

МРНТИ 61.13.15

Л.М. Мусабекова¹ – основной автор, ©
Б.Т. Тажибаева², Б.О. Торланова³, Г.С. Оспанова⁴



¹Д-р техн. наук, и.о. профессора, ²Докторант,
³Канд. фарм. наук, и.о. профессора, ⁴Канд. фарм. наук, и.о. доцента

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0001-8712-2446> ²<https://orcid.org/0009-0007-2973-0065>
³<https://orcid.org/0009-0009-5428-599X> ⁴<https://orcid.org/0000-0002-3553-5457>



^{1,3,4}Южно-Казахстанская медицинская академия, Шымкент, Казахстан
²Университет им. Ж.А. Ташенева, Шымкент, Казахстан



²tbakhyt25@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/QMNB8696>

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОСАЖДЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ В ПРОТОЧНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Разработана компьютерная модель осаждения полидисперсных суспензий. Модель описывает процесс осаждения полидисперсной суспензии в проточных системах. Представлена новая методика расчета распределения дисперсной фазы на выходе из проточного аппарата. Методика основана на построении граничных кривых осаждения для различных фракций дисперсной смеси. На базе новой модели разработана компьютерная программа для расчета эволюции фронтов осаждения, что важно для расчета кинетики осаждения полидисперсных суспензий в природных процессах и промышленных проточных устройствах. Новая методика расчета граничных кривых осаждения позволяет также предложить простой и эффективный метод расчета изменений фракционного состава суспензии на выходе из области течения, а также динамику фронтов осаждения и поверхности осадка, как по высоте реактора, так и по продольной координате проточных аппаратов. В данной работе также впервые разработано и протестировано эффективное программное обеспечение для реализации новой методики расчета.

Ключевые слова: процесс осаждения полидисперсной суспензии, эволюция фронтов осаждения, фракции дисперсной смеси, компьютерная модель осаждения.



Мусабекова, Л.М. Компьютерная модель осаждения полидисперсных суспензий в проточных системах [Текст] / Л.М. Мусабекова, Б.Т. Тажибаева, Б.О. Торланова, Г.С. Оспанова // Механика и технологии / Научный журнал. – 2026. – №2(92). – С.385-398. <https://doi.org/10.55956/QMNB8696>

Введение. Процессы осаждения широко распространены как в природе [1], так и в различных технологических процессах [2]. Эти процессы и явления встречаются в различных природных водоемах: от рек и озер - до морей и океанов. Это также явления, которые происходят в устройствах для производства и очистки целевых технологических суспензий, а также во время очистки выбросов [3,4]. Процессы осаждения также играют важную роль в фармакологии и медицине. С точки зрения характеристик этих процессов, прежде всего, необходимо различать характеристики осаждения в стационарных резервуарах и в проточных системах и аппаратах.

Несмотря на широкое распространение процессов седиментации, как их экспериментальное изучение, так и теоретическое описание сопряжено со многими трудностями, которые могут быть объяснены сложным поведением таких процессов в случае многокомпонентного состава [5,6]. Задачи расчета становятся еще более сложными при описании селективного осаждения полидисперсных суспензий в системах со сквозным течением.

Сила сопротивления жидкости, действующая на сферическую частицу [7-9], зависит от ее размера, относительной скорости движения, вязкости среды и определяется числом Рейнольдса. В условиях, когда такое разделение фракций по дисперсии оказывается слишком грубым, необходимо рассмотреть другие модели. Кроме того, такой подход приемлем только для слабоконцентрированных суспензий, в которых отсутствует влияние частиц одной фракции на гидродинамические условия осаждения другой фракции. Построение теоретических моделей осаждения полидисперсных суспензий является нетривиальной задачей и еще не завершено даже в отсутствие сильного взаимодействия между частицами.

В некоторых работах рассматривается затрудненное (переполненное) осаждение полидисперсной суспензии [10-13]. Требования инженерной практики вынуждают искать пути разработки упрощенных моделей. Ранее авторы представили новый подход к построению макроскопической модели осаждения, основанный на функции распределения частиц в полидисперсной суспензии [14-16]. Основная новизна и фундаментальность представленной в этой работе модели заключается в том, что она построена в виде уравнения диффузии с начальным условием.

Полученные результаты могут быть применены к жидкостям со взвесями достаточно крупных частиц для описания процесса седиментации в стационарных аппаратах [17-20]. Однако при седиментации мелких частиц в проточных системах роль скорости потока и его флуктуаций в интенсивности седиментации возрастает [21-23]. Основная новизна и научный вклад представленной модели заключаются в том, что на ее основе можно рассчитать процесс селективного осаждения в проточных аппаратах [24-26].

Представленная здесь модель является эвристической и содержит некоторые гипотетические положения, которые базируются на анализе теоретических результатов и давно известных надежных экспериментальных данных [27-29], но которые не выведены детально.

Известные методики расчета процессов осаждения мелких дисперсных фракций из суспензии описывают, как правило, процесс седиментации в непроточной емкости, в которой процесс протекает стационарно в течение определенного периода времени. В то же время, не известно до сих пор какой-либо общей методики, позволяющей производить расчет интенсивности процессов седиментации в проточной системе. Однако, такие системы и проточные аппараты для селективной седиментации находят все более широкое применение в современной фармацевтической промышленности и нанотехнологиях.

