиц к общей площади в ярусе.

Накопление частиц приводит к уменьшению доступной площади в ярусе, в результате чего частицы малого размера двигаются с потоком из модуля и влияют на эффективность очистки воды, частицы большого размера осаждаются в ярусе. Но из-за накопления частиц скорость потока воды увеличивается, скорость осаждения частиц большого размера будет замедляться силой Стокса, что увеличивает накопление частиц в ярусе. На рис. 3 показана зависимость скорости потока от коэффициента накопления частиц в ярусе тонкослойного модуля при различных расстояниях между пластинами.

Из графика видно, что скорость потока внутри модуля увеличивается с уменьшением допустимой площади в ярусе.

Теоретическая скорость оседания частиц  $V_{\text{част}}$  представляет собой разницу между составляющей скорости потока воды по оси  $y$  и гидравлической крупностью  $U_0$  [11]:

$$V_{\text{част}} = U_0 - \nu \sin \theta. \quad (9)$$

Для определения гидравлической крупности частицы используется формула Аллена–Прандтля, которая применяется при ламинарном режиме потока ( $Re \leq 500$ ):

$$U_0 = \frac{0,1533gD^{1,14}}{\nu^{0,43}} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right), \quad (10)$$

где  $U_0$  — гидравлическая крупность;  $g$  — ускорение свободного падения ( $g = 9,80665 \text{ м}^2/\text{с}^2$ );  $D$  — размер частицы, м;  $\rho_s$  — плотность частицы (в данном расчете в качестве частиц принят песок с плотностью  $1700 \text{ кг}/\text{м}^3$ );  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости (в данном расчете  $\nu = 0,000000903 \text{ м}^2/\text{с}$  при  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Для определения диаметра частиц руководствовались результатами исследования, по итогам которого в естественном грунте более 80 % частиц имеют размер  $0,01\text{--}0,25 \text{ мм}$  [12].

На рис. 4 представлены графики зависимости минимальной скорости осаждения в тонкослойном модуле от диаметра частиц (в диапазоне от  $0,01$  до  $0,25 \text{ мм}$ ) при различных расстояниях между пластинами.

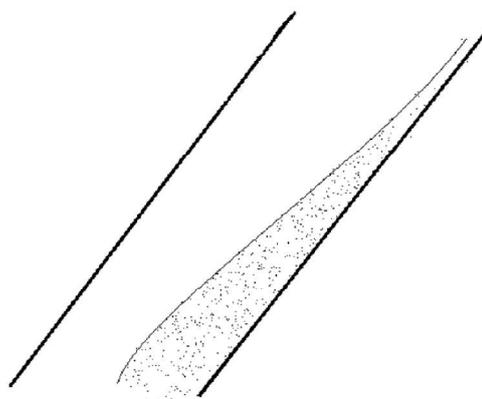


Рис. 2. Схема накопления частиц в ярусе тонкослойного модуля

Из рис. 4 можно сделать вывод, что скорость осаждения частиц пропорциональна их диаметру при постоянной плотности. Чем больше диаметр частиц, тем больше их вес, что влечет за собой увеличение скорости осаждения. Однако, когда диаметр частиц слишком мал, их собственная скорость осаждения  $U_0$  становится меньше скорости восходящего потока воды в модуле. На графике это выражается положительным значением скорости и означает движение частиц вверх.

Для упрощения нелинейной зависимости для скорости частиц (см. рис. 3) предлагаем использовать линейное уравнение следующего вида:

$$V_{\text{част}} = 0,0015D + 0,0133. \quad (11)$$

После подстановки уравнения (11) в формулу (6) было получено выражение для определения высоты яруса:

$$h_{ii} = \frac{v \operatorname{Resin} \theta}{(b(U_0 + 0,0015D - 0,0133) - 2v \operatorname{Resin} \theta) \cos \theta}. \quad (12)$$

Для проверки приведенного вывода был выполнен конечно-элементный ана-

лиз в программе моделирования ANSYS FLUENT. В рамках этого анализа были использованы те же данные, что и в теоретических расчетах:

1. Расход воды, соответствующий предельному числу Рейнольдса.

2. Ширина яруса  $b = 1$  м, угол наклона модуля  $55^\circ$ .

3. Температура воды  $10^\circ\text{C}$ .

