

УДК 533.6.011.55

ВЛИЯНИЕ РАЗРУШЕНИЯ И ТОРМОЖЕНИЯ КАПЕЛЬ В УДАРНОМ СЛОЕ НА СКОРОСТЬ ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**¹Бегалиев Р.А., ¹Губанов Д.Е., ²Шматкова М.С.**¹*Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, e-mail: gubanov@phystech.edu;*²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, e-mail: shmatkovamaria@gmail.com*

Рассмотрено влияние разрушения и торможения капель в ударном слое на скорость эрозионного разрушения материалов в окрестности критической точки тела при движении в атмосфере со скоростями 2...4 км/с. Проведены расчёты в зависимости от радиуса носового притупления, скорости набегающего потока, размера капель. В качестве примера рассмотрено эрозионное разрушение при полёте через тропическое облако. Для оценки действия ударного слоя на процесс разрушения и торможения капель использованы результаты, полученные в экспериментах на ударных трубах. Получены зависимость скорости капли у поверхности летательного аппарата от диаметра капли, зависимость отношения скорости капли у поверхности тела к скорости набегающего потока от скорости набегающего потока. Проведена оценка влияния ударного слоя на скорость эрозионного разрушения.

Ключевые слова: гиперзвук, эрозия, капли, ударный слой**EFFECT OF DESTRUCTION AND INHIBITION OF DROPS IN SHOCK LAYER ON THE RATE OF MATERIAL EROSION DESTRUCTION****¹Begaliev R.A., ¹Gubanov D.E., ²Shmatkova M.S.**¹*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, e-mail: gubanov@phystech.edu;*²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: shmatkovamaria@gmail.com*

The effect of drops destruction and inhibition in shock layer on the erosion material destruction rate at the critical point of the body, moving at a rate from 2 to 4 km/second, was considered. Calculations according to the nose blunting radius, approach flow rate, droplet size were done. As an example, the erosion destruction formed while flying through the tropical cloud was considered. Results of experiments on shock tubes were used to estimate the effect of the shock layer on the drops destruction and inhibition process. The dependence of drop rate at the surface of aircraft from drop diameter was obtained. The shock layer effect on the erosion destruction rate was obtained.

Keywords: hypersound, erosion, droplets, shocklayer

Известно, что наличие твердых или жидких частиц в набегающем потоке может приводить к значительному механическому уносу материалов (эрозии) [3]. В [4] показано, что при движении капель в ударном слое они не только тормозятся, но и разрушаются. В связи с этим представляется интересным рассмотреть влияние экранирующего эффекта ударного слоя на скорость эрозионного разрушения материалов.

В решении задачи для удобства была выбрана система координат связанная с ударной волной. Без потери общности, для упрощения расчётов, рассмотрено движение вблизи оси симметрии. В этом случае приближенно можно считать, что капли движутся в потоке с постоянными параметрами в ударном слое толщиной δ [1].

$$V_2 = kV_\infty, \rho_2 = \frac{\rho_\infty}{k}, \delta = 0,8kR.$$

Отношение плотностей газа до и после скачка уплотнения в воздухе при скорости набегающего потока $V_\infty = 2...4$ км/с равно $k = 0.16...0.11$ [1]. Здесь и далее R – радиус носового затупления, ρ – плотность, индекс

«2» относится к параметрам газа за ударной волной, а параметры набегающего потока обозначаются индексом « ∞ ».

В соответствии с экспериментальными данными [4], при расчёте движения капель в ударном слое можно использовать уравнение (1), которое описывает траекторию движения:

$$S = BT - 0.8T^2, \quad (1)$$

где $S = \frac{x}{D_0}$ – безразмерное расстояние;

$B = \frac{V_\infty}{V_r} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_d}}$ – безразмерный коэффициент;

ент; $T = t \frac{V_r}{D_0} \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho_2}}$ – безразмерное время;

t – время нахождения капли в ударном слое; δ – отход ударной волны от тела (на оси симметрии); $V_r = V_\infty(1-k)$ – начальная скорость капли относительно потока; ρ_2 – плотность за ударной волной; ρ_d – плотность воды; D_0 – начальный диаметр капли.

