

МРНТИ 61.13.21

Ж. Жаксылык¹ – основной автор, | ©
Л.М. Мусабеева², В.Г. Голубев³,
Л.М. Ульев⁴, А.А. Бердалиева⁵



¹Докторант, ^{2,3,4}Д-р техн. наук, ⁵Канд. техн. наук

ORCID

¹<https://orcid.org/0009-0003-3306-9055> ²<https://orcid.org/0000-0001-8712-2446>

³<https://orcid.org/0000-0001-7370-3872> ⁴<https://orcid.org/0000-0002-2732-6444>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-2423-500X>



^{1,2,3}Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
г. Шымкент, Казахстан

^{2,5}Южно-Казахстанская медицинская академия, г. Шымкент, Казахстан

⁴Томский Политехнический университет, г. Томск, Россия



²mleyla@bk.ru

<https://doi.org/10.55956/UJEL9151>

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ИНЕРЦИОННОГО СВОРМИНГА В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Работа фокусируется на моделировании процесса сворминга мелких частиц в потоках, где они распределяются. В работе проведен всесторонний анализ явления сворминга, а также предложены методы для разработки универсальных моделей сворминга, описывающих эти процессы. Выявлено, что существуют три ключевых механизма формирования сворминга в непрерывных потоках дисперсных смесей. Первый механизм связан с изменениями в структуре основного потока внутри устройства, который можно назвать инерционным свормингом. Второй механизм объясняется наличием особых точек или «ловушек», а также притягивающих или отталкивающих центров в устройстве. Третий механизм основывается на взаимодействии между частицами в потоке, что можно охарактеризовать как взаимодействующий сворминг. В исследовании также представлены результаты компьютерного моделирования и численных экспериментов, описывающих сворминг по инерционному механизму, с применением подхода стохастических решеток.

Ключевые слова: сворминг, дисперсные смеси, инерционный сворминг, взаимодействующий сворминг, компьютерное моделирование.



Жаксылык, Ж. Разработка компьютерной модели инерционного сворминга в дисперсных системах [Текст] / Ж. Жаксылык, Л.М. Мусабеева, В.Г. Голубев, Л.М. Ульев, А.А. Бердалиева // Механика и технологии / Научный журнал. – 2024. – №3(85). – Б.338-346. <https://doi.org/10.55956/UJEL9151>

Введение. Работа посвящена моделированию скопления мелких частиц в потоках с дисперсией, например, в системах с непрерывной и твердой фазами или в газо-жидкостных средах.

В работе термин «сворминг» уточняется для описания образования перемещающихся зон с большим накоплением частиц дисперсной фазы, данный термин может использоваться в других смыслах и в других

исследованиях. Это явление пока недостаточно хорошо изучено и исследовано.

В рамках теоретического анализа можно выделить несколько подходов, которые способствуют накоплению частиц в потоках дисперсных сред. При первом подходе происходят изменения в составе среды потока внутри системы [1]. Этот процесс можно описать как накопление по инерции.

Когда в аппарате образуются особенные зоны, с притягивающим и отталкивающим эффектом, данное явление называется привлекательным роением. Это характерно для второго подхода.

Третий подход, связан со связями между кластерами в дисперсной среде аппарата [1]. Этот процесс можно определить как взаимодействие между кластерами в скоплениях частиц.

Каждый из подходов расчета процесса агрегации с накоплением кластеров обладает определенными характеристиками [1].

Рассмотрим группировку кластеров для подхода инерции, которая делит поток в дисперсной среде. В результате образуются несколько агрегационных роев с разными параметрами потока: скорость, размеры кластеров.

В итоге, исходная совокупная функция распределения преобразуется в несколько отдельных выражений, каждая из которых характеризует различные группы (рис. 1). Данный метод сворминга часто встречается в промышленных аппаратах [2].

