

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДОЗВУКОВОГО ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА С ЧАСТИЧНО ПРОНИЦАЕМЫМ ТЕЛОМ

Игорь Александрович ЛЕПЕШИНСКИЙ родился в 1937 г. в городе Ленинграде. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области газодинамики двухфазных сред. Автор более 150 научных работ.

Igor A. LEPESHINSKY, D.Sci., was born in 1937, in Leningrad. He is a Professor at the MAI. His research interests are in gas dynamics of two-phase mediums. He has published over 150 technical papers.

Юрий Владимирович ЗУЕВ родился в 1951 г. в городе Нахабино Московской области. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области газодинамики двухфазных сред. Автор более 150 научных работ.

Yury V. ZUYEV, D.Sci., was born in 1951, in the Moscow Region. He is a Professor at the MAI. His research interests are in gas dynamics of two-phase mediums. He has published over 150 technical papers.

Петр Борисович ЦАРЕНКО родился в 1979 г. в городе Москве. Инженер МАИ. Основные научные интересы — в области газодинамики двухфазных сред. Автор двух научных работ.

Peter B. TSARENKO, was born in 1979, in Moscow. He is an Engineer at the MAI. His research interests are in gas dynamics of two-phase mediums. He has published two technical papers.

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования взаимодействия высококонцентрированного двухфазного потока с частично проницаемым телом. Сформулирована новая физическая модель течения и определены коэффициенты, характеризующие диссипацию энергии и долю газа, увлекаемого частицами в частично проницаемое тело. Сформулированы рекомендации по работе газодинамического зонда.

Обозначения

d — диаметр капли
 e — удельная энергия
 p — давление
 K — коэффициент диссипации энергии
 t — время
 T — температура
 U — абсолютная скорость
 W — скорость каждой фазы
 R — газовая постоянная; радиус шара
 G — массовый секундный расход
 Q — интенсивность передачи тепла; объемный секундный расход фазы
 f — площадь поперечного сечения
 F — сила сопротивления
 c_p — теплоемкость
 C_x — коэффициент аэродинамического сопротивления
 Nu — число Нусельдта

P_r — число Прандтля
 Re — число Рейнольдса
 We — число Вебера
 α — объемная концентрация частиц
 δ — доля газа, попавшая в частично проницаемое тело (газодинамический зонд)
 λ — коэффициент теплопроводности
 σ — коэффициент поверхностного натяжения
 ρ — плотность
 μ — коэффициент динамической вязкости
 g — газ
 p — частицы
 x — осевая составляющая
 r — радиальная составляющая

В настоящее время имеется ряд задач, связанных с обтеканием двухфазным газокапельным потоком тел с различной проницаемостью. Это, например, обтекание устройств формирования пото-

ка, течение в эжекторных устройствах и в струйных компрессорах с двухфазным рабочим телом, задачи, связанные с натеканием двухфазных струй на препятствие при тушении пожара, обработка поверхностей двухфазным потоком, работа зондовых устройств для измерения параметров двухфазного высококонцентрированного потока. Хорошей моделью частично проницаемого тела может служить, например, цилиндрическая трубка с одним открытым концом, обращенным к набегающему двухфазному потоку, на втором конце которой установлен дроссель. Изменяя положение дросселя, можно изменять проницаемость тела, обтекаемого двухфазным потоком. Следует отметить, что обтекание тел с различной проницаемостью может существенно отличаться от обтекания непроницаемых тел, с точки зрения как физических процессов, так и получаемых результатов. Работы, связанные с обтеканием тел различной проницаемости двухфазным потоком, практически отсутствуют.

Задача настоящей работы состоит в исследовании взаимодействия двухфазного высококонцентрированного потока с частично проницаемым телом.

В данной работе рассматривается осесимметричный высококонцентрированный дозвуковой двухфазный газок капельный поток, обтекающий модельное осесимметричное тело на режимах его различной проницаемости. Предполагается, что испарение, конденсация, дробление, коагуляция капель отсутствуют, а дисперсная фаза (капли) монодисперсная. В качестве процессов межфазного взаимодействия учитываются неравновесные теплообмен и силовое взаимодействие фаз со скольжением, стесненность потока и деформация капель.

