

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ «ГАЗ–ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ» ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА: ЭФФЕКТ ВДУВА

Т.Ф.Иванов, М.В.Протасов, А.Ю.Вараксин

*Объединенный институт высоких температур РАН,  
Москва, 125412, Ижорская ул., 13/19*

### Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования характеристик гетерогенного течения в окрестности критической точки обтекаемого тела. Была продемонстрирована возможность эффективной защиты поверхности от негативного воздействия дисперсной фазы при помощи вдува. Влияние характеристик течения на структуру потока «газ – твердые частицы» было исследовано с использованием ЛДА и фотокамеры.

### THE STRUCTURE OF GAS-SOLID FLOW PAST BODY: EFFECT OF BLOWING

The results of experimental investigation of the characteristics of gas-solid flow in the vicinity of the body critical point have been presented. The possibility of the body defense from particle-body interaction by means of air blowing through its surface was shown. The structure of the gas-solid flow in dependence on flow parameters (particles inertia, main air flow and blowing air intensity etc.) has been studied by LDA and photographic technique.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматривается обтекание тел потоками «газ–твердые частицы». Проблема возникла в результате изучения движения летательных аппаратов в запыленной атмосфере, поведения двухфазных теплоносителей в трактах энергетических установок и т.д. Присутствие твердых частиц может приводить с одной стороны к существенному росту тепловых потоков, с другой – к эрозионному разрушению обтекаемой поверхности [1–3]. Упомянутые эффекты могут оказывать существенное влияние на структуру гетерогенного течения, как в области критической точки, так и в пограничном слое, формирующемся вдоль поверхностей обтекаемых тел, благодаря большому количеству разнообразных факторов, таких как взаимодействие частиц со стенкой, наличие шероховатости материала [4] и т.д. Интенсивность процессов, характеризующих поведение гетерогенного течения в окрестности обтекаемых тел, зависит от инерционности и концентрации частиц. Необходимо понимать, что инерционность частиц напрямую связана с геометрией области течения и параметрами потока, и может изменяться в широком диапазоне значений для одних и тех же частиц. Наличие различных временных масштабов несущей фазы (в окрестности критической точки тела и вдоль его оси, масштабов турбулентности и т.д.) существенно осложняет изучение таких течений и систематизацию результатов. Что касается концентрации дисперсной фазы в окрестности обтекаемой поверхности, то она может изменяться в несколько раз по сравнению с начальным значением, вследствие осаждения частиц на поверхность, взаимодействия частиц со стенкой и межчастичных столкновениях. В данной работе была исследована возможность защиты обтекаемого тела от воздействия инерционных твердых частиц путем организации вдува с его поверхности.

## 2. ОБЗОР

Одним из первых исследований траекторий частиц в условиях потенциального обтекания сферы гетерогенным потоком является работа [5]. Благодаря тому, что скорости газовой и дисперсной фаз были приняты равными, течение вдали от тела можно было охарактеризовать как квазиравновесное. Вблизи поверхности тела, вследствие инерционности дисперсной фазы, появлялась разница скоростей дисперсной и несущей фаз, что приводило к потере устойчивости и течение становилось неравновесным. При расчетах полагалось, что сила аэродинамического сопротивления частицы подчиняется закону Стокса. Рассматривался случай малой концентрации дисперсной фазы, что позволяло не учитывать обратного влияния частиц на газовую фазу. Взаимодействия частиц со стенкой тела не происходило, т.к. было принято допущение поглощения дисперсной фазы на обтекаемой поверхности. Траектории движения частиц получались в результате численного расчета. Были получены значения коэффициентов осаждения дисперсной фазы на поверхность тела в зависимости от чисел Стокса в осредненном движении ( $\eta=0.035$ ,  $\eta=0.35$  и  $\eta=0.82$  для чисел Стокса  $Stk_f=0.2$ ,  $Stk_f=0.7$  и  $Stk_f=5$ , соответственно).

Коэффициент осаждения частиц  $\eta$  является важной интегральной характеристикой гетерогенного течения при обтекании тела. Он характеризует отношение числа частиц, столкнувшихся с поверхностью, к числу частиц, которые могли бы выпасть на тело, если бы их траектории были прямыми линиями.

Упомянутое выше число Стокса – параметр, характеризующий инерционность частицы в окрестности критической точки тела, и определяемый соотношением

$$Stk_f = \frac{\tau_p U_{xc}}{R}, \quad (1)$$

где  $\tau_p$ ,  $U_{xc}$  и  $R$  время динамической релаксации частицы, осевая средняя скорость воздуха и радиус обтекаемого тела, соответственно.

