

Теневая визуализация процесса дробления капель воды при течении двухфазного потока в сопле лавала

С.С. Попович¹, А.Г. Здитовец², Ю.А. Виноградов³

НИИ механики, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0001-8904-7283, pss@imec.msu.ru

² ORCID: 0000-0002-4532-1014, zditovets@mail.ru

³ ORCID: 0009-0004-8647-0405, vua40@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования течения воздушно-капельного потока в плоском сверхзвуковом сопле аэродинамической установки непрерывного действия. Капли подавались в поток с помощью форсунок мелкодисперсного распыла, установленных в форкамере. Рабочая часть аэродинамической установки имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами 70х98 мм. Число Маха на срезе сопла изменялось в диапазоне 2,0-3,0 за счет механизма поджатия критического сечения сопла, давление торможения в форкамере – 450-550 кПа, температура торможения – 288-298 К. Начальная концентрация дисперсной (жидкой) фазы в потоке и начальное распределение размеров капель варьировались изменением перепада давления на форсунке. При исследовании динамики дробления капель в критическом сечении сопла использовался теневой лазерный метод SSP (shadow photography), включающий в себя: систему освещения потока на основе двойного импульсного Nd:YAG лазера Beamtech с длиной волны 532 нм, 7-суставную оптическую руку для доставки лазерного излучения, светорассеивающий экран для создания фоновой подсветки со спиртовым раствором люминофора родамина, цифровую ПЗС-камеру с кадровой частотой на полном разрешении до 15 Гц, объектив-микроскоп Infinity K2 DistaMax и синхронизирующий процессор Polis SP-10.0ПС. Получена серия снимков мгновенного состояния воздушно-капельного потока в области критического сечения и в расширяющейся части сопла.

Ключевые слова: аэродинамическая установка, сверхзвуковой поток, теневой метод, дробление капель воды.

1. Введение

В инженерной практике традиционным методом распыла жидкостей является использование форсунок. Различают следующие типы форсунок: струйные, центробежные, пневматические (двухфазные), ударные, механические, акустические и т.п. В материалах коммерческих фирм часто используется собственная терминология (щелевые, вращающиеся, струйные с длинным соплом, ультразвуковые и пр.).

Процесс образования мелкодисперсного распыла довольно хорошо описан в литературе для различных типов форсунок [1-3]. В механических (струйных, центробежных) и пневматических (воздушных, паровых) форсунках дробление истекающей из сопла пелены жидкости происходит под действием гидродинамических сил, вызванных разностью скоростей пелены жидкости и окружающей среды, с образованием отдельных сгустков в виде нитей и их дальнейшим распадом на капли. В ряде случаев имеет место многоплановое вторичное взаимодействие капель с несущим газовым потоком.

Процесс дробления капель жидкости в форсунках обуславливает существование некого распределения капель по размерам, причем спектр размеров капель может оказаться достаточно широким – от долей до сотен микрометров. Как показали многочисленные исследования, при механическом распыле жидкостей наиболее распространенными центробежными форсунками спектр размеров капель близок к логнормальному распределению [4].

Использование свойств газо-капельных потоков с малой массовой концентрацией (до 1%) жидкой фазы может позволить решить задачу снижения аэродинамического нагрева. Известно, что при расширении исходно сжатого газа в канале его термодинамическая температура снижается за счет перехода внутренней энергии газа в кинетическую энергию потока. Возникает вопрос: возможно ли создать в потоке такие условия, при которых температура обтекаемой стенки была бы близка к минимальной температуре в системе – термодинамической температуре потока. Решение данной задачи возможно через использование свойств газочапельных потоков. В случае малой массовой концентрации (до 1%) жидкая фаза практически не влияет на свойства несущего потока, при этом капли могут охлаждаться до термодинамической температуры потока [5-8]. Организовав выпадение охлажденных капель на стенку, возможно добиться снижения температуры поверхности.