4. Частицы — из влажного кварцевого песка с плотностью  $1700 \text{ кг/м}^3$  и размером от 0,01 до 0,25 мм.

5. Модельный эксперимент выполнялся для шести вариантов конструкций модуля. Высота яруса принималась равной 50, 60, 70, 80, 90, 100 мм.

6. Для точности расчета и оценки среднего значения моделируемых величин каждый вариант конструкции модуля просчитывался 25 раз. Массовый расход частиц принимался равным 50 г/с.

Далее сгенерирована расчетная сетка, а также уточнены размеры ячеек на границах взаимодействия жидкости с конструкцией

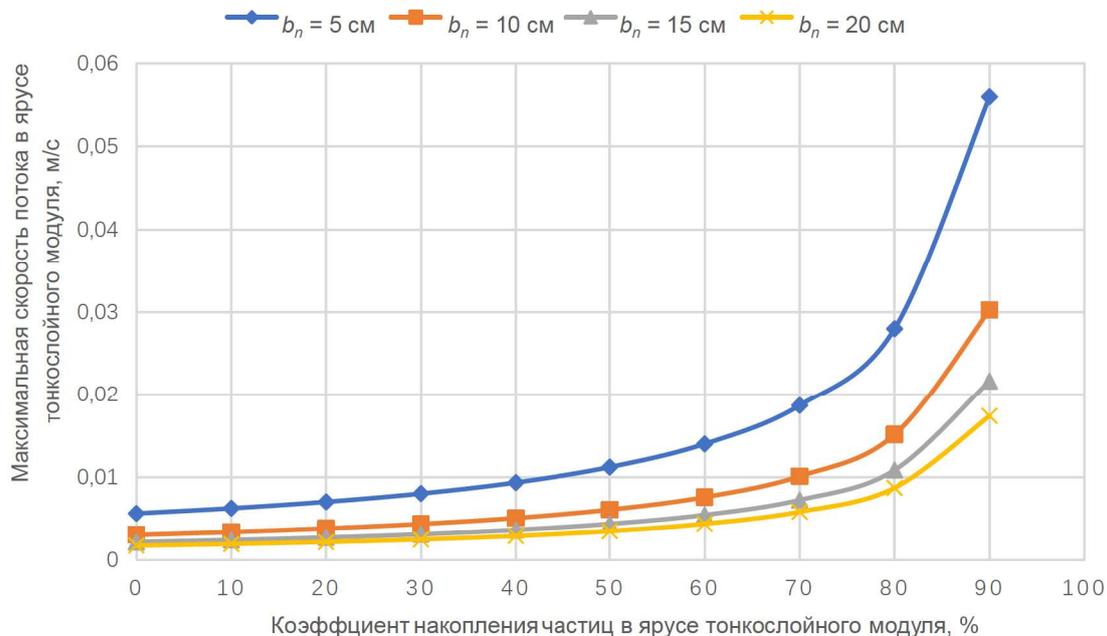


Рис. 3. Зависимость скорости потока от коэффициента накопления частиц в ярусе тонкослойного модуля при различных расстояниях между пластинами

