

УДК 536.75

В.Ф. Дайлюденко

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА STAR-CD ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО НАПРАВЛЕННОГО ПОТОКА В ОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ

Рассматриваются методы моделирования аэродинамических процессов, возникающих при двухфазном направленном течении с учетом различных типов механического взаимодействия компонентов. Показывается, что методика, применяемая в настоящей работе для моделирования в программном пакете STAR-CD, позволяет получить достоверные результаты численного моделирования двухфазного направленного потока твердотельных частиц и несущей среды, в том числе в турбулентном режиме и с учетом взаимодействия частиц с вихревыми структурами.

Введение

Моделирование движения многофазных потоков имеет большое фундаментальное значение в гидродинамических исследованиях [1, 2] и с точки зрения применения позволяет оптимизировать конструктивные особенности соответствующих технических устройств, разрабатываемых и применяемых в машиностроении, а также улучшить их эксплуатационные динамические характеристики [2–4].

В связи с этим в настоящей работе проведен анализ физических процессов, протекающих в двухфазных средах (т. е. состоящих из несущей среды и взвеси твердотельных частиц). Данные процессы исследуются при моделировании средствами программного пакета STAR-CD [3, 4] направленного потока двухфазной среды в ограниченном объеме. Моделирование производится на основе решения соответствующих дифференциальных уравнений (характеризующих как поведение каждой фазы, так и межфазные взаимодействия) методами конечных элементов с учетом различных особенностей взаимодействия компонентов потока в ламинарном и турбулентном режимах, в том числе при наличии вихревых процессов. При этом учитываются взаимодействия потока частиц со стенками рабочей области, аэродинамические процессы непрерывной фазы, характеризующиеся уравнениями Навье – Стокса, а также силы, позволяющие представить взаимодействие частиц с несущей средой. Основной задачей численного моделирования является исследование влияния диссипативных процессов взаимодействия частиц на их движение по транспортеру с целью выбора оптимальных скоростных режимов несущей и дисперсионной среды.

1. Исследование методов моделирования двухфазного дисперсионного течения и обоснование применяемой методики

Моделирование двухфазного динамического потока средствами STAR-CD подразумевает, что поток состоит из непрерывно распределенной фазы (в настоящей работе непрерывная среда полагается газообразной) и дисперсионной фазы (взвешенных твердотельных частиц силосообразной массы). В процессе продвижения по ограниченной области транспортера данные две фазы испытывают непрерывный процесс механического взаимодействия (в общем случае между ними также могут иметь место явления тепло- и массопереноса [4, 5]). Для моделирования данного процесса механического взаимодействия в STAR-CD используется следующее уравнение движения отдельной частицы в потоке непрерывной фазы [4]:

$$m_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} = \vec{F}_{dr} + \vec{F}_p + \vec{F}_{am} + \vec{F}_b, \quad (1)$$

где \vec{u}_d – мгновенная скорость частицы, имеющей массу m_d .

Сила сопротивления движению частицы \vec{F}_{dr} (первоначально введенная в STAR-CD для «медленной» непрерывной фазы) определяется по формуле

$$\vec{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d |\vec{u} - \vec{u}_d| (\vec{u} - \vec{u}_d), \quad (2)$$

где ρ – плотность непрерывной фазы; A_d – площадь поперечного сечения движущейся частицы; \vec{u} – мгновенная скорость непрерывной фазы; C_d – полуэмпирический коэффициент аэродинамического сопротивления. При этом сила аэродинамического сопротивления значительно изменяется при нарушении стационарности потока, в частности при возникновении турбулентности и ударных волн [6].

В исследовании, проводимом в настоящей работе, рассматриваются следующие два режима:

- непрерывная фаза движется быстрее дисперсионной, т. е. $|\vec{u}| > |\vec{u}_d|$;
- непрерывная фаза движется медленнее дисперсионной, т. е. $|\vec{u}| < |\vec{u}_d|$.

Предположим, векторы \vec{u} и \vec{u}_d коллинеарны и направлены в одну сторону (что в большинстве случаев имеет место для рассматриваемого режима). Тогда из (2) следует, что в случае «быстрой» несущей фазы векторы \vec{F}_{dr} и \vec{u}_d также коллинеарны и направлены в одну сторону, т. е. в данном случае \vec{F}_{dr} ускоряет движение частицы, причем ускорение возрастает с увеличением площади ее поперечного сечения и плотности несущей среды.

Сила \vec{F}_p возникает вследствие пространственной неравномерности давления и может быть представлена выражением

$$\vec{F}_p = -V_d \nabla p, \quad (3)$$

где V_d – объем частицы; ∇p – градиент давления.