В литературе имеются как экспериментальные, так и численные работы, посвященные этому вопросу. В [9, 10] экспериментально показано, что расширение влажного водяного пара в сопле (пар с каплями воды влажностью до 4,5%) приводит к снижению температуры стенки сопла по сравнению со случаем течения перегретого пара. В [9] коэффициент восстановления температуры принимал значения $r = 0,7$ во влажном паре и $r = 0,9-0,8$ в перегретом паре в зависимости от начальной степени перегрева. В [10] показано, что адиабатная температура стенки зависит как от начальной влажности, так и от начальной дисперсности капель. При размерах капель $d > 70$ мкм и начальном влагосодержании $> 2\%$ капли осаждаются на стенке, образуя жидкую пленку с температурой, равной температуре насыщения. В [11-14] численно показано, что наличие даже небольшой концентрации капель (менее 3%) в основном потоке воздуха может привести к значительному снижению адиабатной температуры обтекаемой стенки.

В результате ранее проведенных экспериментальных исследований [7, 15, 16] создана и отлажена система подготовки и впрыска жидкости в сверхзвуковой поток через одно- и многофорсуночную систему в форкамере аэродинамической установки. Проведена серия тепловизионных измерений темпа охлаждения пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушным и воздушно-капельным потоками. Обнаружены эффекты образования ледяных наростов на обтекаемой стенке со снижением температуры на 10-13 °C по сравнению с однофазным потоком. Визуализация картины течения показала преимущественную фокусировку частиц в центральной части канала после прохождения сопла. Опробован метод аэродинамической фокусировки частиц вдоль фронта скака уплотнения при установке перед моделью клина-генератора скачка уплотнения. При варьировании чисел Маха набегающего потока обнаружен режим максимального снижения температуры всей поверхности обтекаемой пластины при числах Маха меньших 2,5, в то время как для больших чисел Маха наблюдалось охлаждение только передней кромки пластины.

Целью настоящей работы является исследование динамики распада капель и гistogramм распределения капель по размерам в критическом сечении и в расширяющейся части сверхзвукового сопла в диапазоне чисел Маха на срезе $M_\infty = 2,0-3,0$.

2. Методика и оборудование экспериментального исследования

Большинство современных методов определения дисперсионного состава взвешенных в газовой фазе частиц, дающих детальную информацию об их размерах, основаны на оптических измерениях. Оптические методы весьма распространены, так как являются бесконтактными (не вносят возмущений в несущую среду и не воздействуют на частицы).

В данной работе использовался панорамный теневой лазерный метод SSP (shadow photography) [17-21], включающий в себя: систему освещения потока на основе двойного импульсного Nd:YAG лазера Beamtech с длиной волны 532 нм, 7-суставную руку для доставки лазерного излучения, светорассеивающий экран для создания фоновой подсветки со спиртовым раствором люминофора родамина, цифровую ПЗС-камеру с кадровой частотой на полном разрешении до 15 Гц, объектив-микроскоп Infinity K2 DistaMax и синхронизирующий процессор Polis SP-10.0ПС. Цифровой анализ теневого изображения капель позволяет определить положение и границу объекта в момент фоновой подсветки лазером (Рис. 1), что важно в задачах термоаэродинамики двухфазного потока.

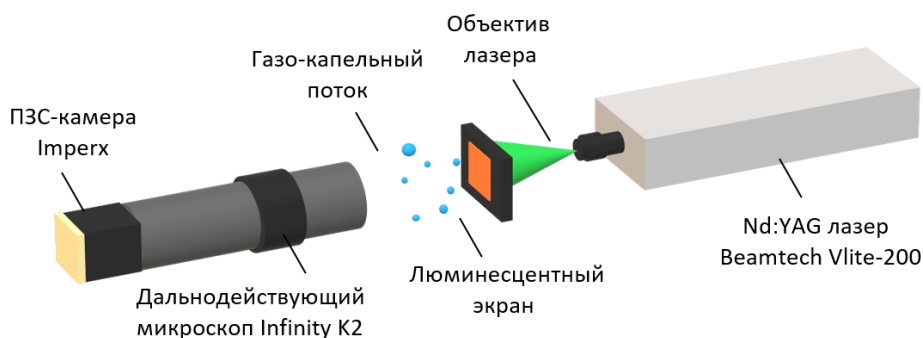


Рис. 1. Методика измерения дисперсности распыла капель воды форсункой.

Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковой аэродинамической установке непрерывного действия АР-2 (рис. 2). Рабочий канал установки имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами 70×98 мм. Сопло образовано двумя плоскими гибкими пластинами, обеспечивающими возможность работы на числах Маха от 2,0 до 3,0 за счет поджатия критического сечения с помощью электропривода.

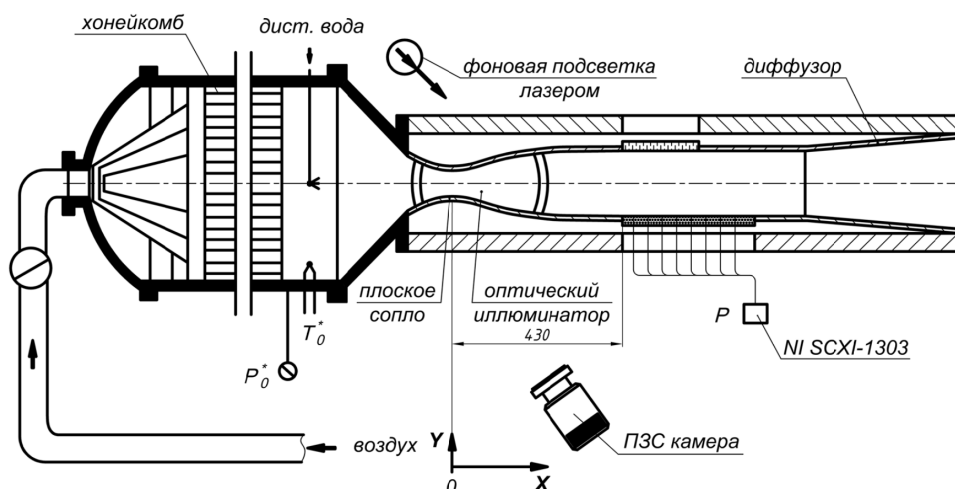


Рис. 2. Схема проведения экспериментального исследования: T_0^* – полная температура набегающего потока, К; P_0^* – полное давление в форкамере, Па; P – статическое давление на стенке, Па.

В центральной части форкамеры на расстоянии 300 мм от начала зоны сужения размещались центробежные форсунки. Средний размер водных капель в создаваемом форсункой спрее (по информации производителя Lechler) – от 60 до 110 мкм при изменении перепада давления от 1000 до 300 кПа, соответственно. Подвод дистиллированной воды к форсунке производился через отдельную систему, состоящую из бака с дистиллированной водой под давлением (давление воды в баке нагнеталось и поддерживалось на заданном уровне пневматической системой), расходомерного устройства и соединительных трубок.

3. Результаты экспериментального исследования

Предварительно была проведена серия измерений распределения водных капель по размерам при распыле воды центробежной форсункой в атмосферу. Проведено сравнение полученных гистограмм с данными производителя форсунки Lechler.

Панорамным теневым методом получена серия снимков мгновенного состояния капель около среза сопла форсунки (Рис. 3, слева) и на расстоянии 30 мм (Рис. 3, справа), а также вплоть до 100 мм от среза для сравнения с данными от производителя. Полученные снимки позволяют оценить угол конуса формируемого факела распыла, преобладающий механизм дробления капель, а набираемая статистика из тысяч кадров – построить гистограммы распределения капель по размерам (Рис. 4). Так, например, при перепаде давления 900 кПа среднезаутеровский диаметр капель при распыле в атмосферу составил около 70 мкм, а по данным производителя – 66 мкм.