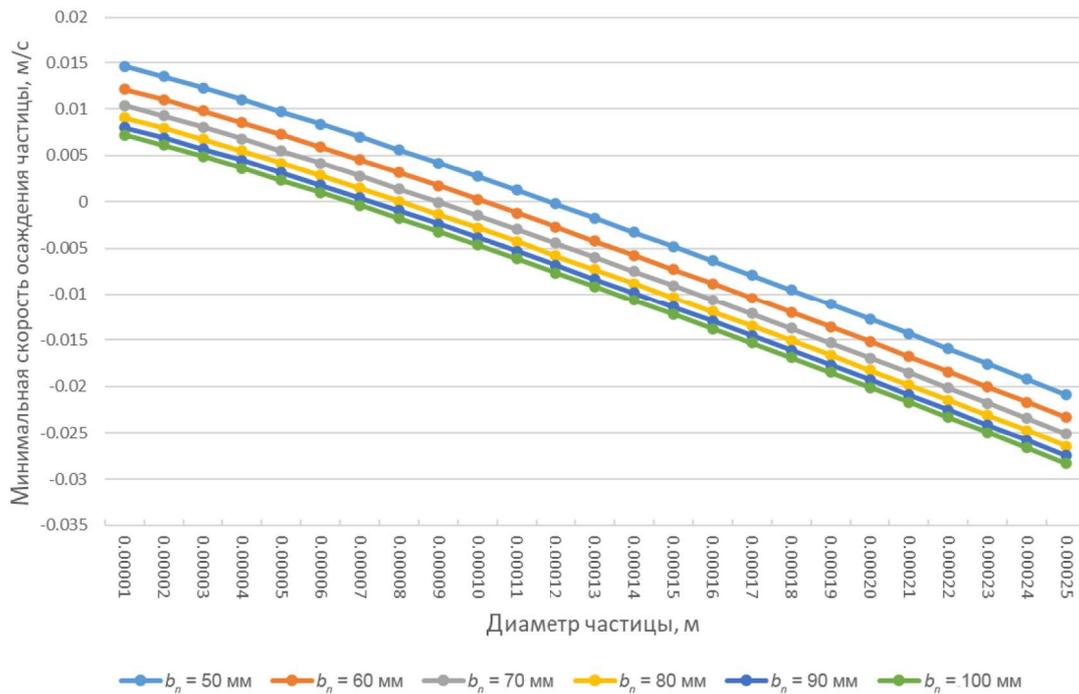


Рис. 4. Зависимость минимальной скорости осаждения частиц от диаметра частиц при различных расстояниях между пластинами тонкослойного модуля

сооружения. Для этого использованы формулы, учитывающие примерную скорость и режимы движения потока воды [13]. В итоге можно получить оптимальную расчетную сетку, учитывающую особенности течения жидкости в конструкции, что даст точность и эффективность проводимого анализа.

Размер ближайшего к стенкам элемента сетки  $\Delta y$  вычислялся по формуле

$$\Delta y = \chi y^+ 74 Re^{-13/14}, \quad (13)$$

где  $\chi$  — гидравлический радиус;  $y^+$  — безразмерный параметр для выбранной модели турбулентности (принимается равным 1 для низкорейнольдсовых моделей);  $Re$  — число Рейнольдса (для данного расчета число Рейнольдса составило 500).

Суммарная толщина пограничного слоя оценивалась с помощью зависимости

$$d = 0,035 \chi Re^{-1/7}. \quad (14)$$

Для моделирования траектории движения частиц в воде была выбрана модель DPM (Discrete Phase Model) — дискретная фазовая модель [14]. В настройках симуляции общее

время моделирования составило 30 с, при этом начало инъектирования частиц в модуль было установлено на 15-й секунде, а завершение подачи частиц ограничивалось 16-й секундой. Для обеспечения сходимости задачи шаг по времени был принят равным 0,01 с.

После проведения расчетов в программе ANSYS FLUENT была получена диаграмма скоростного поля потока и частиц в канале тонкослойного модуля (рис. 5). На графике цветом отражаются области высоких и низких скоростей потока воды. Частицы отмечены векторами для отражения их направления движения.

При более детальном изучении траекторий движения частиц в межпластинчатом пространстве, руководствуясь результатами модельного расчета, был построен график зависимости скорости осаждения частиц от диаметра частиц и высоты яруса (рис. 6). Отрицательное значение скорости свидетельствует об осаждении частиц. На графике видно,

что с увеличением диаметра частиц скорость осаждения возрастает. Также следует отметить, что увеличение высоты яруса также способствует увеличению скорости осаждения. Полученные закономерности соответствуют ожидаемым результатам и подтверждают данные теоретических изысканий.

Путем обобщения результатов модельных расчетов было получено функциональное уравнение следующего вида:

$$v_{\text{част.}} = 0,0015D - 0,00192. \quad (15)$$

Подставив это уравнение в формулу (6), мы получили экспериментальную формулу для определения высоты яруса тонкослойного модуля:

$$h_{ii} = \frac{v R \sin \theta}{(b(U_0 + 0,0015D + 0,00192) - 2v R \sin \theta) \cos \theta}. \quad (16)$$

Полученное выражение позволяет учесть режим движения и вязкость потока, диаметр осаждаемых частиц и конструктивные особенности модуля.

