

В. И. Пинаков, К. В. Кулик, Б. Е. Гринберг

Конструкторско-технологический филиал
Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
ул. Терешковой, 29, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: kulik@kti-git.nsc.ru

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ВИХРЕВОМ СЛОЕ ВЯЗКОГО ГАЗА НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ПЛОСКИХ И ПРОФИЛИРОВАННЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ*

Эксперименты на вращающихся в воздушной среде конусах с углом при вершине $\beta = 120^\circ$ и плоском диске показали, что при частотах $\Omega \geq 2,5$ Гц существует качественное различие в движении мелких ($d \approx 0,1$ мм) и крупных ($d \approx 1$ мм) частиц. Первые движутся в приповерхностной зоне над диском, вторые движутся «прыжками» высотой до 3 см. Сравнение кинематики сферической и несферической частиц, в частности эллипсоида с осями d , d и $4/3 d$, показало неизбежность возникновения «прыжков» крупных частиц. Крупные частицы переходят в режим автоколебаний под действием периодически возникающей силы Магнуса. Мелкие частицы локализируются в пределах вихревого слоя.

Ключевые слова: роторный теплообменник, дегидратация, термическое разложение, пограничный слой, вязкое трение, сила Магнуса.

Введение

В мировой практике для пиролиза биомассы в режиме термоудара применяются опытно-промышленные установки, в которых основным элементом является роторный конический теплообменник (для краткости его называют «конус»). При вращении конуса около вертикальной оси частицы биомассы и нейтрального теплоносителя, состоящего из почти сферических песчинок одинакового диаметра ($0,2 \text{ мм} \leq d \leq 0,75 \text{ мм}$), под действием центробежных сил, перемещаются по его нагретой внутренней поверхности, что приводит к быстрому нагреву и разложению частиц биомассы. Песок одновременно очищает рабочую поверхность теплообменника от конденсированных продуктов разложения биомассы. Появившиеся в результате разложения газообразные продукты конденсируют путем охлаждения, что приводит к получению горючей жидкости, классифицируемой как «биотопливо».

В публикации [1] приведены результаты оценочных расчетов и испытаний реактора флэш-пиролиза, соответствующего описанной схеме. Полный угол при вершине конуса реактора $\beta = 90^\circ$. В описанных экспериментах величина d составляла 159, 284, 428, 350 и 750 мкм, при этом частота вращения Ω теплообменника диаметром $D = 680$ мм соответствовала ряду значений: 3,01, 3,77, 4,55 и 5,28 Гц. Пуски реактора в режиме «холодных» испытаний ($T = 20$ °С) показали, что кинематика мелких частиц песка (размером 159 и 284 мкм) существенно отличается от кинематики крупных (размером до 750 мкм). Первые устойчиво движутся по поверхности конуса, а вторые «прыгают» на высоту порядка нескольких сантиметров. Подобные «прыжки» частиц (песчинок) на поверхности вращающегося конического теплообменника были восприняты как негативный фактор.

Такое же различие в движении мелких и крупных твердых частиц наблюдалось и на

* Работа выполнена при поддержке Президиума СО РАН, проект № 2 «Химические и биохимические устройства на основе новых принципов интенсификации процессов».

роторном теплообменнике реактора «ЦЕФ-ЛАР» [2], который имеет коническую конфигурацию с полным углом при вершине $\beta = 120^\circ$. Реактор предназначен для термодинамической активации порошка гидрагиллита с размером частиц $d \leq 0,15$ мм.

В [3] было показано, что при движении частицы по поверхности вращающегося с постоянной угловой скоростью Ω конуса имеет место ее удаление от оси вращения по траектории, которая удовлетворительно аппроксимируется логарифмической спиралью. При этом эксперименты также показали качественное различие между кинематикой мелких (размером $d \approx 0,1$ мм) и крупных ($d \approx 1$ мм) частиц. Мелкие частицы перемещаются в приповерхностной зоне диска слоем, толщиной порядка 1 мм, крупные – движутся «прыжками», подобно упругим шарикам. Это вертикальное движение суммируется с радиально-азимутальным движением по спиральным траекториям. Оно устойчиво, в связи с этим его можно классифицировать как автоколебания.

