

## О ВЛИЯНИИ ОТРАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА УНОС МАССЫ ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛА ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ

БАЛАНИН Б. А.

В статье рассматриваются результаты экспериментального исследования влияния отраженных частиц при обтекании тела двухфазным потоком на набегающие частицы. Двухфазный поток имел в качестве непрерывной фазы воздух, а в качестве дискретной фазы — узкофракционированные электрокорундовые частицы размером 23 и 109 мкм с концентрацией до 0,25 кг частиц/кг воздуха. Скорость воздуха  $u=200$  м/с, частиц  $u_s=155-190$  м/с. Интенсивность взаимодействия падающих и отраженных частиц оценивалась по интегральным характеристикам эрозионного уноса массы моделей. В качестве моделей были использованы алюминиевые прямые круговые конусы и обратные конусы, внутри которых образовывалось облако имеющих малую скорость отраженных частиц и препятствующее попаданию набегающих частиц на поверхность модели. Полууглы конусов изменялись в пределах  $\alpha=15-90^\circ$ .

Получены зависимости вероятности столкновения частиц от угла встречи с поверхностью, их размеров и характерных размеров обтекаемого тела, а также концентрации.

Результаты работы могут быть использованы для разработки принципиально новых эрозионно-стойких материалов, превышающих по своим антиэрозионным качествам используемые в настоящее время.

При изучении обтекания тел двухфазными потоками можно выделить два направления: исследования эрозионного [1] и силового воздействия [2-7]. Важным при их рассмотрении является использование факта наличия отраженных частиц, существование которых было качественно подтверждено в [8, 10, 11]. Прямое измерение количественных характеристик влияния отраженных частиц на взаимодействие набегающих частиц с телом затруднительно, однако эта информация может быть получена косвенным путем через интегральные характеристики эрозии.

За счет придания телу особой формы в определенных областях окрестности тела можно увеличить концентрацию отраженных частиц так, что эффект экранирования вывится отчетливо.

Таким телом является круговой цилиндр, торец которого направлен навстречу потоку и в нем (торце) выполнено углубление в виде кругового обратного конуса, основание которого направлено навстречу потоку.

При столкновении набегающих частиц со стенками обратного конуса, частицы отражаются по направлению к оси, где будет существовать область повышенной концентрации и, следовательно, большая вероятность взаимодействия набегающих и отраженных частиц, т. е. экранирование. Известно, что (например, [1]) при эрозионном разрушении тела двухфазным потоком отношение количества уносимого материала к количеству поступающей к телу твердой фазы — величина постоянная. Поэтому по отклонению этого отношения от известного постоянного значения можно судить об эффективности взаимодействия падающих и отраженных частиц.

В процессе экспериментов использовались модели в виде обычного прямого конуса, а также в виде обратного конуса, основанием направленного навстречу потоку. Полуугол при вершине конусов имел значение  $\alpha=15, 30, 45, 60, 75$  и  $90^\circ$ . На моделях с диаметром основания 30 мм исследовалось влияние угла встречи частиц с поверхностью на интенсивность экранирования. Схемы моделей показаны на фиг. 1.

Кроме того, было предпринято исследование влияния на интенсивность эрозии поперечного размера конуса, для чего были проведены эксперименты с моделями, в которых диаметр основания конусов имел значения  $d_m=5, 10, 20, 30$  и 40 мм. Полуугол при вершине в этом случае был у всех моделей одинаков и равен  $\alpha=30^\circ$ . Исследовалось также влияние среднемассовых размеров частиц  $d_s$  и концентрации.