В статье [30] изучаются седиментация и агрегация частиц, поглощающих подвижные частицы из окружающей среды. Эта модель показывает переход от фрактальных агрегатов при низкой плотности к гомогенным агрегатам при высокой плотности. Модель демонстрирует кинетику, аналогичную кинетике диффузионно-ограниченной агрегации, но не анализирует конкретно вопрос множественной седиментации и агрегации.

Тем не менее, разработанный подход может оказаться перспективным для описания коллективной динамики активных частиц в условиях седиментации и множественной агрегации.

По мнению авторов, этот подход применим к коллективным системам, обменивающимся биологической информацией. При разработке платформы для контроля качества наномедицинских препаратов необходимо учитывать массивную многочастичную седиментацию наночастиц. Отсутствие надежных моделей для этой цели препятствует разработке адресной доставки и персонализированной наномедицины [31]. Особенно сложными являются ранние стадии разработки лекарств, когда эти процессы происходят при высоких концентрациях дисперсной фазы в суспензиях [32].

В статье [33] предложена континуальная модель седиментации и агрегации клеточных культур в питательной среде. Клетки и культуральная среда описываются как двухфазная смесь в специально созданной лунке. Построена математическая модель, учитывающая процессы седиментации и агрегации в присутствии хемоаттрактантов. Значительные проблемы возникают в ситуациях массовой седиментации, которая может привести к неконтролируемому формированию паттернов.

В статье [34] рассматривается крайне актуальная проблема образования, седиментации и агрегации нанопластиковых частиц, представляющая значительную угрозу для водных экосистем. Исследование носит экспериментальный характер и в первую очередь направлено на выявление специфических особенностей агрегационного поведения дисперсий нанопластика в водной среде. В исследовании [35] изучается кинетика седиментации и агрегации микропластиковых частиц в прибрежных зонах.

Авторы приходят к выводу, что береговая линия может быть основным местом накопления микропластика. В работе [36] исследуются различия в механизмах агрегации микро- и нанопластиковых частиц. Данное исследование может послужить основой для оценки экологических рисков распространения микропластика и наночастиц в природных водных системах.

Отмеченное повышение интереса к экологическим проблемам и современным фармацевтическим технологиям привело к недавней публикации ряда работ, посвященных более глубокому анализу кинетических закономерностей процессов седиментации в дисперсных системах и переосмыслению известных моделей. В статье [37] была разработана трехмерная континуальная модель осаждения и образования агрегатов частиц с учетом естественных условий формирования паттернов в реальных дисперсных системах.

В статье [38] был проведен статистический анализ баз данных по доле столкновений частиц в осаждающей в двухфазной системе дисперсной фазе. Эта проблема особенно важна в процессах переноса со смешанной кинетикой, где следует учитывать, как диффузионно-ограниченные, так и кинетические стадии процессов. Показано, что учет массовой седиментации и агрегации в полидисперсных суспензиях является сложной и плохо изученной проблемой).

Настоящая работа носит теоретический характер и преследует цель предложить новую концепцию расчета процесса селективной седиментации в проточной полидисперсной системе. Предлагаемая модель может быть использована как в слабо концентрированной, так и в высоко

концентрированной суспензиях. Отличие заключается лишь в том, что скорость осаждения частиц данной фракции и интенсивность случайного дрейфа частиц должна рассчитываться по-разному.

Соответствующая методика может использовать известные соотношения, основанные на расчете коэффициента осаждения в зависимости от чисел Рейнольдса, рассчитанных по относительной скорости [39,40]. Все эти вопросы просто включаются в предлагаемую общую методику, не разрушая самого нового подхода, т.е. модели пограничных кривых. В описанной модели предполагается, что процесс осаждения осуществляется при достаточно малых скоростях несущей сплошной фазы ($W \leq 4$) и при умеренных числах Рейнольдса. При интенсивной развитой турбулентности процесс седиментации вообще не рассматривается, да и не имеет места [39]. Авторы полагают, что новая модель применима в широком диапазоне частиц дисперсной фазы в системе, а именно, как от мелких частиц с характерными размерами порядка долей мм или 1 мм, так и микро – и наночастиц.

Такое предположение авторов обосновывается тем, что согласно концепции модели, для каждой фракции рассчитывается своя пограничная кривая осаждения, а диапазоны интенсивности случайного дрейфа также соответствуют по порядку скоростям осаждения.

Поскольку данная работа представляет новую концепцию и новый методологический подход к математическому описанию селективного осаждения в потоках, в дальнейшем необходимо будет дать более четкую интерпретацию управляющих параметров модели для ряда конкретных процессов, а также проверить ее адекватность на более обширном и разнообразном экспериментальном материале.

Особая задача, поставленная и решенная в данной работе, заключалась в разработке эффективного и удобного для инженерной практики программного обеспечения для эффективной реализации новой методики расчета.

Условия и методы исследований. В этом разделе представлена общая форма модели, и предлагаемая модель анализируется более подробно для частного случая осаждения, которое не сопровождается агрегацией в дисперсной фазе. Анализ представленной модели применительно к осаждению с взаимной агрегацией различных фракций будет проведен и представлен в последующих публикациях.