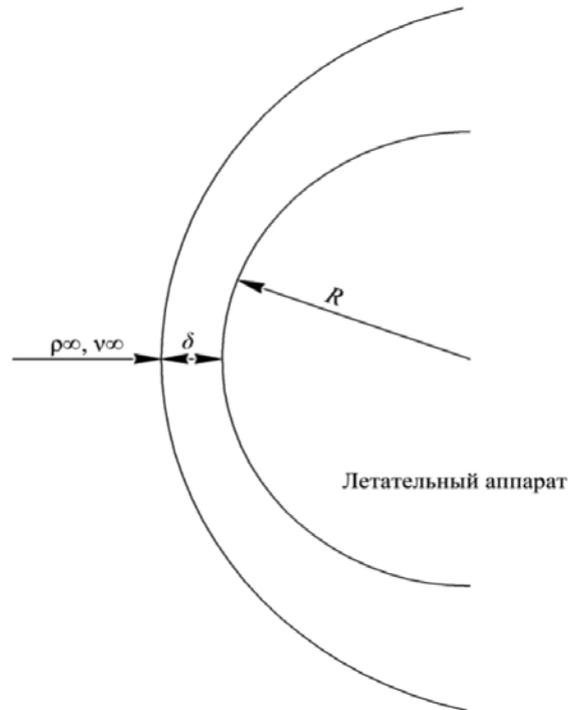


Рис. 1. Схема обтекания

Решая квадратное уравнение (1) можно найти безразмерное время T_{imp} нахождения капли в ударном слое до соударения с поверхностью:

$$\frac{\delta}{D_0} = BT_{imp} - 0,8T_{imp}^2.$$

Для нахождения безразмерной скорости, используя уравнение (1), перейдем к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dS}{dT} = B - 1,6T.$$

При подстановке $T = T_{imp}$ находится безразмерная скорость капли V_{dw} около стенки.

Зависимость скорости капли у поверхности тела от её начального размера приведена на рис. 2. Эти результаты получены при следующих условиях: $R = 0,1$ м; $V_\infty = 3250$ м/с; $\rho_\infty = 1$ г/м³; $T_\infty = 273$ К .

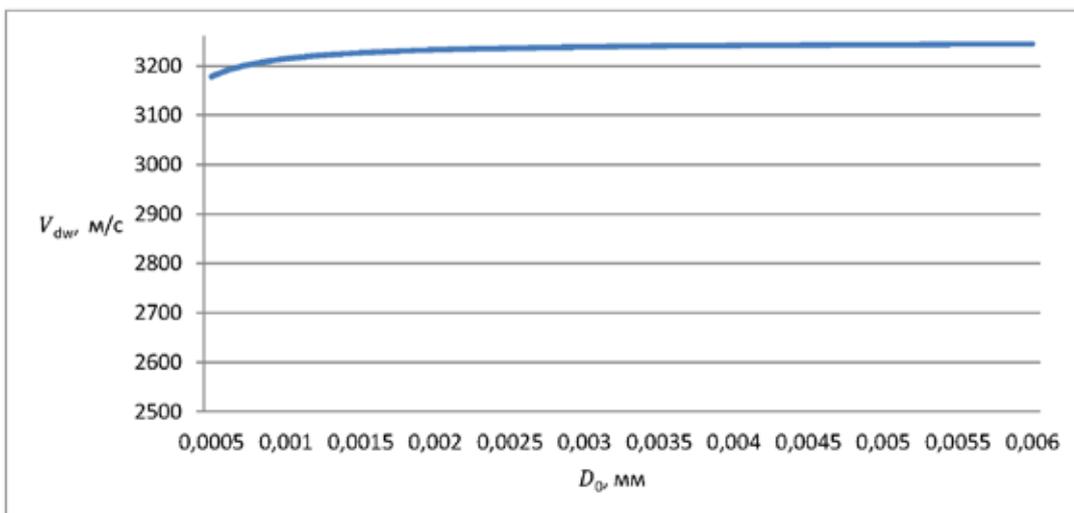


Рис. 2. График зависимости скорости капли у стенки от диаметра ($R = 0,1$ м; $V_\infty = 3250$ м/с; $\rho_\infty = 1$ г/м³; $T_\infty = 273$ К)

Из графика видно, что капли с размером ~ 100 мкм практически не тормозятся в ударном слое. Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Выразим абсолютную скорость у стенки через начальную скорость капли относительно потока после прохождения ударного слоя:

$$V_{dw} = \frac{V_r (B - 1,6T_{imp})}{\left(\rho_d / \rho_2\right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (2)$$

Найдём зависимость V_{dw}/V_∞ для капли диаметром 90 мкм и для разных радиусов притупления ЛА: $R=0,1$ м, 0,5 м, 1 м (рис. 3).