Эксперименты проводились на установке, схема и устройство которой описаны в [9]. Двухфазный поток воздух — частицы формировался в трубе длиной 4 м и диаметром проходного сечения 70 мм. Скорость воздуха была равна  $u=200$  м/с, а среднемассовые размеры частиц  $d_s=23$  и 109 мкм. При данной скорости воздуха средние (по миделю модели) скорости частиц были соответственно  $u_s=190$  и 155 м/с. Среднемассовая концентрация твердой фазы в выходном сечении разгонного устройства  $K=\text{кг тв. фазы/кг воздуха}$  имела два значения: 0,05 и 0,25. Неравномерность скорости частиц  $u_s$  в пределах миделя модели ( $d_m=30$  мм) была не более 5%, а их концентрация — не более 4%. Измерение скоростей и концентраций твердой фазы в потоке проводилось методами лазерной диагностики.

В качестве твердой фазы использовались узкофракционированные стандартные электрокорундовые порошки М28 и № 10 с удельной плотностью 3,9 г/см<sup>3</sup>.

После установления режима модель вводилась в двухфазный поток, находилась там в течение времени, достаточного для того, чтобы унос материала достиг требуемой величины, и затем быстро выводилась из потока. Время ввода и вывода модели было около 1 с, время нахождения в потоке 15-30 с в зависимости от среднего размера частиц.

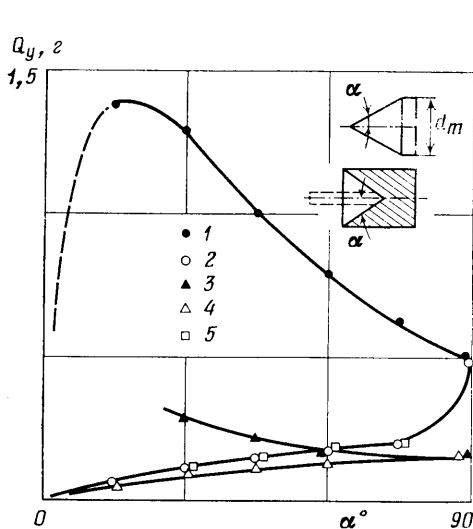
Унос материала модели  $Q_y$  определялся взвешиванием модели до и после эксперимента, т. е.

$$Q_y = Q_0 - Q \quad (1)$$

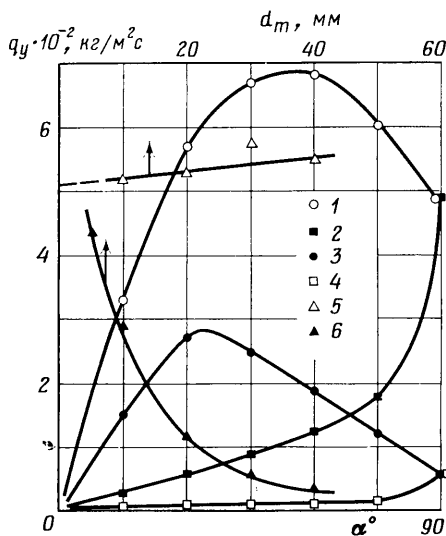
Результаты экспериментов с прямым и обратным конусами сравнивались между собой, так как единственным отличием в условиях их эрозионного разрушения было возможное наличие внутри обратного конуса зоны повышенной концентрации отраженных частиц, т. е. защитного экранирующего слоя. Величины, относящиеся к прямому конусу, обозначим индексом плюс, а к обратному — минус.

Из графиков на фиг. 1 (здесь  $d_s = 109$  мкм) следует, что зависимости уноса материала  $Q_{y^+}$  (кривая 1) и  $Q_{y^-}$  (кривая 2) от угла  $\alpha$  резко отличаются друг от друга как по величине, так и характеру. Графики 1 и 2 соответствуют  $K=0,25$ .

Зависимость  $Q_{y^+}(\alpha)$  с характерным максимумом известна, в то время как кри-



Фиг. 1



Фиг. 2

вая  $Q_{y^-}(\alpha)$  имеет несколько неожиданный характер, вообще говоря, прямо свидетельствующий о наличии весьма эффективного экранирования поверхности обратного конуса отраженными частицами. Это следует из сравнения  $Q_{y^+}$  и  $Q_{y^-}$  при постоянном угле  $\alpha$ . Действительно, унос материала модели для прямого конуса в несколько раз при всех одинаковых условиях больше, чем для обратного конуса. Далее, с увеличением угла  $\alpha$  унос прямого конуса резко падает, в то время как для обратного конуса несколько возрастает. При  $\alpha=90^\circ$  (торец) унос для обоих конусов, естественно, одинаков.