В [5] также исследовалось влияние гравитации на осаждение частиц. Рассмотрено два случая обтекания сферы: нисходящим и восходящим потоками. Влияние силы тяжести на дисперсную фазу становится существенным в случае, когда скорость витания частицы  $\tau_p g$  соизмерима со скоростью потока несущего газа  $U_{xc}$ . Было показано, что, для случая нисходящего течения, сила тяжести способствует увеличению коэффициента осаждения частиц на поверхность сферы, в то время как для восходящего потока действие гравитации имеет обратный эффект.

В более поздней работе [6] был проведен расчет траекторий частиц в условиях потенциального обтекания цилиндра. Рассматривалось движение одиночных частиц, т.е. межчастичные столкновения и обратное влияние дисперсной фазы на несущий газ считались пренебрежимо малыми величинами. В отличие от предыдущей рассмотренной работы в [6] была предпринята попытка учета несоответствия силы аэродинамического сопротивления частицы закону Стокса и воздействия подъемной силы Сэфмена.

В упомянутых выше работах, при постановке и проведении расчетов не учитывалось влияние вязкого пограничного слоя, развивающегося на поверхности обтекаемого тела, не рассматривалось движения отраженных от тела частиц и обратное влияние частиц на газ. Неизотермичность течения, приводящая к возникновению силы термофореза, также может оказывать существенное влияние на процессы, происходящие при обтекании тела гетерогенным потоком. Рассмотрим результаты исследований, авторы которых пытались учесть некоторые из перечисленных выше факторов.

Исследование вязкого обтекания тела гетерогенным потоком было проведено в работе [7]. Рассматривалось несжимаемое течение несущего газа, концентрация частиц в потоке полагалась ничтожно малой, что позволяло не учитывать взаимодействие между частицами и их обратное влияние на газ. Проведенные расчеты показали, что пограничный слой сильно искажает траектории частиц, препятствуя их движению к стенке. Это объясняется тем, что вязкий газ тормозится интенсивнее идеального, что, в свою очередь, ведет к более интенсивному торможению твердых частиц. Частицы, движущиеся в пограничном слое вблизи обтекаемой поверхности, резко теряют свою скорость, «зависают» и далее дрейфуют вдоль поверхности тела. Это приводит к снижению коэффициента осаждения частиц.

Особенности обтекания цилиндрической поверхности слабозапыленным гетерогенным потоком в неизотермических условиях рассмотрены в обзоре [8]. Анализ процесса показал, что в области малоинерционных частиц, для которых механизм осаждения уже не работает, интенсивность осаждения резко возрастает с ростом неизотермичности и в значительной мере определяется явлением термофореза.

Во всех описанных выше исследованиях предполагалось, что частицы, попавшие на поверхность тела, исчезают из потока. Такая постановка задачи приемлема, когда в качестве дисперсной фазы рассматрива-

ются жидкие капли или частицы, образующие после попадания на тело тонкую пленку вдоль обтекаемой поверхности.

В работе [9] исследовано обтекание цилиндра гетерогенным потоком с учетом пограничного слоя, обратного влияния частиц на газ, а также влияния отраженных частиц. Рассматривалось течение с небольшим объемным содержанием частиц, поэтому взаимодействие между частицами не учитывалось. Параметры сплошной среды рассчитывались в эйлеровой постановке, а в лагранжевых уравнениях движения частиц учитывалась только сила аэродинамического сопротивления. Было выявлено, что траектории частиц разных размеров сильно отличаются: мелкие частицы не соударяются с поверхностью тела, в то время как крупные частицы сталкиваются с телом и отскакивают от него. Большое значение на движение частиц оказывает пограничный слой. Учет вязкости газа приводит к увеличению эффективного размера обтекаемого тела, что влияет на траектории частиц и способствует снижению коэффициента их осаждения.

Некоторые работы, посвящены исследованиям сверхзвукового обтекания тел [10, 11]. Эти теоретические исследования были выполнены для малых значений массовых концентраций частиц, что позволяло изучать динамику как падающих, так и отраженных частиц в заданном поле скоростей газа.

Моделирование внешнего сверхзвукового обтекания затупленных тел гетерогенным потоком с учетом обратного влияния частиц на газ проводилось в [12, 13]. Динамика частиц рассчитывалась на основании эйлерова континуального подхода. В этих работах рассчитывались траектории частиц при поперечном обтекании пластины конечной толщины запыленным потоком. Присутствие в потоке крупных частиц оказывало сильное влияние на распределение скорости несущего газа в области торможения.