Для выяснения физической модели течения внутри частично проницаемого тела были проведены предварительные теоретические расчеты расстояния, пройденного каплей в жидкости, находящейся внутри обтекаемого тела. При этом предполагалось, что жидкость неподвижна, капля не изменяет свою форму и размер, а дроссель, установленный на правом конце, закрыт. Очевидно, что частицы конденсированной фазы (капли) инерционны и, попадая в среду частично проницаемого тела (это либо жидкость, либо двухфазная смесь), тормозятся не сразу. В расчетах учитывалась только сила сопротивления. Оценка порядка расстояния, проходимого частицей до ее полного торможения при неизменном диаметре самой частицы, показала, что это расстояние может составлять от сотен калибров диаметра частицы до десятков калибров диаметра канала. На рис. 1. показана зависимость пути x , проходимого каплей до ее полного торможения, от начальной скорости капли W . Это означает, что капли проникают внутрь частично проницаемого тела и, следовательно, должны вытекать из него. Взаимодействие конденсированной фазы капель и газовой фазы может происходить на расстояниях, позволяющих каплям увлекать некоторое количество газовой фазы с собой внутрь частично проницаемого тела. Следовательно, внутри частично проницаемого тела существует циркуляционное течение двухфазного потока, причем его структура газок капельная или пузырьковая, и параметры будут определяться долей газа, увлекаемого каплями.

Ниже представлены формулы, по которым проводился качественный расчет: при расчете предполагалось, что плотность частиц постоянна и равна

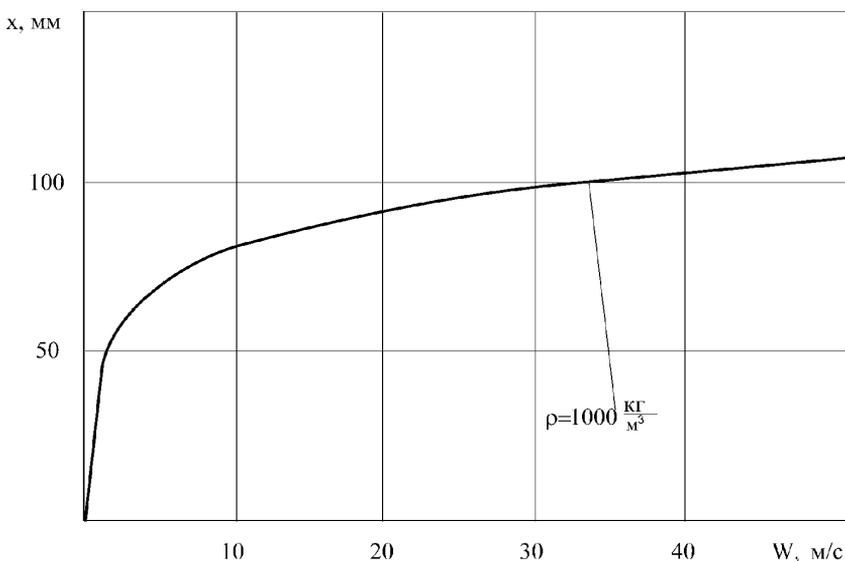


Рис. 1. Зависимость расстояния, пройденного частицей до полной ее остановки, от начальной скорости при входе в частично проницаемое тело

1000 кг/м³, диаметр частиц не изменялся и был равен 50 мкм:

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho \frac{dW}{dt} = \frac{\pi d^2}{4} C_X \frac{\rho W^2}{2};$$

$$\frac{d}{3} \frac{dW}{dx} = C_X \frac{W}{4};$$

$$C_X = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0,4;$$

$$\text{Re} = \frac{\rho W d}{\mu};$$

$$x = \int_{W_{\text{probe}}}^0 \left(\frac{4}{3} \frac{d}{C_X W^2} \right) dW = d \frac{4}{3} \int_{W_{\text{probe}}}^0 \frac{dW}{C_X W^2},$$

где W_{probe} — скорость на входе в частично пронизываемое тело.

Для теоретической проверки сформулированной выше физической модели были проведены расчеты взаимодействия двухфазного высококонцентрированного потока с модельным частично пронизываемым телом. Использовалась модифицированная двумерная модель течения двухфазного газокапельного потока, уравнения которой записаны в цилиндрических координатах [3]:

$$\frac{\partial \rho_g (1-\alpha) r}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g (1-\alpha) W_{g,x} r}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g (1-\alpha) W_{g,r} r}{\partial r} = 0;$$

$$\frac{\partial \rho_p \alpha r}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p \alpha W_{p,x} r}{\partial x} + \frac{\partial \rho_p \alpha W_{p,r} r}{\partial r} = 0;$$

$$\frac{\partial [(1-\alpha) \rho_g] W_{g,x} r}{\partial t} + \frac{\partial W_{g,x} W_{g,r} \rho_g (1-\alpha)}{\partial r} +$$

$$+ \frac{\partial [p(1-\alpha) + \rho_g (1-\alpha) W_{g,x}^2] r}{\partial x} = -\alpha \rho_p F_x;$$

$$\frac{\partial [\alpha \rho_p] W_{p,x} r}{\partial t} + \frac{\partial W_{p,x} W_{p,r} \rho_p \alpha}{\partial r} +$$