ния времени нахождения капли в ударном слое.

Результаты в ударных трубах показали, что существуют два механизма разрушения капель в ударном слое: срыв частичек капель с их поверхности и объёмное «катастрофическое» дробление. Известно [4], что объёмное разрушение капель воды происходит при числах Вебера $We > 20000$ и безразмерном времени пребывания капли в ударном слое больше критического $T > T_c$, причем $T_c = 45We^{-0,25}$. Число Вебера является критерием подобия, определяющего отношение инерции к поверхностному натяжению.

$$We = \frac{\rho L v^2}{\sigma},$$

где ρ – плотность жидкости; L – характерный размер; v – относительная скорость

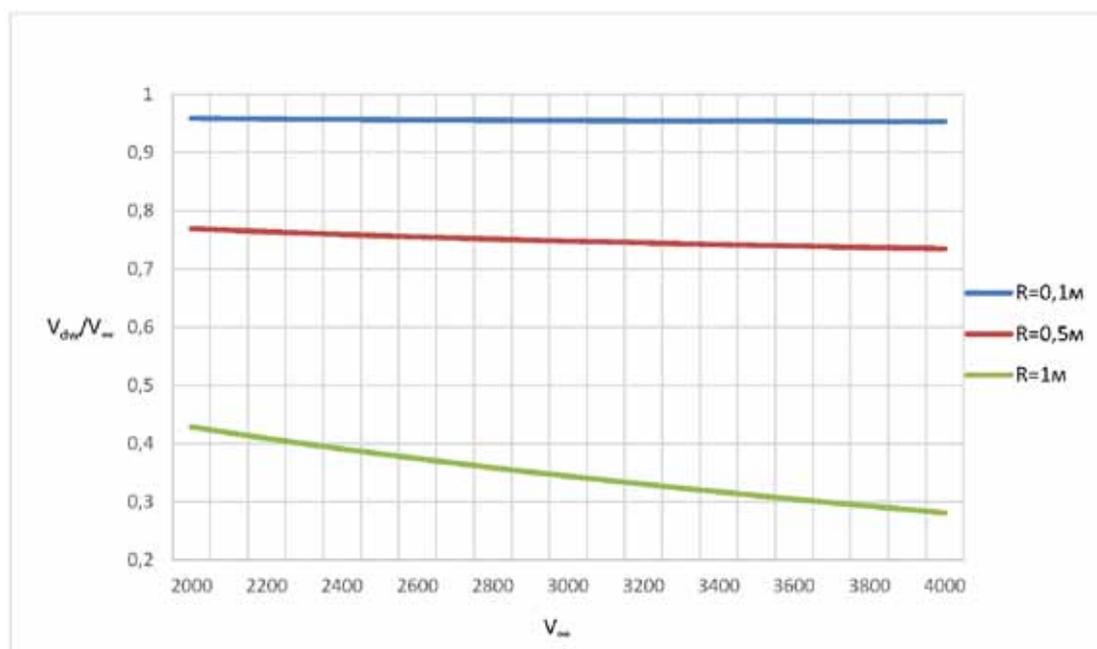


Рис. 3. Зависимость отношения скорости капли у поверхности тела к скорости набегающего потока в зависимости от скорости набегающего потока

Как видно из графика, капли почти не тормозятся в ударном слое при радиусе притупления $R=0,1$ м и весьма сильно теряют скорость при прохождении ударного слоя, возникающего при движении тела с той же скоростью и $R=1$ м. Такой эффект достигается из-за зависимости от радиуса величины δ – отхода ударной волны от тела и, как следствие, увеличе-

движения потока; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Подставляя в уравнения $L = D_0$ и $T = T_{imp}$, находим минимальный размер капли D_c , которая достигает поверхности тела.

Процесс уноса массы за счет срыва с поверхности капли можно описать функцией безразмерного времени [4]:

$$v(T(D_0)) = \frac{m_d(T)}{m_{d0}} = 0,5 \left(1 + \cos \frac{\pi T}{T_s} \right),$$

где m_d – масса капли в данный момент времени T ; m_{d0} – масса капли до вхождения в ударный слой; $T_s = 3,5$ – критическое значение безразмерного времени, при котором происходит полное разрушение капли за счёт срыва с поверхности.

