

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Г. Н. АБРАМОВИЧ, В. И. БАКУЛЕВ, И. С. МАКАРОВ, Б. Г. ХУДЕНКО

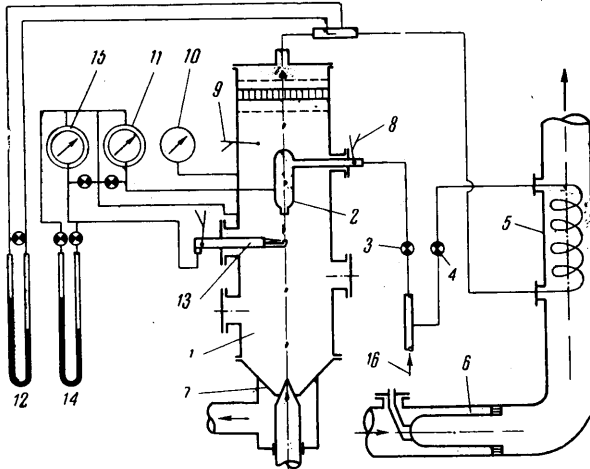
(Москва)

Приводятся результаты экспериментального исследования осесимметричной струи жидкого азота, распространяющейся при закритическом давлении (реального газа), в среде газообразного азота и дается сопоставление экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов.

Качественно струя жидкого азота, распространяющаяся при закритическом давлении, в среде газообразного азота ведет себя как газовая струя, смещение в пограничном слое струи идет без образования капель, так как у жидкости в таком процессе при закритическом давлении отсутствует поверхностное натяжение.

Результаты теоретического расчета, полученные на основании работ [2,3], удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования осесимметричной струи жидкого азота при закритическом давлении проводились на специальной установке, схема которой представлена на фиг. 1. Основная часть установки — барокамера высокого давления 1. Ее рабочая часть выполнялась в двух вариантах. Первый вариант со смотровыми окнами служил для визуальных наблюдений и оптических исследований при помощи прибора ИАБ-451, второй — для измерения полей скорости



Фиг. 1. Схема установки

стного напора и температуры по сечениям струи. Рабочая часть имела внутренний диаметр 116 мм.

Исследовалась струя жидкого азота (критическое давление  $p_* = 34.6 \text{ атм}$ , критическая температура  $T_* = 126^\circ \text{ К}$ ), истекающая в барокамеру из профилированного сопла 2 в среду газообразного азота. Жидкий азот подавался с температурой 80—90° К, подогретый — с температурой 250—420° К. Рабочее давление в барокамере  $p_1$  поддерживалось примерно равным 40 атм.

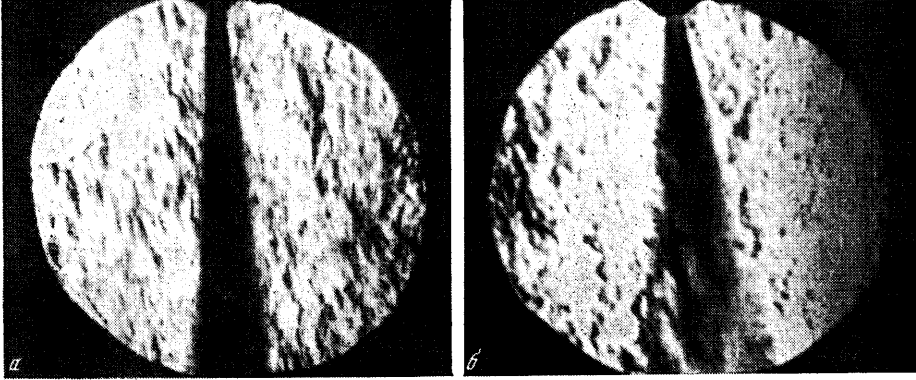
Жидкий азот из баллона емкостью 0.4 м<sup>3</sup> выдавливался сжатым воздухом. В установку азот подавался по двум системам. Холодный азот через дроссельный кран 3 поступал непосредственно к сменному соплу установки. Во время эксперимента менялись сопла с диаметрами 5,0; 3,0; 1, 12 мм. По другой системе холодный азот через дроссельный кран 4 поступал к подогревателю 5, работающему от камеры сгорания 6, а затем подогретый азот подавался в установку. Постоянное давление в установке поддерживается при помощи регулируемого сопла 7.