Детальное экспериментальное исследование поведения падающих и отраженных частиц в окрестности обтекаемых цилиндров с плоским и полусферическим торцами проводилось в работах [14–18]. Числа Стокса в осредненном движении варьировались в широком диапазоне значений  $Stk_f = 10.5–82$ . В силу большой инерционности дисперсной фазы частицы не отслеживали линии тока несущего газа и сталкивались с поверхностью обтекаемых моделей (коэффициент осаждения  $\eta \approx 1$ ). Наличие фазы отраженных частиц существенным образом изменяло картину течения.

Полученные результаты экспериментов позволили определить размер области существования отраженных частиц и коэффициент восстановления их скорости при отражении от обтекаемой поверхности.

Цель данного исследования – изучение возможности защиты обтекаемого тела от твердых инерционных частиц путем осуществления вдува через его поверхность. Главной задачей являлось нахождение таких скоростей вдува, при которых коэффициент осаждения инерционных частиц на поверхность стремится к нулю  $\eta = 0$ . Эксперименты проводились для различных диаметров частиц и скоростей вдува с целью определения геометрии области «свободной» от частиц.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Рабочий участок представлял собой вертикальную трубу, сделанную из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, с внутренним диаметром 64 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина трубы составляла 1500 мм. На расстоянии 1280 мм от верхней части в трубе была профрезерована щель для ввода/вывода зондирующих лучей лазерного доплеровского анемометра (ЛДА). Воздух к рабочему участку подводился из баллонов,

куда предварительно нагнетался при помощи компрессора (модель К2-150). Для формирования гетерогенного течения в верхней части рабочего участка была вмонтирована емкость с частицами (питатель), которая позволяла вводить твердые частицы в поток вдоль оси симметрии трубы. Наличие сменных насадок питателя позволяло варьировать концентрацию частиц в потоке в широком диапазоне значений. В нижней части трубы устанавливалась гравитационная камера для улавливания отработавших частиц.

