

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ В ТОНКОСЛОЙНОМ МОДУЛЕ

MODELING PARTICLE DEPOSITION IN LAMELLA MODULE

Представлено исследование осаждения частиц в тонкослойном модуле новой конструкции: для улучшения эффективности осаждения межпластиночное пространство модуля разделено на верхний канал движения сточных вод и нижний канал движения осадка, гидравлически связанный с верхним рядом отверстий. Для анализа кинетики осаждения частиц предлагается математическая модель, основанная на теории осаждения в потоке малой глубины. Математическая модель для прогнозирования траектории движения частиц учитывает действующие на частицы силы плавучести, тяжести, сопротивления жидкости и дополнительной силы потока в канале удаления осадка, что позволило составить уравнение баланса сил. Для оценки математической модели проводился эксперимент. Результаты лабораторного исследования показали, что модель достаточно хорошо передает процесс осаждения частиц в тонкослойном модуле. Данное исследование позволит получить теоретическое обоснование и практические рекомендации для проектирования новой конструкции тонкослойного модуля.

Ключевые слова: тонкослойный модуль, осаждение частиц, траектория движения частиц.

This study examines particle deposition in a newly designed lamella module. To improve deposition efficiency, the inter-plate space of the module is divided into an upper wastewater flow channel and a lower sludge flow channel, which is hydraulically connected to the upper row of orifices. To analyze the kinetics of particle deposition, a mathematical model based on the theory of deposition in shallow depth flow is proposed. The model for predicting particle motion trajectories accounts for the forces of buoyancy, gravity, fluid resistance, and additional flow forces acting on the particles in the sludge removal channel, which has made possible to formulate a force balance equation. An experiment was conducted to evaluate the mathematical model. The results of the laboratory study indicate that the model accurately reflects the process of particle deposition in the lamella module. This study provides theoretical justification and practical recommendations for the design of new lamella modules.

Keywords: lamella module, particle deposition, particle motion trajectory.

Введение

Отстойники с тонкослойными модулями достаточно широко используются для очистки сточных вод [1] с целью удаления взвешенных частиц. Применение тонкослойного модуля позволяет значительно повысить эффективность осаждения [2]. Большинство современных исследований основывается на результатах осаждения частиц, а не на их специфическом поведении при движении, что недостаточно для полного представления и объяснения процесса отделения частиц в тонкослойных модулях.

В работах [3, 4] представлена математическая модель осаждения частиц, основанная на теории движения частиц в межпластинчатом пространстве. В работах [5, 6] изучен механизм влияния наклонной пластины на усиление эффекта осаждения частиц. В работе [7] создана теоретическая модель, основанная на скорости осаждения частиц, что способствует повышению точности расчетов.

Целью данного исследования является углубленное изучение характеристик движения частиц в классическом и новом тон-

кослойных модулях. Основной задачей исследования является создание уравнения, описывающего движение частиц в межпластинчатом пространстве, для прогноза траектории осаждения в тонкослойном модуле новой конструкции.

Предварительно с помощью программы *Ansys Fluent* были смоделированы условия течения в модулях различной конструкции, что послужило основой для анализа характеристик движения частиц. Программа использует конечно-элементный анализ для решения практических задач и успешно применяется во всем мире для точного моделирования осаждения частиц в потоках воды [8, 9]. Когда частицы осаждаются в ламинарном потоке и на их движение в основном влияет вязкое сопротивление жидкости, инерционные силы можно считать пренебрежимо малыми [10].

Частицы в воде подвержены действию не только объемных сил (сила Архимеда и сила тяжести) [11], но и множества других сил, включая силы сопротивления жидкости; силу Бассета¹; поднимающую силу, вызванную вращением частиц (эффект Маг-

¹ Эта сила обусловлена развитием запаздывающего пограничного слоя при изменении относительной скорости (ускорения) тел, движущихся в жидкости.

нуса) [12]; поднимающую силу, вызванную сдвигом жидкости (сила Сафмана²) [13], и силы взаимодействия между частицами [14]. Под совместным действием этих сил частицы в тонкослойном модуле будут двигаться по определенной траектории [15]. Для обеспечения точности при создании математической модели движения частицы и вместе с тем упрощения сложной задачи были сделаны следующие допущения [16]:

- 1) влияние пограничного слоя на движение частиц игнорируется;
- 2) частицы считаются жесткими однородными сферами, а жидкость — несжимаемой;
- 3) движения частиц в тонкослойном модуле считаются независимыми друг от друга;
- 4) частицы не деформируются;
- 5) частицы не контактируют друг с другом.

В данной работе предложена новая конструкция тонкослойного модуля (рис. 1), в которой межпластинчатое пространство разделено на два канала: канал движения сточных вод и канал движения осадка. Канал осадка представляет собой замкнутое пространство, соединенное с нижним трубопро-

² Эта сила обусловлена разностью давлений вдоль градиента скорости. Она возникает вследствие эффекта инерции в вязком потоке вокруг частицы и направлена перпендикулярно потоку.