Анализ динамики этих автоколебаний в вихревом слое вязкого газа (жидкости) является основным содержанием настоящей работы.

Кинематика сферической частицы

При движении частиц по поверхности конуса или диска, вращающегося с некоторой угловой скоростью Ω в лабораторной системе координат, увеличение длины радиуса-вектора частицы сопровождается увеличением линейной скорости поверхности. Такое движение частицы сходно с более простым случаем поступательного движением вблизи поверхности горизонтально ускоряющейся плоской плиты (горизонтального транспортера).

В первую очередь целесообразно рассмотреть случай с постоянной скоростью плиты U . Предположим что на плиту в поле тяжести g , с малой высоты вертикально падает сферическая упругая частица радиусом r так, что в момент соударения $t = 0$ модуль вертикальной скорости частицы $w \ll U$. При массе частицы m собственный момент инерции шарика $I = 0,4mr^2$. Коэффициент сухого трения частицы при скольжении по поверхности плиты $k > 0$ не зависит от разности скоростей. Модуль вертикальной скорости отскока

$$w_0 = \alpha w \quad (0 \leq \alpha < 1). \quad (1)$$

Влияние воздуха не учитываем.

В момент удара в точке контакта частица получает от плиты импульс, направленный вертикально вверх

$$P_B = m(w + w_0).$$

В той же точке частица одновременно получает и горизонтальный импульс

$$P_r = kP_B = mk \cdot (w + w_0),$$

направленный параллельно U . Модуль ускорения частицы в момент соударения много больше g , поэтому действие веса несущественно.

Параметры движения частицы при соударении, а именно угловая скорость около мгновенного центра вращения ω и расстояние между центрами массы и мгновенного вращения b , получаются из уравнений

$$P_r \cdot (r + b) = (I + mb^2) \cdot \omega, \quad (2)$$

$$P_r = m \cdot \omega b.$$

Решение этой системы дает

$$\omega = P_r r / I,$$

$$b = I / (mr). \quad (3)$$

Следовательно, после соударения имеют место вращение частицы около собственного центра массы и движение с ускорением g по вертикали и равномерное по горизонтали со скоростью

$$w_r = k \cdot (w + w_0).$$

Если в (1) $\alpha = 0$, имеет место абсолютно неупругое взаимодействие. Если $w_0 = 0$, отскока нет, удар однократен. После него, в соответствии с предыдущими соотношениями, частица имеет параметры:

$$w_{гн} = kw, \quad \omega_n = mkrw/I, \quad (4)$$

где нижний индекс «н» указывает на неупругое взаимодействие. В этом случае действие силы трения $F_T = kmg \cdot \text{sign}(U - w_r)$ приводит к выравниванию $w_{гн}$ со скоростью плиты U .

Если α – некоторая малая величина, то соударения будут повторяться, и значения скорости отскока после j -го падения $w_{oj} = w \cdot \alpha^j$ являются членами геометрической прогрессии. Горизонтальная и угловая скорости увеличиваются, поскольку они пропорциональны сумме членов геометрической прогрессии $(w_j + w_{oj})$, где $j = 1; 2; 3; \dots$. При реальных значениях α и k вертикальная скорость падает до нуля, а горизонтальная выравнивается с u , как и в предыдущем случае.

Таким образом, в рассмотренной системе, с $U = \text{const}$, при упругом и неупругом взаимодействии сферической частицы с

движущейся плитой увеличение вертикального импульса частицы приводит к росту ее горизонтального импульса. В то же время изменение горизонтального импульса сферической частицы никак не влияет на величину ее вертикального импульса. Нетрудно убедиться, что переход к нарастающей скорости U не приводит к положительному эффекту, поскольку движение частиц по вертикали также угасает.