Составляющая \vec{F}_{am} представляет собой так называемую «силу виртуальной массы». Данная сила возникает вследствие пространственной неравномерности поля скоростей, образующейся при движении частицы, и выражается следующим образом:

$$\vec{F}_{am} = -C_{am} \rho V_d \frac{d(\vec{u}_d - \vec{u})}{dt}, \quad (4)$$

где C_{am} – коэффициент виртуальной массы. Очевидно, воздействие данной силы на частицу в процессе ее движения при $|\vec{u}| > |\vec{u}_d|$ аналогично воздействию \vec{F}_{dr} .

Сила \vec{F}_b позволяет учесть гравитационные эффекты, а также вращение частиц и может быть записана в соответствии с выражением

$$\vec{F}_b = m_d [\vec{g} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + 2(\vec{\omega} \times \vec{u}_d)], \quad (5)$$

где \vec{g} – вектор гравитационного ускорения; $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости.

При большом количестве частиц в рабочей области возрастает влияние различных статистических взаимодействий (как между самими частицами, так и между ними и границами рабочей области), которые также учитываются в STAR-CD. В частности, в настоящей работе проведен срав-

нительный анализ движения частиц по силосопроводу в режиме механического отражения частиц от стенок («rebound») и в режиме частичного прилипания частиц к ним («stick») [3, 4].

Взаимодействие частиц со стенками транспортера в соответствии с применяемой в настоящей работе методикой [4] описывается выражениями

$$\vec{V}_{d,n}^p = -e_n \vec{V}_{d,n}; \quad (6)$$

$$\vec{V}_{d,t}^p = e_t \vec{V}_{d,t}, \quad (7)$$

где $\vec{V}_{d,n}$ и $\vec{V}_{d,t}$ – нормальная и тангенциальная составляющие скорости частицы до соударения со стенкой, в то время как $\vec{V}_{d,n}^p$ и $\vec{V}_{d,t}^p$ – их значения после соударения; e_n , e_t – нормальный и тангенциальный коэффициенты восстановления импульса. При этом скорость частицы измеряется относительно стенки транспортера. Очевидно, $e_n = e_t = 1$ соответствует режиму полностью упругого взаимодействия, а $e_n = 0$, $e_t = 0$ – полному прилипанию. Для влажных частиц установлено, что значение e_n зависит от угла падения на стенку по степенному полуэмпирическому закону [4]. Это учитывается при моделировании.

Взаимодействие частиц между собой (в результате столкновений) моделируется с использованием функции плотности вероятности распределения скоростей нескольких частиц. Данная функция описывает гауссов случайный процесс и определяется из соответствующих кинетических уравнений с учетом турбулентной диффузии, что справедливо для относительно небольших частиц, размер которых не превышает колмогоровский масштаб [1].

В последнее время результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований показали, что одним из наиболее важных механизмов, влияющих на взаимодействие компонентов многофазной жидкости, является турбулентность [1, 5]. Турбулентные явления в двухфазной жидкости проявляются в первую очередь в турбулентном перемешивании составляющих каждой фазы, что сопровождается возникновением неустойчивых возмущений [7]. Большое значение также имеет взаимодействие частиц с вихревыми структурами, которое оказывает влияние на устойчивость потока и приводит к турбулентной дисперсии [4, 5]. В свою очередь, столкновения могут оказывать влияние на взаимодействие частиц с турбулентными вихрями. Математическая формулировка рассматриваемой задачи может быть представлена через кинетическое уравнение для функции плотности вероятности, которое описывает взаимодействие частиц с турбулентными вихрями несущей сплошной среды. Оператор взаимодействия частиц с турбулентными вихрями определяется путем моделирования турбулентного поля скорости несущей среды гауссовским случайным процессом с известными корреляционными моментами [1]. При этом основное влияние на взаимодействие оказывают коэффициенты, характеризующие степень вовлечения частиц в турбулентное движение сплошной среды, а также время взаимодействия частиц с турбулентными вихрями.

Аппроксимация распределения завихренности ω_N течения гауссовским случайным процессом используется также в рамках обобщенного метода вихревых частиц [8, 9], при этом ω_N аппроксимируется через завихренности N вихревых частиц, которые отображают соответствующую область. В процессе аппроксимации предполагается, что течение несжимаемой жидкости при достаточно больших числах Рейнольдса характеризуется наличием в потенциальном поле конечных областей завихренности и динамика исследуемых течений определяется в основном взаимодействием таких областей. Как показано в [8], завихренность при этом выражается следующим образом:

$$\omega_N(\vec{x}, t) = \sum_{\alpha=1}^N \Gamma_{\alpha} f_{\alpha}(\vec{x} - \vec{x}_{\alpha}(t), \sigma_{\alpha}), \quad (8)$$

где Γ_{α} – интенсивность вихревого процесса отдельной частицы α ; \vec{x}_{α} – радиус-вектор частицы, причем функция f_{α} выражается через функцию Гаусса [8].