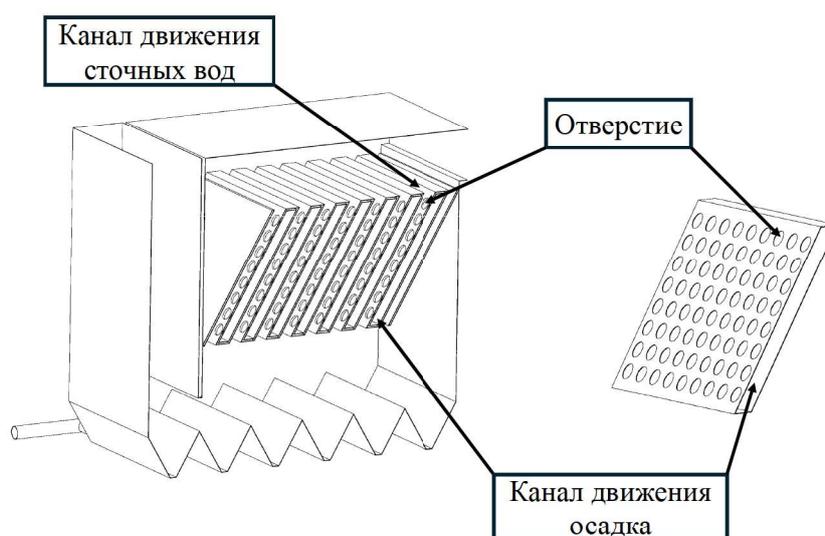


Рис. 1. Конструкция нового тонкослойного модуля

водом отстойника через клапан сброса осадка. Между каналом осадка и каналом сточных вод имеется ряд связующих отверстий.

Методы

Целью данной работы было создание уравнения скорости осаждения частиц в тонкослойном модуле. Для достижения этой цели необходимо исследовать механизмы поведения частиц при критическом движении [17] в тонкослойных модулях. В процессе анализа этих механизмов важно рассмотреть характеристики сил, действующих на частицы в тонкослойном модуле классической и новой конструкции, а также описать механическое поведение частиц, составив уравнения баланса сил для теоретического обоснования дальнейших экспериментов.

Рассмотрим силы, оказывающие влияние на движение частиц в классическом тонкослойном модуле (рис. 2). Среди всех этих сил главную роль играют сила Архимеда, сила тяжести и силы сопротивления жидкости [18]. Для изучения кинематических характеристик частицы покажем векторы указанных сил на схеме. Поток воды поступает в модуль вертикально. Модуль состоит

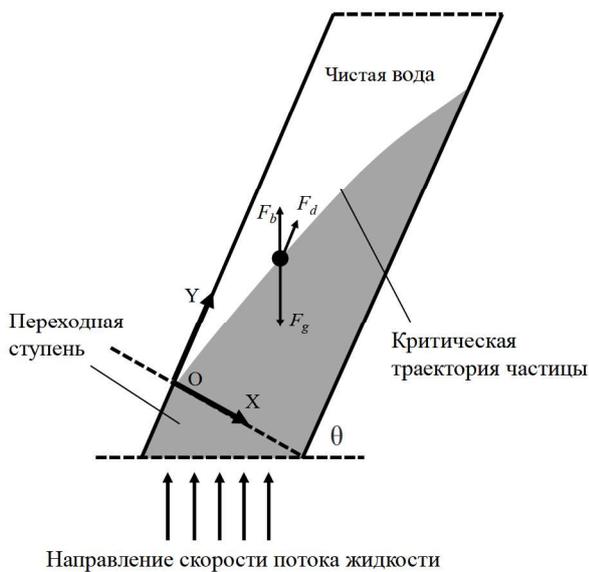


Рис. 2. Силы, действующие на частицы в классическом тонкослойном модуле

из пластин, которые наклонены к горизонтальной плоскости под углом θ . В данном случае рассматривается плоская задача. Начало координат плоскости XOY находится на верхней пластине. Ось OY параллельна, а OX нормальна к пластинам модуля.

Для моделирования осаждения частиц необходимо найти зависимость для каждой силы.

