

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Натанзон М. С., Коссов О. М. О режимах дробления капель и критериях их существования // ИФЖ.— 1981.— Т. 40, № 1.
2. Гонор А. Л., Ривкин В. Я. Динамика капли // Итоги науки и техники. МЖГ.— М.: ВИНТИ, 1982.— Т. 17.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1987.— Ч. 1.
4. Pileh M., Erdman C. A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop // Intern. J. Multiphase Flow.— 1987.— Т. 13, N 6.
5. Палатник И. Б. Пылеуловители с трубами-коагуляторами Вентури.— Алма-Ата: Наука, 1981.
6. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г., Нигматулин Р. И. Газовая динамика многофазных сред. Ударные и детонационные волны в газозвесах // Итоги науки и техники. МЖГ.— М.: ВИНТИ, 1981.— Т. 16.
7. Стернин Л. Е., Маслов Б. Н., Шрайбер А. А., Подвысоцкий А. М. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами.— М.: Машиностроение, 1980.
8. Дейч М. Е., Филищов Г. А. Газодинамика двухфазных сред.— М.: Энергоиздат, 1981.
9. Шрайбер А. А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники. Компл. и спец. разделы механики.— М.: ВИНТИ, 1988.— Т. 3.
10. Лопарев В. П. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости в условиях постепенного нарастания внешних сил // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1975.— № 3.
11. Боше А. А., Палатник И. Б. Экспериментальное определение критического значения критерия Вебера при дроблении капель в ускоряющихся потоках газа в квазистатическом режиме.— Алма-Ата, 1984.— Деп. в ВИНТИ 21.06.84, № 4245—84.
12. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. Разновидности дробления капель в ударных волнах и их характеристики // ИФЖ.— 1974.— Т. 27, № 1.

г. Киев

Поступила 12/II 1990 г.,
в окончательном варианте — 3/IV 1990 г.

УДК 533.6.071

А. С. Бушмин, А. А. Галенко, Л. М. Дмитриев

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОГО АЗОТА В ФАКЕЛЕ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ФОРСУНКИ В ПОТОК ВОЗДУХА

В системах охлаждения потока в криогенных аэродинамических трубах жидкий азот впрыскивается в поток через струйные форсунки. При использовании этого способа представляет интерес информация о распределении жидкости в потоке, глубине проникновения капель в поток, времени их испарения. Для исследования этих процессов широко применяются оптические методы [1], однако их использование зачастую не обеспечивает достаточную точность измерения.

В настоящей работе приводятся данные об устройстве для измерения количества жидкой фазы азота в двухфазном потоке. Работа устройства основана на отборе пробы жидкости. Конструкция и система измерений выполнены таким образом, что анализ пробы проводится в динамическом режиме. Устройство использовано для изучения процессов распыления и испарения жидкого азота, истекающего из струйной форсунки перпендикулярно потоку в рабочей части криогенной аэродинамической трубы. Погрешность измерения массы жидкого азота, попадающего в приемник устройства, составляет $\pm 5\%$.

Схема устройства и системы измерений приведена на рис. 1 (а: 1 — трасса подачи жидкого азота, 2 — форсунка, 3 — трубка Пито, 4 — насадок для отбора жидкости из газожидкостной смеси, 5 — трасса подвода гелия, 6 — редуктор, 7 — переменное гидравлическое сопротивление, 8 — калибровочная трубка, 9 — мерная шайба, 10 — термомпара; б: 1 — приемная щель насадка, 2 — подача гелия, 3 — смесь гелия и испарившегося азота, 4 — поток капель азота, 5 — струя избыточного гелия, ПП — направление потока воздуха).

Форсунка для подачи жидкого азота выполнена с плавным профилем внутреннего канала и имеет выходной диаметр 1,6 мм. Насадок конструктивно выполнялся в двух вариантах. В первом на входе (щель разме-

уравнения состояния $p = \rho RT/m$ можно записать для первого сопротивления

$$(2) \quad (m/\mu^2)(p_1^2 - p_2^2) = C_1 \text{Re}_1.$$

Здесь константа C_1 зависит от геометрических размеров канала и температуры газа; m — молекулярный вес. Наличие дополнительного регулируемого сопротивления (с другими значениями Re) не меняет вида соотношения (2) в силу постоянства расхода вдоль трассы.