Привлекательный сворминг может происходить по нескольким условиям. Одним из условий является метод силового взаимодействия. В этом случае сила притяжения или отталкивания влияет на движение частиц относительно сингулярности. Ещё один подход – это взаимодействие кластеров и частиц. При тесном взаимодействии кластеров появляется задача описания модели расчета взаимодействия множества частиц друг с другом. При силовом взаимодействии происходит непрерывное воздействие на частицы и кластеры. В коммуникационном воздействии рассчитывается скорость и время реакции частиц на импульсы.

Притягательное скопление может происходить, когда элементы направляются к увеличению плотности материи в однородной среде, либо когда сигналы передаются от одного элемента к другому, обозначая путь к аттрактивной точке (рис. 1).



Рис. 1. Картина поведения частиц дисперсной фазы при различных типах роения: инерционное, аттрактивное

Этот механизм особенно значим для частиц биологического происхождения [3]. Исследователи анализировали разнообразные аспекты, влияющие на перемещение биологических скоплений, включая плотность элементов, концентрацию, вязкость окружающей среды и вертикальное удержание. Этот тип сворминга может воспроизводить разнообразные явления в различных областях, включая транспортные пробки, и может быть точно описан с помощью адаптированного уравнения Фоккера-Планка [4].

Взаимодействующий сворминг, при моделировании сталкивается с классической проблемой взаимодействия множества тел [5].

В изучаемой системе рассматривались различные явления и модели сворминга. При накоплении частиц может происходить образование кластерных частиц со сложным внутренним составом, как показано в работах [6] или образование кластеров без агрегирования. Для явления кластеров с агрегированным составом, размер и возраст кластеров ведет к появлению агрегации различного характера.

В исследуемой системе могут параллельно проходить множественные механизмы и сценарии процессов роя. Рой может включать в себя образование кластеров частиц со сложной структурой потока [7], либо происходить без формирования агрегации. При образовании множественных накоплений частиц их возрастание кластеров может зависеть от возраста и диаметра частиц. В таких ситуациях кинетические уравнения агрегации должны быть немарковскими [8].

Сам процесс сворминга можно рассматривать как форму слабой агрегации, где связь между частицами в рое определяется их пространственной корреляцией и скоростями [9]. Учитывая, что физическая природа трех выделенных механизмов сворминга существенно различается, в рамках одной статьи трудно охватить все подходы к моделированию. Инерционный процесс накопления частиц в этой работе заслуживает большое значение, т.к. без этого понятия будет сложно рассчитать многие процессы в химической промышленности.

Основной вклад исследования заключается в моделировании инерционного сворминга и в проведении анализа.

Условия и методы исследований. Разработка всеобъемлющей модели инерционного скопления роя является трудоемким процессом из-за зависимости динамики и механизмов этого явления от специфических условий гидродинамики в системе и изменения движения частиц от их массы и размера в дисперсной фазе.

Допустим исследуемая среда состоит из частиц однородного типа, тогда предполагаем, что частицы разного размера имеют разные скорости перемещения. Для явления инерционного сворминга, они играют важную роль при создании роя. В этом случае происходит разделение частиц и создание скоплений с одинаковыми скоростями.

В работе [10] была рассмотрена методика расчета скорости частиц с разными размерами и порядками в потоке. В модели было показана численная схема расчета перемещения частиц для различных случаев со сложной конфигурацией потока. Уравнение перемещения элемента в течении, при условии отсутствия агрегации или распада, может быть изложено следующим образом:

$$\frac{d}{dt}(m_p \vec{W}_p) = -\xi \frac{\rho_g}{2} \pi d_p^2 W_{rel}^2 \vec{e} + \vec{F}_\perp + m_p \vec{g} \quad (1)$$

Здесь учитываются такие параметры как коэффициент трения, \vec{g} – вектор ускорения свободного падения, ρ_g – плотность газа, d_p – диаметр элемента, \vec{W}_p – вектор скорости элемента, \vec{F}_\perp – аэродинамическая сила, \vec{e} – нормированный вектор относительной скорости, t – время и m_p – вес элемента. В процессе разработки модели, ключевое уравнение движения элемента преобразуется в систему уравнений. Эта система позволяет вычислить значение относительной скорости элемента и угол между нормированным вектором направления этой скорости и выбранной осью координат. Основное преимущество данного подхода заключается в точности определения относительной скорости элемента в любой момент его движения.