Разработан новый подход к созданию модели седиментации в проточных аппаратах. Предлагаемый метод расчета процесса селективной седиментации в проточном аппарате основан на представлении о пограничных фронтах седиментации для каждой фракции дисперсной смеси, протекающей через аппарат. Для каждой фракции при заданной продольной скорости потока дисперсии формируются два пограничных фронта – верхний и нижний [41]. Верхний фронт – это кривая, описывающая траекторию движения частицы заданной фракции, поступающей в рабочий объем проточного аппарата в верхней точке начального сечения.

Если при заданном расходе частицы заданной фракции не достигают конечного выходного сечения аппарата, то понятие нижнего фронта не имеет смысла, поскольку верхний фронт заканчивается в нижней части аппарата. Если верхний фронт достигает выходного сечения аппарата, то нижний фронт представляет собой кривую, описывающую траекторию частицы

данной фракции, поступающей в рабочий объем проточного аппарата в некоторой точке начального сечения и достигающей выходного сечения в нижней точке, т. е. на уровне дна.

Верхняя и нижняя граничные кривые осаждения для каждой фракции ограничивают полосу проскока данной фракции через проточный аппарат. Тогда, при равномерном распределении различных фракций на начальном участке на входе в аппарат, изменение доли той или иной фракции в дисперсном составе на выходе из аппарата можно оценить по отношению ширины полосы проскока к общему сечению выхода.

Новая модель основана на следующих допущениях:

1. Можно четко идентифицировать определенное конечное число фракций, которые различаются по порядку, т.е. по характерному размеру.

2. Предполагается, что физический состав дисперсной фазы однороден, т.е. все частицы твердой фазы, уносимые потоком, состоят из одного вещества.

3. Парциальная концентрация твердой фазы не слишком высока. Тогда взаимным влиянием различных фракций на интенсивность их осаждения можно пренебречь. Однако, это предположение не является концептуально критичным, и построенная далее модель может быть развита без этого предположения. В данной работе такое предположение сделано для облегчения четкого описания структуры новой модели.

4. Предполагается, что коэффициенты формы разных частиц существенно не различаются. Таким образом, можно принять единообразную зависимость как коэффициента уноса частиц потоком, так и параметров, определяющих скорость осаждения частиц, от порядка расположения частиц, т.е. от их характерного размера.

5. Предполагается, что распределение частиц различных фракций на входе в устройство является равномерным по всему поперечному сечению входного отверстия. Таким образом, функция частичного распределения в каждой локальной области входного участка одинакова.

Из данных допущениях, выделенных выше, в свою очередь, вытекают положения концепции построения модели: для каждой фракции может быть построен свой собственный фронт осаждения. Это следует из первого, третьего и пятого допущений. Второе и четвертое допущения позволяют использовать единообразные расчетные зависимости для расчета фронтов осаждения различных фракций. Схема модели представлена ниже.

1. В стационарном режиме формируются определенные кривые, которые можно обозначить как фронты осветления фракции или накопления осадков.

2. Имеется фракция, крайний фронт осветления которой простирается от верхней точки начального поперечного сечения до нижней точки конечного поперечного сечения проточного устройства. Этот фронт соответствует наиболее мелкой фракции тех частиц, которые полностью осаждаются вдоль аппарата и не попадают в поток суспензии, выходящий из аппарата $r_1 > r_2 > r_3 > r_4 > r_5$.

3. Фронты осветления мельчайших фракций не заканчиваются в нижней точке аппарата. Поэтому частицы таких фракций покидают аппарат вместе с вытекающим потоком.

4. Пусть символ $C_{r_{cr}}$ обоих графиков означает фронт осветления критической фракции (т.е. наиболее мелкой из фракций, которые полностью

осаждаются в объеме аппарата и не представлены в потоке, выходящем из аппарата).

5. Таким образом, попадание частиц фракций порядка $r \leq r_{cr}$ в поток, выходящий из аппарата, происходит в «полосе» между двумя граничными кривыми осаждения: C_r^f и C_r^0 . Нижняя граничная кривая C_r^0 для данной фракции r представляет собой траекторию частицы этой фракции, входящей в рабочий объем устройства в определенной точке ниже верхней левой точки и выходящей из устройства в нижней правой точке выпускного сечения.

6. Пусть символ $C_{r_{min}}$ обозначает фронт осветления самой мелкой из всех фракций в смеси, S – ширина полосы между граничными кривыми осаждения. Тогда средняя концентрация любой фракции из интервала $r_{min} \leq r \leq r_{cr}$ на выходе из аппарата для случая дискретного равномерного распределения фракций по входному сечению может быть описана формулой:

$$\langle C_r^f \rangle = \frac{S_r^0 C_r^0}{\sum_{j=r_{min}}^{r_{cr}} C_j^0 S_j^0} \quad (1)$$

7. Если, кроме того, скорость осаждения фракций слабо зависит от расстояния до нижней стенки (дна) аппарата и зависит только от порядка распределения фракций, то фронты осаждения будут представлять собой прямые линии. Тогда предыдущую формулу можно переписать как:

$$\langle C_r^f \rangle = \frac{S_r^f C_r^0}{\sum_{j=r_{min}}^{r_{cr}} C_j^0 S_j^f} \quad (2)$$

Рассмотрим разработанный нами алгоритм модели:

1. Каждое следующее перемещение частицы вычисляется на основе её предыдущего положения. Для каждого шага используются текущие координаты частицы ($u[i-1]$ и $v[i-1]$), чтобы рассчитать следующие координаты.