Модель (8) позволяет получить уравнения движения вихревых частиц для двухмерного случая, посредством которых можно воспроизвести поле скоростей некоторых вихревых структур в результате численного моделирования [8], однако в таком виде вышеуказанный подход применим лишь для описания безграничных течений. Обобщение подобного метода на случай отрывных течений связано с необходимостью учитывать условие непротекания на твердой границе и возможность генерации завихренности. В [9] показано, что с помощью условия Кутты – Жуковского и посредством введения мнимой зеркально отраженной системы вихрей данная модель может быть применима для расчета нестационарных отрывных течений с фиксированной точкой отрыва. В частности, может быть решена задача о сворачивании вихревой пелены, а также произведено моделирование структуры разгонного вихря. Иными словами, данная модель позволяет решить ряд качественных задач фундаментального характера. Однако при моделировании гидродинамических процессов, требующих высокой точности, недостаточно исследован вопрос о переходе множества вихревых частиц в непрерывно распределенную вихревую структуру и погрешность данного приближения [10], поэтому в задачах инженерного моделирования преимущественно используется непрерывное воспроизведение вихревой динамики [2–4].

В частности, в пакете STAR-CD также предусмотрено стохастическое моделирование взаимодействия частиц с турбулентными вихрями (в режиме турбулентной дисперсии [4]). При этом предполагается, что в процессе пересечения зоны турбулентного потока частица случайным образом взаимодействует с последовательностью вихрей, причем турбулентные флуктуации скорости в каждом вихре носят изотропный характер и подчиняются гауссовской функции плотности вероятности (аналогично рассмотренным выше моделям), где дисперсия соответствующего распределения выражается через кинетическую энергию турбулентности k следующим образом:

$$\sigma^2 = \frac{2k}{3}, \quad (9)$$

а среднее значение распределения принимается равным нулю. Время взаимодействия частицы с отдельным макровихрем полагается минимальным, с тем чтобы скорость частицы в области рассматриваемого вихря была постоянной на протяжении всего процесса взаимодействия, время которого τ_I определяется в соответствии с оценкой

$$\tau_I = \min(\tau_e, \tau_t). \quad (10)$$

Здесь τ_e и τ_t представляют собой среднее время существования отдельного макровихря и время, необходимое для пересечения данного вихря движущейся частицей, соответственно, причем τ_e определяется выражением

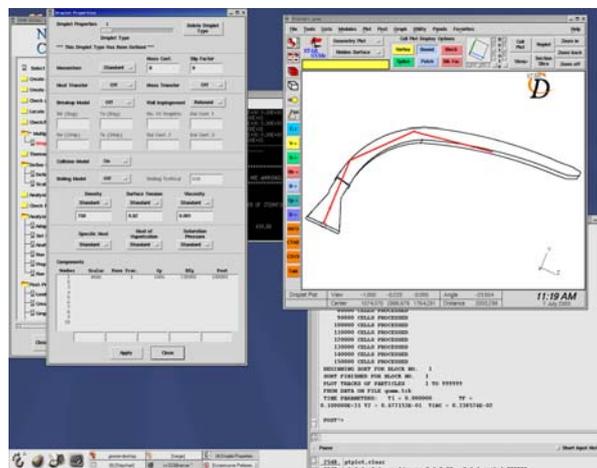
$$\tau_e = 3C_\mu \frac{k}{\varepsilon}, \quad (11)$$

где C_μ – эмпирический коэффициент, необходимый для расчета турбулентной вязкости [4]; ε – диссипация энергии турбулентности. Значение τ_t определяется линейным масштабом турбулентности, соотношением скоростей \vec{u} и \vec{u}_d , а также временным масштабом релаксации импульса. В процессе моделирования потока непрерывной фазы используются уравнения Навье – Стокса (т. е. уравнения сохранения массы и импульса) и k – ε -модели турбулентности (соответствующее аналитическое описание рассмотрено в [11]). Таким образом, применяемая методика действительно позволяет осуществить достоверное моделирование движения двухфазного потока с учетом различных физических явлений взаимодействия компонентов, что подтверждается в настоящей работе соответствующими численными экспериментами.