Из условия $T_{imp} = T_s$ можно найти минимальный размер капель, при котором масса частицы не теряется полностью вследствие поверхностного срыва:

$$D_s = \frac{\delta}{S(T_s)}.$$

Рассмотрев два механизма разрушения капель, мы определили минимальный размер капель, которые долетают до поверхности ЛА:

$$D_* = \max(D_c; D_s).$$

До этого момента рассматривалось изменение параметров одной частицы. Для определения скорости эрозионного разрушения

необходимо определить параметры водности и среднемассовой скорости частиц у поверхности тела.

Водность капель в данной точке можно найти, используя соотношение [4]:

$$\frac{W_{dw}}{W_0} = \int_{D_*}^{\infty} v(D) f(D) dD, \quad (4)$$

где W_{dw} – водность у стенки в данной точке (массовая концентрация капель); W_0 – водность в набегающем потоке; $f(D)$ – функция распределения капель по размерам.

Спектр крупных капель (больше 20 мкм) для тропических облаков описывается функцией [2]:

$$f = \frac{4 - \alpha}{x_{\max}^{4-\alpha} - x_{\min}^{4-\alpha}} x^{3-\alpha}, \quad (5)$$

где $x = \frac{D}{D^*}$; D – диаметр частицы; $D^* = 200$ мкм; $D_{\min} = 20$ мкм; $D_{\max} = 3000$ мкм; $\alpha = 3,2$ для тропических облаков с высокой водностью.

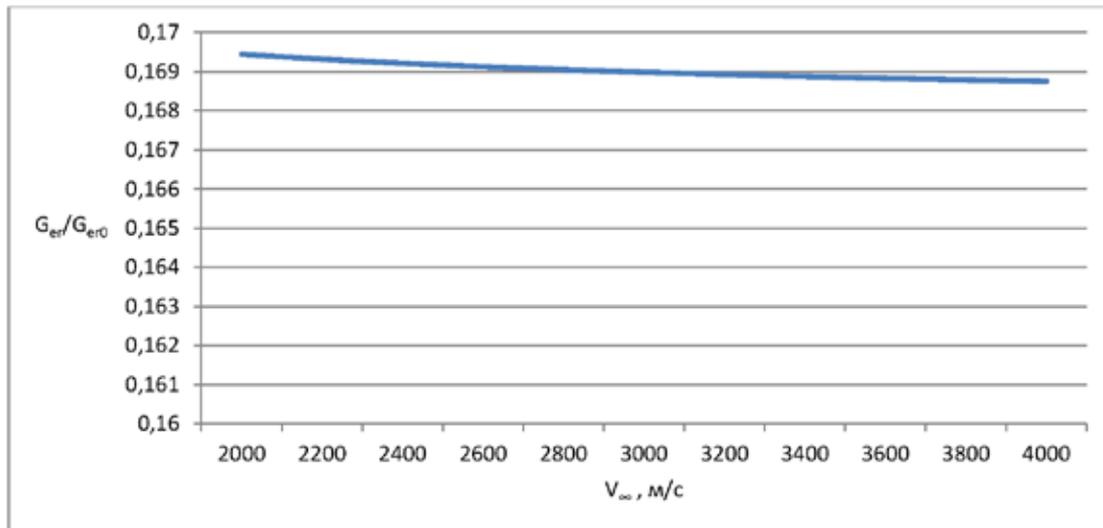


Рис. 4. Зависимость отношения массовых скоростей от скорости набегающего потока ($R=0,3 \text{ м}$, $\rho_{\infty} = 0,41 \text{ кг/м}^3$, $T_{\infty} = 273\text{К}$)