$$+ \frac{\partial [\alpha p + \alpha \rho_p W_{p,x}^2] r}{\partial x} = \alpha \rho_p F_x;$$

$$\frac{\partial [(1-\alpha) \rho_g] W_{g,r} r}{\partial t} + \frac{\partial W_{g,x} W_{g,r} \rho_g (1-\alpha)}{\partial x} +$$

$$+ \frac{\partial [p(1-\alpha) + \rho_g (1-\alpha) W_{g,r}^2] r}{\partial r} = -\alpha \rho_p F_r;$$

$$\frac{\partial [\alpha \rho_p] W_{p,r} r}{\partial t} + \frac{\partial W_{p,x} W_{p,r} \rho_p \alpha}{\partial x} + \frac{\partial [\alpha p + \alpha \rho_p W_{p,r}^2] r}{\partial r} =$$

$$= \alpha \rho_p F_r;$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_g (1-\alpha) U d_p}{\mu};$$

$$F_x = \left| \frac{3 \rho_g \alpha U (C_X \delta f_{We})}{4 \rho_p d_p} \right| \cdot |W_{g,x} - W_{p,x}|;$$

$$F_r = \left| \frac{3 \rho_g \alpha U (C_X \delta f_{We})}{4 \rho_p d_p} \right| \cdot |W_{g,r} - W_{p,r}|;$$

$$U = \sqrt{(W_{g,x} - W_{p,x})^2 + (W_{g,r} - W_{p,r})^2};$$

$$f_{We} = e^{0,03 We^{1,5}};$$

$$We = \frac{\rho_g U^2 d_p}{\sigma};$$

$$\frac{\partial e_g \rho_g (1-\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial [e_g \rho_g (1-\alpha) + p(1-\alpha)] W_{g,x} r}{\partial x} +$$

$$+ \frac{\partial [e_g \rho_g (1-\alpha) + p(1-\alpha)] W_{g,r} r}{\partial r} =$$

$$= \alpha \rho_p (W_{p,x} F_x + W_{p,r} F_r) + \alpha \rho_p Q;$$

$$e_g = T_p c_p + \frac{W_{g,x}^2 + W_{g,r}^2}{2};$$

$$e_p = \frac{p}{\rho_p} + \frac{W_{p,x}^2 + W_{p,r}^2}{2};$$

$$Q = \frac{6 \text{Nu} \lambda (T_g - T_p)}{\rho_p d_p^2};$$

$$\text{Nu} = 2 + 0,459 \text{Re}^{0,55} \text{Pr}^{0,33};$$

$$p = RT_g \rho_g (1-\alpha);$$

$$G_g = (1-\alpha) \rho_g W_{g,x} f;$$

$$C_x = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4,4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0,32;$$

$$G_p = \alpha \rho_p W_{p,x} f.$$

Эта модель использовалась при расчете газодождевого потока. Для расчета пузырькового течения дополнительно использовалось условие равенства скоростей и температур фаз, т.е. условия равновесного течения.

Начальные и граничные условия формулировались следующим образом. Расчетная область представлена на рис. 2. Светлая часть рисунка — область течения потока, темная часть рисунка — обтекаемое тело газодинамический зонд в виде цилиндрического канала, проницаемость которого можно менять с помощью дросселя на выходе из канала (на рисунке не показан).

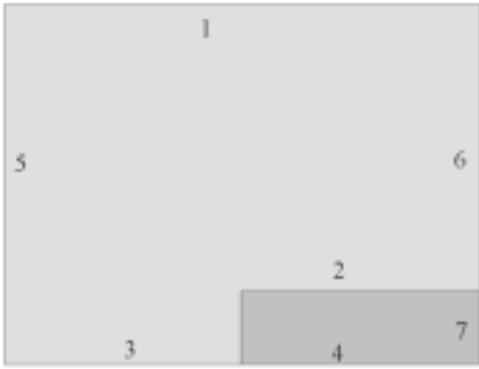


Рис. 2. Расчетная область

Граничные условия ставятся с помощью рядов фиксированных ячеек. В данном случае граничные условия задавались следующим образом:

Область (1); граничные условия: условия непротекания, внешняя граница области.

Область (2); граничные условия: условия непротекания как снаружи зонда, так и внутри него (стенка зонда).

Область (3); граничные условия: условие непротекания, ось канала.

Область (4); граничные условия: условие непротекания, ось канала и зонда.

Область (5); начальные условия: задаются параметры, такие, как: скорость радиальная и осевая для газа, скорость радиальная и осевая для частиц, температура газа и частиц, давление, диаметр частиц, весовая концентрация, плотность газа и частиц, газовая постоянная, показатель изоэнтропы, коэффициент учета деформации капли, коэффициент учета влияния стесненности соседних частиц, коэффициент увеличения временного шага, габаритные размеры канала и зонда.

