

УДК 533.5, 533.7

## **Эжекция пылевой частицы с поверхности каверны, заполненной газом\***

**Н.Ю. Быков<sup>1</sup>, В.В. Захаров<sup>2,1</sup>, И.А. Керестень<sup>1</sup>, М.А. Никитин<sup>1</sup>,  
Н.В. Образцов<sup>1</sup>, Д.Н. Тонков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

<sup>2</sup>*Парижская обсерватория, Франция*

E-mail: nbykov2006@yandex.ru, bykov\_nyu@spbstu.ru

Методом прямого статистического моделирования выполнен расчет динамики системы «газ–пылевая частица» применительно к задаче исследования околоядерной газопылевой атмосферы кометы. Рассмотрен газодинамический механизм эжекции пылевых частиц с поверхности кометного ядра, предполагающий наличие под частицами пыли каверн, заполненных продуктами сублимации составляющих ядро льдов. Получены данные о скоростях частиц пыли в зависимости от определяющих параметров. Показано, что скорость эжекции пылевой частицы определяется одним обобщенным параметром.

**Ключевые слова:** газопылевая атмосфера кометы, эжекция пыли, истечение газа в вакуум, метод прямого статистического моделирования.

### **Введение**

Задача об уносе частиц пыли газовым потоком с пористой поверхности имеет непосредственное отношение к исследованиям околоядерной газопылевой атмосферы комет [1 – 3]. Кометы представляют собой малые тела Солнечной системы, состоящие из смеси различных льдов (воды, монооксида и диоксида углерода и др.) и твердых частиц. На большей части траектории своего движения кометы не активны. С приближением к Солнцу под действием солнечного излучения поверхностный слой кометного ядра нагревается, продукты сублимации льдов расширяются в окружающее пространство, унося с ядра частицы пыли. В рассматриваемом контексте пылевая частица — достаточно общее понятие. Под этот термин подпадает любой объект, содержащий включения тугоплавких веществ (сульфидов, силикатов, углеводородов и пр.) и, как правило, некоторой доли льда. Размеры частиц пыли варьируются в диапазоне от субмикронных до метровых. В широких пределах могут варьироваться и другие параметры пылевых частиц (плотность, пористость и пр.).

---

\* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-12-00299, <https://rscf.ru/project/24-12-00299/> при использовании вычислительного ресурса СКЦ СПбПУ Петра Великого.

Несмотря на многолетние исследования комет, механизмы уноса пыли из приповерхностного слоя кометного ядра точно не известны [4–7]. Один из возможных механизмов предполагает наличие каверн (пор, сопоставимых по размеру с частицей и заполненных продуктами сублимации, диффундирующими изнутри ядра) непосредственно под частицами [8]. При превышении давления в каверне силы связи частицы с поверхностью и гравитационного притяжения ядра происходит отрыв частицы. Начальный разгон частицы реализуется в непосредственной близости от поверхности за счет энергии истекающего из каверны газа. Далее частица подхватывается внешним разреженным потоком молекул, испаряемых из приповерхностного слоя. Для моделирования динамики газопылевой атмосферы (постановки граничных условий на поверхности ядра) необходимо знать скорость эжекции, приобретаемую частицей за счет энергии газа в каверне.

Одна из основных целей настоящей работы заключается в получении зависимости скорости частиц от исходных параметров газа и размеров каверны.

### Постановка задачи и метод расчета

На рис. 1 приведена геометрическая схема задачи. Рассматриваются цилиндрическая каверна 1 в поверхностном слое кометного ядра 3 и пылевая частица 2, запирающая в начальный момент каверну в плоскости поверхности. Каверна заполнена углекислым газом ( $\text{CO}_2$ ) и имеет глубину  $H$  и радиус  $R$ . Начальные значения давления  $p_0$  и температуры  $T_0$  газа в каверне известны. Пылевая частица имеет форму бесконечно тонкого диска с радиусом  $R$  и массой  $M$ . Поверхности ядра и пылевой частице соответствует температура  $T_0$ . Область над поверхностью ядра представляет собой вакуум. В момент времени  $t = 0$  с под действием давления газа частица начинает движение. Движение пылевой частицы приводит к увеличению щели  $h$  между частицей и верхней границей каверны. С удалением от среза каверны давление газа на частицу падает, и с некоторого расстояния она движется с постоянной (конечной) скоростью  $U_t$ . В настоящей работе прочие силы, действующие на пылинку в приповерхностном слое кометы (сила гравитации, центробежная сила и пр.), не рассматриваются.