Анализ кинематики несферической частицы

Рассмотрим движение несферической частицы, например эллипсоида, у которого две полуоси равны r , а размер третьей полуоси составляет $4/3 r$.

В случае абсолютно неупругого соударения, при котором в процессе падения большая ось эллипсоидальной частицы параллельна плоскости плиты, движущейся горизонтально с постоянной скоростью U . Скорость соударения частицы с плитой w направлена вертикально вниз, моменту контакта $t = 0$ соответствует начальный угол между большой осью эллипсоида и горизонталью $\theta(0) = \theta_0 = 0$. Описанная ориентация частицы изображена на рис. 1.

В случае несферической частицы в уравнении (2) величины m и I являются пара-

метрами эллипсоида. Эпюра скоростей точек вертикальной оси эллипсоида после соударения с плитой соответствует моменту времени $t = 0$. Эпюра свидетельствует о вращении частицы с угловой скоростью ω_n (4) около мгновенного центра, находящегося выше центра массы, на расстоянии b , определенном соотношением (3).

Штриховой контур соответствует повороту частицы на угол $\theta_1 \approx 0,9$ рад. Согласно оценочному расчету, при этом значении угла θ должен происходить отрыв частицы от поверхности плиты. Причина в том, что при $\theta = \theta_1$ функция $dh(\theta)/d\theta$, где $h(\theta)$ – вертикальная координата центра массы частицы, проходит через максимум. Поскольку скорость подъема центра массы

$$w_n = dh/dt = (dh/d\theta) \cdot (d\theta/dt) = (dh/d\theta) \cdot \omega_n, \quad (5)$$

ее максимум w_n' также соответствует углу θ_1 .

Оценка показывает, что при $\theta = \theta_1$ $(dh/d\theta)_1 \approx 0,3r$ (размерность – м/рад). Подстановка этого выражения, последнего из соотношений (4) и момента инерции эллипсоида $I = (5/36)md^2$ в (5) приводит к получению не зависящего от r соотношения:

$$w_n' = (dh/dt)_1 \approx 0,3 \cdot \omega_n r \approx 0,6 wk. \quad (6)$$

Следовательно, без учета трения о воздух при абсолютно неупругом взаимодействии несферической частицы с горизонтально

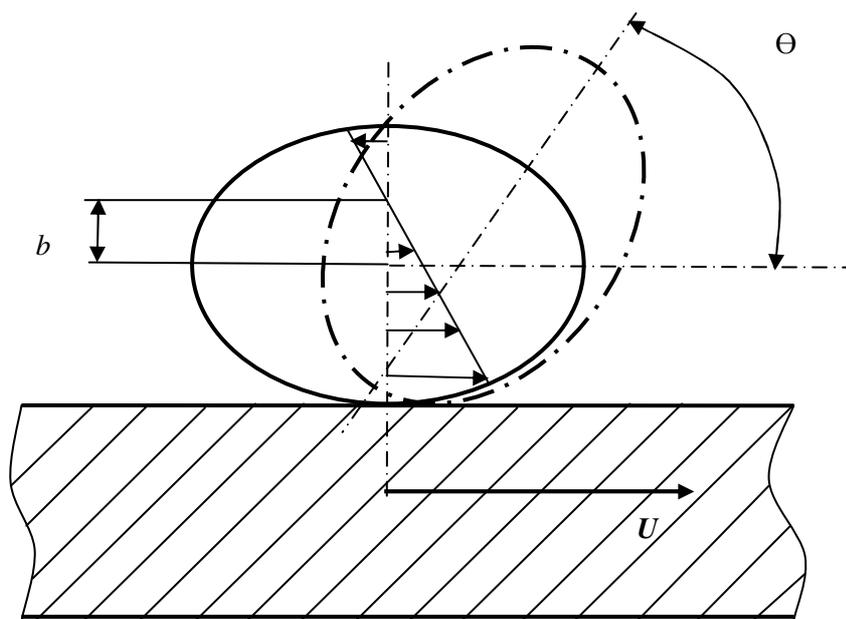


Рис. 1. Падение несферической частицы (эллипсоида) на плиту, движущуюся горизонтально со скоростью U

движущейся плитой сила трения может приводить не только к появлению вертикальной компоненты скорости, но и «прыжкам» частицы. Такие прыжки повторяются до тех пор, пока скорость частицы не выровняется с U . Если величина U будет монотонно нарастать, то движение несферической частицы превращается в незатухающие автоколебания.