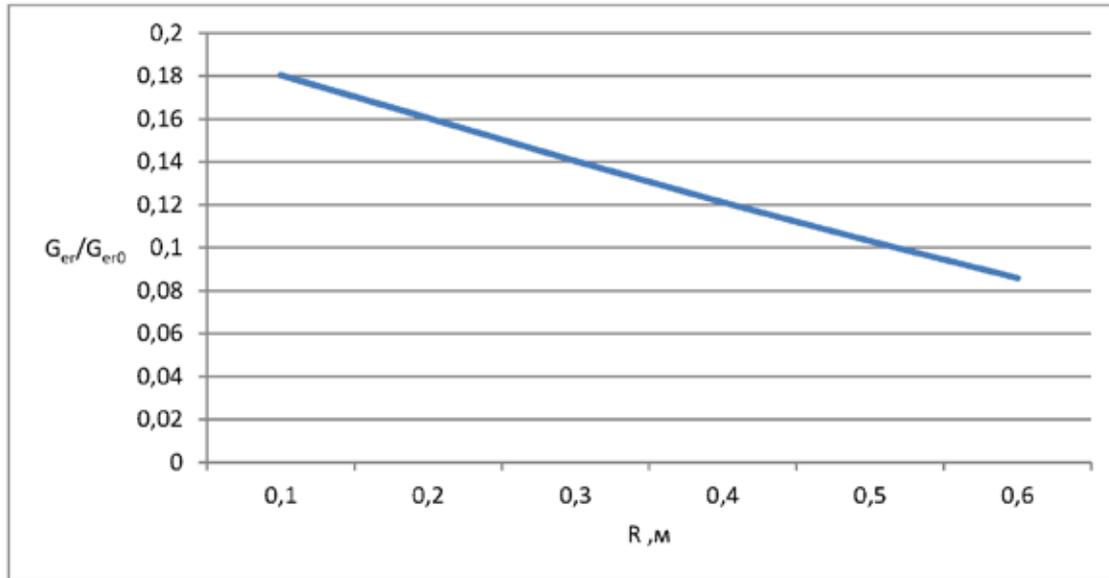


Рис. 5. Зависимость отношения массовых скоростей от радиуса притупления тела ($V_\infty = 3000$ м/с, $\rho_\infty = 0,41$ кг/м³, $T_\infty = 273$ К)

Подставляя (3) и (5) в (4), получаем

$$\frac{W_{dw}}{W_0} = \int_{D_s}^{\infty} 0,5 \frac{4-\alpha}{x_{\max}^{4-\alpha} - x_{\min}^{4-\alpha}} x^{3-\alpha} \left(1 + \cos \frac{\pi T}{T_s} \right) dD.$$

Считая интеграл, находим водность у стенки. Проводя аналогичные вычисления, находится среднемассовая скорость V_{dw} .

Для определения влияния ударного слоя на скорость эрозионного разрушения, необходимо найти массовую скорость уноса материала поверхности ЛА при наличии ударной волны и без неё.

В [3] показано, что массовую скорость эрозионного разрушения можно найти из соотношения:

$$\frac{G_{er}}{G_{dw}} = \frac{\rho_w V_{er}}{W_{dw} V_{dw}} = \frac{V_{dw}^2}{2H_{er}},$$

где H_{er} – эффективная энтальпия эрозионного разрушения, которая является характеристикой материала.

Для определения влияния ударного слоя на процесс уноса массы тела, найдём отношение скоростей G_{er}/G_{er0} :

$$\frac{G_{er}}{G_{er0}} = \frac{W_{dw} V_w^3}{W_\infty V_\infty^3},$$

где G_{er0} – массовая скорость эрозионного разрушения при отсутствии экранирующего

эффекта ударного слоя (скорость соударения равна V_∞ , водность W_∞).

Зависимость G_{er}/G_{er0} при постоянном радиусе притупления ЛА и различной скорости набегающего потока (рис. 4) и это же отношение при постоянной скорости набегающего потока и разных радиусах затупления (рис. 5).

Как следует из этих графиков, отношение массовых скоростей эрозионного разрушения слабо зависит от скорости набегающего потока и сильно зависит от радиуса притупления тела.

Заключение

Изменение скорости и размера капель при прохождении ударного слоя (особенно размера) сильно влияют на процесс эрозионного разрушения. Экранирующее воздействие ударного слоя приводит к снижению скорости эрозионного разрушения в ~ 6 раз при $R = 0,1$ м и в ~ 10 раз при $R = 0,5$ м.

Список литературы

1. Лунев В.В. Течение реальных газов с большими скоростями. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 760 с.
2. Макоско А.А. Математическое моделирование облаков и осадков для задач инженерной экологии. – М.: МИИТ, 2004. – 168 с.
3. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. – М.: Янус-К, 2007. – 392 с.
4. Waldman G.D., Reinecke W.G. Raindrop Breakup in the Shock Layer of a High-Speed Vehicle // AIAA JOURNAL, Vol.10, No. 9, 1972.