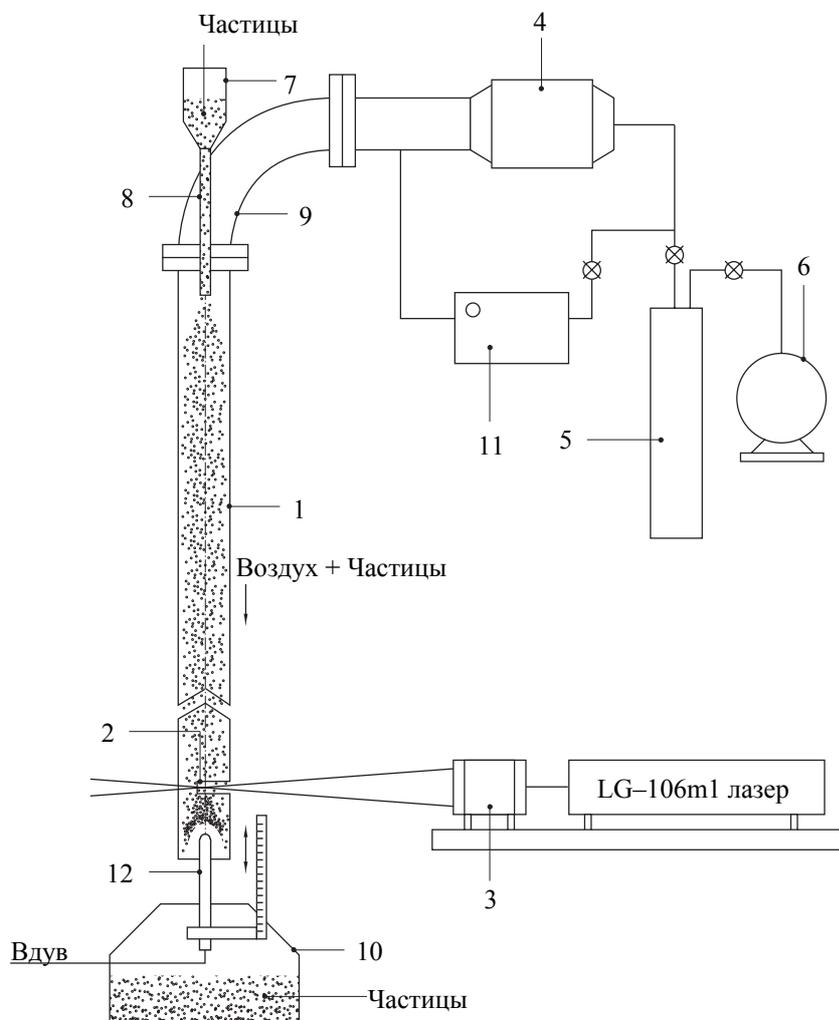


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования структуры нисходящих гетерогенных потоков (1 – вертикальная труба, 2 – щель для ввода/вывода зондирующих лучей, 3 – оптическая система ЛДА, 4 – ресивер, 5 – баллоны со сжатым воздухом, 6 – компрессор, 7 – питатель твердых частиц, 8 – центрирующая трубка, 9 – поворотная секция, 10 – гравитационная камера, 11 – генератор частиц-трассеров, 12 – обтекаемое тело (труба с внешним диаметром 10 мм) с полусферическим торцом)

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вдоль вертикальной оси трубы устанавливалось обтекаемое тело с полусферическим торцом. Для организации вдува обтекаемое тело было подключено к линии сжатого воздуха. Схема гетерогенного течения показана на рис.2. Стеклообразные твердые частицы двигались внутри канала в нисходящем потоке и взаимодействовали с поверхностью обтекаемого тела. Полусферический торец тела был сделан из пористого сетчатого материала, что позволяло организовать вдув

через его поверхность, таким образом, чтобы вдуваемый воздух двигался навстречу гетерогенному потоку. В окрестности обтекаемой поверхности происходило интенсивное торможение частиц и формировалась область оттеснения (свободная от дисперсной фазы). В экспериментах использовались два размера частиц (частицы со средним диаметром  $d_p = 100$  мкм и  $d_p = 200$  мкм). Скорость вдуваемого газа изменялась в широком интервале значений.

Типичные картины течения представлены на рис. 3 и 4. Можно наблюдать, что небольшая интенсивность вдува не оказывает существенного влияния на поведение частиц, и они свободно осаждаются на поверхность тела. Рост скорости вдуваемого воздуха приводит к формированию области торможения частиц, на некотором расстоянии от обтекаемой поверхности. Чем интенсивнее вдув, тем больше область оттеснения. Влияние интенсивности вдува на движение инерционных крупных частиц со средним диаметром  $d_p = 200$  мкм показано на рис.3. При отсутствии вдува ( $U_b = 0$  м/с) наблюдается осаждение частиц на поверхность тела (см. рис.3а). При интенсивном вдуве ( $U_b = 5$  м/с) появляется область «свободная» от частиц (см. рис.3б). Размер области оттеснения вдоль вертикальной оси равен 30 мм. Благодаря взаимодействию с

восходящим вдуваемым потоком воздуха, частицы тормозятся и не сталкиваются с поверхностью тела.

Влияние интенсивности вдува на движение менее инерционных частиц со средним диаметром  $d_p = 100$  мкм показано на рис.4. На рисунках 4а, 4б, 4в и 4г показано поведение частиц в условиях отсутствия вдува, слабого вдува, среднего вдува и сильного вдува, соответственно. Необходимо заметить, что при одних и тех же значениях интенсивности вдува, чем меньше инерционность дисперсной фазы, тем больше размер области оттеснения.

Результаты экспериментального исследования влияния параметров вдува на поведение дисперсной фазы показаны на рис.5.

