

Введение Разработка новых технологий и оборудования разделения, очистки гетерогенных сред [1], перемешивания их [2], охлаждения либо нагрева тел, контактирующих с этими средами, и многих других процессов требует проведения исследований динамики многофазных сред в областях сложной формы. Результаты численного моделирования обтекания кругового цилиндра потоком газа с частицами с использованием уравнений Навье-Стокса, когда число Рейнольдса $Re=100$, число Стокса $Stk=0.01, 0.1, 1, 10, 100$, приводятся в статье [3]. При описании движения частиц учитывается уточненная сила сопротивления Стокса, силы гравитации, подъемная сила Саффмана. Влияние твердой дисперсной примеси на структуру двухфазного следа за поперечно обтекаемым круговым цилиндром ($Re=100$) рассматривается в работе [4]. При этом двумерное нестационарное течение сжимаемого газа описывается уравнениями Навье-Стокса с дополнительными источниковыми членами, моделирующими воздействие примеси. На входе в расчетную область частицы располагаются неравномерно, со сгущением к середине потока. Объемная концентрация их в натекающем потоке варьируется в диапазоне . При этом массовая концентрация изменяется в пределах . Отмечается, что, несмотря на очень малую инерционность частиц, малое значение числа Стокса (Stk), характер движения частиц примеси существенно отличается от течения несущего газа. В частности, частицы выпадают на поверхность цилиндра. Это происходит вследствие того, что частицы примеси движутся в потоке несущего газа в свободномолекулярном режиме, поэтому сила аэродинамического сопротивления, действующая на них со стороны газа, сильно отличается от силы Стокса. Установлено, что с увеличением концентрации частиц интенсивность вихревого движения в следе затухает, коэффициент сопротивления цилиндра растет, тогда как амплитуда колебаний коэффициента подъемной силы уменьшается. В работе [5] акцентируется внимание на особенностях движения частиц в вихревом следе за обтекаемым круговым цилиндром при $Re=30 \div 150$. Траектории частиц рассчитываются с использованием Лагранжева подхода. Подробно анализируется дисперсия частиц, характеризующая отклонение частиц в вертикальном направлении от среднего положения. Показывается, что дисперсия зависит от времени, числа Рейнольдса потока, числа Стокса. При малых числах Стокса частицы движутся вдоль линий тока несущей среды. С увеличением числа Стокса частицы концентрируются в сравнительно узких областях вблизи границ вихрей. Поведение частиц в следе за цилиндром зависит, главным образом, от процесса образования областей больших градиентов скоростей между смежными вихрями с противоположной циркуляцией. Результаты экспериментального и численного исследования турбулентного обтекания водной суспензией кругового цилиндра, находящегося в канале над слоем осадка, приводятся в работе [6]. Концентрация частиц в воде достигает 50%, их диаметр составляет м. Оценивается толщина слоя осадка,