Область (6); граничные условия: заданное давление на выходе, выходное сечение канала. На свободной границе ставилось условие противодавления, кроме того, для проверки влияния граничного условия на изменение параметров потока в канале для некоторых расчетных режимов проводилась экстраполяция нулевого порядка (снос параметров), для этого к расчетной сетке дополнительно добавлялась расчетная область размером в девять ячеек.

Область (7); граничные условия: задается проницаемость внутренней стенки частично проницаемого тела.

При задании параметров набегающего потока принималось следующее допущение: набегающий поток равномерно распределен по радиусу. Значения параметров следующие: вертикальная составляющая скорости газа и частиц равна 0 м/с, горизонтальная составляющая скорости газа и частиц 50 м/с, давление 1,005 атм, диаметр капель 50 мкм.

На рис. 3—7 представлены результаты данного варианта теоретического расчета по математической

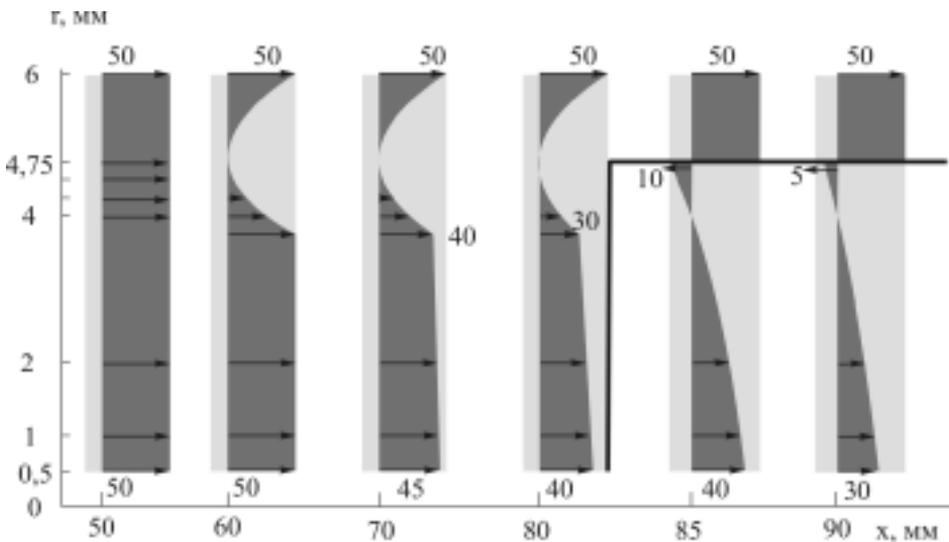


Рис. 3. Распределения осевой скорости газа по длине канала и по радиусу (после 80 мм — осевая скорость газа внутри частично проницаемого тела)

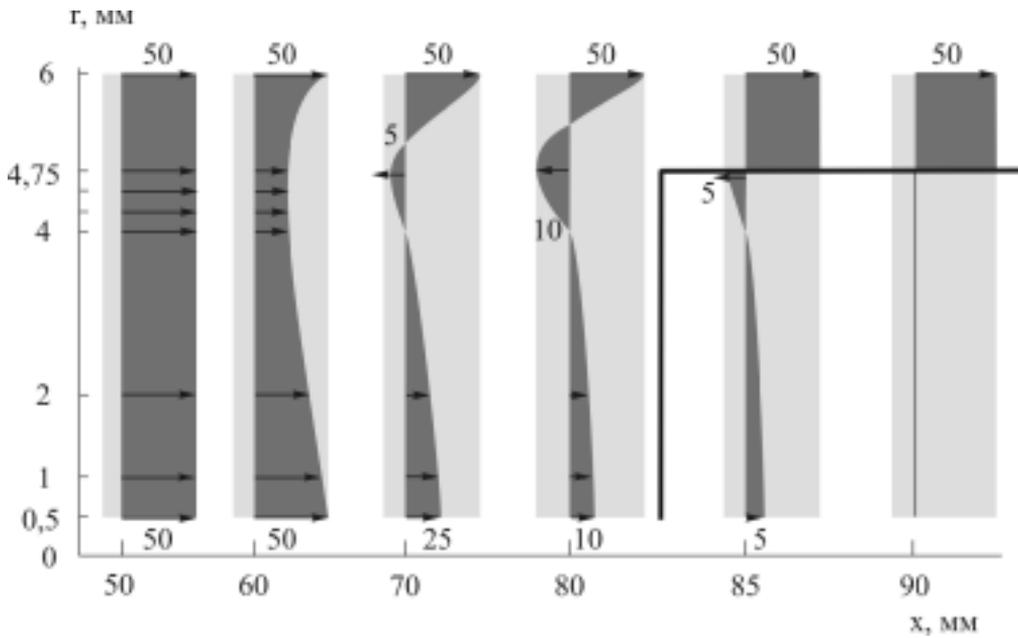


Рис. 4. Распределения осевой скорости частиц по длине канала и по радиусу (после 80 мм — осевая скорость частиц внутри частично проникаемого тела)