Можно оценить численные значения параметров неупругого взаимодействия несферической частицы с плитой. Проведенные эксперименты показали, что силы трения определяются значением $k \approx 0,5$, полученного путем измерения угла скольжения; скорости соударения $w = 0,7$ м/с при высоте падения 2,5 см. Согласно (4) $w_{гн} = 0,35$ м/с, из (5) следует, что вертикальная составляющая скорости «подскока» несферической частицы $w_{п} \approx 0,2$ м/с, что приводит к высоте «подскока» центра массы

$$h_{п} \approx 2 \text{ мм.} \quad (7)$$

Оценочные величины угловых скоростей мелких ($d' = 2 r' \approx 0,1$ мм) и крупных ($d'' = 2r'' \approx 1$ мм) частиц, согласно (4), составляют

$$\omega' \approx 10^4 \text{ рад/с; } \omega'' \approx 10^3 \text{ рад/с.} \quad (8)$$

Необходимо отметить, что в реальности соударения частиц (песчинок, кусочков пробки, дробленых отходов очистки риса, гидраргиллита) с плитой являются упругими, поэтому значение высоты подскока (7) можно рассматривать как оценку снизу.

Анализ движения частиц под действием сил вязкого трения и силы Магнуса

Если частицы с размерами $d' \approx 0,1$ мм и $d'' \approx 1$ мм упадут со скоростью $w \approx 0,7$ м/с не на плиту, движущуюся в вакууме, а на вращающийся в воздухе диск, движение частиц будет существенно отличаться от описанного в предыдущем разделе.

Движение частиц определяется в основном силой вязкого трения. Скорость газа около вращающегося диска $w_{\phi}(z)$ соответствует эпюре вихревого слоя, описанного в [4], которая приведена на диаграмме (рис. 2, а). Здесь скорости соответствуют лабораторной системе координат, если на виде сверху диск вращается в направлении часовой стрелки, а наблюдатель находится на оси вращения Z . Эпюра соответствует рас-

стоянию от оси вращения $R = 0,2$ м и угловой скорости диска $\Omega = 16,8$ рад/с (2,7 об/с).

В системе координат движущейся частицы пример той же эпюры скорости приведен на рис. 2, б. Частица пересекает цилиндрическую поверхность $R = 0,2$ м со скоростью, круговая компонента которой $w_{\phi} \approx 1,5$ м/с. Для наглядности, с соблюдением масштаба, на оси абсцисс изображены мелкая ($d' = 0,1$ мм) и крупная ($d'' = 1$ мм) сферические частицы. Горизонтальная штриховая прямая отделяет зону натекания потока на частицу слева ($0 < z < 1$ мм) от зоны натекания справа ($z > 1$ мм). В лабораторной системе координат первая является зоной разгона частицы, а вторая – зоной ее торможения. Нетрудно увидеть, что крупной частице легче перейти из первой зоны во вторую.

На рис. 2, а видно, что в приповерхностной зоне толщиной до 2 мм круговая скорость $w_{\phi}(z)$ убывает по мере увеличения z практически линейно, в соответствии с пунктирной прямой

$$w_{\phi}'(z) \approx \Omega R(1 - 0,7 \cdot \Omega^{1/2} \cdot \nu^{1/2} \cdot z).$$

Градиент скорости вызывает однонаправленное вращение частиц около собственных горизонтальных осей, проходящих через их центр массы, с угловой скоростью ω_0 , которая не зависит от их размера. Поскольку в данном случае вязкость, с одной стороны, вызывает вращение частицы, а с другой – тормозит это вращение, то ω_0 меньше, чем dw_{ϕ}/dz . При $R = 0,2$ м $dw_{\phi}/dz \approx 2,4 \cdot 10^3$ рад/с. Следовательно, вблизи поверхности диска все частицы вращаются в одну сторону (на рис. 2 против часовой стрелки) с угловой скоростью $\omega_0 \approx (dw_{\phi}/dz)/2 \approx 10^3$ рад/с. Следует отметить, что ω_0 и ω'' не только близки по величине, но и совпадают по направлению.