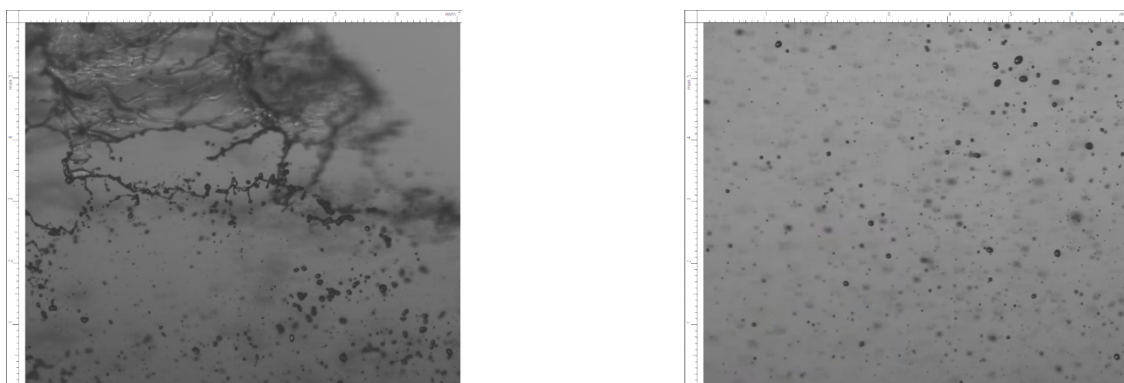


Рис. 3. Дробление воды на капли и определение угла конуса факела распыла (слева), сформированный мелкодисперсный распыл на расстоянии 30 мм от среза форсунки (справа).

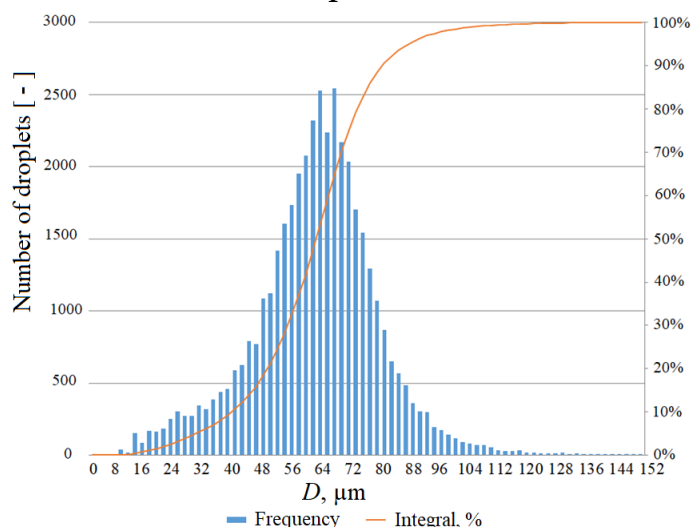


Рис. 4. Гистограмма распределения капель по размерам при распыле воды форсункой в атмосферу при перепаде давления 900 кПа.

Получена серия снимков мгновенного состояния воздушно-капельного потока в области критического сечения и в расширяющейся части сопла (рис. 5). Методом SSP получено нормальное распределение капель по размерам с характерным средним диаметром по Заутеру порядка 20 мкм на срезе сопла (рис. 6, 7). При этом средний диаметр капель и распределение по размерам практически не зависели от перепада давления на форсунке в исследуемом широком диапазоне от 200 до 1300 кПа и изменении числа Маха в диапазоне от 2,0 до 3,0.

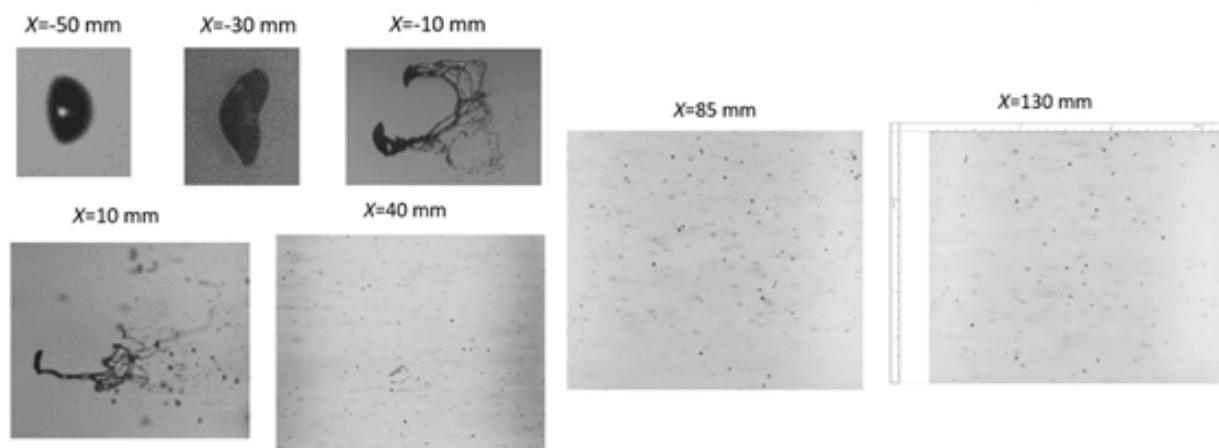


Рис. 5. SSP визуализация процесса дробления капель воды при течении через сопло Лаваля ($X=0$ мм соответствует критическому сечению сопла).