2. Выбор направления: на каждом шаге генерируется случайное изменение для горизонтального (du) и вертикального (dv) перемещения. Эти значения могут быть -1, 0, или +1, что соответствует движению влево, остаться на месте или движению вправо по горизонтали и аналогично вверх, остаться на месте или вниз по вертикали.

3. Движение частицы внутри прямоугольника размером 500 на 100 ячеек (прямоугольник 500X100). Частица начинает свой путь из крайнего левого верхнего угла и движется следующим образом: вертикальная составляющая + горизонтальная составляющая. График отражает каждый шаг частицы, а ось Y инвертирована для визуального соответствия началу движения из верхнего угла.

4. Подбираются начальные значения координат частицы $V0 = 0,5, 10, 20, \dots, 100$ при направлении вертикальных и горизонтальных смещений

$r=1,2,3,4,5$ (порядок частиц) и $ug=2,4,6,8,10$ (скорость потока) для кривой. Подбор осуществляется таким образом, чтобы последнее расчетное значение точки приходилось на правый нижний угол прямоугольника:

5. Подбираются начальные значения $r=1,2,3,4,5$ и $ug=2,4,6,8,10$ для $V0$, при которых кривые выходят из прямоугольника, т.е. находятся компьютерным перебором расстояния от нижней правой точки прямоугольника.

Таким образом, определяется величина $V0$, при которой происходит «прорыв» частиц фракций порядка $r \leq r_{cr}$ в поток, выходящий из аппарата. Прорыв происходит в «полосе» между двумя граничными кривыми осаждения C_r^f и C_r^0 . Это предположение может быть более или менее приемлемым для дисперсий с низкой концентрацией.

Результаты исследований и их обсуждение. На основе изложенной в предыдущем разделе методики расчета разработана на языке Python программа для реализации модели. Фрагмент кода на языке Python, используемого для численных исследований с учетом случайных движений потока, показан ниже:

```
def simulate_particle_movement(rows, cols, r, ug, v0, u0, num_steps=500):  
    x, y = u0, v0 # Начальные условия  
    path = [(x, y)]  
    horizontal_steps = 0  
    vertical_steps = 0  
    for _ in range(num_steps):  
        dv = random.choice([-1, 0, 1]) # Шаг по вертикали  
        du = random.choice([-1, 0, 1]) # Шаг по горизонтали  
        # Положение частицы на каждом шаге  
        v = max(0, min(rows+1, y + r + dv)) # V  
        u = max(0, min(cols+1, x + ug + du)) # U  
        if dv != 0:  
            vertical_steps += 1  
        if du != 0:  
            horizontal_steps += 1  
        path.append((u, v))  
        x, y = u, v  
    return path  
  
# процедура расчета пути частицы  
def draw_path():  
    try:  
        rows = int(height_entry.get())  
        cols = int(width_entry.get())
```

Интерфейс программы в среде PyCharm и пример расчета с построением графика кривых осаждения на основе алгоритма новой модели движения частиц показан на рисунке 1.

Через интерфейс можно изменять начальные данные, высоту, ширину рабочей зоны аппарата, скорость частиц, скорость потока, начальное положение частиц, заносить в журнал и строить по этим данным графики

движения частиц, отдельные графики можно сортировать в файлах с расширением *.png:

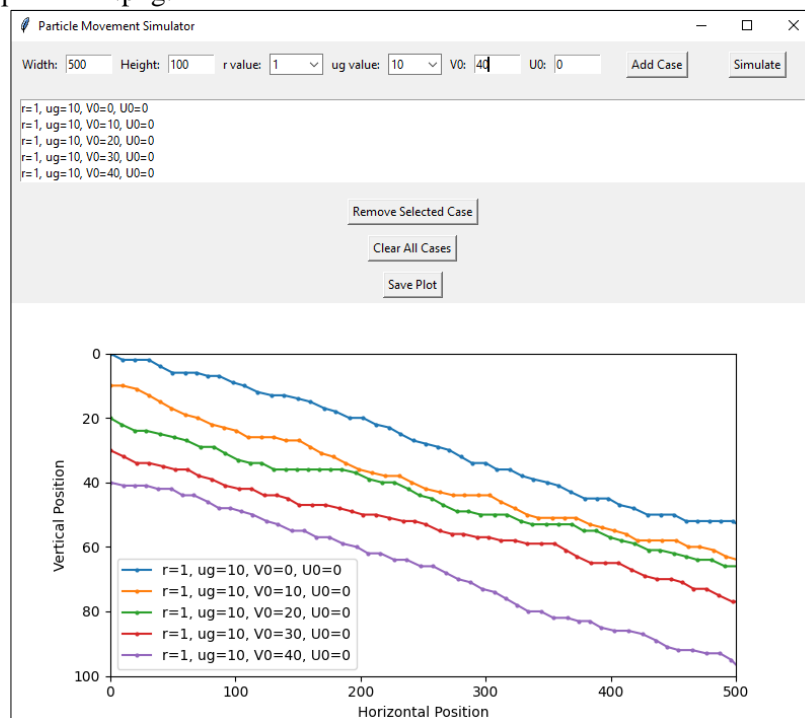


Рис. 1. Интерфейс программы и пример расчета

Была проведена серия численных экспериментов. Результаты проведенного численного эксперимента на основе модели осаждения в проточных аппаратах проиллюстрированы на рисунках 2-4.