Вернемся к плоской задаче. Рассмотрим случай, когда скорость плиты U по модулю равна скорости точки диска

$$\Omega R = 16,8 \cdot 0,2 \approx 3,3 \text{ м/с.}$$

Кроме того, предположим, что приповерхностный слой над плитой имеет параметры вихревого слоя, соответствующие диаграмме (а) рис. 2.

На рис. 3 масштаб диаграммы, приведенной на рис. 2, а, увеличен, на ее плоскость нанесены траектории изображающих точек в соответствии с результатами оценок, полученных в предыдущем разделе с поправкой, учитывающей отскок с сохранением 10 % кинетической энергии при соударении.

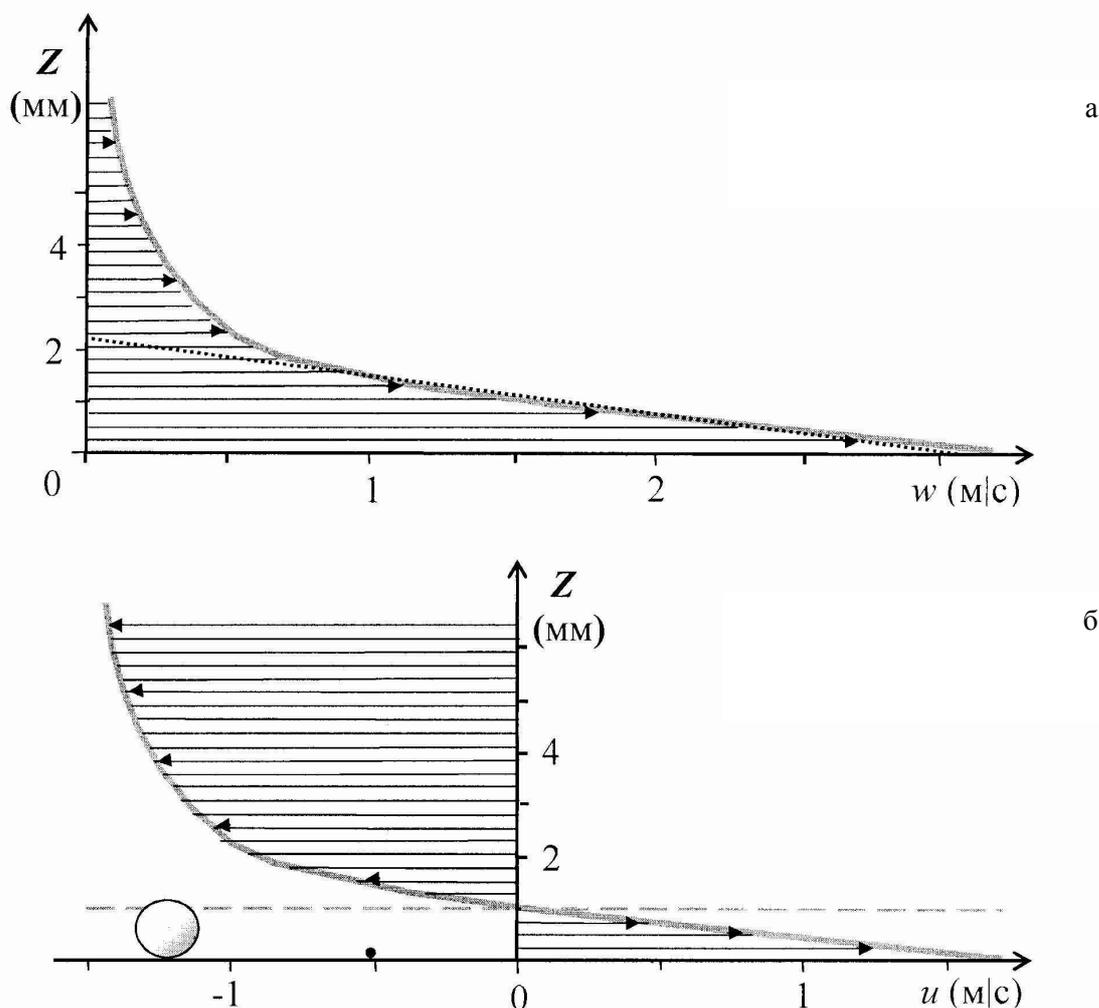


Рис. 2. Эпюры скорости в вихревом пограничном слое: *a* – эпюра скорости в вихревом пограничном слое в лабораторной системе координат; *б* – эпюра скорости в вихревом пограничном слое в системе координат, связанной с частицей

Это приводит к увеличению подскока на $h_y \leq 2,5$ мм.

Оценки показывают, что при падении, т. е. до момента соударения с диском, горизонтальные скорости мелкой и крупной частиц за счет ускорения в пограничном слое вращающегося диска увеличиваются незначительно, не более чем до 1 см/с. Поэтому на рис. 3 линии, отображающие начальное падение той и другой частиц, практически совпадают с положительной координатной полуосью Z . Это совпадение заканчивается при соударении с диском той и другой частиц в точках, где происходит излом отображающих линий практически под прямым

углом. Поскольку взаимодействие мгновенно, на отрезке абсциссы от нуля до

$$w_{\text{гн}} \approx 1,3 \cdot 0,35 \approx 0,45 \text{ м/с}$$

линии превращаются в отрезки горизонтальных прямых $z' = r' = 0,05$ мм и $z'' = r'' = 0,5$ мм. Понятно, что нижняя линия z' отображает движение мелкой частицы, а верхняя линия z'' – крупной.

В соответствии с (8) и с учетом поправки на отскок собственная частота вращения мелкой частицы ω' в момент соударения, вследствие контактного «раскручивания» составляет более 10^4 рад/с. При движении частицы в приповерхностной зоне, где воздух движется быстрее частицы, на нее дей-