Во время экспериментов измерялись:  $T_0$  — температура холодного азота термометром 8 перед входом в сопло;  $T_2$  — температура подогретого азота термометром 9 на входе в рабочую часть;  $P_2$  — давление (манометром 10) в рабочей части установки;  $\Delta p_3$  — перепад давлений (дифференциальным манометром 11) на участке сопло — рабочая часть;  $h_m$  — скоростной напор в мерном участке подогретого азота (дифференциальным манометром 12). Скоростной напор и температура по профилю струи измерялись комбинированным насадком 13 в нескольких фиксированных сечениях. Показания термометры комбинированного насадка выводились на потенциометр ПП-1. Показания трубки скоростного напора выводились на два дифференциальных манометра: ртутный 14 — для измерения малых перепадов давления и манометр 15, заключенный в кожух, для измерения больших перепадов давления.

Определение ширины зоны смещения струи проводилось при помощи прибора ИАБ-451 на первом варианте рабочей части барокамеры. На фиг. 2 приведены теневые фотографии струи холодного азота и газовой струи с очень небольшой разностью температур (практически изотермической струи). На этих фотографиях отчетливо

видна наружная граница струи. Внутренняя граница струи холодного азота не просматривается из-за большого изменения плотности в пограничном слое струи.

На втором варианте барокамеры проводились измерения скоростного напора и температуры в различных сечениях струи при изменении скорости истечения струи в диапазоне  $u_0 = 20-50$  м/сек. Числа Рейнольдса  $R$  по выходному сечению сопла менялись в пределах  $R = (1.7-5.8) \cdot 10^6$ . Скорость спутного потока не превышала



Фиг. 2. Теневые фотографии струй: а — струя холодного азота, ( $T_0 = 80^\circ \text{ К}$ ,  $T_2 = 363^\circ \text{ К}$ ), б — изотермическая струя

0.3 м/сек, так что струю во всех случаях можно считать затопленной. Эксперименты проводились в двух диапазонах температуры подогретого азота  $T_2 = (250-300)^\circ \text{ К}$  и  $T_2 = 370-420^\circ \text{ К}$ .

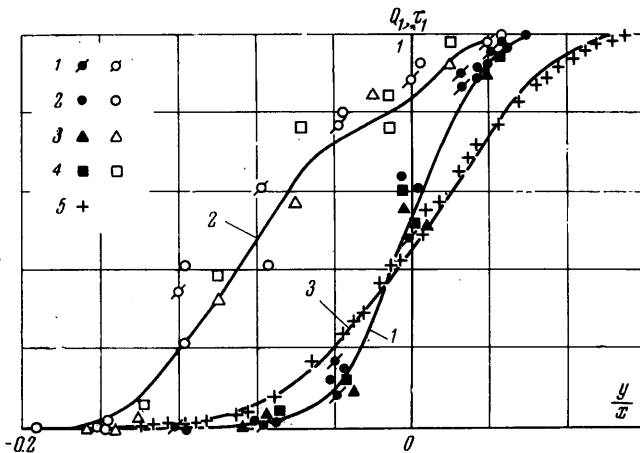
Опытные данные обрабатывались для начального участка в виде зависимостей

$$Q_1 = \frac{\langle \rho u \rangle \langle u \rangle}{\rho_0 u_0^2} = f\left(\frac{y}{x}\right), \quad \tau_1 = \frac{\langle \Delta T \rangle}{\Delta T_0} = \frac{\langle T \rangle - T_2}{T_0 - T_2} = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