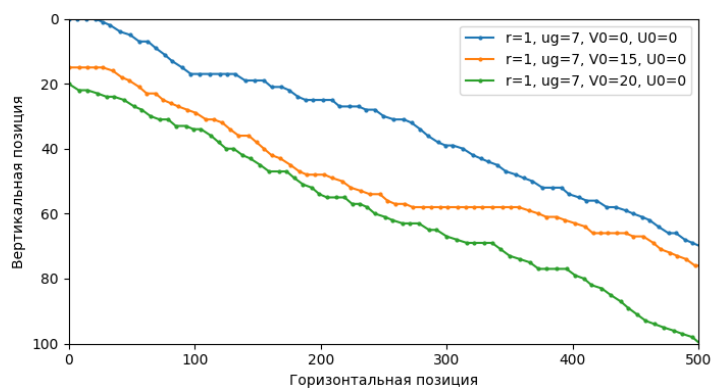


Рис. 2. Пример расчета кривых осаждения для частиц порядка $r=1$ при значениях координаты $V_0=0$, $V_0=15$, $V_0=20$

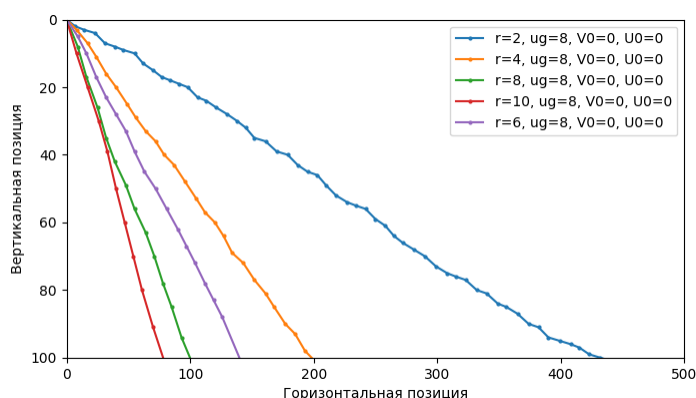


Рис. 3. Пример расчета кривых осаждения для горизонтальной скорости потока $U_g=8$

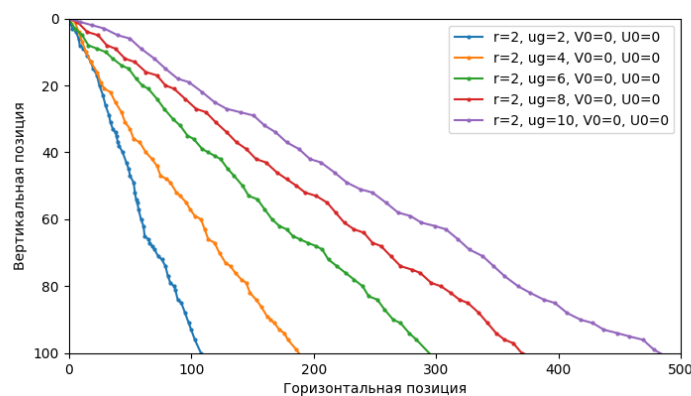


Рис. 4. Пример расчета кривых осаждения для частиц порядка $r=2$

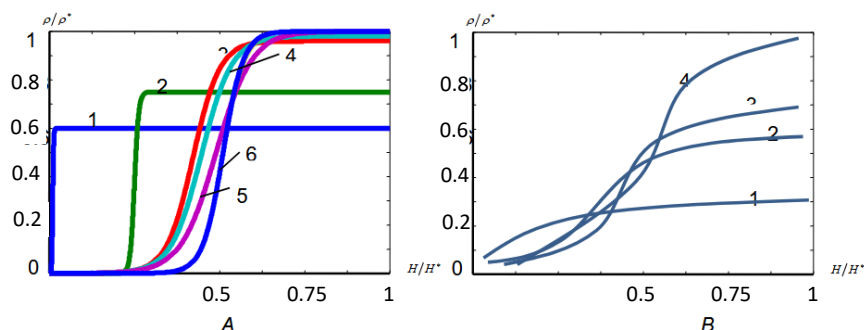
В соответствии с известными физическими предпосылками и теоретическим описанием процесса осаждения мелких частиц в сплошной вязкой среде скорость осаждения частицы зависит от скорости несущего потока, вязкости потока, размера частицы и ее массы, а также концентрации дисперсной фазы. В инженерных методиках расчета эти управляющие параметры обычно связываются через числа Рейнольдса. Современный обзор этих соотношений приводится в работе [42]. Шаги случайного дрейфа выбираются в соответствии с порядком смещений, обусловленных скоростью несущего потока на каждом временном интервале численной схемы.

Как уже отмечалось общей апробированной методики расчета седиментации в проточной системе в литературе не удается обнаружить, что подчеркивается в целом ряде источников. Это объясняется, в частности, тем, что насущная потребность таковой методики в инженерной практике возникла и была осознана недавно с развитием современных фармацевтических и нано технологий.