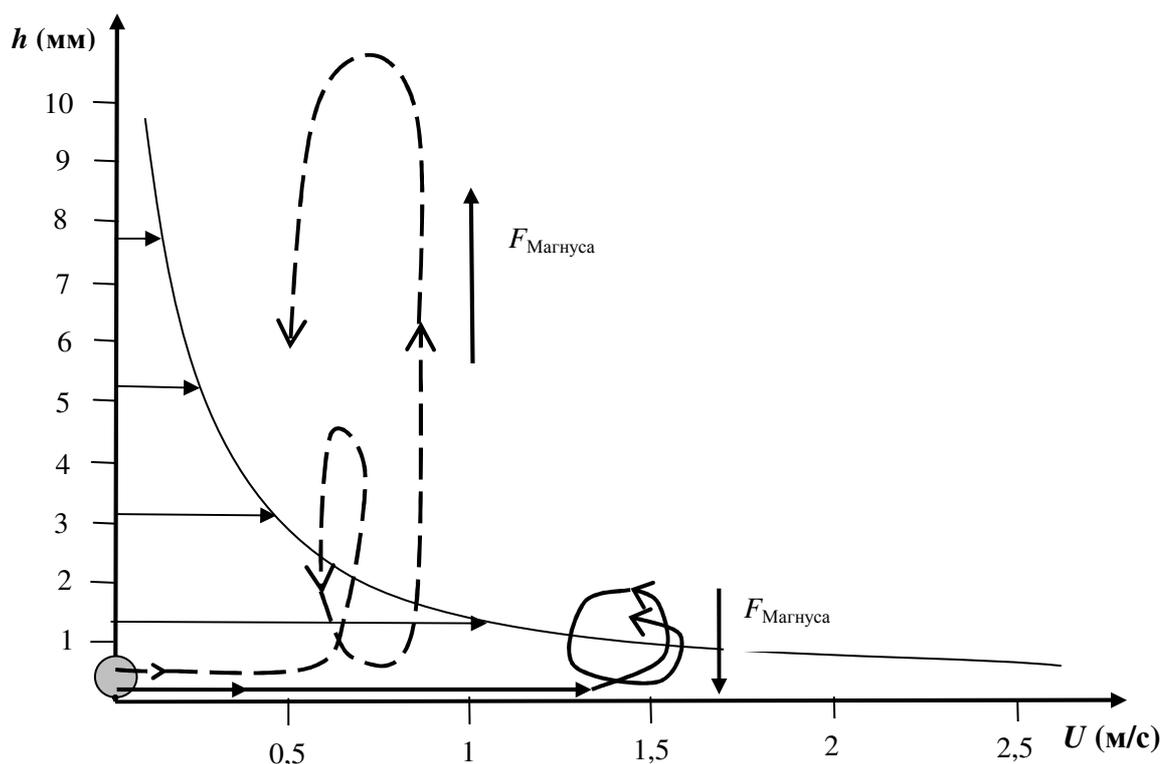


Рис. 3. Траектории движения частиц в зависимости от эпюры скорости в вихревом пограничном слое в лабораторной системе координат

ствует поперечная гидродинамическая сила Магнуса, которая направлена вниз.

Существует [5] соотношение для силы Магнуса, действующей на единицу длины вращающегося цилиндра, $F_M = \rho_v u \cdot K$ (K – циркуляция скорости, в нашем случае $K' \approx 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $u' \approx 2,8 \text{ м/с}$, $\rho_v \approx 1,3 \text{ кг/м}^3$).

Оценочно полагаем, что на несферическую частицу (с тем же значением радиуса) действует вдвое меньшая, чем на цилиндр, сила $F_M' \approx 8 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$. Оценка показывает, что она в пять раз больше веса частицы $P' \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$ (ее объем $1,3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \approx 0,65 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$, плотность 2400 кг/м^3). Сложение одинаково направленных P' и F_M' увеличивает вертикальное ускорение частицы (приблизительно до $6g$) и в той же пропорции уменьшает высоту «подскока» мелкой частицы. На рис. 3 движение мелкой частицы при значениях абсциссы более $0,45 \text{ м/с}$ отображается гладкой кривой, переходящей в «предельный цикл», средние значения высоты и скорости которого составляют приблизительно 1 мм и $1,5 \text{ м/с}$. Понятно, что вязкое трение приводит к па-

дению величины ω' , однако при контактах с поверхностью потери компенсируются.

Действие силы Магнуса на крупную частицу непосредственно после соударения с поверхностью несущественно влияет на ее движение. Это связано с тем, что в области диаграммы рис. 3, лежащей под границей эпюры скорости, $\omega'' \approx \omega_0$. В то же время динамический напор вязкой среды разгоняет частицу. Поэтому после соударения (при значениях скорости v_ϕ более $0,45 \text{ м/с}$) верхняя отображающая кривая, как это показано на диаграмме, стремится достичь высоты $d''/2 + h_{\text{п}} + h_{\text{y}} \approx 5 \text{ мм}$. Она не только достигает ее, но и поднимается несколько выше, потому что после прохождения через границу эпюры частица попадает в натекающий справа поток воздуха, в котором сила Магнуса направлена вверх.

Циркуляция $K'' \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, скорость $u'' \approx 0,7 \text{ м/с}$, аналогичная с предыдущей оценка дает для «подъемной» силы $F_M'' \approx 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$. Это больше, чем вес органической частицы, составляющий до $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$, но меньше, чем вес песчинок

диаметром $d'' \approx 1$ мм, составляющий до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Н. При повторном соударении эффект подъема усиливается благодаря увеличению ω'' , поэтому высота «подскока» растет. На диаграмме рис. 3, которая соответствует идеализированному плоскому случаю, это выглядит как петля «предельного цикла».