### Обсуждение

Следует отметить, что теоретическая формула (12) и формула (16), полученная на основании модельных расчетов, позволяют получить достаточно близкие результаты. Так, например, если задать гидравлическую крупность  $U_0 = 0,036$  м/с и диаметр осаждаемых частиц  $D = 0,25$  мм, по зависимо-

сти (12) высота яруса составит  $h_{ii} = 49,6$  мм, а по зависимости (16) получается значение  $h_{ii} = 56,4$  мм. Безусловно, результаты вычисления, получаемые по представленным зависимостям, имеют некоторые погрешности, поскольку теоретический и модельный расчеты идеализированы и не учитывают присутствие в потоке большого числа частиц и их взаимодействие между собой. В дальнейшем для уточнения зависимости необходимо провести дополнительные эксперименты на лабораторной установке отстойника с тонкослойным модулем.

### Выводы

В ходе работы были рассмотрены нормативные зависимости для расчета и проектирования отстойников с пластинчатым тонкослойным модулем и отмечено отсутствие формулы для определения высоты яруса  $h_{ii}$  в зависимости от характеристик потока и габаритов модуля. С целью установления функциональной зависимости для высоты яруса было проанализировано уравнение Рейнольдса и выполнено моделирование в программе ANSYS FLUENT. Результаты моделирования показали увеличение скорости осаждения при увеличении диаметра частиц и высоты яруса, что соответствует ожидаемым результатам. Полученная расчетная за-

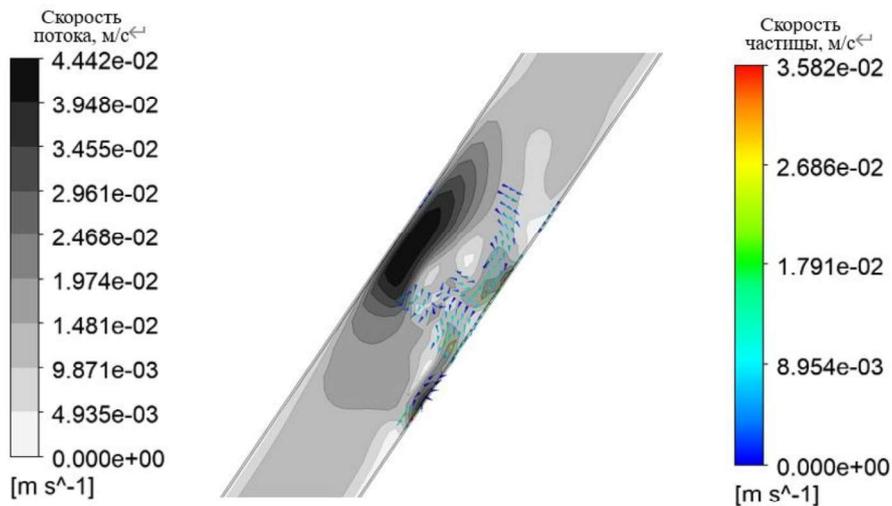


Рис. 5. Диаграмма скоростного поля потока и частиц для высоты яруса  $h_n = 50$  мм