Основными параметрами, описывающими рассматриваемую задачу, являются: род газа (определяющий показатель адиабаты  $\gamma$ ), начальная энергия газа в каверне

$$E_0 = \frac{mc_0^2}{\gamma(\gamma-1)}, \quad (1)$$

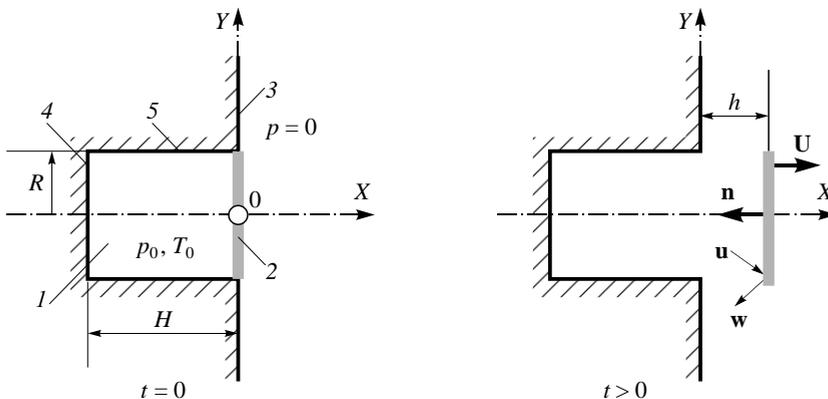


Рис. 1. Геометрическая схема задачи.

1 — каверна, 2 — частица пыли, 3 — поверхность ядра, 4 — дно каверны, 5 — боковая поверхность каверны.

(здесь  $c_0$  — начальная скорость звука), геометрические размеры каверны  $R$  и  $H$ , масса газа в каверне  $m$ , масса пылевой частицы  $M$ . Вместо массы и начальной энергии газа в каверне при заданных геометрических размерах можно использовать начальные давление  $p_0$  и температуру  $T_0$  газа.

В силу особенностей истечения газа в вакуум и нестационарного характера течения, сопровождающегося изменением характерного размера  $h$ , падением концентрации газа в каверне и, соответственно, ростом средней длины свободного пробега, в рассматриваемой области наблюдаются различные режимы течения от сплошносредного до свободномолекулярного. С учетом этого обстоятельства вычисления проводились методом прямого статистического моделирования (DSMC, the direct simulation Monte-Carlo method) [9]. В расчетах использовалась модель сфер переменной твердости VHS (Variable Hard Sphere) с параметрами  $d_{\text{ref}} = 5,62 \cdot 10^{-10}$  м (диаметр, соответствующий температуре  $T_{\text{ref}} = 273$  К),  $\omega = 0,93$  (показатель степени в зависимости вязкости от температуры) [10]. Также учитывался рассматриваемый температурный диапазон и линейная форма — молекула  $\text{CO}_2$  имеет  $\zeta_i = 2$  внутренние (вращательные) степени свободы. Внутренняя энергия полагалась непрерывной функцией температуры. Обмен энергией между поступательными и внутренними степенями свободы описывался моделью Ларсена–Боргнакке. Вероятность такого энергообмена при столкновении молекул полагалась равной единице. На поверхностях каверны (см. 4, 5 на рис. 1), прилегающей поверхности 3 и внутренней/внешней поверхности частицы ставилось условие диффузного отражения молекул с полной аккомодацией энергии.

Движение частицы определялось из закона сохранения импульса:

$$M \Delta U = m_i \sum_{i=1}^N (\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{n} - \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{n}), \quad (2)$$

здесь  $\Delta U$  — изменение скорости пылевой частицы на временном шаге  $\Delta t$ ,  $m_i$  — масса молекулы  $\text{CO}_2$ ,  $\mathbf{n}$  — нормаль к донной части частицы (рис. 1),  $\mathbf{u}$  — вектор скорости частицы, падающей на донную часть молекулы,  $\mathbf{w}$  — вектор скорости отраженной молекулы,  $N$  — число молекул, падающих на пылинку за время  $\Delta t$ . На каждом временном интервале частица передвигалась на расстояние  $\Delta h = \int_t^{t+\Delta t} U dt$ .