В случае, если C зависит от Re_1 , вид соотношения (2) также сохранится, только C_1 будет зависеть от Re_1 . При экспериментальной проверке (2) величина $p_1^2 - p_2^2$ для чистого газа пропорциональна расходу (т. е. также и Re_1) в пределах погрешности измерений, значит, C_1 может быть только слабой функцией Re_1 .

Перепад давления на мерной шайбе относительно атмосферного p_3 имеет вид $\Delta p_2 = p_2 - p_3 = \xi(\text{Re}_2) \rho_2 u_2^2 / 2$ (ξ — коэффициент гидравлического сопротивления).

С учетом уравнения состояния $p_2 = \rho_2 RT/m$ последнее соотношение запишем как

$$(3) \quad (m/\mu^2) \Delta p_2 p_2 = A f(\text{Re}_2),$$

где константа A зависит только от геометрических параметров и температуры газа, но не от рода газа, давления и расхода.

Так как $\text{Re}_1 \sim \text{Re}_2$ (постоянство расхода), из уравнений (2), (3) следует, что при заданных температуре и геометрических размерах существует функциональная зависимость между величинами $q = (m/\mu^2) \Delta p_2 p_2$ и $r = (m/\mu^2)(p_1^2 - p_2^2)$ (т. е. $q = q(r)$), которая может быть определена предварительными тарировками. Из таковых установлено, что в условиях экспериментов $q \sim r^n$, $n \simeq 1,72$. Тогда

$$(4) \quad m/\mu^2 = B (p_1^2 - p_2^2)^{-n/(n-1)} (\Delta p_2 p_2)^{1/(n-1)}.$$

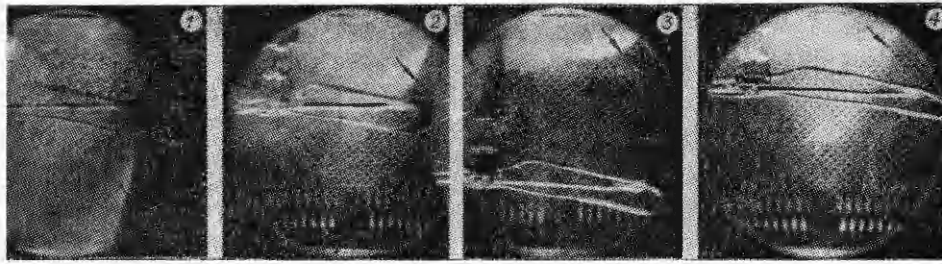
Здесь постоянная B определяется из измерений с использованием чистого гелия (константы в уравнениях (1)–(4) размерные).

Согласно (4) и соотношениям $4(1 - \alpha) + 28\alpha = m$, $\mu = \mu(\alpha)$, определим молярную долю α азота в смеси. Так как вязкости чистых гелия и азота отличаются всего на 10 %, то в первом приближении можно считать вязкость μ равной вязкости гелия, а в последующих итерациях найти μ , используя теоретическую зависимость $\mu(\alpha)$.

Так как $\text{Re}_2 \sim g/\mu$, то на основе (3) и соотношения $r \sim q^{1/n}$ построим тарировочную зависимость для нахождения расхода g : $g/\mu \sim [(m/\mu^2) \Delta p_2 p_2]^{1/n}$. Количество азота в смеси определяется αg . Основная погрешность при нахождении αg связана с погрешностью построения тарировочных зависимостей и оценивается в ± 5 %.