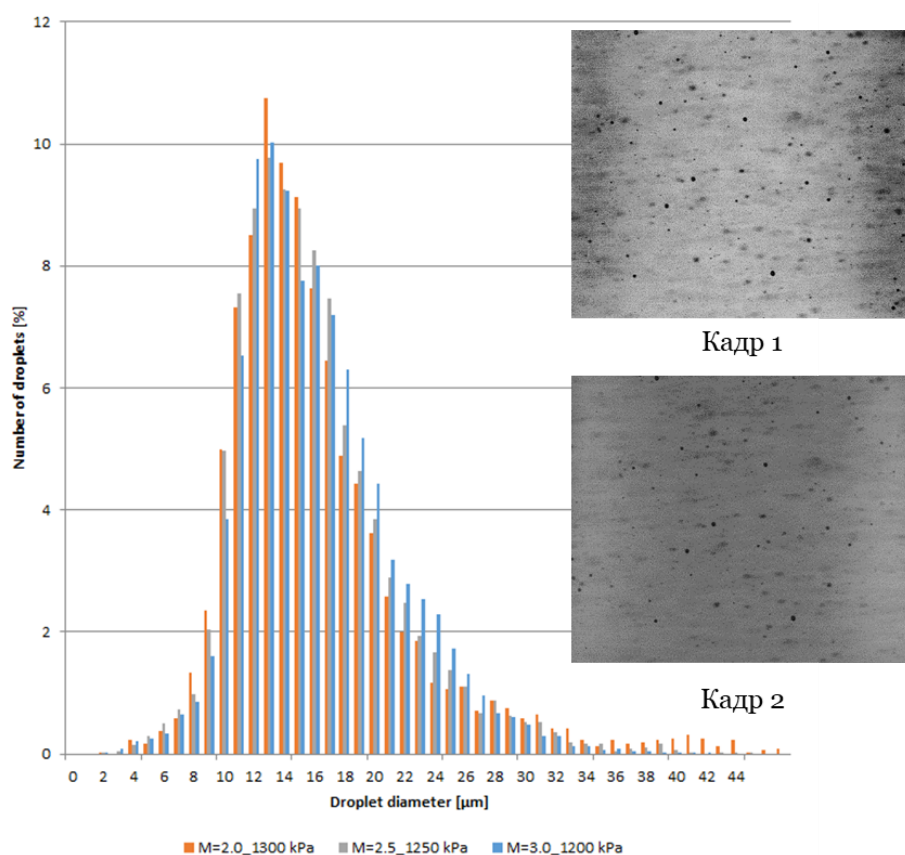


Рис. 6. Распределение капель воды по диаметру в сверхзвуковом потоке при числе Маха M_∞ и перепаде давления на форсунке ΔP : $M_\infty=2.0$, $\Delta P=1300$ кПа; $M_\infty=2.5$, $\Delta P=1250$ кПа; $M_\infty=3.0$, $\Delta P=1200$ кПа.