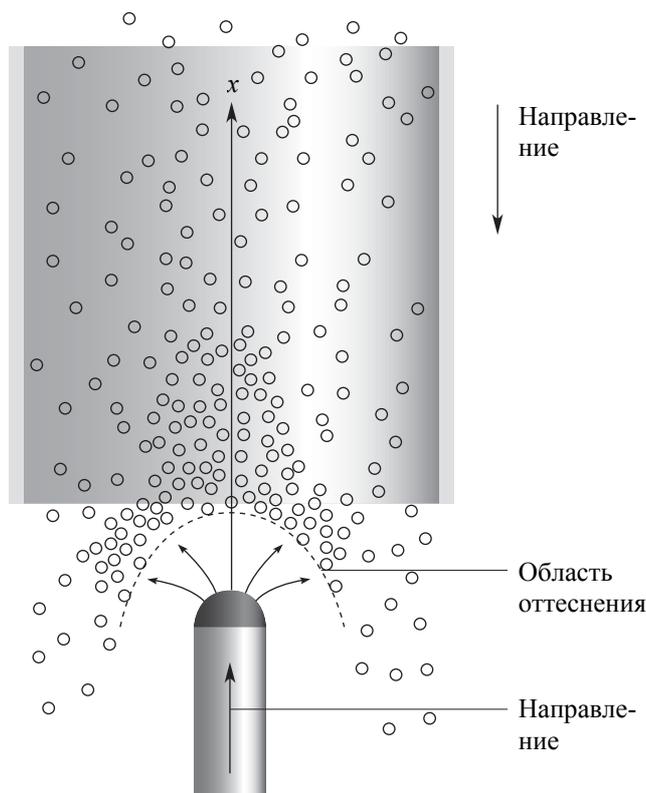


Рис. 2. Схема обтекания тела гетерогенным потоком при организации вдува из пористого сетчатого торца.

На основе представленных графиков можно сделать вывод о том, что размер области оттеснения частиц зависит как от интенсивности вдува, так и от размеров и физических свойств дисперсной фазы. Размер области оттеснения растет при увеличении скорости вдуваемого воздуха и уменьшении диаметра частиц. Инерционность частиц снижается при их попадании в область воздействия вдуваемого газа. Аэродинамическая сила существенно возрастает благодаря резкому увеличению разницы между скоростями воздуха и дисперсной фазы. Упомянутый выше процесс может быть описан при помощи числа Стокса.

Число Стокса, характеризующее инерционность частиц в окрестности критической точки обтекаемого тела в условиях вдува предлагается находить при помощи следующего соотношения

$$Stk_{fb} = \frac{\tau_p U_{xc}^2}{L U_b}, \tag{2}$$

где,  $\tau_p$ ,  $U_{xc} \approx V_{xc}$ ,  $U_b$  и  $L$  – это время динамической релаксации частицы, осевая средняя скорость нисходящего воздуха (в первом приближении ее можно рассматривать как скорость дисперсной фазы), скорость вдуваемого воздуха и линейный масштаб, характеризующий глубину проникновения вдува в поток, соответственно.

Проанализируем соотношение (2) для некоторых предельных случаев. В условиях небольших скоростей вдува  $U_b \rightarrow 0$  ( $Stk_{fb} \rightarrow \infty$ ), безразмерное число Стокса не будет определять характер движения частиц в окрестности критической точки обтекаемого тела и поведение дисперсной фазы будет характеризоваться осаждением частиц на поверхность.