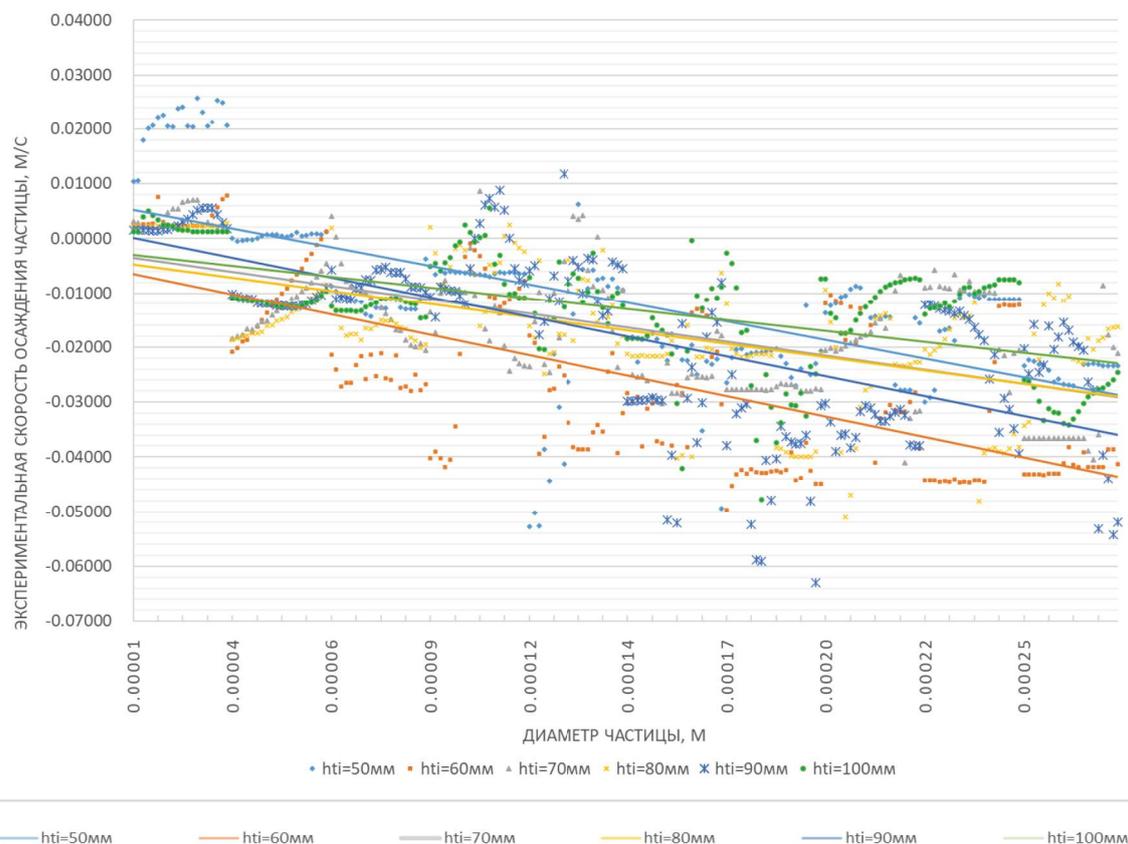


Рис. 6. Экспериментальная скорость осаждения кварцевого песка диаметром 0,01–0,25 мм при расстоянии между пластинами модуля  $h_{ti} = 50\text{--}100$  мм и угле наклона  $55^\circ$

висимость (16) может быть рекомендована к практическому применению в инженерной практике при определении характеристик тонкослойного модуля. Расчет высоты яруса позволит оптимизировать работу тонкослойного модуля и повысить эффективность работы отстойника в целом. Дальнейшее развитие данного исследования может включать в себя экспериментальное подтверждение расчетов в лабораторных и промышленных условиях, что позволит расширить область применения результатов на практике.

#### Библиографический список

1. Lan Liu, Perez M. A., Whitman J. B. Evaluation of Lamella Settlers for Treating Suspended Sediment // Water. 2020. Vol. 12 (10). 2705.
2. Демура М. В. Проектирование тонкослойных отстойников. Киев: Будівельник, 1981. 51 с.

3. Проектирование сооружений для очистки сточных вод: справочное пособие к СНиП / под ред. З. С. Шестопаловой. М.: Стройиздат, 1990. 192 с.

4. Фрог Д. Б. Классификаторы тонкослойных модулей для наружных сетей водоснабжения. М.: НИИСФ РААСН, 2015. 48 с.

5. Jia B., Lu J., Xiao F., Zou Y., You Y., Chen Y., Yang Z. Difficulties and solutions in the engineering applications of dense media loading coagulation and sedimentation // Chinese Journal of Environmental Engineering. 2018. Vol. 12 (12). Pp. 3540–3546.

6. Лю Сюэлян, Федоров С. В., Верхотуров В. П. Исследование усовершенствованного типа тонкослойного модуля // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 5 (94). С. 83–90.

7. Иванов В. Г. Тонкослойные отстойники для интенсификации очистки природных и сточных вод: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1998. 304 с.

8. Демура М. В. Проектирование тонкослойных отстойников. Киев: Будівельник, 1981. 51 с.

9. Максимов Е. А., Васильев В. И. Методика расчета тонкослойных модулей нефтеловушки на основе

метода баланса мощностей // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2014. № 3. С. 37–41.

10. Wilson M. P., Worrall F. The heat recovery potential of 'wastewater': a national analysis of sewage effluent discharge temperatures // Environmental Science: Water Research & Technology. 2021. Vol. 7 (10). Pp. 1760–1777.

11. Дроздов Е. В., Журавлева И. В. Расчёт гидравлической крупности частиц загрязнений сточных вод // Научный вестник Воронежского гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2009. № 2 (14). С. 29–35.