Формула массы частицы:

$$m_{\text{ч}} = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}}. \tag{1}$$

Формула силы тяжести частицы:

$$F_g = m_{\text{ч}} g = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} g. \tag{2}$$

Формула силы Архимеда:

$$F_b = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ж}} g. \tag{3}$$

В несжимаемой сплошной жидкости частицы испытывают силу сопротивления. Направление этой силы всегда противоположно направлению движения частицы, а ее величина зависит от размера, диаметра и характеристик частиц, а также от скорости и свойств жидкости. Формула силы сопротивления жидкости имеет следующий вид:

$$F_d = C_D \frac{\pi r_{\text{ч}}^2}{2} \rho_{\text{ж}} (u_{\text{ч}} - u_{\text{ж}})^2. \tag{4}$$

Коэффициент сопротивления зависит от режима движения частиц в потоке и определяется числом Рейнольдса Re [19]. Его можно определить с помощью следующей зависимости:

$$C_D = \frac{24(1 + 0,17 Re^{\frac{2}{3}})}{Re}. \tag{5}$$

Когда частица достигает установившейся скорости оседания, векторная сумма сил равна нулю, и достигается состояние механического равновесия. По второму закону Ньютона уравнение движения частицы вдоль оси y имеет следующий вид:

$$F_g \sin \theta - F_b \sin \theta - F_d = m_{\text{ч}} \frac{du}{dt}. \tag{6}$$

Подставляя (2), (3) и (4) в уравнение (6), получим

$$\frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) g \sin \theta - C_D \frac{1}{2} \rho_{\text{ж}} \pi r_{\text{ч}}^2 (u_{\text{ч}} - u_{\text{ж}})^2 = 0. \quad (7)$$

Полученная математическая модель описывает кинематические свойства частиц в классическом тонкослойном модуле. Далее мы рассчитаем кинематические свойства частиц в новом тонкослойном модуле на основе этой модели.

Рассмотрим силы, определяющие движение частицы в новом тонкослойном модуле (рис. 3). В канале движения сточной воды силы, действующие на частицы, такие же, как в описанной выше модели. Рассмотрим силы в канале осадка. На нижний конец канала действует дополнительная сила потока воды, который удаляется из модуля. Влияние на движение частиц оказывают силы тяжести, силы Архимеда и силы сопротивления потоку воды. Кроме того, на частицы действуют силы, обусловленные ускорением потока воды. Аналогично определим зависимость для каждой силы.

Клапан на канале осадка всегда открыт, и расход в результате соответствует следующему выражению:

$$Q_{\text{к}} = \pi r_{\text{к}}^2 u_{\text{к}}. \quad (8)$$

Этот расход вызывает нисходящее ускорение частиц в канале осадка, что решается уравнением импульса:

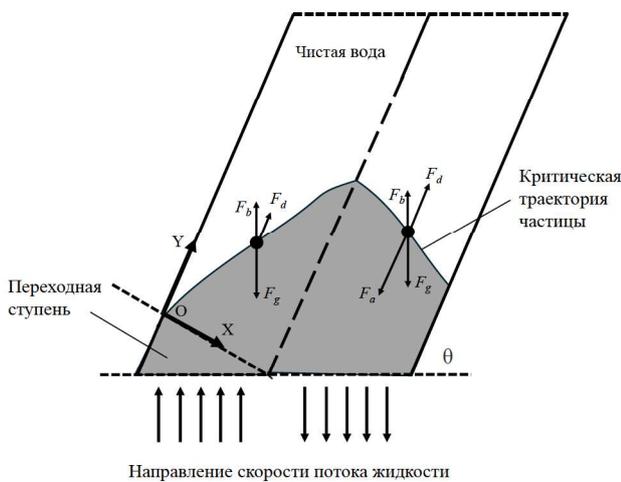


Рис. 3. Силы, действующие на частицы в новом тонкослойном модуле

$$a = \frac{Q_{\text{к}} \cdot u_{\text{к}}}{V_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{к}}}. \quad (9)$$

Зависимости для силы Архимеда, силы тяжести и силы сопротивления потоку воды аналогичны предыдущему случаю.

Дополнительная сила воздействия увлекающего потока воды на частицы имеет следующий вид:

$$F_a = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} a. \quad (10)$$

Определим скорость оседания частиц в новом модуле. По второму закону Ньютона уравнение движения частицы вдоль оси y имеет следующий вид:

$$F_g \sin \theta + F_a - F_d - F_b \sin \theta = m_{\text{ч}} \frac{du}{dt}. \quad (11)$$

Подставляя зависимости для сил, получим следующее уравнение:

$$\frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \left[g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \rho_{\text{ч}} \frac{Q_{\text{к}} \cdot u_{\text{к}}}{V_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{к}}} \right] - C_D \frac{\pi r_{\text{ч}}^2}{2} \rho_{\text{ж}} (u_{\text{ч}} - u_{\text{ж}})^2 = 0. \quad (12)$$

При этом скорость оседания частиц всегда превышает скорость потока жидкости. Следовательно, получим скорость оседания частиц:

$$u_{\text{ч}} = u_{\text{ж}} - \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}}}{3C_D \rho_{\text{ж}}} \times \left[g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\rho_{\text{ч}} Q_{\text{к}} \cdot u_{\text{к}}}{V_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{к}}} \right]}. \quad (13)$$