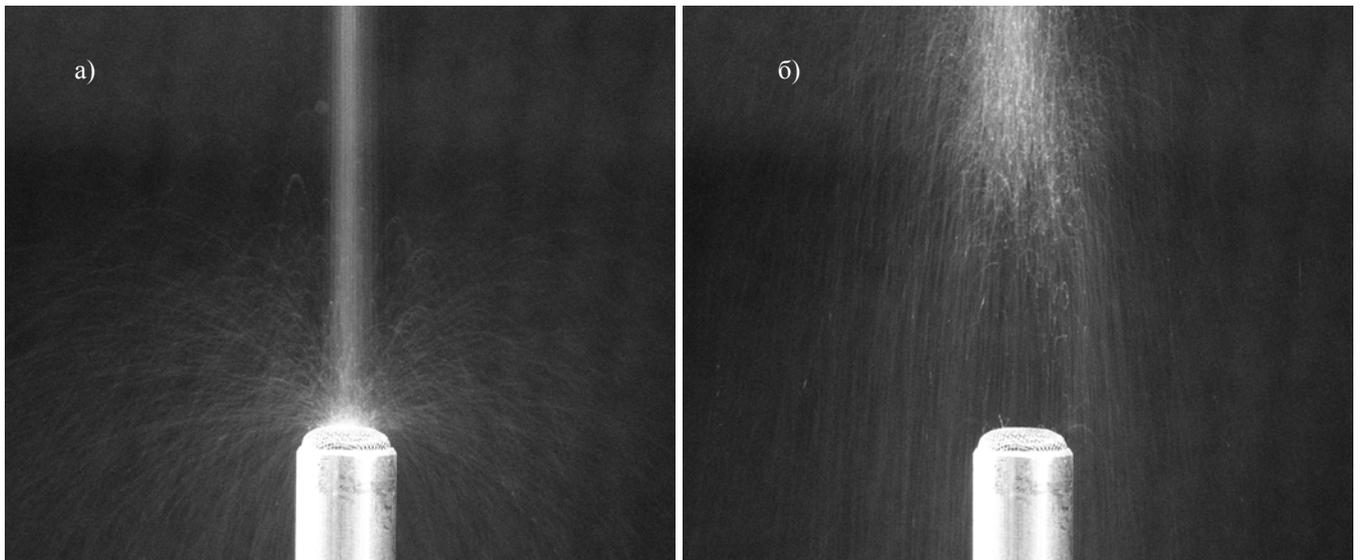


Рис. 3. Типичная картина течения нисходящего гетерогенного потока в окрестности критической точки обтекаемого тела ( $d_p = 200$  мкм): а) при отсутствии вдува ( $U_b = 0$  м/с); б) интенсивный вдув ( $U_b = 5.0$  м/с)

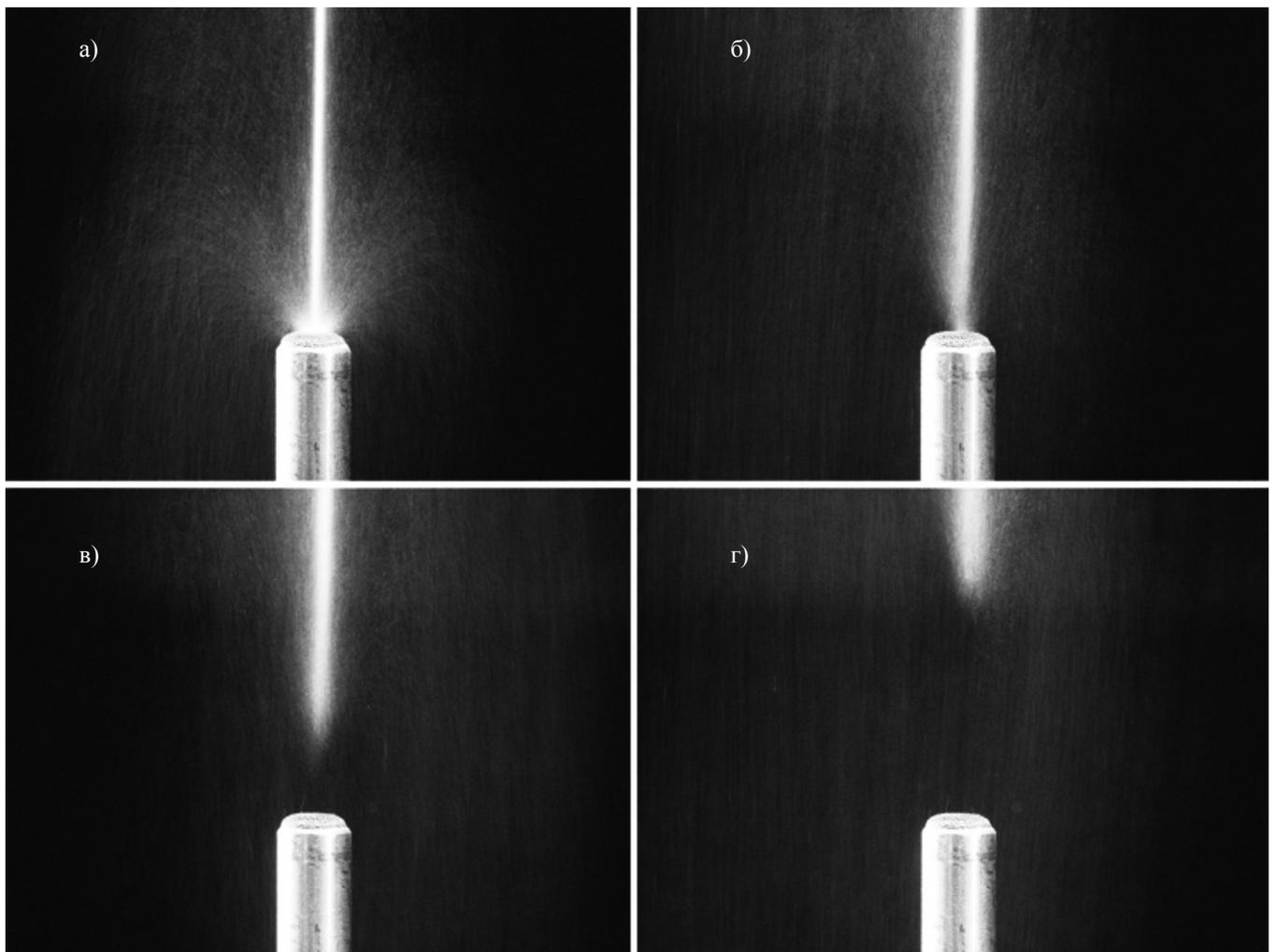


Рис. 4. Типичная картина течения нисходящего гетерогенного потока в окрестности критической точки обтекаемого тела ( $d_p = 100$  мкм): а) при отсутствии вдува ( $U_b = 0$  м/с); б) слабый вдув ( $U_b = 3.5$  м/с); в) средний вдув ( $U_b = 4.0$  м/с); г) интенсивный вдув ( $U_b = 4.5$  м/с)