изменение формы верхней поверхности этого слоя под воздействием потока суспензии. Исследование дисперсии частиц в следе за круговым цилиндром при высоких числах Рейнольдса потока с использованием метода дискретных вихрей и подхода Лагранжа для расчета траекторий частиц выполнено в [7]. Числа Стокса варьируются от 0.01 до 1000. В названных выше, других технологических процессах течение гетерогенных сред сопровождается обычно теплообменом, который, как правило, играет ключевую роль. Например, в рекуперативных и регенеративных теплообменниках, каталитических и других реакторах, при охлаждении микроэлектронных чипов, других электронных деталей и элементов, проведении замеров с использованием термоэлементов, анемометров. Имеющиеся в литературе выводы о влиянии многофазности среды на конвективный теплообмен, зачастую, противоречивы. По данным [8] наличие в несущей среде механической примеси приводит к увеличению площади контакта смеси и обтекаемого тела, как следствие, к интенсификации теплообмена. Коэффициент конвективного теплообмена может быть увеличен таким образом в 5-10 раз. Подтверждают это и результаты работы [9], из которых следует, что увеличение диаметра частиц примеси способствует усилению теплоотдачи тел, находящихся в смеси. Однако наблюдается и обратное [10]. Более предметное исследование влияния размера частиц примеси на вынужденную конвекцию при обтекании цилиндра вязкой жидкостью показало, что без учета локального теплового равновесия между несущей и дисперсной фазами при изменении отношения диаметра цилиндра к диаметру частиц от 10 до 100, числа Рейнольдса от 1 до 250, отношения коэффициентов теплопроводности материала частиц и несущей среды в пределах 0.01-1000 с увеличением радиуса частиц число Нуссельта может как увеличиваться, так и уменьшаться. В работе [11] установлено, что коэффициент конвективного теплообмена стенок канала увеличивается или уменьшается с ростом диаметра частиц в зависимости от расхода частиц, их концентрации, тепловой дисперсии, а также значения коэффициента теплопроводности материала частиц, несущей среды. Комплексное влияние наночастиц (1÷100 нм) на гидродинамику и теплообмен поперечно обтекаемого кругового цилиндра исследуется в [12]. При моделировании ламинарного течения жидкости используются уравнения Навье-Стокса с дополнительными членами, учитывающими влияние наночастиц, а также уравнение энергии. Расчеты проводятся при числах Рейнольдса 80÷180. Объемная концентрация частиц варьируется в интервале от 0 до 25%. Установлено, что с ростом концентрации частиц в потоке увеличивается коэффициент сопротивления цилиндра, число Струхала, число Нуссельта, уменьшается амплитуда подъемной силы цилиндра. Следует заметить, что большинство работ по численному моделированию обтекания тел гетерогенной смесью выполнено с использованием Лагранжева подхода [4, 12-14]. При этом объемная концентрация частиц примеси не может превышать 10%. Вместе с

тем, на практике часто встречаются более густые смеси. Поэтому для расчета движения их, теплообмена с обтекаемыми телами следует применять Эйлеров континуальный подход [6, 15 и др.]. Целью настоящей работы является оценка влияния физических свойств материала подаваемых в поток вязкой несжимаемой жидкости частиц, их размеров на гидродинамическое сопротивление и теплообмен кругового цилиндрического тела, размещенного в канале. Определяющие соотношения

Математическое описание неизоэнтальпического движения вязкой жидкости с частицами в канале с прямолинейными стенками и расположенном на его оси круговым цилиндром осуществляется с использованием Эйлера континуального подхода [15]. При этом частицы по отдельности не рассматриваются, для каждой фазы записываются уравнения сохранения массы, количества движения и энергии. Существенное преимущество этого подхода перед другими состоит в использовании однотипных балансовых соотношений, единого алгоритма интегрирования соответствующих уравнений. Принимаются следующие допущения [15]. Смесь монодисперсная, дисперсная фаза в каждом элементарном макрообъеме присутствует в виде сферических включений одинакового радиуса. Возможные дробление, слипание, деформирование частиц во внимание не принимается. Предполагается, что частицы увлекаются потоком жидкости, поэтому скорости движения несущей среды и дисперсной фазы близки. Силы тяжести, Архимеда не учитываются. При проведении расчетов основной несущей фазой является вода; характерная скорость движения смеси порядка м/с. Следовательно, числа Маха малы, сжимаемостью среды можно пренебречь. Расчетная область представляет собой прямоугольник длиной 6.0 м, шириной 0.4 м, в котором на удалении 1 м от входного сечения на равном расстоянии от боковых границ располагается обтекаемый цилиндр с радиусом $r = 0.05$ м. Данная область покрывается сеткой треугольных элементов, сгущающихся к поверхности обтекаемого тела. На поверхности тела находится 100 узлов, общее количество узлов сетки 8 тыс., треугольных элементов 16 тыс. Начало системы координат располагается в центре цилиндра, ось направляется вдоль набегающего потока. Основные уравнения. Уравнения сохранения массы записываются в виде [15]: $\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_V \rho \nabla \cdot \mathbf{u} dV = 0$; (1) где t - время, $\mathbf{u}$ - вектор скорости i -ой фазы; ρ - объемная концентрация, соответственно, несущей и дисперсной фаз (i); $\nabla \cdot \mathbf{u}$ - дивергенция вектора скорости. (2) Уравнение импульсов для i -ой фазы в отсутствие гравитационных сил имеет вид $\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{F}$. (3) Здесь p - среднее давление i -ой фазы; $\mathbf{T}$ - тензор напряжений в i -ой фазе; $\mathbf{F}$ - сдвиговая, объемная вязкость; $\mathbf{I}$ - единичный тензор; $\mathbf{F}$ - осредненная сила взаимодействия между фазами, V - контрольный объем, μ , μ_p , μ_{sp} - коэффициент сопротивления частицы; μ_{sp} - число Рейнольдса относительного движения фаз. В отсутствие соударения частиц коэффициент динамической вязкости определяется по формуле [6]: $\mu_{sp} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu}{\mu_p} + \frac{\mu_p}{\mu} \right)$, где μ - коэффициент трения, μ_p - слагаемое, обусловленное кинетической энергией частиц, $f(r)$ - радиальная функция