При выборе величины начального давления в каверне полагалось, что оно равно силе сцепления в расчете на единицу площади пылевой частицы [11]  $\sigma = G/\sqrt{R}$ , где  $G = 100 \text{ Па} \cdot \text{м}^{0,5}$ , за исключением варианта 5. Так как в расчетах форма частицы полагалась упрощенной — бесконечно тонкий диск, масса частицы задавалась равной массе сферы того же радиуса и плотности:  $\rho_d = 500$  (варианты 1–6, 8), 62,5 (вариант 7), 279 (вариант 9), 707,9 (вариант 10), 559  $\text{кг}/\text{м}^3$  (вариант 11). Варианты расчетов приведены в таблице.

Расчеты выполнялись с использованием схемы столкновений без временного счетчика (NTC, no time counter) [9, 10]. Число модельных частиц в расчетах зависело от глубины каверны и находилось в диапазоне 10–40 млн. Шаг по времени зависел от варианта расчета (размера частицы/каверны) и составлял  $2,5 \cdot 10^{-9}$  с для  $R = 5$  мм и  $2,5 \cdot 10^{-8}$  с для  $R = 5$  и 10 см. Использовалась прямоугольная зонная сетка с числом ячеек в диапазоне от 350000 до 500000.

Таблица

Варианты расчета

Вариант №	R, м	H/R	M, кг	M/m	$\rho_0$ , Па	$T_0$ , К	E, Дж	$E/M/(H/R)^{1/2}$ , Дж/кг	$U_f$ , м/с
1	0,05	1	0,261667	$7,04 \cdot 10^4$	447,21	250	0,43883	1,68	0,199
2	0,05	2	0,261667	$3,52 \cdot 10^4$	447,21	250	0,87766	2,37	0,246
3	0,05	4	0,261667	$1,76 \cdot 10^4$	447,21	250	1,75531	3,35	0,305
4	0,05	1	0,261667	$3,52 \cdot 10^4$	447,21	125	0,43883	1,68	0,22
5	0,05	1	0,261667	$3,52 \cdot 10^4$	894,43	250	0,87766	3,35	0,312
6	0,1	1	2,093333	$9,95 \cdot 10^4$	316,23	250	2,48239	1,19	0,159
7	0,1	1	0,261667	$1,24 \cdot 10^4$	316,23	250	2,48239	9,49	0,61
8	0,005	1	0,000262	$2,22 \cdot 10^4$	1414,2	250	0,00139	5,3	0,428
9	0,005	1	0,000146	$1,24 \cdot 10^4$	1414,2	250	0,00139	9,49	0,623
10	0,005	2	0,00037	$1,57 \cdot 10^4$	1414,2	250	0,00278	5,3	0,422
11	0,005	4	0,000293	$6,22 \cdot 10^3$	1414,2	250	0,00555	9,49	0,61

Результаты расчетов

Давление газа на донную часть пылевой частицы приводит к ее отрыву от каверны, перемещению в область вакуума и увеличению зазора (щели) между верхней частью каверны и частицей (рис. 1). Наличие щели ведет к формированию струйного течения (рис. 2а) с большими градиентами параметров вне каверны. Так как истечение происходит в вакуум, в выходном сечении щели скорость оказывается близка к скорости звука. Увеличение ширины щели приводит к ускорению процесса истечения и опустошению каверны. К некоторому моменту времени давление в каверне падает настолько, что расширяющийся газ уже не оказывает существенного влияния на разгон частицы, скорость пылевой частицы становится практически постоянной, соответственно зависимость расстояния  $h$  от поверхности от времени — линейной (рис. 2б).

Достижение пылевой частицей конечной скорости  $U_f$ , начиная с некоторого момента времени, демонстрируется данными на рис. 3а. Также данные о расчетной конечной скорости частицы представлены в таблице. Скорость частицы, которая предполагает полный переход внутренней энергии газа (1) в кинетическую энергию пылевой частицы, имеет вид:

$$U_{\max} = (2E_0/M)^{1/2}. \tag{3}$$

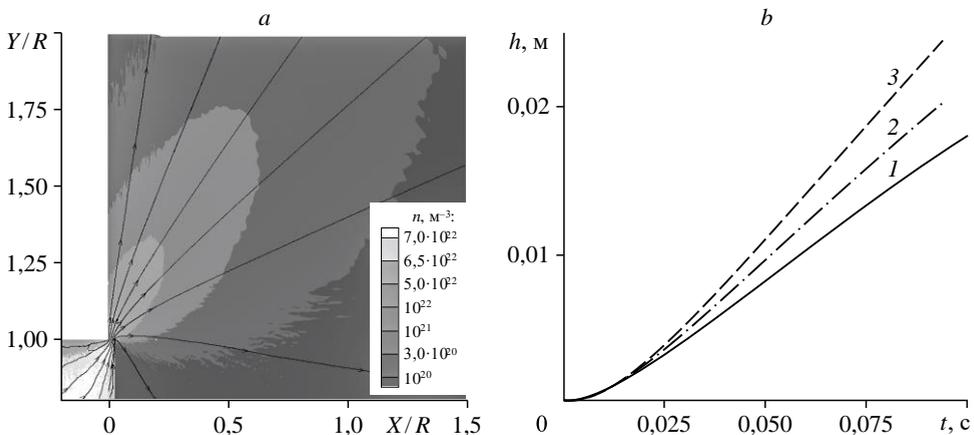


Рис. 2. Поле концентрации  $n$  и линий тока в окрестности щели в момент времени  $15 \cdot 10^{-3}$  с для варианта расчета 1 (а) и зависимость расстояния  $h$  от времени (б).

б: 1 — вариант 1, 2 — вариант 2, 3 — вариант 3.

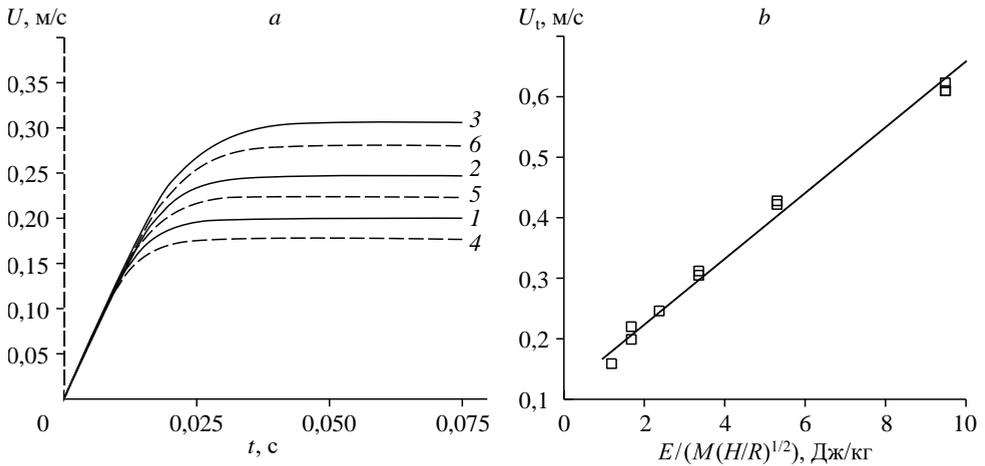


Рис. 3. Зависимости скорости пылевой частицы от времени (а) и конечной скорости от обобщенного параметра (b).

а: 1–3 — варианты расчетов 1–3 соответственно; 4–6 — аппроксимация для вариантов расчетов 1–3 на основе уравнений Сен-Венана – Ванцеля и движения пылевой частицы.

Приведенная оценка использовалась в том числе для определения конечной скорости частицы в работе [8]. Максимальная скорость частицы, согласно (3), оказывается примерно на порядок больше скорости  $U_t$ , получаемой в расчетах (см. таблицу). Существенная доля начальной энергии газа переходит в кинетическую энергию движения самого газа в сверхзвуковой струе. И только незначительная (менее 10 %) часть начальной энергии идет на разгон частицы.

На рис. 3а представлена временная зависимость скорости частицы для вариантов расчета 1–3, различающихся глубиной каверны. Увеличение глубины приводит к росту конечной скорости частицы. Для варианта 1 скорость равна 0,2 м/с, для варианта 2 — 0,25 м/с, для варианта 3 — 0,3 м/с. Данная зависимость является закономерной, так как увеличение глубины каверны при равных давлении и температуре торможения приводит к увеличению массы газа и, соответственно, его полной энергии. На том же рис. 3а приведено решение системы уравнений, состоящей из формулы Сен-Венана – Ванцеля [12] для случая истечения газа из резервуара через щель переменного размера  $h$  и уравнения движения частицы, перемещающейся под действием давления газа, находящегося в каверне. Расхождение результатов между данными, полученными с помощью расчетов DSMC, и решением указанной системы уравнений составляет порядка 15 %. Это расхождение связано прежде всего с наличием в рассматриваемой постановке подвода энергии от стенок каверны и частицы пыли, которые имеют постоянную температуру  $T_0$ , к газу, температура которого в каверне с течением времени уменьшается.