Уравнения траектории движения частиц будут иметь следующий вид:

$$x(t) = x_0 + t \times \left(\frac{u_{\text{ж}} \cos \theta - \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}} \cos^2 \theta}{3C_D \rho_{\text{ж}}} \left[g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\rho_{\text{ч}} Q_{\text{к}} \cdot u_{\text{к}}}{V_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{к}}} \right]}}{1} \right); \quad (14)$$

$$y(t) = y_0 + t \times \left(\frac{u_{\text{ж}} \sin \theta - \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}} \sin^2 \theta}{3C_D \rho_{\text{ж}}} \left[g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\rho_{\text{ч}} Q_{\text{к}} \cdot u_{\text{к}}}{V_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{к}}} \right]}}{1} \right). \quad (15)$$

Полученные зависимости могут служить теоретическим обоснованием для разработки методики инженерного расчета тонкослойного модуля новой конструкции. Для проверки

модели движения частиц, описанной в данной статье, была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 4). Она состоит из открытого резервуара размером $440 \times 160 \times 340$ мм, выполненного из акрила. В резервуаре установлена конструкция тонкослойного модуля размером 205×160 мм. На наклонной пластине предусмотрены отверстия диаметром 5 мм. Угол наклона пластины 60° , расстояние между наклонными пластинами 30 мм. Вода с частицами подается из резервуара с помощью центробежного насоса.

Для эксперимента в качестве взвешенных частиц использовался натуральный кварцевый песок по стандарту ГОСТ 22551–77: плотность $\rho = 2650$ кг/м³. Через сито отбирались кварцевые песчинки диаметром 0,0001, 0,0002, 0,0003 и 0,0004 м. Перед экспериментом установка заполнялась водой и достигалось установившееся движение потока. В зоне движения потока к тонкослой-

ному модулю его скорость поддерживалась больше скорости седиментации частиц, что позволило предотвратить преждевременное оседание частиц на дно емкости и обеспечить их нахождение во взвешенном состоянии. Это также предотвращает эффект прилипания частиц к стенкам [20].

Целью данного эксперимента являлась проверка теоретической модели скорости осаждения частиц в тонкослойном модуле, которая описана в уравнении (13), а также оценка точности моделей движения частиц (уравнения (14) и (15)).

Расход Q на входе в устройство составлял от 0 до 0,125 л/с. Из-за ограниченных условий эксперимента сифонный трубопровод был спроектирован с постоянным расходом $Q_{\text{к}} = 0,0112$ л/с.

При стабилизации экспериментальной системы частицы выпускались на входе в поток воды, и информация о них записыва-

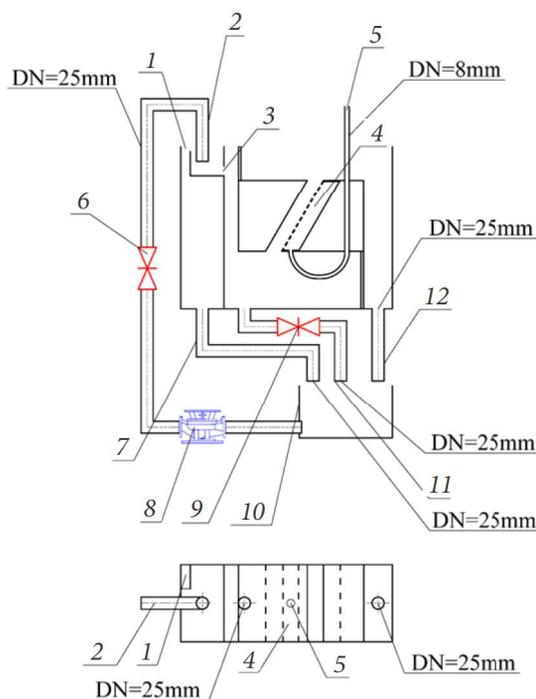


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 — переливная труба; 2 — труба подачи воды с частицами; 3 — отверстие подачи воды; 4 — тонкослойный модуль; 5 — сифонная труба; 6 — шаровый кран; 7 — труба отведения переливного стока; 8 — центробежный насос; 9 — шаровой кран; 10 — резервуар с водой; 11 — труба отведения стока; 12 — труба отведения чистой воды

лась с момента поступления в канал движения осадка до осаждения на дно. С помощью измерительной линейки измерялась длина зоны оседания, а также подсчитывалось время осаждения, после чего определялась конечная скорость оседания частиц. Направление падения частиц должно совпадать с направлением действия силы тяжести, что использовалось для проверки модели (уравнение (13)). Затем увеличивали диаметр частиц, и процесс повторялся. Для исключения ошибок каждый набор экспериментов повторяли пять раз и усредняли результаты.