12. Шилова Н. А., Студёнов И. И. Особенности расчёта гидравлической крупности частиц при моделировании начальной концентрации взвешенных веществ в приустьевых районах арктических морей (на примере Белого моря) // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 14. С. 295–307.

13. Пугачев П. В., Свобода Д. Г., Жарковский А. А. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинах с использованием пакета ANSYS CFX. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. 119 с.

14. Deldar S., Jafarian A., Mahdavi Keshavar O. Study and investigation of secondary sedimentation tank equipped with lamella using discrete phase model (DPM) // Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2019. Vol. 9 (1). Pp. 173–186.

## References

1. Lan Liu, Perez M. A., Whitman J. B. Evaluation of Lamella Settlers for Treating Suspended Sediment. *Water*, 2020, vol. 12 (10), 2705.

2. Demura M. V. *Proektirovanie tonkosloynykh otstoynikov* [Design of thin-layer settling tanks]. Kiev, Budivel'nik, 1981, 51 p.

3. *Proektirovanie sooruzheniy dlya ochistki stochnykh vod. Spravochnoe posobie k SNIp* [Design of structures for wastewater treatment. Reference manual to SNIp]. Ed. by Shestopalova Z. S. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990, 192 p.

4. Frog D. B. *Klassifikatory tonkosloynykh moduley dlya naruzhnykh setey vodosnabzheniya* [Classifiers of thin-layer modules for external water supply networks]. Moscow, NIISF RAASN Publ., 2015, 48 p.

5. Jia B., Lu J., Xiao F., Zou Y., You Y., Chen Y., Yang Z. Difficulties and solutions in the engineering applications of dense media loading coagulation and sedimentation. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, vol. 12 (12), pp. 3540–3546.

6. Lyu Syuelyan, Fedorov S. V., Verkhoturov V. P. *Issledovanie usovershenstvovannogo tipa tonkosloynogo modulya* [Research of the improved type of thin-layer

module]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 5 (94), pp. 83–90.

7. Ivanov V. G. *Tonkosloynnye otstoyniki dlya intensivatsii ochistki prirodnykh i stochnykh vod. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Thin-layer settling tanks for intensification of natural and waste water treatment. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 1998, 304 p.

8. Demura M. V. *Proektirovanie tonkosloynykh otstoynikov* [Designing of thin-layer settling tanks]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1981, 51 p.

9. Maksimov E. A., Vasil'ev V. I. *Metodika rascheta tonkosloynykh moduley neftelevushki na osnove metoda balansa moshchnostey* [Methodology of calculation of thin-layer oil trap modules on the basis of the method of power balance]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya – Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbon Raw Materials*, 2014, no. 3, pp. 37–41.

10. Wilson M. P., Worrall F. The heat recovery potential of 'wastewater': a national analysis of sewage effluent discharge temperatures. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2021, vol. 7 (10), pp. 1760–1777.

11. Drozdov E. V., Zhuravleva I. V. *Raschyot gidravlicheskoy krupnosti chastits zagryazneniy stochnykh vod* [Calculation of hydraulic coarseness of particles of wastewater pollution]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gos. arkhit.-stroit. un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura – Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture*, 2009, no. 2 (14), pp. 29–35.

12. Shilova N. A., Studyonov I. I. *Osobennosti rascheta gidravlicheskoy krupnosti chastits pri modelirovanii nachal'noy konsentratsii vzveshennykh veshchestv v priustevykh rayonakh arkticheskikh morey (na primere Belogo morya)* [Features of calculation of hydraulic particle size when modeling the initial concentration of suspended solids in the mouth areas of the Arctic seas (on the example of the White Sea)]. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 14, pp. 295–307.

13. Pugachev P. V., Svoboda D. G., Zharkovskiy A. A. *Raschet i proektirovanie lopastnykh gidromashin. Raschet vyazkogo techeniya v lopastnykh gidromashinakh s ispol'zovaniem paketa ANSYS-CFX* [Calculation and Design of Blade Hydraulic Machines. Calculation of viscous flow in vane hydraulic machines using ANSYS-CFX package]. St. Petersburg, Politekhneskiy universitet Publ., 2016, 119 p.

14. Deldar S., Jafarian A., Mahdavi Keshavar O. Study and investigation of secondary sedimentation tank equipped with lamella using discrete phase model (DPM). *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2019, vol. 9 (1), pp. 173–186.