Применение метода Лагранжа позволяет переформулировать уравнение (1) следующим образом:

$$\vec{e} \left(\frac{dW_{rel}}{dt} + k_1 W_{rel}^2 \right) + \frac{d\vec{e}}{dt} W_{rel} = - \frac{d\vec{W}_g}{dt} + k_2 W_{rel} \vec{e}_\perp + \vec{g} \quad (2)$$

Здесь:

$$k_1 = \frac{3\xi\rho_g}{4\rho_p d_p}; \quad k_2 = \frac{3K\mu_g}{4\pi\rho_p d_p} \sqrt{\frac{1}{v_g} \left| \frac{\partial \vec{W}_g}{\partial \vec{n}} \right|} \quad (3)$$

Ускорение газа:

$$\frac{d\vec{W}_g}{dt} = \frac{\partial \vec{W}_g}{\partial t} + \left(\frac{\partial \vec{W}_g}{\partial \vec{r}}, \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \frac{\partial \vec{W}_g}{\partial t} + \left(\frac{\partial \vec{W}_g}{\partial \vec{r}}, \vec{W}_g \right) + \left(\frac{\partial \vec{W}_g}{\partial \vec{r}}, \vec{e} \right) W_{rel} \quad (4)$$

Термин $\frac{\partial \vec{W}_g}{\partial \vec{r}}$ относится к производной пространственного тензора. В контексте плоской задачи, этот термин может быть интерпретирован как изменение тензора в пространстве, например, как градиент поля напряжений или деформаций в двумерной плоскости. Это означает, что он описывает, как соответствующие величины меняются в зависимости от изменений в пространственных координатах в рамках плоскости задачи.

$$\frac{\partial \vec{W}_g}{\partial \vec{r}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_{g,x}}{\partial x} & \frac{\partial W_{g,x}}{\partial y} \\ \frac{\partial W_{g,y}}{\partial x} & \frac{\partial W_{g,y}}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

После выполнения необходимых преобразований, уравнение (4) приводится к следующей системе уравнений:

$$\frac{dW_{rel}}{dt} = -k_1 W_{rel}^2 - (\vec{e}', \vec{e}) W_{rel} - (\vec{v}, \vec{e}) + (\vec{g}, \vec{e}) \quad (6)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{W_{rel}} \left((\vec{g}, \vec{e}_\perp) - (\vec{V}, \vec{e}_\perp) \right) - (\vec{e}', \vec{e}) + k_2 \quad (7)$$

Здесь:

$$\vec{e}' = \left(\frac{\partial \vec{W}_g}{\partial \vec{r}}, \vec{e} \right), \quad \vec{V} = \frac{\partial \vec{W}_g}{\partial t} + \left(\frac{\partial \vec{W}_g}{\partial \vec{r}}, \vec{W}_g \right) \quad (8)$$

Результаты исследований. Применение данного метода позволяет выполнять расчеты для потока вещества с заранее неопределённым распределением скоростей. Возможность таких анализов достигается за счёт одновременного проведения исследований гидродинамических процессов и определения перемещения частиц в дисперсной фазе. В контексте этой техники вероятность объединения частиц не принимается во внимание.

В исследовании, проведённом авторами [11], была разработана компьютерная модель для описания траекторий сферических частиц разнообразных размеров в газовом потоке. В модели учитывается поведение таких частиц в перпендикулярном сечении при обтекании аппарата. Результаты моделирования показывают, что большие частицы с идентичными размерами собираются в группы, тогда как более мелкие частицы следуют по сложным путям в областях вихрей при обтекании объектов (рис. 2). Эти небольшие частицы создают рои, возникающие рядом с обтекаемым объектом, а более объёмные частицы образуют скопления или агрегации, идущие в направлении главного потока. В статье также представлены рекомендации по выбору сворминга.