Результаты и обсуждение

На рис. 5, а показано распределение скоростей частиц в классическом тонкослойном модуле при входной скорости $V = 0,01$ м/с. Это распределение оказывает значительное влияние на процесс осаждения. Скорость частиц значительно меняется по высоте тонкослойного модуля. В верхней части межпластиночного пространства скорость движения частиц оставалась постоянной и соответствовала скорости потока жидкости 0,01 м/с.

На рис. 5, б показано поле скорости частиц внутри нового тонкослойного модуля при входной скорости $V = 0,01$ м/с. Видно,

что скорость частиц в модуле значительно снижена по сравнению с классическим модулем из-за наличия выпускного клапана в канале осадка. Скорость частиц в канале осадка варьируется от 0,005 до 0,01 м/с. Уделим внимание распределению скоростей частиц в канале осадка. В этой области скорость частиц варьируется от 0,000 до 0,005 м/с, что значительно повышает эффективность осаждения.

На рис. 6 показано различие в скоростях осаждения частиц диаметром 0,0001, 0,0002, 0,0003 и 0,0004 м при различных скоростях потока. Теоретическая модель предсказывает уменьшение скорости осаждения с увеличением скорости потока. Пунктирная линия отображает предсказания модели, предложенной в данной работе, а дискретные точки отображают экспериментальные результаты.

Поскольку интервал вариации между экспериментальными и модельными данными невелик, для более интуитивной проверки корреляции данных была проведена обработка относительного отклонения. На рис. 7 показано относительное отклонение между экспериментальными и модельными данными конечной скорости осаждения частиц, где сплошная линия указывает, что данные

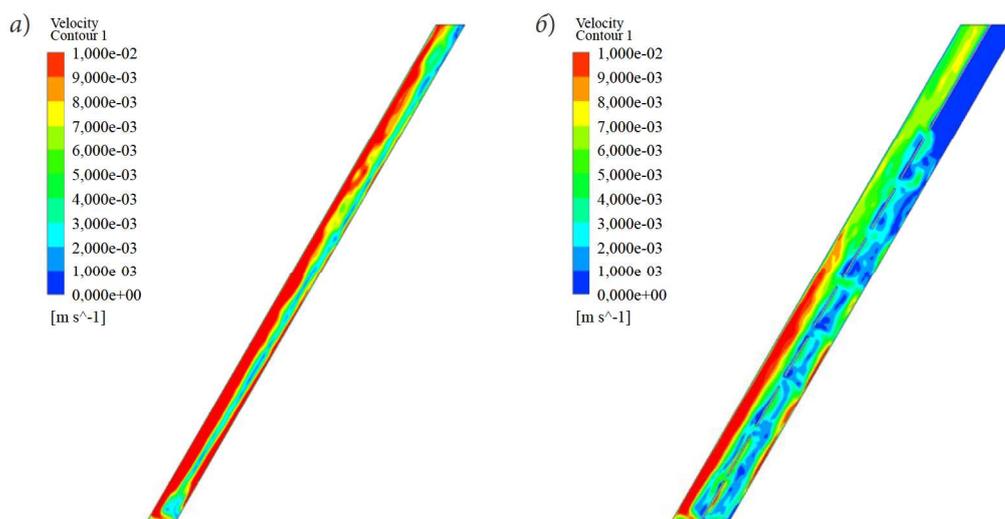


Рис. 5. Поле скорости частиц в межпластинчатом пространстве: а — классический тонкослойный модуль; б — новый тонкослойный модуль

