

УДК 629.78, 621.384.62, 629.784.017.07.023.26:523.68

ОЦЕНКА СОУДАРЕНИЯ СВЕРХСКОРОСТНОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ С ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЗДУШНОГО СУДНА ПРИ ПОЛЁТАХ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ ТРОПОСФЕРЫ

А.М. ПАШАЕВ*, А.Х. ДЖАНАХМЕДОВ*, А.А. АЛИЕВ*

Рассмотрена возможность сверхскоростных ударов микроразмерных частиц (сферул) космогенного и антропогенного происхождения о наружную поверхность воздушных судов (ВС) при крейсерских полётах в верхних слоях тропосферы. Проанализированы известные механизмы соударения «мишень – снаряд» при скоростях ~1...12 км/с. Проведена приближённая расчётная оценка повреждений внешнего лакокрасочного покрытия и остекления ВС от подобных соударений и их предполагаемые последствия.

Ключевые слова: метеорит, микрометеороиды, сферулы, эрозия, воздушное судно, сверхскоростной удар, лакокрасочное покрытие, остекление, тропосфера, космический мусор.

Введение. В последние десятилетия при расследованиях авиакатастроф, вызванных невыясненным источником критического повреждения конструкции воздушного судна (ВС), среди ряда возможных причин различными экспертами указывается т. н. импактное событие, т. е. соударение самолёта с метеоритом или космическим мусором [1-4].

Вследствие высокой пространственно-временной неоднородности метеоритных потоков имеющиеся оценочные данные весьма противоречивы. Так, У.Кэссиди отмечает, что для проникающего удара по самолёту вполне достаточно кинетической энергии метеорита диаметром 1 дюйм, а вероятность такого попадания составляет одно событие за 59000-77000 лет [1, 2]. Очевидно, что попадание из космоса в нижние слои атмосферы макродисперсных метеоритов представляет собой относительно редкое (единичное) явление. Однако по оценкам Д.Гельфанда и Ч.Хэйли, вероятность столкновения пассажирского самолёта с метеоритом не более ~8 см в диаметре («бейсбольный мяч»), обладающим достаточной кинетической энергией для пробоя топливного бака или фюзеляжа, составляет около 10% [3]. И хотя с момента зарождения коммерческой авиации пока не зафиксировано ни одного достоверного случая столкновения самолёта с метеоритом, существует ненулевая вероятность данного события. Также можно допустить, что для летательных аппаратов с практическим потолком стратосферного уровня (~20 км и более) – сверхзвуковые военные самолёты и т. п. – вероятность импактного события возрастает многократно.

В отличие от единичных крупных объектов, в околоземную атмосферу из космоса со скоростями в десятки километров в секунду постоянно входят неоднородные потоки микро-

* Азербайджанская Национальная академия авиации
E-mail: dzhanakhmedov@yahoo.com

размерных частиц космогенного и антропогенного (индустриально-обломочного) происхождения размером от нескольких до сотен микрон [5]. Большинство из них ещё в термосфере подвергается абляционному измельчению и испарению, но некоторая часть достигает верхних слоёв тропосферы (~9-13 км) в виде оплавленных «сферул»* плотностью ~3,5 г/см³ и скоростью вплоть до ~12 км/с [6].

Целью настоящей работы является предварительная расчётная оценка столкновения сверхскоростных микрочастиц с внешней поверхностью ВС и степени её повреждения.

Поскольку верхние слои тропосферы как раз соответствуют типовой высоте крейсерского полёта магистрального ВС, остекление и внешнее лакокрасочное покрытие (ЛКП) верхних поверхностей планера имеют потенциальный риск получения эрозионных повреждений из-за точечных ударов сверхскоростных (свыше 1 км/с) сферул.

При прямом ударе микрочастицей со скоростью ~10 км/с и выше при любых материалах контактных пар материалы ударника (снаряда) и мишени в точке соударения мгновенно сублимируют в пар за счёт сверхбыстрого нагрева ударной волной сжатия [7, 8].

Актуальных данных об ориентировочной тропосферной концентрации сверхскоростных сферул в открытых источниках не обнаружено. Описаны различные, в т. ч. стандартизированные модели пространственного распределения и оценки плотности микрочастиц на удалении до 1000 км от Земли, но все они фактически относятся к космическому пространству и неприменимы для условий высот крейсерских полётов самолётов [9, 10].