В предыдущей работе авторов [43], посвященной моделированию седиментации в концентрированных полидисперсных системах, авторы проводили сравнение с известными экспериментальными данными.

Мы вновь приводим в данной статье рисунок 5, взятый из указанной работы [43]. Это сравнение позволяет сделать вывод об удовлетворительном совпадении результатов моделирования с известными

экспериментальными данными, т.е. можно говорить о правильной интерпретации физических закономерностей селективной седиментации из полидисперсных потоков.



А – по модели данной статьи, в развитие работы [43], безразмерное время протекания через аппарат: 1- $\tau=5$, 2- $\tau=10$, 3- $\tau=15$, 4- $\tau=20$, 4- $\tau=25$, 5- $\tau=30$, 6-30; В – экспериментальные данные для водной суспензии частиц вольфрамита среднего диаметра [44]

Рис. 5. Типичные графики изменения плотности взвеси во времени с высотой

Результаты проведенного численного эксперимента качественно хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными, ранее не получавшими адекватного теоретического обоснования [5,23-25]. Важно отметить также, что представленная в статье модель и разработанная на ее основе компьютерная программа описывают процессы седиментации как в проточных природных системах [24], так и в технологических аппаратах в широком диапазоне порядков частиц, начиная с нанодиапазона [5].

Заключение. Научная новизна работы заключается в том, что предлагается новая концепция, относительно которой в нашей работе дается оценка качественного совпадения с физическими закономерностями процесса осаждения, а также выделяются контрольные параметры. Это открывает возможности в дальнейшем использовать данный подход для разработки методик оптимизации режимов селективной седиментации полидисперсных суспензий в проточных аппаратах.

Представленная модель, основанная на новой концепции граничных кривых осаждения, позволяет рассчитать все важные для практики динамические характеристики осаждения полидисперсных суспензий для селективного осаждения в проточных системах. Анализ полученных зависимостей и тип графиков хорошо согласуются с известными изученными закономерностями процесса седиментации. Аналогичные ускоренные расчеты с использованием этой модели могут быть выполнены с другими исходными данными. Разработанный программный комплекс для численной модели подтвердил высокую эффективность при реализации новой методики расчета. Для надежного практического применения эта модель требует идентификации управляющих параметров для конкретных физико-химических систем. Только после этого можно будет рекомендовать надежный пошаговый алгоритм использования модели на практике.

Список литературы

1. Mitchell P.J., Spence M.A., Aldridge J., Kotilainen A.T., Diesing M. Sedimentation rates in the Baltic Sea: A machine learning approach // *Continental Shelf Research*. – 2021. – Vol. 214. – Art. 104325.
2. Berzi D., Fraccarollo L. Intense sediment transport: Collisional to turbulent suspension // *Physics of Fluids*. – 2016. – Vol. 28, No. 2.
3. Aimable A., Jongen N., Testino A., Donnet M., Lemaitre J., Hofmann H., Bowen P. Precipitation of nanosized and nanostructured powders: Process intensification and scale-out using a segmented flow tubular reactor (SFTR) // *Chemical Engineering & Technology*. – 2011. – Vol. 34, No. 3. – P. 344-352.
4. García M.H. (Ed.). *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. – Reston, Virginia: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 110, 2007.
5. Besenhard M.O., Pal S., Gkogkos G., Gavriilidis A. Non-fouling flow reactors for nanomaterial synthesis // *Reaction Chemistry & Engineering*. – 2023. – Vol. 8, No. 5. – P. 955-977.
6. Schleiss A.J., Franca M.J., Juez C., De Cesare G. Reservoir sedimentation // *Journal of Hydraulic Research*. – 2016. – Vol. 54, No. 6. – P. 595-614.
7. Hamidifar H., Nones M., Rowinski P.M. Flood modeling and fluvial dynamics: A scoping review on the role of sediment transport // *Earth-Science Reviews*. – 2024. – Vol. 253. – Art. 104775.
8. Bürger R., Concha F., Tiller F.M. Applications of the phenomenological theory to several published experimental cases of sedimentation processes // *Chemical Engineering Journal*. – 2000. – Vol. 80. – P. 105-117.
9. Bürger R., Karlsen K.H., Towers J.D. Mathematical model and numerical simulation of the dynamics of flocculated suspensions in clarifier-thickeners // *Chemical Engineering Journal*. – 2005. – Vol. 111. – P. 119-134.
10. Maki R., Tabe Y., Yamamoto T., Takemura H., Sawada T., Esaki T., Ohsaka A. Accuracy study of a novel alternate method measuring erythrocyte sedimentation rate for prototype hematology analyzer CellTac α^+ // *International Journal of Laboratory Hematology*. – 2021. – Vol. 43, No. 4. – P. 588-596.
11. Lippert M.C., Woods A.W. Experiments on the sedimentation front in steady particle-driven gravity currents // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2020. – Vol. 889. – Art. A20.
12. Massah M., Khamehchi E., Mousavi-Dehghani S.A., Dabir B., Tahan H.N. A new theory for modeling transport and deposition of solid particles in oil and gas wells and pipelines // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 152. – Art. 119568.
13. Kondrat'ev A.S., Naumova E.A. Calculation of the velocity of obstructed settling of monodisperse solid particles in a Newtonian liquid // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2004. – Vol. 38, No. 6. – P. 586-591.
14. Brener A., Tazhibayeva B., Golubev V., Dairabay D. Diffusion model of polydisperse sedimentation // *Chemical Engineering Transactions*. – 2023. – Vol. 103. – P. 733-738.
15. Kondrat'ev A.S., Naumova E.A. Calculation of the hindered settling of a bimodal mixture of solid particles in a Newtonian liquid // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2007. – Vol. 41, No. 2. – P. 228-232.
16. Yang A.J., Olsthoorn J., Timmermans M.L. Sedimentation in particle-laden flows with and without velocity shear // *Physics of Fluids*. – 2023. – Vol. 35, No. 8.
17. Pavlenko I., Ochowiak M., Agarwal P., Olszewski R., Michalek B., Krupińska A. Improvement of mathematical model for sedimentation process // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 15. – Art. 4561.
18. Wallwork J.T., Pu J.H., Kundu S., Hanmaiahgari P., Pandey M., Satyanaga A., Khan M.A., Wood A. Review of suspended sediment transport mathematical modelling // *Environmental Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 81. – Art. 10123.