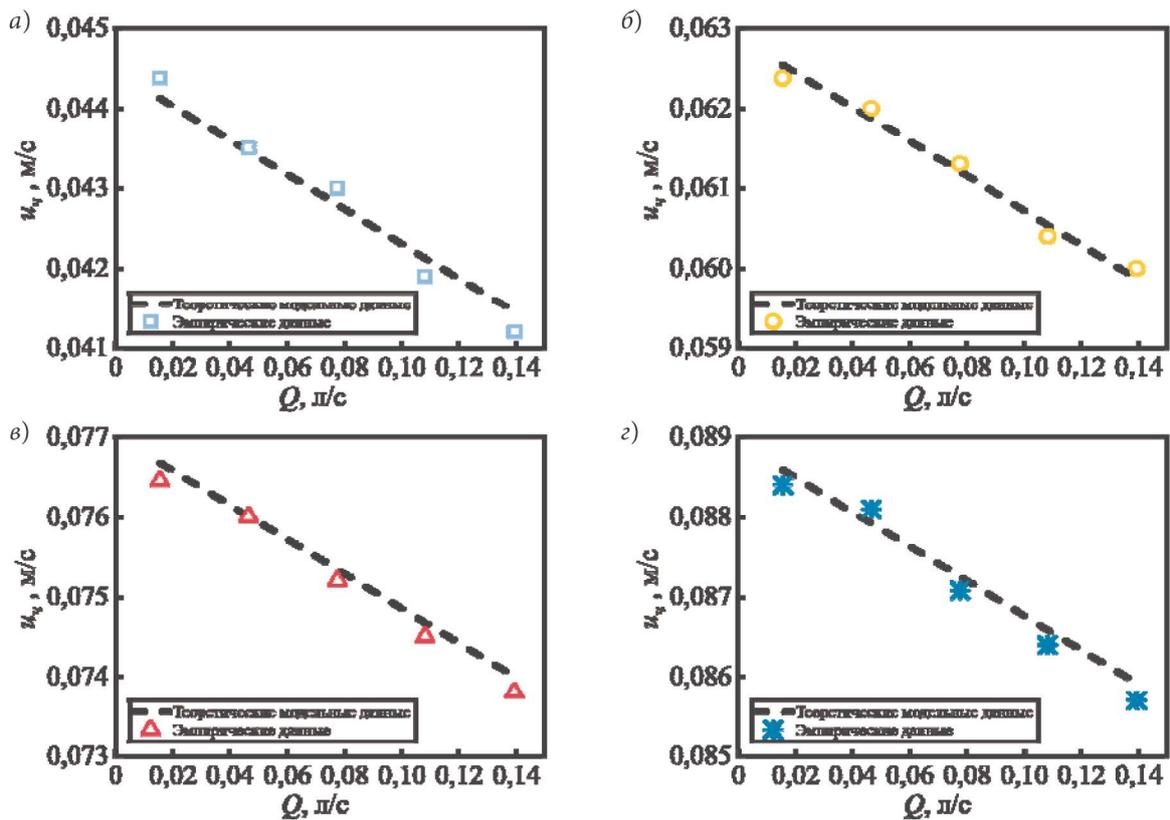


Рис. 6. Изменение конечной скорости оседания частиц в зависимости от их радиуса: а — $r_c = 0,0001$ м; б — $r_c = 0,0002$ м; в — $r_c = 0,0003$ м; г — $r_c = 0,0004$ м

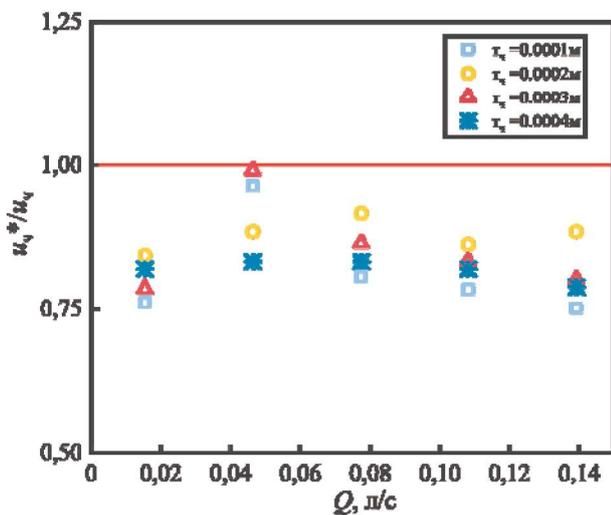


Рис. 7. Изменение относительного отклонения u_{ch}^*/u_{ch} конечной скорости оседания частиц

эксперимента совпадают с данными модели. Как видно, относительное отклонение для обоих наборов данных невелико, в пределах

от 0,75 до 1. Полученный результат говорит о достоверности предложенной модели.

Выводы

1. В исследовании рассмотрено движение частиц в новом тонкослойном модуле и построена математическая модель на основе теории осаждения частиц в потоке малой глубины. Модель создана на основе уравнения баланса сил для жестких однородных сферических частиц. С помощью модели оценивается конечная скорость осаждения частиц. Для оценки достоверности модельных расчетов разработана экспериментальная установка с конструкцией нового тонкослойного модуля.

2. Предложена тонкослойная модульная конструкция, которая позволяет оптимизировать путь потока частиц и увеличить скорость осаждения частиц. Данное решение позволяет дополнительно повысить эффективность очистки сточных вод.

3. Экспериментальные результаты показывают, что разработанная теоретическая модель может достаточно близко предсказать фактическую скорость осаждения частиц. Погрешность результатов составляет от 12,18 до 18,69 %.