Таким образом, в плоском случае, по сравнению с движением в вакууме, после первого соударения с плитой мелкая частица подскакивает ниже, чем в вакууме, а крупная частица – выше, чем в вакууме.

Наблюдения за движением частиц гидраргиллита и органических частиц по вращающемуся диску показали, что последние выходят на режим устойчивых подскоков на высоту до 2 см. Это свидетельствует об адекватности проведенных оценок.

Заключение

Описанные в данной статье эксперименты, а также приведенные в [1] результаты исследований движения частиц на поверхности роторного конического теплообменника, при которых диаметр d песчинок составлял 159, 284, 428, 350 и 750 мкм, а частота вращения Ω соответствовала ряду значений: 3,01, 3,77, 4,55 и 5,28 об/с, позволяют оценить пограничные значения d_n , при котором начинаются «прыжки» частиц: $d_n \approx \delta^*/2$, где $\delta^* \approx 1,3(\nu/\Omega)^{1/2}$ – толщина вытеснения вихревого слоя, а ν – кинематическая вязкость газа.

Повышение рабочей температуры процесса в реакторе приводит к увеличению толщины пограничного слоя при фиксированном значении Ω . Например, двукратное увеличение температуры от $T \approx 300$ К до $T \approx 600$ К приводит к увеличению кинема-

тической вязкости в 3,3 раза. Следовательно, толщина вихревого слоя δ^* возрастает 1,8 раза, в той же мере будет расти и величина порогового диаметра d .

Таким образом, в настоящей работе:

- получены оценочные значения подскока несферической частицы при взаимодействии с горизонтально движущейся плитой под действием сил сухого трения;
- показано, что в пределах вихревого слоя крупные ($d \approx 1$ мм) и мелкие ($d \approx 0,1$ мм) частицы вращаются в одном направлении;
- объяснено возникновение автоколебаний крупных частиц под действием сил вязкого трения и вертикально направленной силы Магнуса;
- оценено пограничное значение d_n , при котором начинаются «прыжки» частиц.

Список литературы

1. Janse A. M. C., Jong X. A. de, Prins W., Swaaij W. P. M. van. Heat Transfer Coefficients in the Rotating Cone Reactor // Powder Technology. 1999. № 106. P. 167–175.
2. Pinakov V. I., Grinberg B. E. et al. Method and Device for a Heat Shock Treatment of Loose Materials. European Patent № 1374986, 2004.01.02.
3. Пинаков В. И., Кулик К. В., Гринберг Б. Е. Движение частиц по роторным теплообменникам // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2009. Т. 4, вып. 3. С. 55–62.
4. Бэтчелор Д. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
5. Фабер Т. Е. Гидроаэродинамика. М.: Постмаркет, 2001.

Материал поступил в редколлегию 16.07.2010

V. I. Pinakov, K. V. Kulik, B. E. Grinberg

ANALYSIS OF THE PARTICLES' MOVEMENT OVER THE FLAT AND PROFILED ROTATING DISCS SURFACE IN THE VELOCITY LAYER OF THE VISCOUS GAS

Experiments on the rotating in the air cones with vertex angle $\beta = 120^\circ$ and flat disc shown that on frequencies $\Omega \geq 2.5$ hertz exists a qualitative difference in movement for the particles with diameters $d \approx 1$ mm and $d \approx 0.1$ mm. The particles with $d \approx 0.1$ mm move in the near-surface region, the particles with $d \approx 1$ mm jump up to 3 cm. Comparison of the spherical and aspheric (ellipsoid with axes d , d and $4/3 d$) particles' kinematics moving shown the inevitability of the large particles jump occurrence. Large particles come to self-oscillation regime by reason of periodically appearance of the Magnus force. Small particles are localized in the velocity layer.

Keywords: rotary heat exchanger, dehydration, thermal decomposition, boundary layer, viscous friction, Magnus force.