Рис. 2. Пути движения частиц в условиях нестационарного вихревого следа с частицами различного диаметра: 1 – 2×10^{-4} м, 2 – 5×10^{-4} м, 3 – 7×10^{-4} м; диаметр цилиндра $D_{cyl} = 0.2$ м; средняя скорость газового потока $W_g = 3$ м/с.

Изучение результатов выявляет, что подобное поведение типично для различных сценариев обтекания, включая как одиночный цилиндр, так и слой

насадки при разной конфигурации цилиндрических элементов. На рисунке 2 представлены характерные траектории частиц различного размера. Замечено, что мелкие частицы (рис. 2, кривая 1) направляются в область вихревого следа, в то время как более крупные (рис. 2, кривые 2 и 3) обходят цилиндр, причем некоторые из них временно двигаются поперек потока (рис. 2, кривая 3), описывая петлеобразные траектории. Это приводит к увеличению времени нахождения таких частиц в зоне воздействия и способствует их разделению.

Обсуждение научных результатов. В модели был использован подход с помощью вероятностной сеточной модели. В рамках исследования проводился численный анализ с применением вероятностной сеточной модели [12] при различных профилях скорости движущего потока. Эта методика предусматривает заблаговременно установленный профиль скорости потока и также способствует эффективному учёту динамики агрегационных процессов. В предшествующих работах были созданы компьютерная модель расчёта с помощью метода вероятностной сетки, представлены программа, анализы и графики численного анализа данной методики для процессов агрегации в дисперсных системах, где наблюдались случаи агрегации с диффузионным ограничением (АДО) и агрегации с комбинированной кинетикой.

Затем рассматриваемый метод был адаптирован с помощью компьютерной модели разбиения сетки на крупные зоны. Основные аспекты этой модели в контексте АДО описываются следующим образом:

1. Пусть у нас имеются матрицы: массив суммы кластеров в зонах A_0 и массив концентрации $A_{i,j}$ и, где S, D размеры матрицы A_0 , размеры R, T для матрицы $A_{i,j}$.

Например, у нас имеется сетка 200×50 . Мы делим на 5 частей по длине и на 5 частей по ширине, тогда у нас получатся зоны с размерами 40×10 .

2. В каждом блоке полученных блоков были посчитаны сумма количества кластеров и сумма порядков кластеров.

На рисунке 3 представлены результаты разработанной модели. Была принята следующая цветовая модель: зеленые цвета для расчета суммы количества кластеров, для модели с порядками кластеров фиолетовая цветовая схема. В алгоритме был использован RGB-код из стандартной цветовой модели [13], в программе предусмотрено изменение шага. Диапазон параметров можно было менять в широких границах измерения.

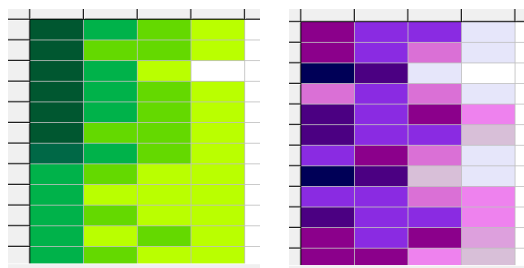


Рис. 3. Модель сворминга на базе стохастической решетки

Были использованы размеры сторон вычислительного массива-прямоугольника от 100 до 200 по длине и от 20 до 50 по ширине. Был принят диапазон размеров зоны или прямоугольника отдельной матрицы с размерами: 40×4 , 40×10 . Выполнены численные эксперименты и анализ для различных видов начальных фронтов скорости потоков: неупорядоченный