Условные обозначения

g — ускорение свободного падения, м/с²;
 θ — угол наклона пластин;
 $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частиц, кг/м³;
 $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, кг/м³;
 $u_{\text{ж}}$ — скорость движения потока жидкости, м/с;
 $u_{\text{ч}}$ — теоретическое значение скорости частиц, м/с;
 $u_{\text{ч}}^*$ — экспериментальное значение скорости частиц, м/с;
 $u_{\text{к}}$ — скорость жидкости, вытекающей из трубопровода в нижней части межпластинного пространства, м/с;
 $r_{\text{ч}}$ — радиус частиц, м;
 $r_{\text{к}}$ — радиус трубопровода, отводящего воду из нижней части межпластинного пространства, м;
 x_0, y_0 — координаты начального положения частиц в модуле;
 t — время движения частиц, с;
 C_D — коэффициент сопротивления;
 $V_{\text{к}}$ — объем жидкости, вытекающей из трубопровода, отводящего воду из нижней части межпластинного пространства, л;
 Q — общий расход сточных вод, л/с;
 $Q_{\text{к}}$ — расход из трубопровода, отводящего воду из нижней части межпластинного пространства, л/с;
 a — ускорение частиц за счет увлекаемого потока воды, м/с²;
 $m_{\text{ч}}$ — масса частицы, кг;
 F — вес частицы, Н;
 F_b^g — сила Архимеда, действующая на частицу, Н;
 F_d — сила сопротивления жидкости, Н;
 F_a — сила воздействия увлекающего потока воды на частицы, Н.

Библиографический список

1. Kapoor B., Acrivos A. Sedimentation and sediment flow in settling tanks with inclined walls // *Journal of Fluid Mechanics*. 1995. Vol. 290. Pp. 39–66. DOI 10.1017/S0022112095002412.
2. Chintokoma G. C., Machunda R. L., Njau K. N. Optimization of Sedimentation Tank Coupled with Inclined Plate Settlers as a Pre-treatment for High Turbidity Water // *Journal of Environment and Earth Science*. 2015. Vol. 5 (17). Pp. 11–23.
3. Galvin K. P., Nguyentranlam G. Influence of parallel inclined plates in a liquid fluidized bed system // *Chemical Engineering Science*. 2002. № 57 (7). Pp. 1231–1234.
4. Nguyentranlam G., Galvin K. P. Applications of the Reflux Classifier in solid–liquid operations // *International Journal of Mineral Processing*. 2004. Vol. 73 (2–4). Pp. 83–89.
5. Galvin K. P., Callen A. M., Spear S. Gravity separation of coarse particles using the Reflux Classifier // *Mineral Engineering*. 2010. Vol. 23 (4). Pp. 339–349.
6. Galvin K. P., Callen A., Zhou J., Doroodchi E. Gravity separation using a full-scale Reflux Classifier // W. B. Membrey (ed.). *Proceedings of 10th Australian Coal Preparation Conference*. 2004. Paper H21.
7. Zigrang D. J., Sylvester N. D. An explicit equation for particle settling velocities in solid–liquid systems // *AIChE Journal*. 1981. Vol. 27 (6). Pp. 1043–1044.
8. Hirom K., Devi T. T. Application of Computational Fluid Dynamics in Sedimentation Tank Design and Its Recent Developments: a Review // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022. Vol. 233 (1). P. 22.
9. Zhang P., Gros Y., Roberts R. M., Bénard A. Modeling of turbulent flow with particle deposition in curved pipes // *Proceedings of 7th International Conference on Multiphase flow, ICMF 2010*. Tampa, FL USA, May 30–June 4, 2010. 9 p.
10. Mann H., Mueller P., Hagemeyer T., Roloff C., Thévenin D., Tomas J. Analytical description of the unsteady settling of spherical particles in Stokes and Newton regimes // *Granular Matter*. 2015. Vol. 17. Pp. 629–644. DOI 10.1007/s10035-015-0584-y.
11. Liu D. *Two-phase fluid dynamics*. Beijing: Higher Education Press, 1993. 734 p.
12. Lukerchenko N., Kvurt Y., Keita I., Chara Z., Vlasak P. Drag force, drag torque, and Magnus force coefficients of rotating spherical particle moving in fluid // *Particulate Science and Technology*. 2012. Vol. 30 (1). Pp. 55–67.
13. Legendre D., Magnaudet J. A note on the lift force on a spherical bubble or drop in a low-Reynolds-number shear flow // *Physics of Fluids*. 1997. Vol. 9 (11). Pp. 3572–3574.
14. Galvin K. P., Walton K., Zhou J. How to elutriate particles according to their density // *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64 (9). Pp. 2003–2010.
15. Li Y., Qi X., Li N., Wang A., Zhang W., Zhu R., Peng Z. Motion characteristics of binary solids in a liquid fluidised bed with inclined plates // *China Particology*. 2018. Vol. 39 (4). Pp. 48–54.
16. Doroodchi E., Fletcher D. F., Galvin K. P. Influence of inclined plates on the expansion behaviour of particulate suspensions in a liquid fluidised bed // *Chemical Engineering Science*. 2004. Vol. 59 (17). Pp. 3559–3567.

17. Belinsky M., Rubin H., Agnon Y., Kit E. Characteristics of Resuspension, Settling and Diffusion of Particulate Matter in a Water Column // *Environmental Fluid Mechanics*. 2005. Vol. 5 (5). Pp. 415–441.