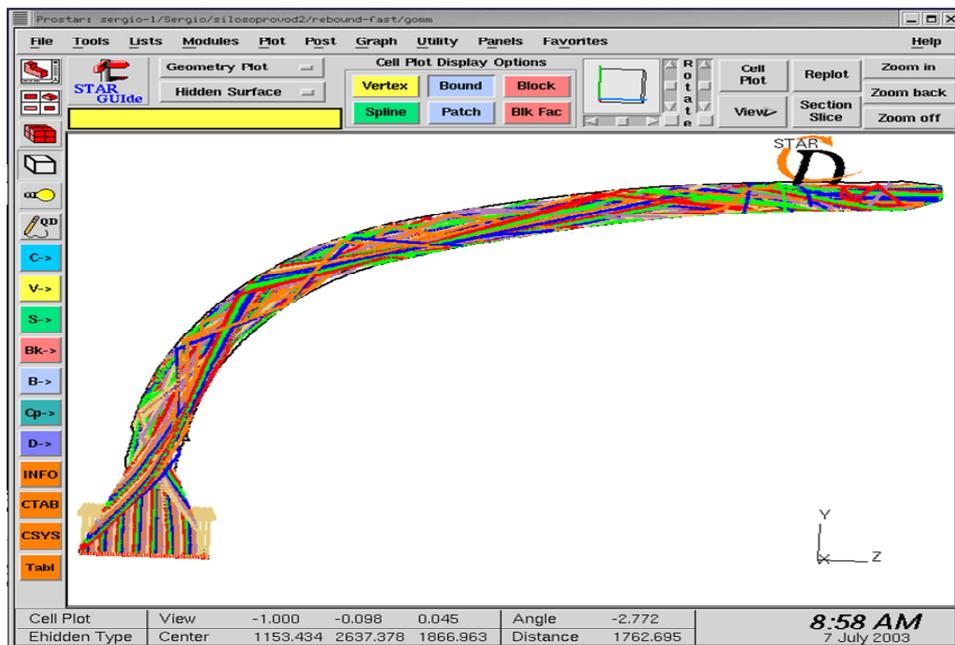
2. Результаты компьютерного моделирования потока твердотельных частиц

В настоящей работе компьютерное моделирование производилось средствами программного пакета STAR-CD (версия 3.15A) в соответствии с вышеизложенной методикой. Начальная скорость дисперсионной фазы выбиралась $|\vec{u}_d| = 25$ м/с. Плотности несущей фазы и вещества дисперсионной фазы составляли 1,205 и 750 кг/м³ соответственно. Диаметр движущихся частиц составлял 30 мм. Выбранные параметры вещества частиц позволяют воспроизвести движение силосной массы по транспортеру.

Результаты моделирования в режиме отражения частиц при $|\vec{u}| > |\vec{u}_d|$ представлены на рис. 1. Траектории частиц в рабочей области силосопровода на протяжении всего времени перемещения рассчитаны путем проведения численных экспериментов, которые показывают, что при таком режиме соотношения начальных скоростей происходит равномерное заполнение рабочей области и движение массы. Скорость несущей фазы выбиралась $|\vec{u}| = 41$ м/с.



а)



б)

Рис. 1. Результаты моделирования для «быстрой» несущей фазы: а) для одной частицы, входящей в центр силосопровода; б) для 252 частиц, равномерно распределенных по плоскости входного сечения

Дополнительно проводилось моделирование потока частиц в случае «медленной» несущей фазы (рис. 2), для которой первоначально были даны определения составляющих, входящих в (1), где $|\vec{u}| = 10$ м/с. Плотности несущей фазы и вещества дисперсионной фазы составляли по-прежнему 1,205 и 750 кг/м³. При этом имело место частичное обратное движение частиц вследствие наличия силы сопротивления со стороны «медленной» несущей фазы, что может затруднять их продвижение по силосопроводу. Моделирование на рис. 1 и 2 проводилось в стационарном («steady») режиме на протяжении 100 итераций. Из результатов моделирования следует, что для более равномерного продвижения потока частиц начальная скорость несущей фазы должна быть несколько большей, чем дисперсионной.