По состоянию на 1980-е годы, приближённые данные об интенсивности в нижних слоях атмосферы потоков частиц микроразмерного диапазона приведены в работе [6], где отмечается, что в течение суток на каждый 1 см² земной поверхности в среднем выпадает 1 частица размером $D_p=4$ мкм (т. е. 10^4 на 1 м²). Указанная обобщённая распределённая плотность потока сферул ($10^4/\text{м}^2$), несомненно, является завышенной, однако постоянный рост числа ежегодно выводимых на орбиту спутников неизбежно ведёт к прогрессирующему увеличению объёма космического мусора и связанной с ним околоземной концентрации сферул [11], в т. ч. в верхних слоях тропосферы. Вероятность столкновений сверхскоростных микрочастиц с поверхностью ВС будет только расти из года в год, и поэтому предположение об их возможной реальной опасности представляется обоснованным.

При определённых обстоятельствах даже единичное повреждение от соударения подобного рода может привести к серьёзным последствиям, в т. ч. к выводу из строя отдельных систем ВС. Более того, за штатный период эксплуатации ЛКП (не менее четырёх лет [12]) и остекления не исключено и значительное накопление ударных кратеров (каверн) вследствие сферульной абляции, что может вызвать деградацию его защитных характеристик, в связи с чем изучение этого процесса представляется актуальным.

Ситуация усугубляется и тем, что размер каверн соизмерим с микронными размерами ударников, вследствие чего подобные точечные повреждения практически не выявляемы при визуальном осмотре.

Другая опасность кавернозных повреждений состоит в том, что они способствуют дальнейшему разрушению поверхности в результате проникновения в них дождя, что приводит к образованию высокоскоростных струй и постепенному разрастанию глубины каверн. Также каверны могут быть причиной последующей диффузии и адсорбции атмосферной влаги в толщу материала. В условиях низких температур адсорбированная вода, замерзая и расширяясь в приповерхностных полостях, вызывает их криогенное растрескивание.

Алгоритм оценочного расчёта

Разрушение полимерной мишени (ЛКП, остекление) при сверхскоростном соударении является сложным процессом, расчёт которого возможен лишь при ряде идеализирую-

* В ряде источников для обозначения сверхскоростных малоразмерных частиц (1 мкм...2 мм) околоземного и космического пространства также применяется термин «микрометеороид». Но поскольку он в основном описывает объекты естественного (космогенного) происхождения, во избежание терминологической путаницы при описании системы «мишень – микроснаряд» по отношению к последнему будем применять термины «сферула» и «ударник» вне зависимости от происхождения.

щих допущений. Материал снаряда считаем гораздо твёрже и плотнее материала мишени (ЛКП, триплекс-остекление).

Соударения со сверхвысокими скоростями о мишень рассмотрим для случаев – *сферического* и *продолговатого (клинообразного)* микроснарядов.

Наружную окрашенную поверхность ВС рассматриваем как двухслойную систему «подложка/ЛКП», в которой ЛКП выступает в роли своего рода противометеороидного защитного экрана. Эмпирический анализ, проведённый Мейденом и Макмилланом [13] позволяет определить оптимальную толщину ЛКП, достаточную для испарения *сферического микроснаряда* после удара:

$$D_c/D_p = 0,45U_p(h_l/D_p)^{2/3} + 0,90 \quad (1)$$

где D_c – диаметр каверны, D_p , U_p – диаметр и скорость ударника соответственно, h – толщина экрана.

Отсюда следует, что толщина слоя ЛКП должна быть не менее:

$$h \geq D_p \left(\frac{\frac{D_c}{D_p} - 0,9}{0,45U_p} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

Соотношение глубины проникания *сферического микроснаряда* P_c к его диаметру D_p составляет [7]:

$$P_c/D_p = (\rho_p k/4)^{1/3} D_p^{0,06} U_p^{2/3} \quad (3)$$

Отсюда следует, что

$$P_c = (\rho_p k/4)^{1/3} D_p^{1,06} U_p^{2/3} \quad (4)$$

При скоростях соударения свыше 5 км/с соотношение глубины каверны к её диаметру равно 0,5, что представляет собой классическую форму кратера [7]. Следовательно, диаметр кратера составляет:

$$D_c = P_c/0,5 = 2P_c = 2(\rho_p k/4)^{1/3} D_p^{1,06} U_p^{2/3} \quad (5)$$

Подставив (5) в (2), после элементарных преобразований получим:

$$h \geq D_p \left(\frac{2(\rho_p k/4)^{1/3} D_p^{0,06} U_p^{2/3} - 0,9}{0,45U_p} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

Значение коэффициента пропорциональности (теплотворной способности) k зависит от свойств материалов снаряда и мишени и лежит в диапазоне 0,5-2 кДж/см³ (0,5...2×10⁹ Дж/м³). Как следует из приведённых выражений, при ударе сферической микрочастицы материал ЛКП имеет значение лишь с точки зрения степени однородности нагрузки, прикладываемой к нижележащей конструкции.