Кривые 3 и 4 соответствуют уменьшенной концентрации  $K=0,05$ . Здесь унос  $Q_y$  меньше, чем для  $K=0,25$ , но характер зависимости сохраняется. Интересно отметить, что в то время как унос  $Q_{y^+}$  растет пропорционально увеличению концентрации (т. е. приходу) твердой фазы, для  $Q_{y^-}$  унос с увеличением концентрации (кривые 2 и 4) практически не увеличивается. Уже при  $K=0,05$  эффект экранирования достигает максимального значения и далее почти не растет.

Высказанная выше гипотеза о существовании в районе оси модели обратного конуса облака или «шнура» повышенной концентрации твердой фазы и ее экранирующего действия подтверждается специальным экспериментом, суть которого состояла в том, что в модели обратного конуса (на оси) устанавливался металлический стержень (показан на схеме на фиг. 1 пунктиром), в определенной степени имитирующий «шнур» высокой концентрации частиц. Кривая 5 соответствует  $Q_{y^-}$  с установленным на оси стержнем. Отсюда также следует тот факт, что отраженные частицы не вызывают эрозии, а участвуют только в образовании экранирующего слоя, так как  $Q_{y^-}$  не изменяется при наличии внутри стержня.

На фиг. 2 представлена зависимость удельного уноса  $q_{y^+}(\alpha)$  кг·м<sup>2</sup>/с (кривые 1 и 3) и  $q_{y^-}(\alpha)$  (кривые 2 и 4) для различных средних размеров частиц  $d_s=23$  мкм (кривые 3 и 4) и 109 мкм (кривые 1 и 2). Удельный унос материала увеличивается с ростом  $d_s$ , характер зависимости для различных  $d_s$  сохраняется. Также представлены результаты исследования влияния поперечного размера модели (миделя)  $d_m$  на удельный унос  $q_y$  с прямого (кривая 5) и обратного конусов (кривая 6). Удельный унос с поверхности прямого конуса  $q_{y^+}$  практически не зависит от  $d_m$ . В то же время  $q_{y^-}$  быстро уменьшается с увеличением  $d_m$  и составляет при  $d_m=$

$=40$  мм, например, всего  $1/10q_y^+$ , т. е. обратный конус противостоит эрозии в 10 раз лучше, чем прямой. При  $d_m \rightarrow 0$   $q_y^-$  должно, очевидно, приближаться к  $q_y$  для торца ( $\alpha=90^\circ$ ), так как малое количество частиц, находящихся во внутренней полости обратного конуса, уже не может образовывать эффективного экранирующего облака.

Рассмотрим результаты экспериментов с точки зрения защиты поверхности модели отраженными частицами.

Введем некоторую величину — защищенность  $q$  — и определим ее как  $q=q_y^+/q_y^-$ . Величина  $q$  показывает эффективность защиты поверхности обратного конуса отраженными частицами. Если считать, что  $q_y^+$  пропорционально числу частиц, попадающих на прямой конус, а  $q_y^-$  — попадающих на обратный конус, то величина  $q_y^+ - q_y^-$  — число частиц, претерпевших столкновение и ушедших на образование защитного облака. Тогда выражение

$$P=1-1/q \quad (2)$$

выражает вероятность столкновения набегающих частиц с отраженными.

На фиг. 3 (точки 1–4) представлены экспериментальные данные, характеризующие зависимость  $q$ , а следовательно, и  $P$  от  $\alpha$  (точки 1 и 2),  $d_m$  (точки 3 и 4) и  $d_s$ , причем  $d_s=23$  мкм соответствуют точки 2 и 4, а  $d_s=109$  мкм — точки 1 и 3.