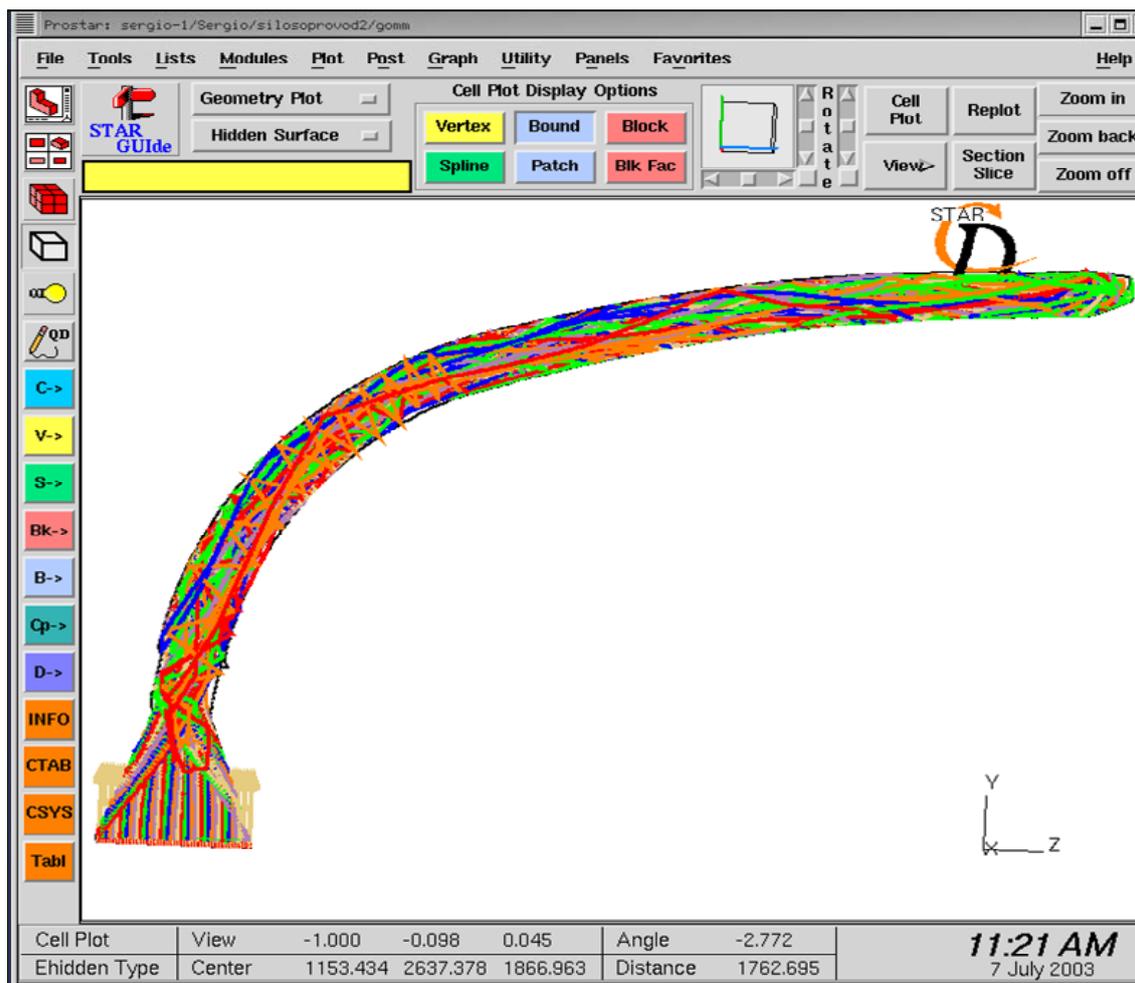


Рис. 2. Результаты моделирования для 252 частиц и «медленной» несущей фазы

При моделировании движения пакета из 252 частиц был включен турбулентный режим решателя (большие числа Рейнольдса в случае $k-\varepsilon$ -модели турбулентности) для потока воздуха и режим соударения частиц [3], но равномерность движения частиц от этого не нарушалась, несмотря на возможное присутствие турбулентных структур в несущей среде. Однако многократное упругое отражение не дает надлежащего согласования с экспериментальными результатами. Действительно, в таком случае как касательная, так и нормальная составляющие частицы остаются неизменными после ее взаимодействия со стенками (согласно методике [4]), что не дает возможности учесть диссипативные процессы, имеющие место в результате прилипания частиц (особенно влажных) и торможения их о стенки. Эти диссипативные процессы удалось воспроизвести в режиме частичного прилипания частиц к стенкам. В таком режиме наблюдалось сходство с натурным экспериментом, при котором происходило отклонение потока

дисперсионной фазы к верхней стенке рабочей области. Данный эффект заметен уже при моделировании прилипания с одной частицей (рис. 3). Результаты моделирования получены при $|\vec{u}| = 40$ м/с, остальные характеристики выбирались такими же, как и в случае допущения упругого взаимодействия, причем вязкость и поверхностное натяжение дисперсионной фазы выбирались по умолчанию.