распределения. Объемная вязкость полагается равной нулю. Уравнение переноса тепла в несущей и дисперсной фазах имеет вид: , (4) где , - коэффициент теплообмена между несущей и дисперсной фазами, число Нуссельта рассчитывается по формуле: , (5) число Прандтля . Уравнения (1)-(4) дополняются граничными и начальными условиями. Во входном сечении, перпендикулярном оси , примем: ; операционное давление =0.1 МПа; температура несущей и дисперсной фаз одинакова: ; концентрация . На выходе из расчетной области воспользуемся следующими граничными условиями: (), ; что означает выравнивание на выходе как гидродинамических, так и тепловых, концентрационных характеристик сред. На боковых границах - стенках канала реализуются условия прилипания несущей и дисперсной фаз ; температура: , . Считается, что на поверхности обтекаемого цилиндра имеет место прилипания несущей и дисперсной фаз ; идеальный тепловой контакт: . При этом удельный тепловой поток (), где - внешняя нормаль к поверхности цилиндра, - температура -ой фазы на удалении от цилиндра (среднемассовая температура), - искомый локальный коэффициент конвективного теплообмена. В начальный момент времени среда мгновенно начинает двигаться, , , , . Интегрирование соответствующих уравнений (1)-(4) производится с помощью программного комплекса. Выбирается неявный решатель второго порядка точности, используется процедура коррекции давления SIMPLE. Критерий сходимости по всем параметрам принимается равным , максимальное количество итераций на каждом временном шаге 40. Шаг по времени выбирается таким образом, что при изменении времени в пределах этого шага малый объем жидкости смещается на одну ячейку сетки. Входные параметры При проведении вычислительных экспериментов число Рейнольдса потока принимает значения 1, 10, 40, 100, 250. В результате движение среды является ламинарным, корректна плоская постановка задачи. Из этих данных находится скорость несущей среды и частиц на входе в расчетную область. Во входном сечении фиксируется объемная концентрация частиц , температура жидкости и частиц =300K. На боковых стенках канала поддерживается постоянная температура , постоянна и температура поверхности обтекаемого цилиндра =350K. Для данного диапазона изменения температур полагается, что плотность , коэффициент динамической вязкости , удельная теплоёмкость несущей среды - воды зависят от температуры линейно (см. табл. 1), а коэффициент теплопроводности =0.6 Вт/(м·K). Средние значения теплофизических характеристик материала, диаметр вбрасываемых частиц в ходе эксперимента варьируются. Таблица 1 -

Температура, K	Плотность, кг/м³	Вязкость, кг/(м·с)	Теплоёмкость, Дж/(кг·K)	Теплопроводность, Вт/(м·K)
300	996.59	0.000852	4164	325
987.09	0.000529	4127	350	973.46
0.000369	4082			