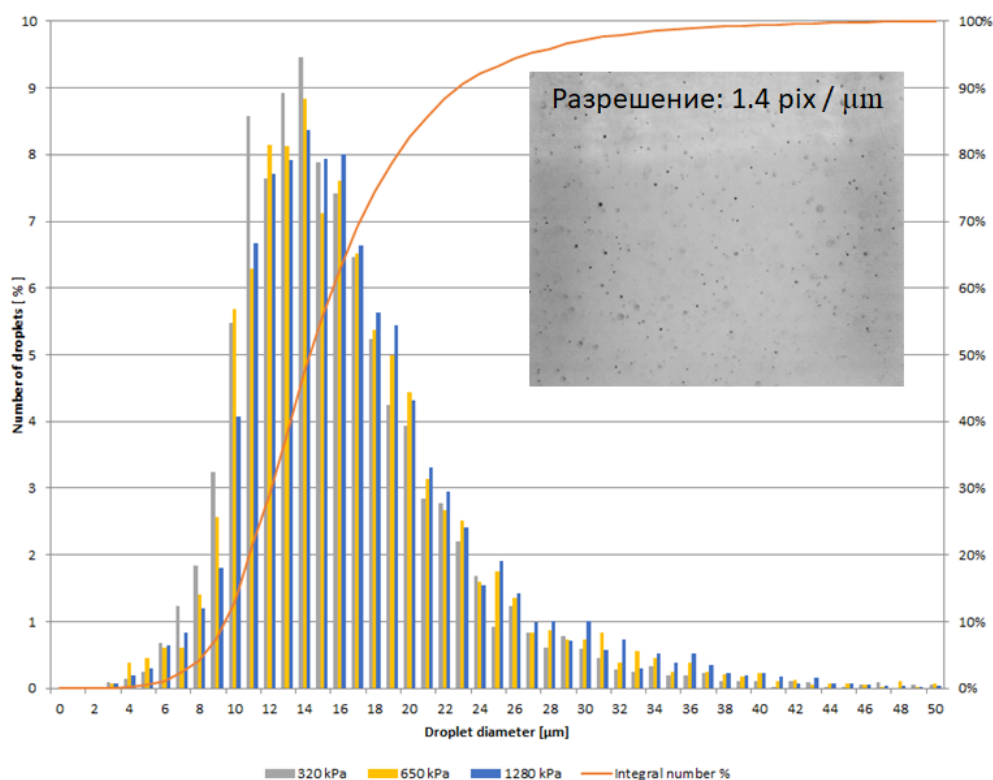


Рис. 7. Сравнение диаметра капель при изменении перепада давления на форсунке ΔP : 320; 650 и 1280 кПа.

4. Заключение

Панорамным теневым методом получена серия снимков мгновенного состояния капль около среза сопла форсунки и на расстоянии до 100 мм от среза. Получено совпадение с данными производителя форсунки в пределах 6% для перепадов давления воды на форсунке до 900 кПа. Проведено исследование динамики течения воздушно-капельного потока в плоском сверхзвуковом сопле. Методом SSP установлен среднезаутеровский диаметр капль на срезе сопла ≈ 20 мкм. Получена серия снимков мгновенного состояния воздушно-капельного потока в области критического сечения и в расширяющейся части сопла. Средний диаметр капль и гистограммы распределения по размерам мало менялись при увеличении перепада давления на форсунке вплоть до 1300 кПа и изменении числа Маха в широком диапазоне от 2.0 до 3.0.

Благодарности

Работа выполняется в рамках госбюджетной тематики МГУ имени М.В. Ломоносова (№AAAA-A19-119012990115-5).

Список обозначений

SCXI – модульная система согласования сигналов измерительных приборов;

SSP – теневой лазерный метод;

ПЗС – прибор с зарядовой связью;

M – число Маха, -;

P – давление, Па;

T – температура, К;

X, Y – координаты, м.

Индексы:

о – параметр торможения;

∞ – параметр в набегающем потоке.