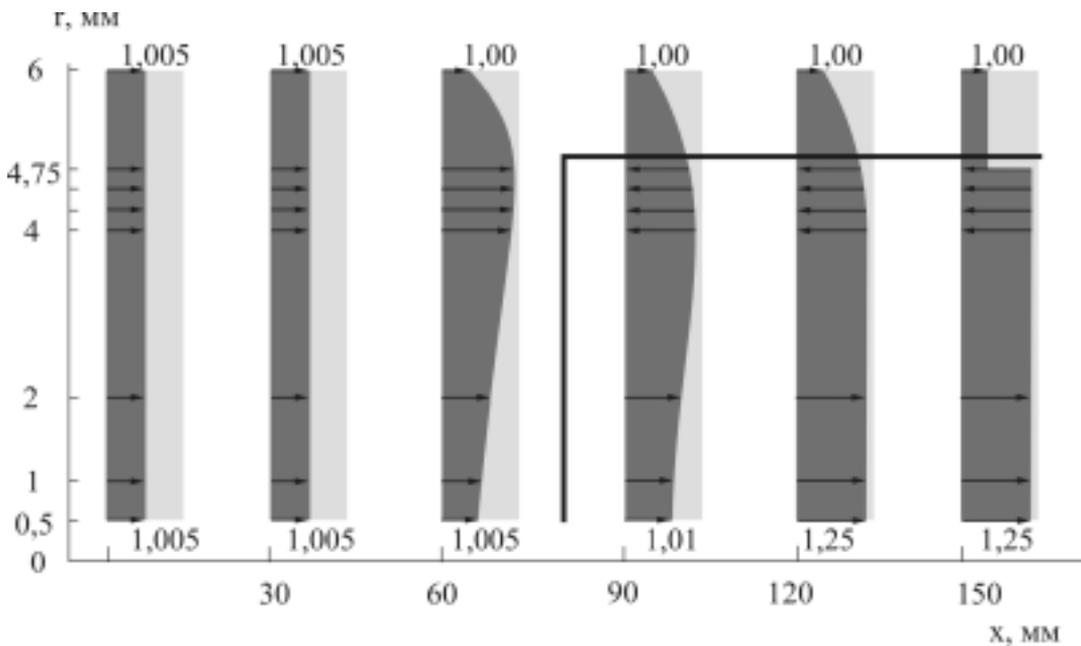


Рис. 5. Распределения давления по длине канала и по радиусу (после 80 мм — давление внутри частично проникаемого тела)

модели, учитывающей структуру двухфазного потока (газокапельная или пузырьковая) внутри зонда, определяемую на основе объемной концентрации перед зондом.

На рис. 3 изображено распределение осевой скорости газа. Видно постепенное уменьшение осевой скорости газа, при этом ближе к стенке зонда осевая скорость газа увеличивается, но в противоположном направлении. Следовательно, внутри газодинамического зонда образуется циркуляционное течение.

На рис. 4 видно, что поля осевой скорости частиц также имеют циркуляционный характер течения внутри зонда.

На рис. 6 представлены поля объемной концентрации жидкой фазы. Видно постепенное увеличение концентрации до критического значения, равного 0,5, где поток меняет свою структуру. Следовательно, внутри зонда происходит изменение структуры потока с газокапельной на пузырьковую.

На рис. 5 представлено изменение давления, соответствующее профилям скорости. Из распре-