Эксперименты проводились на установке [2], представляющей собой криогенную эжекторную аэродинамическую трубу с размерами рабочей части $200 \times 200 \times 740$ мм. Условия экспериментов: статическое давление в потоке $p_\infty = (1,2 \div 1,5) \cdot 10^5$ Па, число Маха потока $M = 0,1 \div 0,6$, температура $T_\infty = 250 \div 130$ К, давление в трассе подачи жидкого азота в исследуемую форсунку $p_4 = (3 \div 9) \cdot 10^5$ Па, температура жидкого азота $T_4 = 80$ К. Скорость истечения струи из форсунки определялась из соотношения $u_4 = k \sqrt{2(p_4 - p_\infty)/\rho_4}$, где расходный коэффициент $k = 0,9$ [3].

Измерялись давление p_0 и температура T_0 в форкамере трубы, статическое давление p_∞ в потоке (трубка Пито в зоне приемного отверстия насадка), атмосферное — p_3 , азота — p_4 , перепады давлений $(p_1 - p_2)$ и $\Delta p_2 = p_2 - p_3$. Одновременно с измерениями проводилось фотографирование струи в рассеянном свете от искрового источника (длительность вспышки $\sim 10^{-3}$ с).



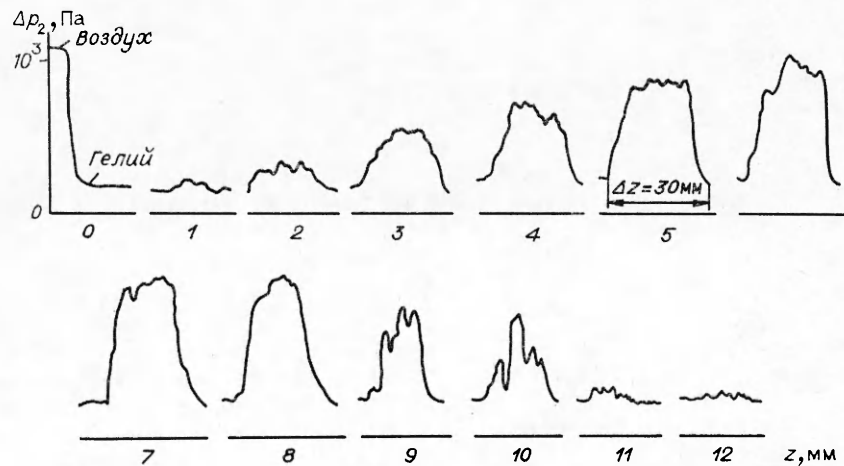
Р и с. 2

На рис. 2 приводятся фотографии струи жидкого азота при $u_4 = 40$ м/с, $T_\infty = 145$ К. Скоростной напор для кадров 1—4 соответствует $1,1 \cdot 10^3$, $7,2 \cdot 10^3$, $2,3 \cdot 10^4$, $3 \cdot 10^4$ Н/м² (стрелкой обозначена внешняя граница струи). От скоростного напора зависит не только глубина проникновения струи в поток, но и расположение зон разрушения и распыления струи.

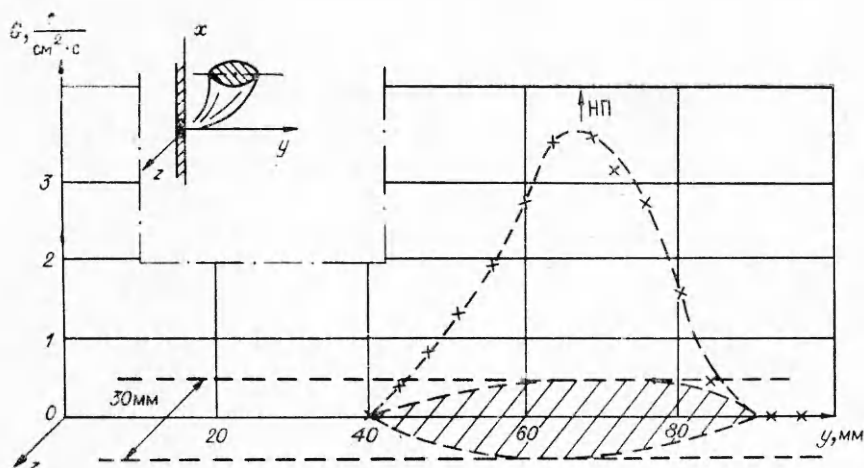
На рис. 3 показана последовательность осциллограмм при измерении Δp_2 , полученная при сканировании насадком вдоль направления z (координаты на рис. 4) области распыления струи при различных значениях координаты y (шаг $\Delta y = 4$ мм, $y_1 = 44$ мм, $y_{12} = 88$ мм) на расстоянии $x = 65$ мм от оси форсунки. Так как измерения проведены при $p_1 \approx \text{const}$ (с точностью 5%), то величина измерения Δp_2 грубо пропорциональна количеству жидкого азота, попадающего в щель насадка.