Список литературы

1. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками / Под ред. Кутателадзе С.С. Государственное энергетическое издательство, Ленинград. 1962. 264 с.
2. Droplets and Sprays. Applications for Combustion and Propulsion // Ed. by Basu S., Agarwal A.K., Mukhopadhyay A., Patel C. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018.
3. Пискунов В.Н. Динамика аэрозолей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 296 с.
4. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (Обзор) // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 3. С. 421–455.
5. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 3. С. 455–480.
6. Леонтьев А.И., Осипцов А.Н., Рыбдылова О.Д. Пограничный слой на плоской пластине в сверхзвуковом газокапельном потоке. Влияние испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. №6. С. 910–917.
7. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Медвецкая Н.В. Измерение адиабатной температуры стенки плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушно-капельным потоком // Известия РАН. МЖГ. 2020. №5. С. 130–136.
8. Zditovets A.G., Kiselev N.A., Popovich S.S., Vinogradov U.A. Adiabatic wall temperature in the supersonic flow of moist air with spontaneous condensation // Experimental Thermal and Fluid Science. 2024. V. 150. N. 111057.
9. Жуковский В.С., Мадиевский В.А., Резнирович К.И. О собственной температуре стенки в потоке перенасыщенного пара // Теплофизика высоких температур. 1966. Т. 4. № 3. С. 399–406.
10. Игнатъевская Л.А. Исследование двухфазного пограничного слоя на плоской стенке. Дисс. к.т.н. МЭИ, 1971.
11. Азанов Г.М., Осипцов А.Н. Влияние мелких испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 4. С. 67–76.
12. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Влияние примеси неиспаряющихся капель на структуру течения и температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 3. С. 58–69.
13. Golubkina I.V., Osipsov A.N. Compressible gas-droplet flow and heat transfer behind a condensation shock in an expanding channel // International Journal of Thermal Sciences. 2022. V. 179.
14. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Структура течения и теплообмен в стационарном газокапельном потоке за точкой падения ударной волны на плоскую стенку // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2023. — Т. 58, № 4. — С. 50–63.
15. Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A. Experimental study of the shock wave influence on adiabatic wall temperature in a supersonic air-droplet flow // Journal of Physics: Conference Series. 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/2/022064
16. Popovich S.S., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A. Experimental investigation by the shadow method of water droplets breakup in an adjustable supersonic nozzle // 22nd International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2024), Novosibirsk, 2024. P. 148–149.
17. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Применение метода IPI для исследования газокапельных потоков // 11-я Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», 2011.

18. Gobyzov O., Lozhkin Y., Ryabov M., Markovich D. Experimental study of submillimeter droplets dynamics and breakup in continuous supersonic flow terminated by shock wave // EPJ Web of Conferences. 2016. V. 114. N. 02031.
19. Poplavski S.V., Boiko V.M., Gobyzov O.A., Ryabov M.N., Bilsky A.V. Experimental Study of the Breakup of Microdrops and Drops of Natural Size in Gradient Flows // International Conference on the Methods of Aerophysical Research ICMAR, 2018. AIP Conf. Proc. N. 2027.
20. Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М. История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 1. С. 1-24.
21. Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2023. Т. 13. № 3. С. 125-158.

Shadow Visualization of Water Droplets Breakup Process in a Laval Nozzle Two-Phase Flow

S.S. Popovich¹, A.G. Zditovets², U.A. Vinogradov³

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0001-8904-7283, pss@imec.msu.ru

² ORCID: 0000-0002-4532-1014, zditovets@mail.ru

³ ORCID: 0009-0004-8647-0405, vua40@mail.ru

Abstract

The results of an experimental study of an air-droplet flow in a flat supersonic Laval nozzle of a periodic-acting wind tunnel are presented. The droplets were fed into the flow using fine spray nozzles installed in the pre-chamber. The working part of the wind tunnel has a rectangular cross-section with dimensions of 70x98 mm. The Mach number at the nozzle exit varied in the range 2,0-3,0 due to the mechanism of compression of the nozzle critical section, the total pressure in the pre-chamber was 450-550 kPa, and the total temperature was 288-298 K. The initial concentration of the dispersed (liquid) phase in the flow and the initial droplet size distribution were varied by changing the pressure drop at the spray nozzles. When studying the dynamics of droplet crushing in the critical section of the nozzle, the SSP (shadow photography) laser method was used, which includes: a flow illumination system based on a Beamtech dual-pulse Nd:YAG laser with a wavelength of 532 nm, a 7-joint optical arm for delivering laser radiation, a light-scattering screen for creating a backlight with alcohol solution of rhodamine phosphor, a digital CCD camera with a frame rate at full resolution up to 15 Hz, an Infinity K2 DistaMax microscope lens and the synchronization processor. A series of snapshots of the instantaneous state of the air-droplet flow in the critical section and in the expanding part of the Laval nozzle were obtained.

Keywords: wind tunnel, shadow method, supersonic flow, water breakup process.