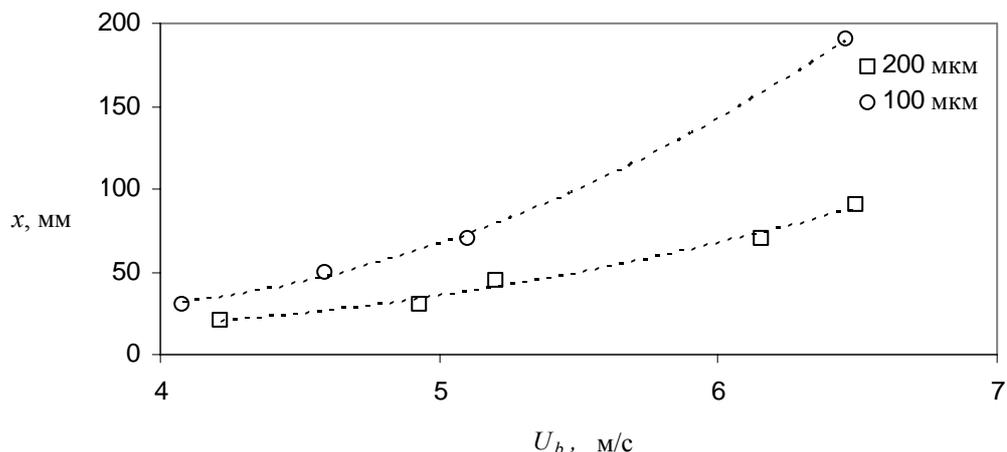


Рис. 5. Зависимость размера области оттеснения дисперсной фазы от скорости выдуваемого газа

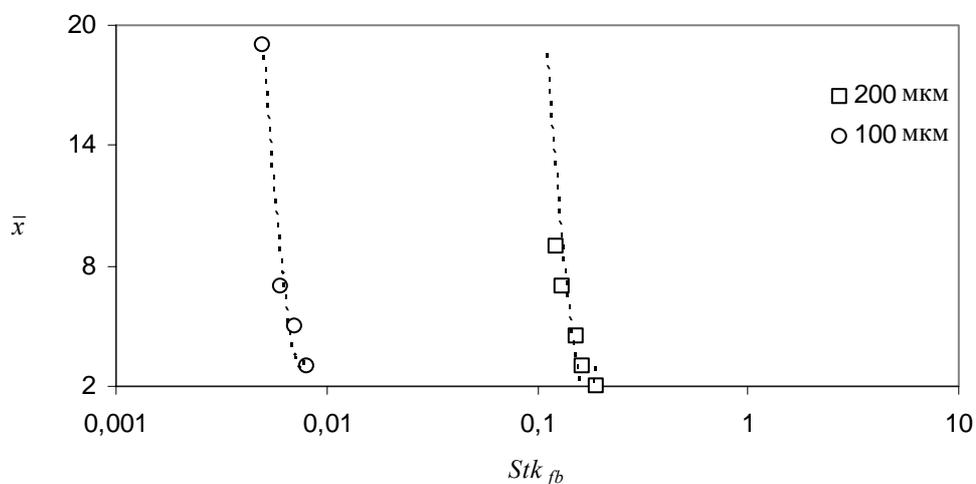


Рис. 6. Зависимость размера области оттеснения дисперсной фазы от инерционности частиц (числа Стокса)

При больших скоростях вдува  $U_b \rightarrow \infty$  ( $Stk_b \rightarrow 0$ ) поведение частиц будет полностью контролироваться интенсивностью вдува. При числах Стокса меньше единицы ( $Stk_b = O(1)$ ), процесс осаждения частиц на поверхность будет определяться как инерционностью частиц, так и интенсивностью вдува.

Таким образом, показано что соотношение (2) может быть использовано для качественного анализа влияния вдува на процессы осаждения частиц на обтекаемую поверхность.