В случае сверхскоростного *продолговатого микроснаряда* в месте соударения со сверхвысокой скоростью (свыше 1 км/с) образуется глубокий туннелеобразный кратер, глубина которого P_c определяется уравнением Лаврентьева – Айхельбергера:

$$P_c/L_p = (\rho_p/\rho_t)^{1/2} \quad (7)$$

где ρ_t – плотность материала мишени; L_p – длина снаряда.

Из уравнения (7) следует, что глубина проникновения P_c не зависит от скорости соударения, а зависит только от длины снаряда L_p и соотношения плотностей материалов снаряда ρ_p и мишени ρ_t . Несмотря на то, что значения реальных параметров будут иметь статистический разброс и потому никакая совокупность фиксированных значений параметров

не может рассматриваться как жёсткое условие пробоя мишени, можно приблизительно оценить критическую длину снаряда-клина, пробивающего слой материала известной толщины h :

$$L_p = H / (\rho_p / \rho_t)^{1/2} \quad (8)$$

Пример расчёта

Взяв в расчёт вышеприведённые усреднённые данные о плотности, размере и скорости сферул ($\rho_p = 3,5 \text{ г/см}^3$, $D_p = 4 \times 10^{-6} \text{ м}$, $U_p = 12 \text{ км/с}$) и приняв, что $k = 2 \times 10^9 \text{ Дж/м}^3$, осуществим расчёт её соударения с ЛКП и остеклением.

Типичная толщина внешней лакокрасочной системы ВС составляет $\sim 100\text{-}120 \text{ мкм}$, из них примерно половина ($\sim 50 \text{ мкм}$) приходится на слой верхнего покрытия [14]. На сегодняшний день среди ЛКМ авиационного назначения типовыми верхними покрытиями являются ЛКМ на полиуретановой основе. При этом средняя плотность отверждённого ЛКМ наружных слоёв составляет $\rho_t \sim 1 \dots 2 \text{ г/см}^3$ [15].

Толщина стекла из материала типа триплекс остекления кабины пилотов составляет около 20 мм .

Необходимая толщина ЛКП (остекления) при ударе *сферического микроснаряда*:

$$h \geq D_p \left(\frac{2(\rho_p k / 4)^{1/3} D_p^{0,06} U_p^{2/3} - 0,9}{0,45 U_p} \right)^2 \approx 3,7 \text{ мкм}$$

Примерная длина *продолговатого микроснаряда*, насквозь пробивающего слой полиуретанового ЛКП средней плотностью $\rho_t = 1,2 \text{ г/см}^3$ и толщиной 120 мкм :

$$L_p = P_c / (\rho_p / \rho_t)^{1/2} = 120 / (3,5 / 1,2)^{1/2} \approx 70 \text{ мкм}$$

Примерная длина продолговатого микроснаряда, насквозь пробивающего стекло кабины пилотов $\rho_t = 2,5 \text{ г/см}^3$ и толщиной 20 мм :

$$L_p = P_c / (\rho_p / \rho_t)^{1/2} = 20 / (3,5 / 2,5)^{1/2} \approx 17 \text{ мм}$$

Результаты исследований и их обсуждение. Из приведённых оценочных расчётов по укрупнённым данным следует, что глубина кратера при сверхскоростном ударе среднего по размеру ударника затрагивает только верхний слой ЛКП и остекления, и даже при повышенных исходных параметрах вызываемое повреждение оказывается ничтожным и не способно влиять на безопасность полёта.

Сквозной пробой ЛКП возможен продолговатым микроснарядом длиной от $\sim 80 \text{ мкм}$. Отсюда следует, что реальную опасность для воздушного судна, недопустимо снижающую надёжность, представляют сверхскоростные частицы миллиразмерных масштабов и выше, вероятность появления которых на высоте крейсерского полёта относительно низка. Тем не менее, как уже отмечалось, плотность потока частиц космического мусора на крейсерских высотах будет возрастать, поэтому конструкторы ВС должны учитывать сверхскоростное соударение с микрочастицами естественного и антропогенного происхождения.

В целях минимизации риска подобных повреждений выходом является утолщение слоя ЛКП и применение ЛКМ повышенной плотности, что увеличивает общую массу ВС и создаёт противоречие с основным принципом по снижению веса пустого самолёта.