Результаты расчетов Предварительно с использованием результатов решения модельной задачи изотермического обтекания кругового цилиндра однородным потоком вязкой жидкости выбирается среди сгущающихся около поверхности цилиндра

сеток такая, на которой рассчитываемые параметры: коэффициент сопротивления цилиндра, число Струхала удовлетворительно согласуются с данными других авторов [16-18]. На первом этапе вычислительных экспериментов варьируется только плотность материала частиц при фиксированных $\rho_p = 4164 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\mu = 0.6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, диаметре частиц m и скорости набегающего потока u м/с. Изменение продольных составляющих действующих на цилиндр сил трения, давления, силы сопротивления в зависимости от показывается на рис. 1. Из приведенных данных следует, что на графиках кривых, и можно выделить три характерных участка. На первом и третьем участках, когда 1000 1500, 2000 3000 соответственно, данные функции близки к линейным, причем на третьем участке прямые более пологие. Второй участок (1500 2000) является переходным. Из результатов расчетов также следует, что при увеличении плотности материала частиц примеси, когда плотность частиц больше плотности несущей среды, при неизменных прочих параметрах коэффициент теплоотдачи цилиндра возрастает. Например, если $\rho_p = 1000$, то коэффициент $\alpha = 23$; $\rho_p = 3000$ - $\alpha = 30$. Интенсификация теплообмена, по нашему мнению, происходит потому, что частицы с большей массой в большем количестве достигают поверхности цилиндра, возмущая близлежащие слои среды, «турбулизируя» их. Рис. 1 - Зависимость продольной составляющей силы сопротивления трения (пунктирная линия), давления (штрих-пунктирная линия) и (сплошная линия) Обнаруженную закономерность подтверждают эксперименты, в которых скорость среды на входе в расчетную область меняется в названном интервале. Причем с ростом скорости среды влияние плотности материала частиц на теплоотдачу цилиндра увеличивается нелинейно (рис. 2). Рис. 2 - Коэффициент теплоотдачи цилиндра: плотность материала частиц $\rho_p = 160 \text{ кг}/\text{м}^3$ (нижняя кривая), $\rho_p = 8030 \text{ кг}/\text{м}^3$ (верхняя кривая) Изменение коэффициента теплоотдачи цилиндра в случае, когда изменяется скорость среды на входе в расчетную область и характеристики материала частиц в соответствии с табл. 2 [8], иллюстрирует рис. 3. При этом диаметр частиц остается постоянным, равным m . Таблица 2 - Теплофизические характеристики материала частиц

Материал	Муассанит	Сталь	Дерево
$\rho_p, \text{кг}/\text{м}^3$	8030	160	3.21
$\mu, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	298	502.48	1200
$\alpha, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	420	16.27	0.055

Рис. 3 - Коэффициент теплоотдачи цилиндра: 1 - муассанит; 2 - сталь; 3 - однородная среда (вода); 4 - дерево Установлено, что для названных материалов доминирующее влияние на теплообмен оказывает величина коэффициента теплопроводности: с ростом коэффициент теплоотдачи увеличивается тем сильнее, чем больше скорость набегающего потока. Последнее ожидаемо, поскольку в целом интенсивность конвективного теплообмена обтекаемых жидкостью тел возрастает с увеличением числа Рейнольдса. Следует заметить, что изменение удельной теплоёмкости материала частиц в пределах $300 \div 1200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ не оказывает заметного влияния на теплоотдачу цилиндра и его