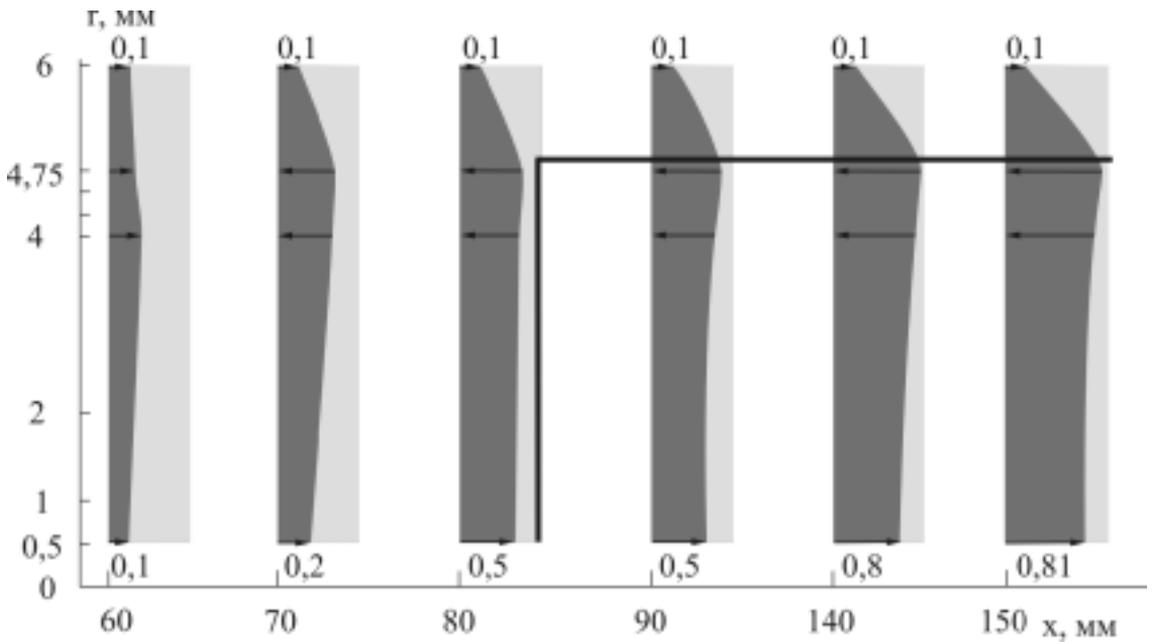


Рис. 6. Распределение объемной концентрации по длине канала и по радиусу

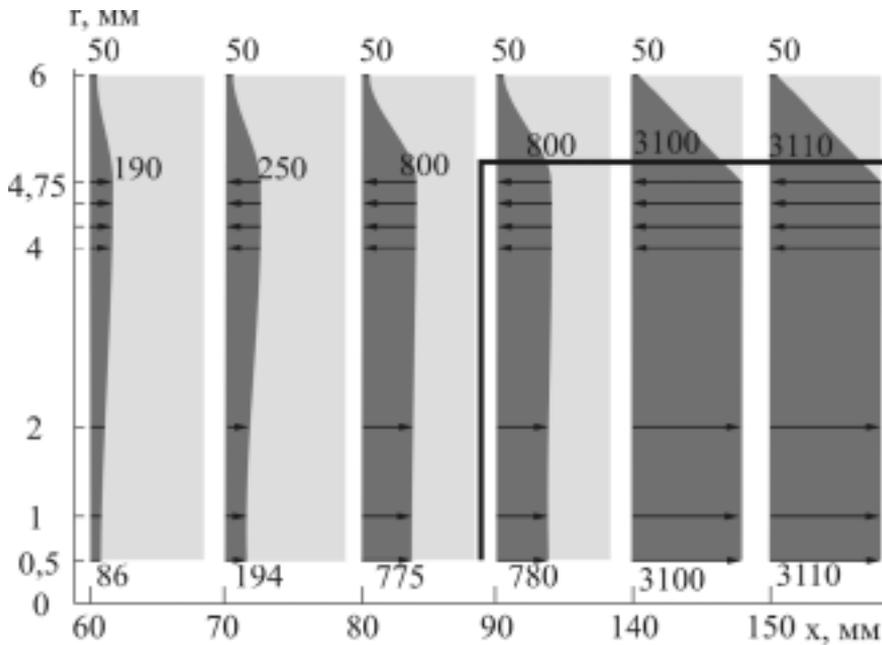


Рис. 7. Распределение весовой концентрации по длине канала и по радиусу (после 80 мм — объемная концентрация внутри частично проникаемого тела)

ления видно, что статическое давление на входе меньше давления торможения, т.е. измерение давления торможения вблизи входа в зонд будет приводить к ошибке, поэтому необходимо проводить замер полного давления на определенном расстоянии внутри газодинамического зонда.

Доля газа, попавшего в газодинамический зонд, представляет собой отношение исходного массового секундного расхода газа к массовому секунднему расходу газа внутри газодинамического зонда, и в данном варианте расчета составляет

$$\delta = \frac{G_g^{(0)}}{G_g^{(150)}} = \frac{50}{3110} \approx 0,016.$$

На рис. 8 сплошной линией представлена зависимость доли газа δ , попавшего в частично проникаемое тело, от сформулированного критерия подобия, состоящего из числа Рейнольдса и объемной концентрации.