Однако тенденция к применению лакокрасочных систем малой толщины (менее 100 мкм) и малой плотности (менее 1 г/см^3) значительно сокращает критическую длину пробойного снаряда и тем самым повышает риск получения сквозных повреждений ЛКП.

В ряде случаев применение многослойных покрытий исключено вследствие функционального предназначения защищаемой поверхности. В антенных обтекателях для обеспечения равномерной радиопрозрачности стенка обтекателя должна иметь очень малые колебания по толщине, и толщина ЛКС не должна превышать установленную соответствующими инструкциями норму.

Тонкослойное ЛКП при сверхскоростном соударении будет заведомо пробито, но при этом микроснаряд прекратит своё существование. В отличие от других внешних воздействий, пробой ЛКП от сверхскоростных бомбардировок микрочастицами зависит лишь от характеристик плотности материалов и является неустранимым деструктивным фактором при любом материале.

Несмотря на то, что данный расчёт носит приближённый характер, поскольку основан только на усреднённых параметрах и не учитывает общий кумулятивный эффект от разрушительного воздействия других факторов окружающей среды (газокапельная и газообразная эрозия от дождя, ветра и пр.), полученные результаты расчёта могут быть использованы при разработке моделей разрушения ЛКП при сверхскоростном ударе.

Заключение. Повреждение внешних лакокрасочных покрытий и остекления воздушного судна в верхних слоях тропосферы при соударении со сферами на сверхвысоких скоростях является практически неустранимым и прогрессирующим явлением.

При среднем диаметре сферул $D_p=4$ мкм глубина образующейся каверны составит $P_c \approx 11$ мкм, а примерная длина продолговатого пробойного микроснаряда составляет ~ 70 мкм для ЛКП и ~ 17 мм для остекления кабины пилотов.

Результаты расчёта могут быть использованы при разработке моделей разрушения ЛКП при сверхскоростном ударе.

REFERENCES

1. National Transportation Safety Board. "Aircraft Accident Report: In-flight Breakup Over the Atlantic Ocean Trans World Airlines Flight 800". NTSB Aircraft Accident Report, 23.08.2000
2. **William A. Cassidy.** Estimated frequency of a meteorite striking an aircraft. Dept. of Geology and Planetary Science, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, December 17, 1997
3. Is it possible that a meteorite could strike a commercial airliner and cause it to explode? Could this possibly have caused the crash of TWA Flight 800? Scientific American. Space. July 15, 1997. Volume 277, Issue 1
4. **Sara C. Nelson.** EgyptAir Flight MS804 Was Brought Down By A Meteor. The Huffington Post. 26/05/2016
5. **Ogurcov M.G., Raspopov O.M.** O vozmozhnom vliyaniy na klimat Zemli potokov mezhplanetnoj i mezhzvezdnoj pyli. Geomagnetizm i aeronomiya, 2011, tom 51, № 2, s. 278-286.
Огурцов М.Г., Распов О.М. О возможном влиянии на климат Земли потоков межпланетной и межзвёздной пыли. Геомагнетизм и аэрономия, 2011, том 51, № 2, с. 278-286.
6. **Martynov D.J.** Kurs obshhej astrofiziki: Ucheb. dlya vuzov. – 4-e izd., pererab. i dop. – М.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988. – 640 s., с. 614-615.
Мартынов Д.Я. Курс общей астрофизики: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с., с. 614-615.
7. **Hellok F. Swift.** Mehanika soudareniya so sverhvysoкими skorostyami // V kn.: Dinamika udara. – М.: Mir, 1985. – 341s.
Хэллок Ф. Свифт. Механика соударения со сверхвысокими скоростями // В кн.: Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 341с.
8. **Pashaev A. M., Janahmadov A. Kh.** Fraktalnye podhody v mehanike razrusheniya. Baku: Apostroff, 2015, 440 s.
Пашаев А.М., Джанахмедов А.Х. Фрактальные подходы в механике разрушения. Баку: Apostroff, 2015, 440 с.
9. GOST 25645.128-85. Veshhestvo meteorное. Model prostranstvennogo raspredeleniya.
ГОСТ 25645.128-85. Вещество метеорное. Модель пространственного распределения.
10. **Mironov V.V., Tolkach M.A.** Modeli meteoroidnoj sredy v okolozemnom kosmicheskom prostranstve i opredelenie plotnosti potoka meteoroidov. Kosmicheskaya tehnika i tehnologii, №2 (17)/2017, s. 49-62
Миронов В.В., Толкач М.А. Модели метеороидной среды в околоземном космическом пространстве и определение плотности потока метеороидов. Космическая техника и технологии, №2 (17)/2017, с. 49-62