Из рассмотрения этих кривых (фиг. 3) следует, что увеличение угла  $\alpha$  уменьшает защищенность, причем это влияние сильнее для мелких частиц.

Однако защищенность растет с увеличением размера модели и тем сильнее, чем меньше частиц.

Концентрация твердой фазы линейно увеличивает защищенность ( $q=1+dk$ ), причем чем меньше угол  $\alpha$ , тем более значителен этот эффект; углам  $\alpha$  соответствуют значения  $d$ :  $\alpha=90^\circ$ ,  $d=0$ ;  $\alpha=75^\circ$ ,  $d=8,0$ ;  $\alpha=60^\circ$ ,  $d=16,0$ ;  $\alpha=45^\circ$ ,  $d=24,0$ ;  $\alpha=30^\circ$ ,  $d=31,0$ ;  $\alpha=15^\circ$ ,  $d=40,0$  при  $d_s=109$  мкм.

Величина  $q$  хорошо аппроксимируется следующим выражением

$$q=1+k(a+bd_s)(90-\alpha) \left( \frac{d_m}{d_s \cdot 10^3} \right)^3 \quad (3)$$

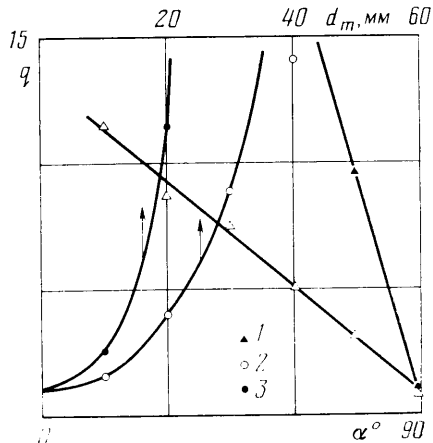
где  $\alpha$  — град,  $d_s$  и  $d_m$  — мм.

Таким образом, приведенные выражения характеризуют эффективность защитного слоя отраженных частиц и вероятность взаимодействия набегающих и отраженных частиц в зависимости от параметров двухфазного потока и характерных размеров модели. Коэффициенты в этих соотношениях будут, очевидно, зависеть от материалов частиц и модели.

Полученные результаты, кроме того что они прямо подтверждают наличие и эффективность защитного экранирующего слоя частиц при обтекании тел двухфазным потоком, имеют существенное прикладное значение. Из их анализа следует, что придание обтекаемой поверхности специальной формы, например формирование на ней обратных конусов, может существенно повысить эрозионную износостойкость за счет образования перед ней защитного слоя частиц. Так, поверхность из использованного здесь алюминиевого сплава Д16 при наличии на ней обратных конусов с  $\alpha=15^\circ$  противостоит эрозии от частиц размером 109 мкм лучше в 12 раз, а от частиц размером 23 мкм — в 48 раз, чем плоская поверхность, расположенная под таким же углом, и соответственно лучше в 6 и 8 раз, чем торцевая поверхность. Материал, изготовленный таким способом, по эрозионной износостойкости значительно превосходит все известные используемые в промышленности, как правило, дефицитные, дорогие и нетехнологичные антиэрозионные материалы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков В. И., Виноградов В. Н., Мартыросян М. М., Михайлычев В. Н. Абразивное изнашивание газопромыслового оборудования. М.: Недра, 1977. 207 с.
2. Матвеев С. К. Математическое описание обтекания тел потоком газозвеси с учетом влияния отраженных частиц. — В кн.: Движение сжимаемой жидкости и неоднородных сред. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982, с. 189–201.