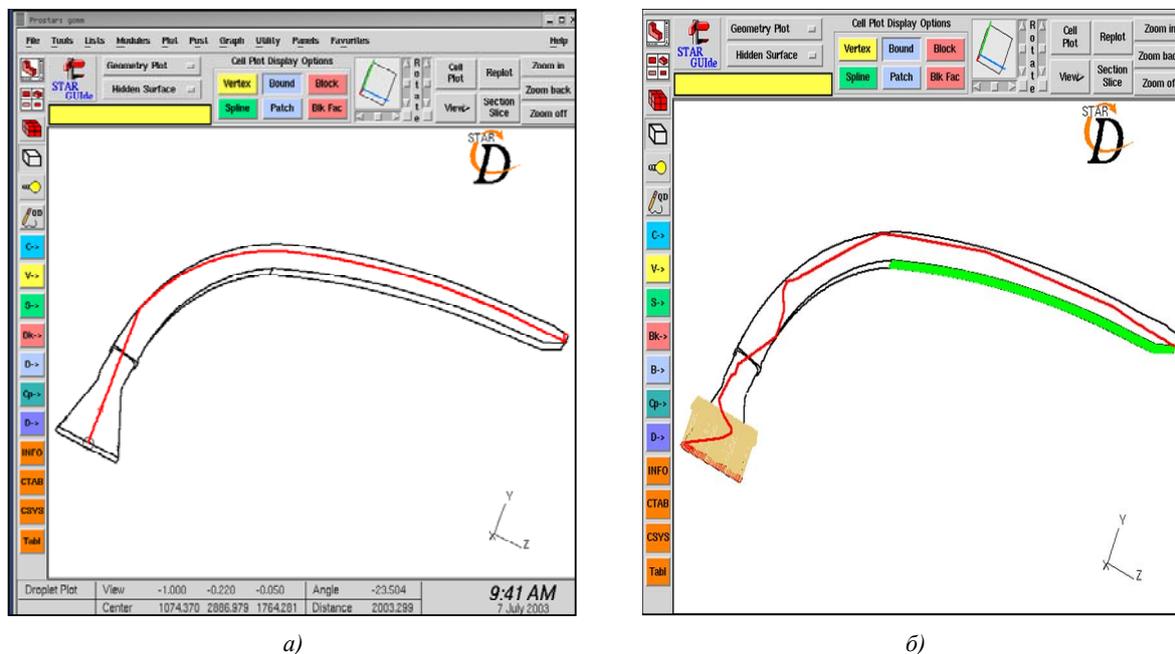


Рис. 3. Результаты моделирования для одной частицы в режиме частичного прилипания к стенкам при различном начальном расположении: а) в центре; б) у левого края

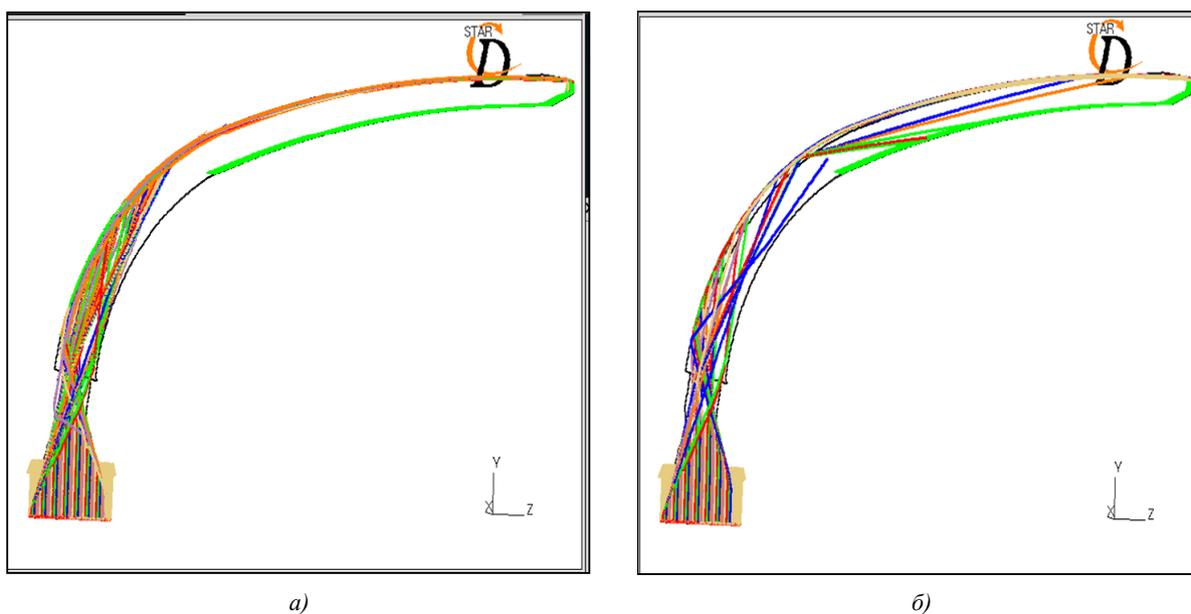
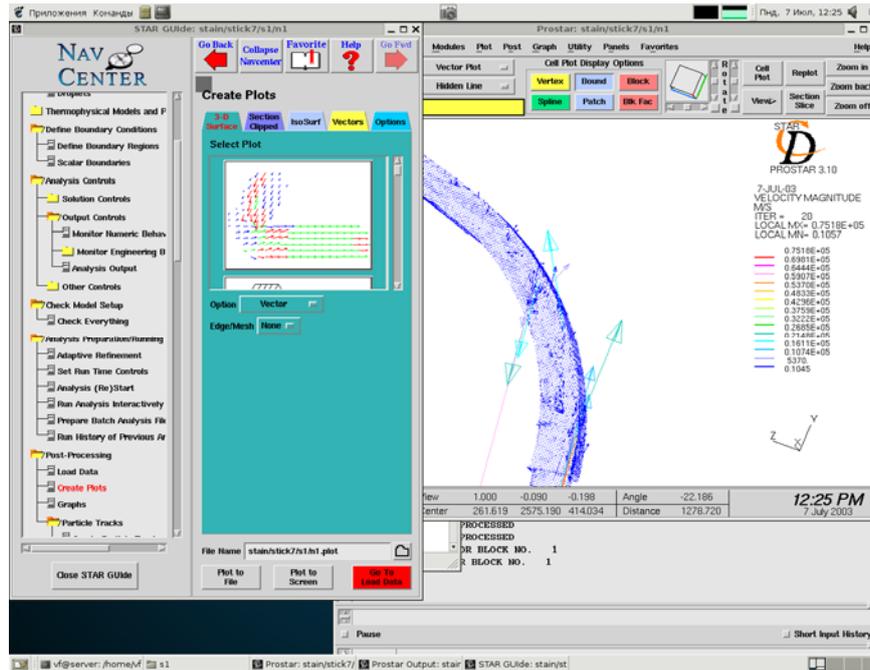