неравномерный поток и упорядоченный неравномерный поток, а также равномерного потока. Фрагмент кода для расчета неравномерного потока скоростей (рис. 4).

```
procedure TForm1.uneven1;
var i,l,j,s,U:integer;
begin
  su_g.ColCount:=n2+1;
  su_g.RowCount:=n1+1;
  for l:=1 to n2+1 do //n2+1
    for i:=1 to n1 do
      for j:=1 to n3 do
        U[l,i,j]:=0;
        for l:=1 to n2+1 do //n2+1
          for i:=1 to n1 do
            for j:=1 to n3 do
              begin
                if (l<=w1) and (i<=wn1) then U[l,i,j]:=1;
                if (l<=w2) and (i>wn1) and (i<=(wn1+wn2)) then
                  U[l,i,j]:=1;
                if (l<=w1) and (i>(wn1+wn2)) and (i<=n1) then
                  U[l,i,j]:=1;
                memo1.Lines.Add(inttostr(U[l,i,j]));
                U1[l,i,j]:=U[l,i,j];
                sU:=sU+U[l,i,j]; //label3.Caption:=inttostr(sU);
                su_g.Cells[l,i]:= inttostr(U[l,i,j]);
              end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
```

Рис. 4. Фрагмент программы для расчета неравномерного потока скоростей

В результате анализа было установлено: увеличение агрегации в зонах с повышенной плотностью частиц; для равномерного потока не образуются большие скопления частиц; концентрация частиц зависит от случайного перемещения частиц и начального распределения.

Заключение. В результате анализа проведенных расчетов численных экспериментов для компьютерной модели, были выявлены различные зоны скопления частиц с различной плотностью. Здесь был использован пошаговый алгоритма расчета скорости частиц дисперсной фазы в различных зонах аппарата. Особенностью разработанной модели является возможность рассчитать скорости фронтов потока, порядки и количество кластеров по объему аппарата.

Разработка модели показала, что с помощью решеточной модели случайного блуждания частиц можно выполнить расчет оценки плотности скопления частиц, провести анализ и их распределение по объему аппарата, рассчитать среднюю скорость частиц в аппарате. Анализ этой модели показывает зависимость кинетики скоплений частиц от неупорядоченного профиля скорости потока. Для случая неупорядоченного профиля скорости потока образуются скопления частиц в разных зонах аппарата, с различной плотностью частиц, порядков и количества этих частиц.

Список литературы

1. Carranza P.M., Coates P. Swarm modelling // Proceedings of the 3rd Generative Art Conference (GA2000). – 2000.
2. Talukder S. Mathematicle modelling and applications of particle swarm optimization. – 2011.

3. Carrillo J.A. et al. Particle, kinetic, and hydrodynamic models of swarming // *Mathematical modeling of collective behavior in socio-economic and life sciences*, 2010. P. 297-336.
4. Bees, M.A., Andresen, P., Mosekilde, E., Givskov, M. The interaction of thin-film flow, bacterial warming and cell differentiation in colonies of *Serratia liquefaciens* // *Journal of Mathematical Biology*, 2000. No. 40. P. 27-63.
5. Maningo J.M.Z., Faelden G.E.U., Nakano R.C.S., Bandala A.A., Vicerra R.R.P., Dadios E.P. Formation Control in Quadrotor Swarm Aggregation using Smoothed Particle Hydrodynamics // *Proceedings of IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, 2016. P. 2070-2075.
6. Brener A.M. Nonlocal equations of the heat and mass transfer in technological processes // *Theor. Found. of Chem. Eng*, 2006. No. 40 (6). P. 564-572.
7. Rimer O., Ariel G., Kinetic Order-Disorder Transitions in a Pause-and-Go Swarming Model with Memory // *Journal of Theoretical Biology*, 2017. Vol. 419. P. 90-99.
8. Schmidt S.A., Simon M., Attarakih M.M., Lagar L.G., Bart H.-G. Droplet population balance modelling—hydrodynamics and mass transfer // *Chemical Engineering Science*, 2006. No. 61. P.246-256.
9. Kim L.A., Brener A.M., On the time nonlocality in the heat and mass transfer equations for high-rate processes // *Theor. Found. of Chem. Eng*, 1996. Vol. 30 (3). P. 233-235.
10. Brener A.M., Bolgov N.P., Kaziev M.T., Orymbetov E.M. Simplified model of drop motion in a gas flow // *Theor. Found. of Chem. Eng*, 1987. No. 21 (1). P. 126-131.
11. Balabekov B. Ch., Brener A.M., Balabekov O.S. Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer Processes upon the Flowing of Regular Structures by Gas_Drop Flow // *Theor. Found. of Chem. Eng*, 2016. No. 50 (3). P. 273-285.
12. Brener A.M., Musabekova L.M., Jamankarayeva M.A. Stochastic lattice model of aggregation in heterogeneous polydisperse media // *Chemical Engineering Transactions*, 2017. Vol. 60. P.79-84.
13. Poynton C. *Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces*. – Morgan Kaufmann Publishers, 2012.