11. **Semkin N.D.** Registracija kosmičeskoj pyli iskusstvennogo i estestvennogo proishozhdeniya. Fizika volnovyih processov i radiotexničeskie sistemy. T. 13, №3, 2010, s. 107-124
Сёмкин Н.Д. Регистрация космической пыли искусственного и естественного происхождения. Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т. 13, №3, 2010, с. 107-124
 12. OST 1 00481-83. Pokrytiya lakokrasochnye na osnove poliuretanovyh emalej dlya passazhirskih samolotov (vertolotov). Pokazateli i normy kachestva. 1986, s. 2-3
ОСТ 1 00481-83. Покрyтия лакокрасочные на основе полиуретановых эмалей для пассажирских самолётов (вертолётoв). Показатели и нормы качества. 1986, с. 2-3
 13. **J. Gering.** Teoriya soudareniya s tonkimi mishenyami i ekranami v sopostavlenii s eksperimentalnymi dannymi. V kn.: Vysokoskorostnye udarnye javleniya. Pod redakciej R. Kinslou. Mir, 1973, 532 s.
Дж. Геринг. Теория соударения с тонкими мишенями и экранами в сопоставлении с экспериментальными данными. В кн.: Высококоростные ударные явления. Под редакцией Р. Кинслоу. Мир, 1973, 532 с.
 14. **Pashaev A.M., Janahmadov A.Kh., Aliev A.A.** Opredelenie dolgovechnosti lakokrasochnyh pokrytij s ispolzovaniem tribofaticheskix ispytaniy // Vestnik Azerbajjanskoj inzhenernoj akademii, t. 9, №1, 2018, s. 7-14
Пашаев А.М., Джанахмедов А.Х., Алиев А.А. Определение долговечности лакокрасочных покрытий с использованием трибофатических испытаний // Вестник Азербайджанской инженерной академии, т. 9, №1, 2018, с. 7-14
 15. **Semenova L.V., Malova N.E., Kuznecova V.A., Pozhoga A.A.** Lakokrasochnye materialy i pokrytiya // Aviacionnye materialy i tehnologii. – 2012. – № S. – S. 315-327.
Семенова Л.В., Малова Н.Е., Кузнецова В.А., Пожого А.А. Лакокрасочные материалы и покрытия // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № S. – С. 315-327.
-

TROPOSFERİN ÜST LAYLARINDA UÇUŞLAR ZAMANI HAVA GƏMİSİNİN ÜZ SƏTHİ İLƏ YÜKSƏK SÜRƏTLİ MİKROZƏRRƏCİYİN TOQQUŞMASININ QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ

A.M. PAŞAYEV, Ə.X. CANƏHMƏDOV, Ə.Ə. ƏLİYEV

Troposferin üst laylarında kreyser uçuşları zamanı hava gəmilərinin xarici səthi haqqında kosmogen və antropogen mənşəyinin mikroölçülü hissəciklərinin (sferulların) yüksək sürətli zərbələrinin imkanının ümumi probleminə baxılıb. ~1...12 km/san sürətli "hədəf – mərmı" toqquşmanın məlum mexanizmləri təhlil edilib. Hava gəmilərinin üz lak-boya örtüyünün və şüşələnələrinin belə toqquşmalardan zədələrin ilkin hesabı qiymətləndirilməsi və onların güman edilən nəticələri nəzərdən keçirilib.

Açar sözlər: meteorit, mikrometeoroidlər, sferul, eroziya, hava gəmisı, yüksək sürətli zərbə, lak-boya örtüyü, şüşələnmə, troposfer, kosmik zibil.

EVALUATION OF IMPACT OF SUPER HIGH SPEED MICROPARTICLE ON AIRCRAFT OUTER SURFACE IN THE UPPER LAYERS OF TROPOSPHERE

A.M. PASHAYEV, A.Kh. JANAHMADOV, A.A. ALIEV

The paper examines an impact of micro-sized particles (spherules) of the cosmogenic and anthropogenic origin on the aircraft outer surface of during cruising flights in the upper layers of troposphere. It analyzes the known mechanisms of "projectile-target" collision at speeds of ~1...12 km/s. An approximate estimate is carried out for a damage from such impacts on the exterior paintwork and glazing of aircraft and their intended consequences.

Keywords: meteorite, micrometeoroids, spherules, erosion, aircraft, high speed impact, paintwork, glazing, troposphere, space debris.

Поступило в редакцию: 31.04.2019

После доработки: 11.09.2019

Принято к публикации: 22.09.2019