Рис. 4. Результаты моделирования для 252 частиц в режиме прилипания в ходе итерационного процесса: а) после третьей итерации; б) после шестой итерации



a)



б)

Рис. 5. Результаты моделирования турбулентной дисперсии:
 а) области вихревых структур в несущей фазе; б) расчет траекторий

При моделировании режима частичного прилипания в случае 252 частиц возникают значительные сложности с конкретной реализацией вычислительного процесса (время расчета одной итерации увеличивалось в среднем до 30–40 мин). Основной причиной этого является возможное нарушение стационарных режимов движения дисперсионной фазы, вызванное более сложным характером взаимодействия со стенками в режиме частичного прилипания, что влияет на сходимость вычислительного процесса (дополнительным фактором ухудшения данной сходимости является отсутствие стационарных граничных условий для дисперсионной фазы). Кроме того, дополнительные временные затраты связаны с тем, что при стационарном режиме расчета при каждой последующей итерации файл «case.track» пересчитывается заново в режиме прилипания частиц. Учитывая, что для 252 частиц его размер составляет 150–200 МБ, процедура пересчета требует значительных компьютерных затрат. Наконец, при реализации такого взаимодействия решатель предъявляет повышенные требования к качеству используемой сетки, особенно в «присте-

ночной» области и на выходе потока (ее структура должна быть более мелкой, чем в основном объеме рабочей области). В противном случае выдается сообщение о принудительном редуцировании потока массы (иными словами, не все взаимодействия учитываются, что может повлиять на достоверность полученного решения).

Тем не менее в настоящем исследовании удалось получить результаты моделирования движения пакета из 252 частиц в режиме частичного прилипания к стенкам до шестой итерации включительно. На рис. 4 рассчитанные в режиме прилипания траектории показаны после определенного числа итераций, направленных на получение стационарного решения. При этом плотности несущей фазы и вещества дисперсионной фазы были такими же, как и для предыдущего моделирования. Турбулентный режим решателя был выключен в целях экономии компьютерных ресурсов. Учитывались взаимодействия между частицами, а также гравитационные силы. Моделирование проводилось для «медленной» несущей фазы, причем $|\vec{u}| = 15$ м/с. Полученные результаты подтверждают данные натурального эксперимента, а именно:

- отклонение потока дисперсионной фазы к верхней стенке транспортера;
- удаление некоторого количества частиц через нижнюю часть выходной границы («outlet»).

Вторая особенность подтвердилась после шестой итерации (рис. 4, б). В настоящей работе было также установлено, что движение частиц в режиме прилипания сильно замедляется в случае наличия на стенках неоднородностей (шероховатостей), поэтому при моделировании стенки предполагались гладкими (опция «slip»).

С целью исследования динамики образования когерентных структур в несущей среде с использованием $k-\varepsilon$ -модели турбулентности и влияния начальной энергии турбулентности на структуру поля скоростей в рабочей области и на движение частиц дисперсионной фазы в настоящей работе проведено компьютерное моделирование движения сплошной и дисперсионной фаз в ограниченном объеме рабочей области. Возникновение турбулентной зоны вблизи входной части потока является характерным явлением для течений с малой вязкостью [12]. В настоящей работе задавались следующие значения начальной энергии турбулентности и диссипации: $k_0 = 0,9$ м²/с², $\varepsilon_0 = 0,1$ м²/с³. Начальные скорости сплошной среды и дисперсионной фракции задавались $|\vec{u}| = 15$ и $|\vec{u}_d| = 25$ м/с соответственно. Плотности несущей фазы и вещества дисперсионной фазы составляли 1,205 и 250 кг/м³ соответственно. Диаметр движущихся частиц составлял по-прежнему 30 мм. Компьютерное моделирование двухкомпонентного потока средствами STAR-CD производилось для 51 входящей частицы, которые были равномерно распределены по плоскости входного сечения и расположение которых задавалось автоматически посредством соответствующих команд и параметров, используемых в пакете STAR-CD [3, 4]. При расчете траекторий движения частиц выбирался режим частичного прилипания частиц к стенкам, поскольку именно в таком режиме имеется возможность учесть диссипативные процессы, имеющие место в результате прилипания частиц (особенно влажных) и торможения их о стенки, что согласуется с натурным экспериментом.