Фиг. 3

3. Сеюкова Л. П. Расчет обтекания сферы запыленным газом с учетом влияния отраженных частиц.— В кн.: Движение сжимаемой жидкости и неоднородных сред. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982, с. 202—211.
4. Баланин Б. А., Лашков В. А. Сопротивление плоского клина в двухфазном потоке.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1982, № 2, с. 177—180.
5. Давыдов Ю. М., Нигматуллин Р. И. Расчет внешнего обтекания затупленных тел гетерогенным потоком газа с каплями или частицами.— Докл. АН СССР, 1981, т. 259, № 1, с. 57—60.
6. Головачев Ю. П., Шмидт А. А. Обтекание затупленного тела сверхзвуковым потоком запыленного газа.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1982, № 3, с. 73—77.
7. Юрьев И. М. О влиянии частиц на сопротивление тел в дисперсном потоке.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1982, № 3, с. 164—167.
8. Алхимов А. П., Нестерович Н. И., Папырин А. Н. Экспериментальное исследование обтекания тел сверхзвуковым двухфазным потоком.— ПМТФ, 1982, № 2, с. 66—74.
9. Баланин Б. А., Тразов Е. П. Экспериментальная установка для исследования высокоскоростных двухфазных течений.— В кн.: Течение вязкого и невязкого газа. Двухфазные жидкости. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981, с. 32—41.
10. Smith D. H. Debris shielding in regions of high edge velocity.— AIAA Journal, 1976, v. 14, № 1, p. 94—96. (Рус. перев.: Смит. Защитный эффект слоя эрозийных осколков для областей с большой осевой составляющей скорости на границе пограничного слоя. Ракетная техника и космонавтика. 1976. т. 14, № 1, с. 116—118).
11. Hove D. T., Smith A. A. Holographic analysis of particle-induced hypersonic bow-shock distortions.— AIAA Journal, 1975, v. 13, № 7, p. 947—949. (Рус. перев.: Хоув. Смит. Голографический анализ возмущений головной ударной волны за счет присутствия частиц в гиперзвуковом потоке. Ракетная техника и космонавтика, 1975, № 7, с. 135—137.)

Ленинград

Поступила в редакцию  
4.V.1983

УДК 533.6.011.55:536.244

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕУГОЛЬНОГО КРЫЛА, ОБТЕКАЕМОГО ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА ПОД БОЛЬШИМИ УГЛАМИ АТАКИ

АФОНИНА Н. Е., ВЛАСОВ А. Ю., ГРОМОВ В. Г.

На основе разработанной численной модели течения вязкого реагирующего газа в ударном слое около наветренной стороны затупленных удлиненных тел проведено исследование теплообмена треугольного крыла с затупленными кромками и различными каталитическими свойствами поверхности, обтекаемого под углами атаки 40 и 60° гиперзвуковым потоком воздуха.

1. Для расчета сверхзвукового обтекания гладких тел при достаточно больших числах Рейнольдса широко используется модель вязкого ударного слоя. В этой модели область ударной волны заменяется поверхностью разрыва газодинамических параметров, а для описания течения в ударном слое применяются различного типа «укороченные» уравнения Навье — Стокса. В настоящей работе пространственное течение в ударном слое на наветренной стороне тела описывается уравнениями, включающими в себя все члены уравнений невязкого течения и пограничного слоя [1] и записанными в системе координат, связанной с поверхностью тела. Используется пятикомпонентная модель диссоциирующего воздуха — O, N, NO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> — с учетом шести основных газофазных реакций [2]. Константы скоростей реакций выбраны на основе рекомендаций [3].

Предполагается, что внутренние степени свободы компонент газа возбуждены равновесно с поступательными степенями свободы. Термодинамические свойства атомарных компонент определяются на основе модели «жестких сфер», молекулы описываются системой жесткий ротатор — гармонический осциллятор. Постоянные этих моделей и термодинамические данные заимствованы из [4].

Коэффициенты вязкости и теплопроводности газовой смеси вычисляются по формулам типа Уилке, диффузионные потоки — из соотношений Стефана — Максвелла. Необходимые для определения характеристик молекулярного переноса потенциалы взаимодействия пар атом — атом взяты из [5], атом — молекула и молекула — молекула — из [6].