С учетом полученных результатов рассматривалась работа газодинамического зонда для измере-

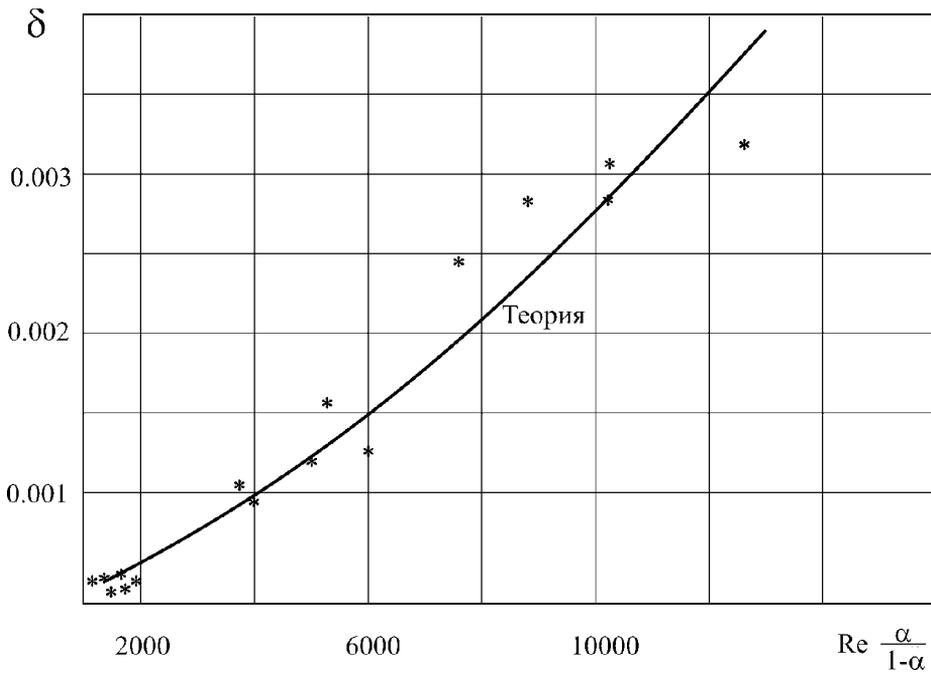


Рис. 8. Зависимость доли газа, попавшего в частично проницаемое тело, от критериев подобия

ния параметров двухфазного высококонцентрированного потока [1, 5, 7, 8].

Зонд представляет собой насадку, выполненный по типу насадка полного давления для газа. Режимы измерений изокINETического отбора пробы и измерения импульса (определение полного давления) обеспечивают получение в процессе замера значений таких параметров, как удельные расходы и скорости газа и капель, диаметр капель.

На режиме изокINETического отбора пробы в отсасывающей магистрали создаются такие условия, при которых статическое давление в насадке равно давлению в измеряемой точке потока. В этом случае линии тока не деформируются. Отобранную пробу далее разделяют на фазы, расходы которых измеряют каким-либо способом. Зная расход жидкости и газа, можно определить концентрацию конденсированной фазы. В том случае, когда не удастся реализовать изокINETический отбор пробы, необходимо корректировать результаты измерений расходов, в частности расхода газовой фазы.

Измерение давления торможения производится следующим образом: при закрытом дросселе на входе в зонд измеряется статическое давление, которое приравнивается давлению торможения. При этом предполагается, что рабочее тело не движется внутри зонда. Так как в ходе изучения течения было показано, что рабочее тело внутри зонда движется и торможение реализуется на значительном расстоянии от входа в зонд, необходимо проводить отбор давления торможения там, где рабочее тело полностью затормозилось.

Давление торможения подсчитывается по формуле [4]

$$p^* = p + \frac{\rho_g W_g^2 (1 - \alpha)}{2} + K \frac{\rho_p W_p^2 \alpha}{2},$$

состоящей из статического давления, скоростного напора каждой фазы и коэффициента диссипации энергии K .

В результате торможения потока при обтекании включается механизм неравновесного взаимодействия, приводящий к диссипации энергии и потерям давления торможения. Эти потери учитываются коэффициентом диссипации K . При использовании зондового метода разные авторы используют значение K , лежащее в диапазоне 1–2 [1, 4, 5, 7]. На основе проведенных расчетов была определена теоретическая зависимость коэффициента K от критерия подобия, состоящего из числа Рейнольдса и объемной концентрации, показанная на рис. 9.

На рис. 9 представлены экспериментальные данные по коэффициенту диссипации энергии, полученные при исследовании парогазового [6] и газокапельного потока.