На рис. 4 представлено распределение потока жидкой фазы G по сечению, перпендикулярному направлению набегающего потока газа, при $u_\infty = 77$ м/с, $u_4 = 45$ м/с, $p_\infty = 1,4 \cdot 10^5$ Па, $T_\infty = 145$ К. На графике крестиками обозначены средние значения потока массы жидкого азота, полученные по измерениям Δp_2 на различных расстояниях z , штриховой линией, ограничивающей заштрихованную площадь, — границы струи по координате z . Полный расход азота через форсунку равнялся 60 г/с, измеренный расход в сечении (заштриховано) 25 г/с. Область распыления имеет форму чечевицы, у одной из вершин ее координата y совпадает с координатой, в которой происходит разрушение струи (определяется по фотографии), вторая вершина совпадает с визуальной передней (по потоку) границей факела струи.

По передней границе факела можно оценить верхнюю границу размеров образующихся капель из сравнения наблюдаемых траекторий с расчетными. Последние определяются интегрированием уравнений движения капли в потоке с учетом ее теплообмена с потоком. Зависимость



Р и с. 3



Р и с. 4

числа Нуссельта от Re и числа Прандтля Pr принята в виде [4] $Nu = 2 + 0,393 Re^{0,55} Pr^{0,36}$.

Интегрирование проводилось численно на ЭВМ, при этом параметры потока принимались постоянными. Это допущение может быть обосновано только для крайней (передней) траектории и более грубо для траекторий на внешней поверхности факела. Для капель, находящихся во внутренних областях факела, необходимо учитывать изменение скорости потока и температуры газа из-за испарения жидкого азота. Оцененные таким образом максимальные значения размеров капель d подчиняются эмпирическому соотношению $d/D = (3,7 \pm 0,4) We^{-1/2}$ в диапазоне изменения чисел Вебера $We = \rho_{\infty} u_{\infty}^2 D / \sigma = 2,5 \cdot 10^3 \div 1,2 \cdot 10^4$ (D — диаметр форсунки, σ — поверхностное натяжение).

Интересно отметить такой результат экспериментов: если в форкамере форсунки дополнительно турбулизировать поток жидкости (помещая в него перпендикулярно оси проволоку диаметром 1 мм), то в измеренных распределениях в факеле в центре появляется провал. По-видимому, это обусловлено тем, что при разрушении струи существенную роль играет турбулентность, которая приводит к разрушению прежде всего наиболее турбулизированных объемов жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валеев В. С., Кудрявцев А. В., Кузнецов Г. М. Экспериментальное исследование распыливания жидкости, подаваемой струйной форсункой перпендикулярно направлению потока воздуха // Изв. вузов. Авиац. техника. — 1984. — № 3.
2. Агуреев Ю. А., Буров Ю. В., Бушмин А. С., Тарасов С. И. Автоматизированная система сбора и обработки информации установки с криогенными температурами // ИФЖ. — 1988. — № 5, вып. 54.
3. Бородин В. А., Дитятин Ю. Ф., Клячко Л. А. Распыливание жидкостей. — М.: Машиностроение, 1967.
4. Кутателадзе С. С., Боришанский Б. М. Справочник по теплопередаче. — Л.; М.: Госэнергоиздат, 1959.

г. Жуковский

Поступила 20/X 1989 г.,
в окончательном варианте — 14/II 1990 г.