

### 03

## Экспериментальное исследование движения малоразмерных моделей через двухфазную среду

© А.Ю. Вараксин<sup>1,2</sup>, М.Э. Ромаш<sup>1</sup>, С.В. Паз<sup>1</sup>, М.В. Протасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Москва, Россия

E-mail: varaksin\_a@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 2 декабря 2024 г.

Принято к публикации 2 декабря 2024 г.

Представлены результаты исследования особенностей движения малоразмерных моделей через двухфазную среду (тонкая струйка воды в неподвижном воздухе). Кратко описан созданный баллистический стенд. Выполнены методические эксперименты, показавшие работоспособность стенда и развитых методик синхронизации пролета модели через измерительный участок и ее фоторегистрации. Получены первые результаты, касающиеся особенностей взаимодействия модели и струйки воды. Сформулированы основные задачи дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** движение тел, взаимодействие модели со стружкой, двухфазные среды, облако капель, синхронизация пролета и фотофиксации.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60072.20111

Проблема взаимодействия двухфазных потоков с обтекаемыми телами возникла в связи с изучением движения различных летательных аппаратов в атмосфере [1–3], содержащей твердые грунтопылевые образования, дождевые капли и т.п. В последнее время большую актуальность приобрело решение задач о пролете малоразмерных летательных аппаратов через двухфазные среды. В работе впервые ставится задача изучения особенностей движения малоразмерных моделей в двухфазной среде (тонкая струйка воды в воздухе). Целью настоящей работы являлось изучение особенностей взаимодействия малоразмерной модели и двухфазной среды.

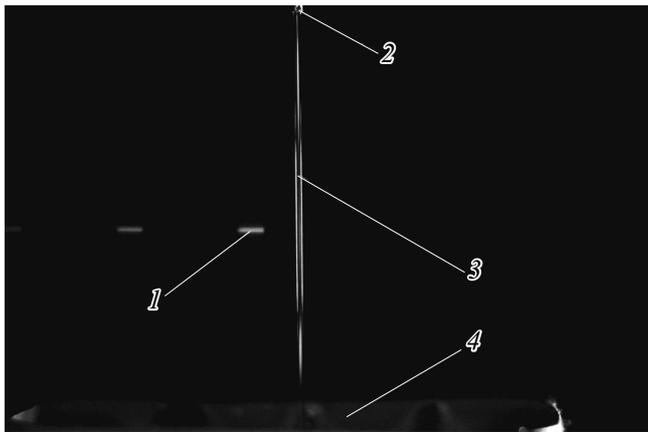
Для изучения особенностей пролета тел через различные двухфазные среды (струйки воды, капли, частицы) был создан баллистический стенд. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Основу стенда составляет выполненная из пластика камера. Метаемая специальным устройством (на рисунке не показано) модель (позиция 1 на рис. 1) во время эксперимента движется внутри канала и улавливается на выходе из него. Основные параметры созданного баллистического стенда: 1) масса метаемой модели (от 0.2 до 1 g); 2) начальная скорость модели (до 270 m/s). В настоящей работе изучалось взаимодействие движущейся модели с тонкой стружкой воды (позиция 3 на рис. 1) диаметром 0.8 mm, создаваемой специально сконструированным для этих целей устройством (позиция 2 на рис. 1). Вода собиралась в емкость (позиция 4 на рис. 1).

Основу диагностического комплекса составляют системы видеофиксации модели, водяной струйки и облака

капель посредством скоростной видеосъемки (Photron Fastcam SA4 и др.) и фотосъемки (Canon EOS 1D X Mark III Body и др.). Было создано несколько оригинальных методик обеспечения синхронизации пролета модели через измерительный участок и ее фотофиксации (видеофиксации). В настоящей работе описываются результаты лишь фоторегистрации модели путем фотосъемки.

Опишем кратко одну из предложенных методик. Приборная реализация включает фотостарт, основанный на использовании инфракрасного (940 nm) оптического прерывателя; светодиодную матрицу CoB (мощность около 350 W), осуществляющую вспышку; камеру фотофиксации. Принцип работы: модель, выпущенная из метателя, с некоторой известной (измеряется в каждом эксперименте) скоростью пересекает линию фотостарта. Это приводит к запуску схемы задержки включения светодиодной вспышки. Через определенное время (оно зависит от параметров схемы задержки) происходит включение вспышки. К этому моменту времени (при известной скорости) модель попадает внутрь камеры фотофиксации.

Таким образом, система позволяет изменять количество вспышек и их скважность. При проведении настоящего исследования количество вспышек было выбрано равным четырем, а скважность составляла 72  $\mu$ s. Длительность вспышки равнялась 18  $\mu$ s. Необходимо пояснить, что в результате четырех вспышек получалась суммарная „картина“, содержащая четыре изображения модели и накладываемые друг на друга интересные нас различные области разлета капель.



**Рис. 1.** Схема эксперимента (размер изображения  $98 \times 65$  mm). 1 — метаемая модель, 2 — устройство формирования струйки, 3 — струйка воды, 4 — емкость для сбора воды.