Из результатов компьютерного моделирования (рис. 5) следует, что начальная турбулентность действительно приводит к образованию вихревых структур в поле скоростей несущей среды (рис. 5, а) и к появлению дополнительной кривизны в траекториях частиц (рис. 5, б). Появление искривленных траекторий в начальной части рабочей области означает процесс турбулентного перемешивания благодаря заданию начальной энергии турбулентности и использованию режима турбулентной дисперсии. Аналогично (см. рис. 3 и 4) в верхней части рабочей области получено отклонение потока дисперсионной фазы к верхней границе (рис. 5, б), что подтверждает результаты натурального эксперимента.

Заключение

В настоящей работе исследованы аналитические модели механического взаимодействия компонентов двухфазного направленного потока непрерывно распределенной фазы и взвешенных твердотельных частиц с учетом различных типов взаимодействия с границами рабочей области. Результаты проведенного исследования и численного моделирования в программном пакете STAR-CD показали, что применяемая методика действительно дает возможность полу-

чить достоверные результаты моделирования двухфазного направленного потока твердотельных частиц и несущей среды, в том числе в турбулентном режиме и с учетом взаимодействия частиц с вихревыми структурами. Это является актуальным с точки зрения исследования явлений самоорганизации в гидродинамике. Результаты численного моделирования подтверждают согласование с данными натурального эксперимента по отношению к траектории твердотельных частиц. Действительно, при направленном движении частиц в ограниченной рабочей области имеют место диссипативные процессы, вызванные взаимодействием частиц со стенками и приводящие к отклонению потока частиц к верхней границе. Данная закономерность подтвердилась как для движения одной частицы, так и для потока непрерывно взаимодействующих частиц, причем подтвердилось ее сохранение также в режиме турбулентного перемешивания. Следовательно, полученные результаты могут быть использованы при решении задач компьютерного моделирования соответствующих процессов в многофазных средах различных физических и технических приложений.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Для более равномерного потока частиц по транспортеру начальная скорость несущей фазы должна быть несколько большей, чем дисперсионной фазы (в среднем на 40–60 %).
2. Конструкция верхней стенки транспортера должна обеспечивать минимальное трение с потоком частиц.

Список литературы

1. Алипченков, В.М. Столкновения частиц в турбулентном потоке / В.М. Алипченков, Л.И. Зайчик // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2007. – № 3. – С. 94–109.
2. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
3. User Guide for STAR-CD, version 3.15A: Computational Dynamics Limited. – London, 2002.
4. Methodology for STAR-CD, version 3.15A: Computational Dynamics Limited. – London, 2002.
5. Влияние межфазного теплообмена на устойчивость многокомпонентного турбулентного течения в вихре / Е.С. Асмолов [и др.] // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2005. – № 6. – С. 109–121.
6. Бойко, В.М. Динамика частиц и капель в потоке за ударной волной / В.М. Бойко, С.В. Поплавский // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2007. – № 3. – С. 110–120.
7. О стохастическом перемешивании, вызванном неустойчивостью Рэлея – Тейлора / Н.А. Иногамов [и др.] // ЖЭТФ. – 2001. – Т. 119, № 4. – С. 822–852.
8. О построении дискретных вихревых моделей течений идеальной несжимаемой жидкости / А.Н. Веретенцев [и др.] // Журн. вычисл. мат. и матем. физ. – 1986. – Т. 26, № 1. – С. 103–113.
9. О развитии метода вихревых частиц применительно к описанию отрывных течений / А.Н. Веретенцев [и др.] // Журн. вычисл. мат. и матем. физ. – 1989. – Т. 29, № 6. – С. 878–887.
10. Jimenez, J. On the linear stability of the inviscid Karman vortex street / J. Jimenez // J. Fluid Mech. – 1987. – Vol. 178, № 1. – P. 177–194.
11. Дайлюденко, В.Ф. Численное моделирование аэродинамических потоков вокруг турбины на основе решения уравнений Навье – Стокса конечно-элементными методами / В.Ф. Дайлюденко // Информатика. – 2006. – № 4 (12). – С. 28–38.
12. Белоцерковский, С.М. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей / С.М. Белоцерковский, А.С. Гиневский. – М.: Физ.-мат. литература, 1995. – 368 с.

Поступила 28.07.09

Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: selforg@newman.bas-net.by

V.F. Dailyudenko

**APPLICATION OF THE STAR-CD SOFTWARE FOR MODELING
TWO-PHASE DIRECTED FLOW IN A RESTRICTED REGION
AT DIFFERENT TYPES OF PARTICLE INTERACTION**

The methods of modeling of aerodynamic processes at their appearance in two-phase directed flow with different types of mechanical interaction between its components are considered. The methods applied for modeling in the STAR-CD software are shown to provide reliable results of numerical modeling of two-phase directed flow containing solid particles and the carrier medium, including simulation in turbulent regime and considering particles interaction with vortex patterns.