References

1. Vitman L.A., Kacnel'son B.D., Paleev I.I. Spraying liquid with nozzles / Ed. by Kutateladze S.S. State Power Agency, Leningrad. 1962. 264 p. [in Russian]
2. Droplets and Sprays. Applications for Combustion and Propulsion // Ed. by Basu S., Agarwal A.K., Mukhopadhyay A., Patel C. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018.
3. Piskunov V.N. Aerosol dynamics. Moscow: FIZMATLIT, 2010. 296 p. [in Russian]
4. Varaksin A.Yu. Fluid dynamics and thermal physics of two-phase flows: Problems and achievements // High Temperature, 2013, V. 51, I. 3, Pp. 377-407.
5. Leontiev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S., Popovich S.S. Temperature Recovery Factor in a Compressible Turbulent Boundary Layer // High Temperature. 2022. Vol. 60. Pp. 409-431.
6. Leont'ev A. I., Osipov A. N., Rybdylova O. D. The boundary layer on a flat plate in a supersonic-gas-droplet flow: Influence of evaporating droplets on the temperature of the adiabatic wall // High Temperature. 2015. V. 53. N. 6. Pp. 866-873.
7. Popovich S.S., Vinogradov Yu A., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Medvetskaya N.V. Measurement of the adiabatic wall temperature of a flat plate in a supersonic air-droplet flow // Fluid Dynamics. 2020. V. 55, N. 5. P. 701-707.
8. Zditovets A.G., Kiselev N.A., Popovich S.S., Vinogradov U.A. Adiabatic wall temperature in the supersonic flow of moist air with spontaneous condensation // Experimental Thermal and Fluid Science. 2024. V. 150. N. 111057.

9. Zhukovskiy V.S., Madiyevskiy V.A., Reznikovich K.I. On the intrinsic temperature of the wall in a flow of supersaturated steam // High Temperature. 1966. V. 4. N. 3. Pp. 399-406.
10. Ignatievskaya L.A. Study of a two-phase boundary layer on a flat wall // Ph. D. thesis, Moscow Power Engineering Institute, 1971.
11. Azanov G.M., Osipov A.N. The effect of fine evaporating droplets on the adiabatic-wall temperature in a compressible two-phase boundary layer // Fluid Dynamics. 2016. V. 51. N. 4. Pp. 498–506.
12. Golubkina I.V., Osipov A.N. The effect of admixture of non-evaporating droplets on the flow structure and adiabatic wall temperature in a compressible two-phase boundary layer // Fluid Dynamics. 2019. V. 54. N. 3. Pp. 349–360.
13. Golubkina I.V., Osipov A.N. Compressible gas-droplet flow and heat transfer behind a condensation shock in an expanding channel // International Journal of Thermal Sciences. 2022. V. 179.
14. Golubkina I.V., Osipov A.N. Steady gas-droplet flow pattern and heat transfer behind the point of incidence of a shock wave on a flat wall // Fluid Dynamics. 2023. V. 58. N. 4. Pp. 555–568.
15. Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A. Experimental study of the shock wave influence on adiabatic wall temperature in a supersonic air-droplet flow // Journal of Physics: Conference Series. 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/2/022064
16. Popovich S.S., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A. Experimental investigation by the shadow method of water droplets breakup in an adjustable supersonic nozzle // 22nd International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2024), Novosibirsk, 2024. P. 148-149.
17. Bilsky A.V., Lozhkin Y.A., Markovich D.M. Application of IPI technique to study spray flows // 11th International conference OMFI, 2011.
18. Gobyrov O.A., Lozhkin Y.A., Ryabov M.N., Markovich D.M. Experimental study of submillimeter droplets dynamics and breakup in continuous supersonic flow terminated by shock wave // EPJ Web of Conferences. 2016. V. 114. N. 02031.
19. Poplavski S.V., Boiko V.M., Gobyrov O.A., Ryabov M.N., Bilsky A.V. Experimental Study of the Breakup of Microdrops and Drops of Natural Size in Gradient Flows // International Conference on the Methods of Aerophysical Research ICMAR, 2018. AIP Conf. Proc. N. 2027.
20. Bilsky A.V., Gobyrov O.A., Markovich D.M. Evolution and recent trends of particle image velocimetry for an aerodynamic experiment (review) // Thermophysics and Aeromechanics. 2020. T. 27. № 1.
21. Znamenskaya I.A. Methods for Panoramic Visualization and Digital Analysis of Thermophysical Flow Fields // Scientific Visualization. 2021. V. 13. N. 3. Pp. 125-158.