19. Nocoń W. Quantitative monitoring of batch sedimentation based on fractional density changes // *Powder Technology*. – 2016. – Vol. 292. – P. 1-6.
20. Taye M.A. Sedimentation rate of erythrocyte from physics perspective // *The European Physical Journal E*. – 2020. – Vol. 43, No. 3. – P. 19-25.
21. Guazzelli É., Hinch J. Fluctuations and instability in sedimentation // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2011. – Vol. 43. – P. 97-116.
22. Lee K., Kim T., Rajniak P., Matsoukas T. Compositional distributions in multicomponent aggregation // *Chemical Engineering Science*. – 2008. – Vol. 63. – P. 1293-1303.
23. Jan R., Huda M.B., Rather N.A., Lone M.A., Eslamian S. Sedimentation, erosion, and resilience // *Handbook of Climate Change Impacts on River Basin Management*. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – P. 285-299.
24. Li J., Wang G., Song C., Sun S., Ma J., Wang Y., Guo L., Li D. Recent intensified erosion and massive sediment deposition in Tibetan Plateau rivers // *Nature Communications*. – 2024. – Vol. 15, No. 1. – Art. 722.
25. Liang H.K., Cui Y.W., Yan J.L., Yan H.J., Li Z.Y., Cui Y.B. The role of fungi in the formation and instability of halophilic aerobic granular sludge in a continuous-flow reactor // *Journal of Water Process Engineering*. – 2024. – Vol. 59. – Art. 105038.
26. Wang H., Tai Y., Huang L., Yang C., Jing H. Analyzing water and sediment flow patterns in circular forebays of sediment-laden rivers // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, No. 24. – Art. 16941.
27. Wang K., Yang H., Chang Y., Huang W., Xia J. Phosphorus release and distribution in sediment resuspension systems under disturbing conditions // *Chemosphere*. – 2024. – Vol. 342. – Art. 142386.
28. Wang P., Ye N., Han Y., He X. Experimental study on the sedimentation performance of an arc-plate linear sedimentation tank // *Water*. – 2024. – Vol. 16, No. 8. – Art. 1075.
29. Xoshimov S., Atakulov D., Yalgashev O., Komilov S., Boykulov J. Evaluation of sedimentation of water reservoirs with modern technologies // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 365. – Art. 03033.
30. Paoluzzi M., Leoni M., Marchetti M.C. Fractal aggregation of active particles // *Physical Review E*. – 2018. – Vol. 98, No. 5. – P. 1-8.
31. Ferreira L.F., Picco A.S., Galdino F.E., Albuquerque L.J.C., Berret J.F., Cardoso M.B. Nanoparticle–protein interaction: Demystifying the correlation between protein corona and aggregation phenomena // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2022. – Vol. 14, No. 25. – P. 28559-28569.
32. Ganesh A.N., Donders E.N., Shoichet B.K., Shoichet M.S. Colloidal aggregation: From screening nuisance to formulation nuance // *Nano Today*. – 2018. – Vol. 19. – P. 188-200.
33. Green J.E.F., Whiteley J.P., Oliver J.M., Byrne H.M., Waters S.L. Pattern formation in multiphase models of chemotactic cell aggregation // *Mathematical Medicine and Biology*. – 2018. – Vol. 35, No. 3. – P. 319-346.
34. Pokhrel A., Islam M.S., Mitra S. Aggregation dynamics of nanoplastics: Insights through real world waste // *Environmental Science: Processes & Impacts*. – 2026. – P. 1-15.
35. Yang X., An C., Feng Q., Boufadel M., Ji W. Aggregation of microplastics and clay particles in the nearshore environment: Characteristics, influencing factors, and implications // *Water Research*. – 2022. – Vol. 224. – Art. 119041.
36. Sun H., Jiao R., Wang D. The difference of aggregation mechanism between microplastics and nanoplastics: Role of Brownian motion and structural layer force // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 268. – Art. 115942.
37. Karpov S.V., Gerasimov V.S., Isaev I.L., Obushchenko A.V. Simulation of the growth of nanoparticle aggregates reproducing their natural structure in disperse systems // *Colloid Journal*. – 2006. – Vol. 68, No. 4. – P. 441-450.
38. Gomez-Flores A., Bradford S.A., Hong G., Kim H. Statistical analysis, machine learning modeling, and text analytics of aggregation attachment efficiency: Mono