18. Li Y. F., Li Y., Xia W. C., He C. Y., Zhu R. T. A novel particulate sedimentation model in inclined channels of liquid–solid fluidized bed // *Powder Technology*. 2017. Vol. 305. Pp. 764–770.

19. Медников Е. М. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981. 174 с.

20. Showcat Ali S. A., Azarpeyvand M., Szöke M., Ilário da Silva C. R. Boundary layer flow interaction with a permeable wall // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30 (8). 085111.

References

1. Kapoor B., Acrivos A. Sedimentation and sediment flow in settling tanks with inclined walls. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, vol. 290, pp. 39–66. DOI 10.1017/S0022112095002412.

2. Chintokoma G. C., Machunda R. L., Njau K. N. Optimization of Sedimentation Tank Coupled with Inclined Plate Settlers as a Pre-treatment for High Turbidity Water. *Journal of Environment and Earth Science*, 2015, vol. 5 (17), pp. 11–23.

3. Galvin K. P., Nguyentranlam G. Influence of parallel inclined plates in a liquid fluidized bed system. *Chemical Engineering Science*, 2002, no. 57 (7), pp. 1231–1234.

4. Nguyentranlam G., Galvin K. P. Applications of the Reflux Classifier in solid–liquid operations. *International Journal of Mineral Processing*, 2004, vol. 73 (2–4), pp. 83–89.

5. Galvin K. P., Callen A. M., Spear S. Gravity separation of coarse particles using the Reflux Classifier. *Mineral Engineering*, 2010, vol. 23 (4), pp. 339–349.

6. Galvin K. P., Callen A., Zhou J., Doroodchi E. Gravity separation using a full-scale Reflux Classifier. W. B. Membrey (ed.). *Proceedings of 10th Australian Coal Preparation Conference*, 2004, paper H21.

7. Zigrang D. J., Sylvester N. D. An explicit equation for particle settling velocities in solid–liquid systems. *AIChE Journal*, 1981, vol. 27 (6), pp. 1043–1044.

8. Hirom K., Devi T. T. Application of Computational Fluid Dynamics in Sedimentation Tank Design and Its Recent Developments: a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2022, vol. 233 (1), p. 22.

9. Zhang P., Gros Y., Roberts R. M., Bénard A. Modeling of turbulent flow with particle deposition in curved pipes. *Proceedings of 7th International Conference on Multiphase flow, ICMF 2010*. Tampa, FL USA, May 30–June 4, 2010, 9 p.

10. Mann H., Mueller P., Hagemeyer T., Roloff C., Thévenin D., Tomas J. Analytical description of the unsteady settling of spherical particles in Stokes and Newton regimes. *Granular Matter*, 2015, vol. 17, pp. 629–644. DOI 10.1007/s10035-015-0584-y.

11. Liu D. *Two-phase fluid dynamics*. Beijing: Higher Education Press, 1993, 734 p.

12. Lukerchenko N., Kvurt Y., Keita I., Chara Z., Vlasak P. Drag force, drag torque, and Magnus force coefficients of rotating spherical particle moving in fluid. *Particulate Science and Technology*, 2012, vol. 30 (1), pp. 55–67.

13. Legendre D., Magnaudet J. A note on the lift force on a spherical bubble or drop in a low-Reynolds-number shear flow. *Physics of Fluids*, 1997, vol. 9 (11), pp. 3572–3574.

14. Galvin K. P., Walton K., Zhou J. How to elutriate particles according to their density. *Chemical Engineering Science*, 2009, vol. 64 (9), pp. 2003–2010.

15. Li Y., Qi X., Li N., Wang A., Zhang W., Zhu R., Peng Z. Motion characteristics of binary solids in a liquid fluidized bed with inclined plates. *China Particology*, 2018, vol. 39 (4), pp. 48–54.

16. Doroodchi E., Fletcher D. F., Galvin K. P. Influence of inclined plates on the expansion behaviour of particulate suspensions in a liquid fluidised bed. *Chemical Engineering Science*, 2004, vol. 59 (17), pp. 3559–3567.

17. Belinsky M., Rubin H., Agnon Y., Kit E. Characteristics of Resuspension, Settling and Diffusion of Particulate Matter in a Water Column. *Environmental Fluid Mechanics*, 2005, vol. 5 (5), pp. 415–441.

18. Li Y. F., Li Y., Xia W. C., He C. Y., Zhu R. T. A novel particulate sedimentation model in inclined channels of liquid–solid fluidized bed. *Powder Technology*, 2017, vol. 305, pp. 764–770.

19. Mednikov E. M. *Turbulentniy perenos i osazhdenie aerorozley* [Turbulent transport and deposition of aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 174 p.

20. Showcat Ali S. A., Azarpeyvand M., Szöke M., Ilário da Silva C. R. Boundary layer flow interaction with a permeable wall. *Physics of Fluids*, 2018, vol. 30 (8), 085111.