Выводы

Разработана модель взаимодействия двухфазного высококонцентрированного потока с частично проницаемым телом. Достоверность модели подтверждается экспериментальными данными авторов статьи и других исследователей. Полученные результаты позволяют повысить точность измерений параметров двухфазных потоков зондовым

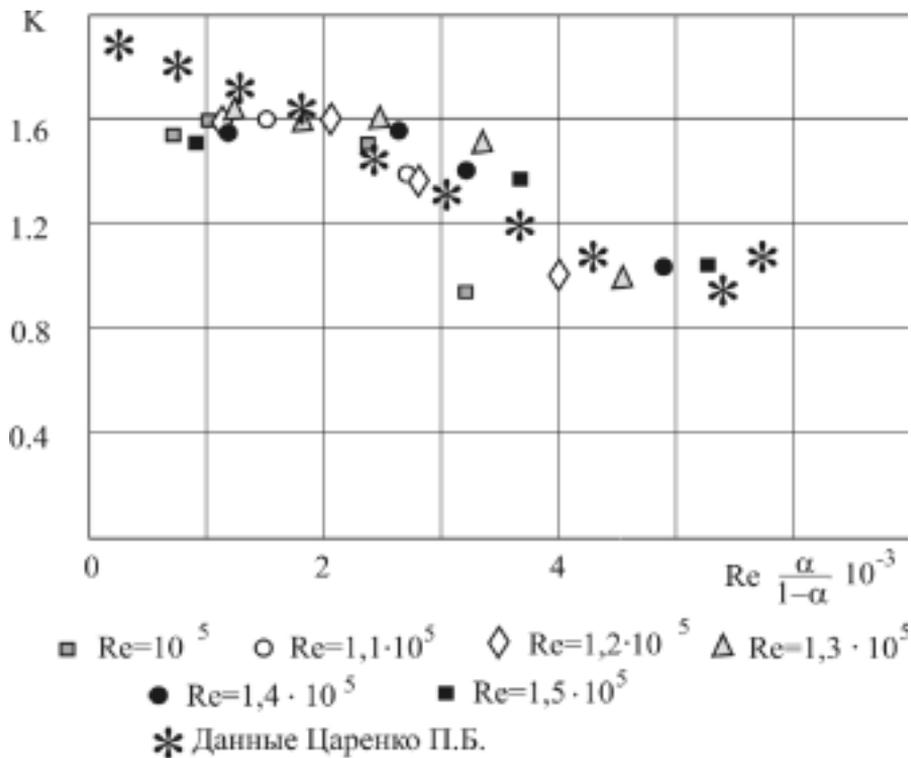


Рис. 9. Зависимость коэффициента диссипации энергии от критерия подобия

методом и использовать этот метод на режимах неизокинетического отбора.

Summary

Results of theoretical and experimental investigations are considered to analyze an interaction between subsonic high-concentrated two-phase flow and partially permeable body. A new physical model is formulated for this problem. Values of the model coefficients are determined, which characterize energy dissipation as well as a percentage of gas entrained with particles into partially permeable body. Recommendations are suggested about gas-dynamic probe operations.

Библиографический список:

1. Лепешинский И.А., Воронецкий А.В., Зуев Ю.В. и др. Методы экспериментальных исследований газокапельных струй с высокой массовой концентрацией жидкости в газе // Труды 3-й международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Истра-Москва, 3-7 июля 2000 г. М.: МГИУ, 2000. С. 229-230.
2. Моллесон Г.В., Стасенко А. Л. Газотермодинамика двухфазной струи, натекающей на нормальную преграду // Ученые записки ЦАГИ. Т. XXI. № 5, 1990. С. 51-58.
3. Стернин Л.Е., Маслов Б.М., Шрайбер А.Я. Двухфазные и полидисперсные течения газа с частицами. — М.: Машиностроение, 1980.

4. Петухов И.И., Фролов С.Д. Об измерении локальных параметров пузырькового газожидкостного потока трубчатыми зондами // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Вып. 3. Харьков: ХАИ, 1980. С. 121-126.

5. Бажанов В.И., Зуев Ю.В., Лепешинский И.А. Измерение локальных параметров двухфазного потока зондовым методом // Турбулентные двухфазные течения. Таллин: АН ЭССР, 1979. С. 202-208.

6. Левин А.А., Кузнецов В.И. О взаимодействии зонда типа трубки Пито с высоковлажным двухфазным потоком // Теплофизика высоких температур. Т. XVII. М., 1979. С. 12-91.

7. Бажанов В.И., Зуев Ю.В., Лепешинский И.А. Зондовый метод измерения параметров фаз двухфазного двухкомпонентного потока // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Вып. 1. Харьков, 1978. С. 123-128.

8. Васильев Ю.В., Гальбек А.А., Китанин Э.Л. Применение трубчатых зондов при исследовании гидродинамики газожидкостных потоков // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Вып. 1. Харьков: ХАИ, 1978. С. 117-123.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 1.04. 2008