Материал поступил в редакцию 15.07.24.

Ж. Жаксылык¹, Л.М. Мусабекова², В.Г. Голубев¹, Л.М. Ульев³, А.А. Бердалиева²

¹М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан

²Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы, Шымкент қ., Қазақстан

³Томск политехникалық университеті, Томск қ., Ресей

ДИСПЕРСІК ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ИНЕРЦИАЛДЫҚ ШАЛТЫНУДЫҢ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛІН ӨЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Жұмыста ұсақ бөлшектердің таралатын ағындардағы үйірлену процесін модельдеуге бағытталған. Жұмыста үйінді құбылысына жан-жақты талдау жасалған, сондай-ақ осы процестерді сипаттайтын әмбебап үйінді модельдерін жасау әдістері ұсынылған. Дисперсті қоспалардың үздіксіз ағынында үйіндінің пайда болуының үш негізгі механизмі бар екені анықталды. Бірінші механизм құрылғының ішіндегі негізгі ағынның құрылымының өзгеруімен байланысты, оны инерциялық үйінді деп атауға болады. Екінші механизм құрылғыда арнайы нүктелердің немесе «тұзақтардың», сондай-ақ тарту немесе итермелейтін орталықтардың болуымен түсіндіріледі. Үшінші механизм ағындағы бөлшектердің өзара әрекеттесуіне негізделген, оны өзара әрекеттесуші үйінді ретінде сипаттауға болады. Зерттеу сонымен қатар CFD модельдеу және стохастикалық тор тәсілдерін қолдана отырып,

инерциялық үйіндіні сипаттайтын компьютерлік модельдеу және сандық эксперименттердің нәтижелерін ұсынады.

Түйінді сөздер: үймелеу, дисперсті қоспалар, инерциялық үйінділер, өзара әрекеттесу, компьютерлік модельдеу.

Zh. Zhaksylyk¹, L.M. Musabekova², V.G. Golubev¹, L.M. Ulyev³, A.A. Berdaliyeva²

¹*M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan*

²*South Kazakhstan Medical Academy, Shymkent, Kazakhstan*

³*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

DEVELOPMENT THE COMPUTER MODEL OF INERTIAL SWARMING IN DISPERSE SYSTEMS

Abstract. The work focuses on modeling the process of swarming of small particles in flows where they are distributed. The work provides a comprehensive analysis of the swarming phenomenon, and also proposes methods for developing universal swarming models that describe these processes. It was revealed that there are three key mechanisms for the formation of swarming in continuous flows of dispersed mixtures. The first mechanism is associated with changes in the structure of the main flow inside the device, which can be called inertial swarming. The second mechanism is explained by the presence of special points or “traps”, as well as attracting or repulsive centers in the device. The third mechanism is based on the interaction between particles in the flow, which can be characterized as interacting swarming. The study also presents the results of computer simulations and numerical experiments describing inertial swarming using both CFD modeling and stochastic lattice approaches.

Keywords: swarming, dispersed mixtures, inertial swarming, interacting swarming, computer modeling.