Значения конечной скорости частицы для разных значений начальных давления и температуры каверны, а также для разных геометрических размеров (радиуса) каверны и разных масс пылевой частицы (варианты 4–11) приведены в таблице. Скорость частицы увеличивается с ростом давления, а также с уменьшением массы частицы.

Важным параметром является отношение энергии газа в каверне к массе пылевой частицы —  $E/M$ . Очевидно, что с увеличением значения этого отношения скорость частицы будет возрастать. Однако в расчетах 1 и 3 значение этого параметра отличается примерно в 4 раза за счет большей глубины каверны в варианте 3. Скорость же частицы для варианта 3 оказывается примерно в 1,5 раза больше. Таким образом, при одной и той же

энергии газа необходим учет параметра  $H/R$ . В таблице для всех вариантов расчетов приведены значения параметра  $E/(M \cdot (H/R)^\alpha)$  ( $\alpha = 0,5$ ) и данные о конечной скорости частицы. На рис. 3b изображен соответствующий график зависимости скорости от приведенного параметра. Видно, что с использованием указанного параметра полученные данные могут быть обобщены.

### Заключение

В настоящей работе рассматривается газодинамический механизм эжекции пылевых частиц с поверхности кометного ядра. Он предполагает пористую структуру приповерхностного слоя кометного ядра, когда под частицами пыли находятся каверны, заполненные продуктами сублимации составляющих ядро льдов (углекислый газ, пары воды и пр.). С приближением кометы к Солнцу температура приповерхностного слоя возрастает, увеличивается давление летучих соединений внутри каверн. При достижении давления, равного силе связи частицы с поверхностью, происходит отрыв пылевых частиц. В зависимости от массы частицы, размеров каверны, рода газа, начальных давления и температуры газа пылевая частица на малом расстоянии от поверхности может приобретать скорость до нескольких десятков сантиметров в секунду.

Методом прямого статистического моделирования DSMC выполнен расчет расширения газа из каверны в вакуум и одновременного движения пылевой частицы в широком диапазоне определяющих параметров. В процессе перемещения частицы формируется сверхзвуковая струя, истекающая из увеличивающейся со временем щели между каверной и пылевой частицей.

Установлено, что оценка скорости вброса частицы, предполагающая полный переход внутренней энергии изначально покоящегося газа в каверне в кинетическую энергию частицы, существенно (в несколько раз) завышает скорость пыли. Показано, что скорость эжекции пылевой частицы в рассмотренном диапазоне параметров определяется параметром  $E/(M \cdot (H/R)^{1/2})$ .

### Список литературы

1. Еленин Л. Кометы. Странники Солнечной системы. М.: Эксмо, 2024. 304 с.
2. Thomas P.J., Hicks R.D., Chyba C.E., McKay C.P. Comets and the origin and evolution of life. Springer: Berlin Heidelberg, 2006. 346 p.
3. Jutzi M., Michel P. Collisional heating and compaction of small bodies: Constraints for their origin and evolution // Icarus. 2020. Vol. 350. P. 113867-1–113867-9.
4. Fulle M., Blum J., Rotundi A. How comets work // The Astro-physical J. Letters. 2019. Vol. 879. P. L8-1–L8-3.
5. Fulle M., Blum J., Green S.F., Gundlach B., Herique A., Moreno F., Mottola S., Rotundi A., Snodgrass C. The refractory-to-ice mass ratio in comets // MNRAS 482. 2019. P. 3326–3340.
6. Fulle M., Blum J., Rotundi A., Gundlach B., Guttler C., Zakharov V. How comets work: nucleus erosion versus dehydration // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2020. Vol. 493, No. 3. P. 4039–4044.
7. Wesolowski M., Gronkowski P., Tralle I. Selected mechanisms of matter ejection out of the cometary nuclei // Icarus. 2020. Vol. 338. P. 113546-1–113546-10.
8. Lemos P., Agarwal J., Marshall R., Pfeifer M. Ejection and dynamics of aggregates in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astronomy & Astrophysics. 2024. Vol. 687. P. A289-1–A289-19.
9. Bird G.A. The DSMC method. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. 300 p.
10. Bird G.A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. Oxford: Clarendon Press, 1994. 458 p.
11. Biele J., Vincent J.B., Knollenberg J. Mechanical properties of cometary surfaces // Universe. 2022. Vol. 487, No. 8. 21 p.
12. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.

*Статья поступила в редакцию 21 июля 2024 г.,  
после доработки — 4 сентября 2024 г.,  
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*