Зависимость размера области оттеснения дисперсной фазы от инерционности частиц (числа Стокса) показана на рис.6. Числа Стокса были определены для условий эксперимента в соответствии с соотношением (2).

Числа Стокса для частиц обоих диаметров намного меньше единицы ( $Stk_b \ll 1$ , см. рис.6). Этот факт говорит о существенном влиянии вдува на осаждение частиц. Оценки чисел Стокса согласуются с полученными экспериментальными данными (см. рис.3 и 4). Таким образом, увеличение интенсивности вдува ведет к снижению коэффициента осаждения частиц и позволяет добиться полного оттеснения дисперсной фазы от обтекаемой поверхности.

## 5. ВЫВОДЫ

Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния вдува на динамику крупных твердых частиц вблизи поверхности модели. Полученные экспериментальные данные позволили определить геометрию «свободной» от частиц области и ее зависимость от скорости набегающего потока, инерционности частиц, концентрации частиц и интенсивности вдува. Выявлена зависимость размера области оттеснения падающих частиц от инерционности дисперсной фазы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 06-08-00351-а, 05-02-16893-а, 06-08-00146-а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ruff A.W., Wiederhorn S.M. Erosion by impinging solid particles // In Erosion (ed. by C.M.Preece). Academic Press. 1979.
2. Tsirkunov, Yu.M. Gas-particle flows around bodies – key problems, modelling and numerical analysis // Proc. Fourth Int. Conf. on Multiphase Flow. 2001. New Orleans. Paper 607.

3. Varaksin, A.Yu. Turbulent particle-laden gas flows. 2007. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.
4. Sommerfeld, M. Analysis of collision effects for turbulent gas-particle flow in a horizontal channel: part I. Particle transport//Int. J. Multiphase Flow. 2003. Vol.29. pp.675–699.
5. Michael D.H., Norey P.W. Particle collision efficiencies for a sphere // J. Fluid Mech. 1969. Vol. 37. P. 565-575.
6. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // J. Fluid Mech. 1972. Vol. 55. pp.193–208.
7. Циркунов Ю.М. Влияние вязкого пограничного слоя на осаждение частиц при обтекании сферы газозвесью // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. №1. С.59–66.
8. Спокойный Ф.Е., Горбис З.Р. Особенности осаждения тонкодиспергированных частиц из охлаждаемого газового потока на поперечно обтекаемой поверхности теплообмена // ТВТ. 1981. Т.19. №1. С.182–199.
9. Виттэл Б.В.Р., Табаков В. Обтекание двухфазным потоком бесконечного цилиндра // Аэрокосмическая техника. 1987. №12. С.50–57.
10. Салтанов Г.А. Сверхзвуковые двухфазные течения. Минск: Высшая школа. 1972. 480 с.
11. Салтанов Г.А. Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и двухфазных сред. М.: Наука. 1979. 286 с.
12. Давыдов Ю.М., Нигматулин Р.И. Расчет внешнего обтекания затупленных тел гетерогенным потоком газа с каплями или частицами // ДАН СССР. 1981. Т.259. №1. С.57–60.
13. Давыдов Ю.М., Еникеев И.Х., Нигматулин Р.И. Расчет обтекания затупленных тел потоком газа с частицами с учетом влияния отраженных частиц на течение газозвеси // ПМТФ. 1990. №6. С.67-74.
14. Иванов Т.Ф., Вараксин А.Ю. Исследование поведения отраженных частиц при обтекании затупленного тела гетерогенным потоком: эксперимент и расчет // ТВТ. 2005. Т.43. №2. С.317-320.
15. Varaksin A.Yu., Ivanov T.F. Effect of particle concentration on their velocity distributions for heterogeneous flow near blunted body // Proc. Fourth Int. Conf. on Multiphase Flow. 2001. New Orleans. Paper 793.
16. Вараксин А.Ю., Иванов Т.Ф. Исследование поведения отраженных частиц при обтекании затупленного тела гетерогенным потоком // ТВТ. 2003. Т.41. №1. С. 70–76.
17. Вараксин А.Ю., Иванов Т.Ф. Распределения скоростей фаз гетерогенного потока в окрестности критической точки затупленного тела // ТВТ. 2003. Т.41. №4. С. 549-553.
18. Вараксин А.Ю., Иванов Т.Ф. Псевдоламинарный пограничный слой на затупленном теле, обтекаемом гетерогенным потоком // ТВТ. 2004. Т.42. №1. С.77–82.