сопротивление; рассчитанные значения коэффициента теплоотдачи цилиндра с учетом теплового взаимодействия фаз по формуле (5) несколько выше, чем без его учета. Что касается влияния размера частиц примеси на теплоотдачу цилиндра, обтекаемого многофазной средой, показано, что при неизменной объемной концентрации частиц на входе в расчетную область с увеличением диаметра частиц в случае, когда коэффициент теплопроводности материала частиц больше, чем коэффициент теплопроводности несущей среды ($=420.0 \text{ Вт/(м·К)}$), теплообмен ухудшается (рис. 4). Этот эффект проявляется тем заметнее, чем больше скорость среды на входе в канал. Рис. 4 - Коэффициент теплоотдачи цилиндра при обтекании потоком жидкости с частицами: м - сплошная линия; м - пунктирная линия. Таким образом, в подтверждение результатов работы [11], влияние размера частиц на теплоотдачу цилиндра зависит от теплопроводности материала частиц, а также, как нам представляется, от объемной концентрации частиц вблизи поверхности обтекаемого тела. Концентрация же частиц для тел заданной формы определяется, в первую очередь, плотностью материала частиц, их размерами, скоростью набегающего потока. Если плотность материала частиц больше плотности несущей среды, крупные частицы, как более инерционные, с большей вероятностью, чем мелкие частицы, достигнут поверхности обтекаемого тела. Следовательно, можно ожидать, что с увеличением диаметра частиц средняя объемная концентрация их вблизи поверхности обтекаемого тела будет увеличиваться. При плотности материала частиц меньше или равной плотности несущей среды частицы, обладая сравнительно малой инерционностью, будут двигаться, в основном, непосредственно с потоком несущей среды. Поэтому объемная концентрация их вблизи поверхности обтекаемого тела будет близка к объемной концентрации частиц в набегающем потоке, особенно частиц малых размеров. Действительно, из результатов расчетов следует, что при плотности материала частиц $=3.21 \text{ кг/м}^3$, существенно меньшей плотности воды, при диаметре частиц m и скорости набегающего потока m/c средняя объемная концентрация частиц на поверхности цилиндра ; при m . Следовательно, определяя эффективный коэффициент теплопроводности смеси по формуле [19] , убеждаемся, что вблизи поверхности обтекаемого цилиндра при увеличении размера частиц примеси коэффициент уменьшается, а значит будет уменьшаться коэффициент теплоотдачи цилиндра, что и наблюдается. Если бы в этой же ситуации коэффициент теплопроводности материала частиц был бы сравним, либо меньше коэффициента теплопроводности несущей среды, при увеличении размера частиц теплообмен, наоборот, улучшался бы. Заключение Из полученных результатов следует, что в отсутствие гравитационных сил при ламинарном неизотермическом обтекании кругового цилиндра дисперсной смесью частицы примеси могут заметно влиять на гидродинамические характеристики, как уменьшать, так и увеличивать теплоотдачу тела. При

уменьшении плотности, теплопроводности материала частиц неизменных размеров коэффициент теплоотдачи цилиндра уменьшается и, наоборот, при увеличении этих параметров теплообмен улучшается. Влияние размера частиц на теплообмен обтекаемого цилиндра со средой также во многом зависит от плотности и теплопроводности материала частиц. Если плотность материала частиц меньше или равна плотности несущей среды, а теплопроводность больше, то при увеличении диаметра частиц теплообмен ухудшается. Когда теплопроводность материала частиц меньше теплопроводности несущей среды, с увеличением размера частиц теплообмен улучшается. Если частицы «тяжелые», плотность их материала больше плотности несущей среды, то увеличение размера частиц при хорошей теплопроводности материала теплообмен улучшает, а при плохой - ухудшает. Таким образом, при фиксированной концентрации частиц примеси на входе в расчетную область для интенсификации теплообмена обтекаемого дисперсной смесью цилиндра за счет увеличения размера частиц примеси необходимо, чтобы материал примеси был бы «легким», с плохой теплопроводностью, что характерно для теплоизоляционных материалов; либо «тяжелым» и хорошо проводящим тепло, таким, например, как материалы металлов. Необходимо также иметь в виду, что при одинаковых размерах частиц в первом случае гидродинамическое сопротивление обтекаемого цилиндра будет меньше, чем во втором.