- and binary particle systems // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – Vol. 454. – Art. 131482.
39. Merkus H.G. Sedimentation techniques // Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. – P. 319-348.
40. Gomboš M., Tall A., Trpčevská J., Kandra B., Pavelkova D., Balejčiková L. Sedimentation rate of soil microparticles // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – Vol. 11, No. 20. – P. 635-645.
41. Tazhibayeva B., Brener A., Musabekova L., Golubev V., Kobeyeva Z., Yunussova A. Model of boundary deposition curves for polydisperse suspension sedimentation in flow-through systems // Chemical Engineering Transactions. – 2025. – Vol. 116. – P. 709-714.
42. Gonzalez Rodriguez L., McCallum A., Kent D., Rathnayaka C., Fairweather H. A review of sedimentation rates in freshwater reservoirs: Recent changes and causative factors // Aquatic Sciences. – 2023. – Vol. 85, No. 2. – Art. 60.
43. Brener A., Tazhibayeva B., Golubev V., Dairabay D. Diffusion Model of Polydisperse Sedimentation // Chemical Engineering Transactions. – 2023. – Vol. 103. – P. 733-738.
44. Burt R.O. Gravity Concentration Methods // Mineral Processing Design / Eds. B. Yarar, Z.M. Dogan. – Berlin: Springer, 1987. – P. 106-137.

Материал поступил в редакцию 22.10.25, принят 30.04.26.

Л.М. Мусабекова^{1,3}, Б.Т. Тажибаева², Б.О. Торланова¹, Г.С. Оспанова¹

¹Оңтүстік Қазақстан медициналық академиясы, Шымкент, Қазақстан

²Ж.А. Ташенев атындағы университет, Шымкент, Қазақстан

³М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

АҒЫНДЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ПОЛИДИСПЕРСТІ СУПЕНЗИЯЛАРДЫ ТҰНДЫРУҒА АРНАЛҒАН КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛІ

Аңдатпа. Полидисперсті суспензияларды тұндырудың компьютерлік моделі жасалды. Модель ағынды жүйелерде полидисперсті суспензияның тұндыру процесін сипаттайды. Ағынды аппараттың шығысындағы дисперсті фазаның таралуын есептеудің жаңа әдісі ұсынылған. Әдіс дисперсті қоспаның әртүрлі фракциялары үшін шекаралық тұндыру қисықтарын құруға негізделген. Жаңа модель негізінде табиғи процестерде және өнеркәсіптік ағынды аппараттарда полидисперсті суспензиялардың шөгу кинетикасын есептеу үшін маңызды болып табылатын тұндыру фронттарының эволюциясын есептеуге арналған компьютерлік бағдарлама әзірленді. Шекаралық тұндыру қисықтарын есептеудің жаңа әдісі сонымен қатар реактор биіктігі бойынша да, ағыс аппаратының бойлық координатасы бойынша да ағын аймағының шығысындағы суспензияның фракциялық құрамының, сондай-ақ шөгу фронттары мен тұнба бетінің динамикасының өзгеруін есептеудің қарапайым және тиімді әдісін ұсынады. Бұл жұмыста, сонымен қатар, жаңа есептеу әдісін енгізуге арналған тиімді бағдарламалық қамтамасыз ету бірінші рет әзірленіп, сынақтан өткені көрсетілген.

Тірек сөздер: полидисперсті суспензияның тұндыру процесі, тұндыру фронтының эволюциясы, дисперсті қоспа фракциялары, компьютерлік тұндыру моделі.

L.M. Musabekova^{1,3}, B.T. Tazhibayeva², B.O. Torlanova¹, G.S. Ospanova¹

¹*South Kazakhstan Medical Academy, Shymkent, Kazakhstan*

²*Zh.A. Tashenev University, Shymkent, Kazakhstan*

³*M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan*

**COMPUTER MODEL FOR SEDIMENTATION OF POLYDISPERSED
SUSPENSIONS IN FLOW SYSTEMS**

Abstract. A computer model of the deposition of polydisperse suspensions has been developed. The model describes the process of deposition of a polydisperse suspension in flow systems. A new method for calculating the distribution of the dispersed phase at the outlet of the flow apparatus has been presented. The technique is based on the calculation of boundary deposition curves for various fractions of a dispersed mixture. Based on the new model, a computer program has been developed to calculate the evolution of deposition fronts, which is important for calculating the kinetics of deposition of polydisperse suspensions in natural processes and industrial flow devices. The new method for calculating the boundary deposition curves also allows us to propose a simple and effective method for calculating changes in the fractional composition of the slurry at the outlet of the flow area, as well as the dynamics of the deposition fronts and the sediment surface, both along the height of the reactor and along the longitudinal coordinate of the flow apparatus. In this paper, effective software for the implementation of a new calculation methodology has also been developed and tested for the first time.

Keywords: the deposition process of a polydisperse suspension, the evolution of deposition fronts, fractions of a dispersed mixture, a computer model of deposition.