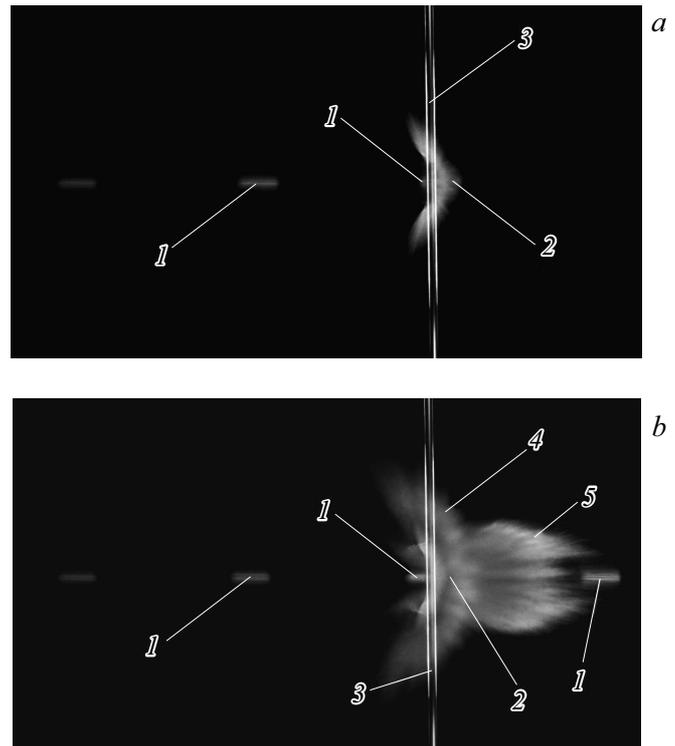
В экспериментах использовались свинцовые модели диаметром  $4.5$  mm с полусферическим торцом. Масса метаемых моделей составляла  $0.55$  g.

На рис. 2 приведены выборочные фотографии взаимодействия моделей со стружкой воды для двух моментов времени:  $10$  и  $82 \mu\text{s}$ . Момент времени отсчитывался с момента касания моделью стружки воды.

Например, на рис. 2, *a* отчетливо видны три положения модели в разные моменты времени. Два первых изображения модели соответствуют двум первым „срабатываниям“ вспышки. Также видно „облако“ капель (их траектории), образовавшееся в процессе разрушения стружки воды. Движущаяся с высокой скоростью ( $260 \pm 10$  m/s) модель разрушает стружку воды на множество капель, которые начинают перемещаться в процессе обмена импульсом. Зафиксированный в экспериментах процесс размытия области разлета капель во времени несет в себе очень важную информацию, так как позволяет производить оценки осевой составляющей их скорости.

На рис. 2, *b* видны уже все четыре положения модели. На этом рисунке также отчетливо видна начальная область разлета капель. Помимо этого можно выделить периферийную и фронтальную области разлета капель. Данные области разлета являются трансформацией начальной области разлета (рис. 2, *a*) за прошедший промежуток времени  $72 \mu\text{s}$ . Эксперименты выявили, что максимальная осевая скорость разлета капель во фронтальной зоне достигала  $220$  m/s. Именно эти капли являлись результатом взаимодействия стружки с приосевой областью модели и получали максимальный импульс. Максимальная осевая скорость разлета капель в периферийной зоне была существенно ниже и достигала лишь  $120$  m/s.

Выполнены первые методические эксперименты, показавшие работоспособность созданного баллистического



**Рис. 2.** Типичные фотографии (размер изображения  $66 \times 37$  mm) взаимодействия модели со стружкой воды в моменты времени  $t = 10$  (*a*) и  $82 \mu\text{s}$  (*b*). 1 — метаемая модель (в различные моменты времени), 2 — область разлета капель, 3 — стружка воды, 4 — периферийная область разлета капель, 5 — фронтальная область разлета капель.

стенда и развитых методик синхронизации пролета модели через измерительный участок и ее фоторегистрации. Получены первые фотографии метаемой модели и создаваемого „облака“ дисперсной фазы.

В заключение сформулируем основные задачи дальнейших исследований: 1) изучение особенностей газодинамического взаимодействия моделей различной формы с различными двухфазными средами (стружки воды, капли, частицы); 2) изучение характеристик капель и частиц (поля концентраций и скоростей) вблизи модели; 3) изучение потери импульса модели при взаимодействии с двухфазными средами; 4) изучение уноса массы модели и др.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00734.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A.V. Sposobin, D.L. Reviznikov, *Fluids*, **6** (11), 406 (2021). DOI: 10.3390/fluids6110406
- [2] С.В. Панфилов, Ю.М. Циркунов, *ЖТФ*, **92** (5), 665 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52370.324-21 [S.V. Panfilov, Y.M. Tsirkunov, *Tech. Phys.*, **68** (Suppl. 3), S579 (2023). DOI: 10.1134/S1063784223900899].
- [3] С.В. Панфилов, Д.А. Романюк, Ю.М. Циркунов, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 4, 64 (2023). DOI: 10.31857/S1024708423600069 [S.V. Panfilov, D.A. Romanyuk, Y.M. Tsirkunov, *Fluid Dyn.*, **58** (4), 569 (2023). DOI: 10.1134/S0015462823600487].