а для основного участка в виде

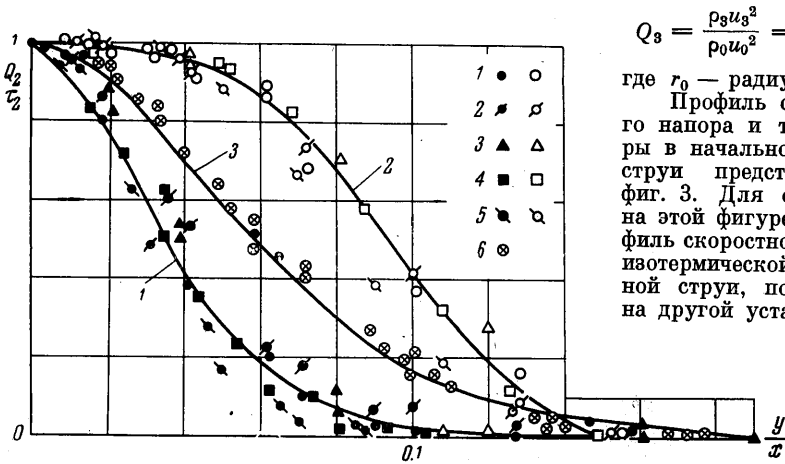
$$Q_2 = \frac{\langle \rho u \rangle \langle u \rangle}{\rho_3 u_3^2} = f\left(\frac{y}{x}\right) \text{ и } \tau_2 = \frac{\langle \Delta T \rangle}{\Delta T_3} = \frac{\langle T \rangle - T_2}{T_3 - T_2} = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

Здесь  $x, y$  — координаты точки измерения,  $\rho_0 u_0^2$  — скоростной напор на выходе из сопла,  $\rho_3 u_3^2$  — скоростной напор на оси струи,  $\langle \rho u \rangle \langle u \rangle$  — осредненный скоростной напор в точке измерения,  $\langle T \rangle$  осредненная температура в точке измерения,  $\rho_0$  — плотность азота на выходе из сопла,  $\rho_2$  — плотность окружающей среды.



Фиг. 3. Профили скоростного напора и температуры в начальном участке струи. Экспериментальные точки (темные — для  $Q_1$ , светлые — для  $\tau_1$ ) определялись для значений  $(\alpha/r_0, T_2^\circ \text{ К}, \theta_2, r_0 \text{ мм})$ : 1 (10, 417, 20.8, 2.5); 2 (16.7, 360, 18.8, 1.5); 3 (16.7, 378, 16, 1.5); 4 (16.7, 440, 6.9, 1.5); 5 (-1, 25). Теоретические кривые: 1 ( $Q_1, \alpha = 0.0905$ ); 2 ( $\tau_1, \alpha = 0.093$ ); 3 ( $Q_1, \alpha = 0.1$ )

Изменение скоростного напора по оси струи представлено в следующем виде:

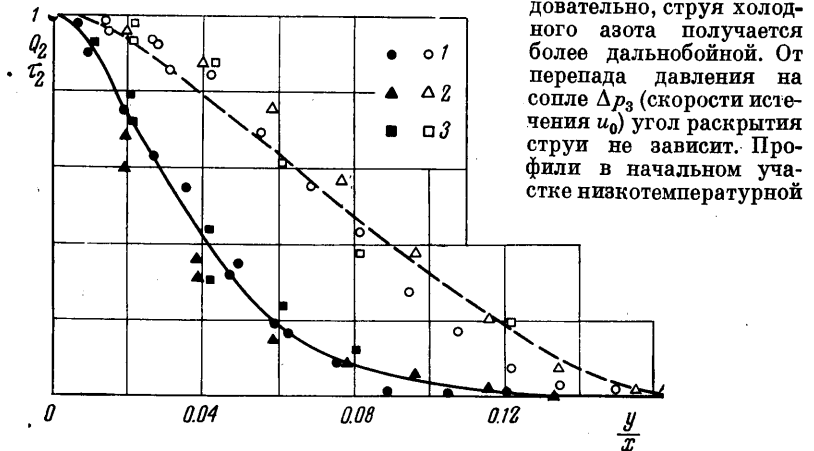


$$Q_2 = \frac{\rho_2 u_2^3}{\rho_0 u_0^3} = f\left(\frac{x}{r_0}\right)$$

где  $r_0$  — радиус сопла.  
Профиль скоростного напора и температуры в начальном участке струи представлен на фиг. 3. Для сравнения на этой фигуре дан профиль скоростного напора изотермической воздушной струи, полученный на другой установке.

Фиг. 4. Профили скоростного напора и температуры в основном участке струи. Экспериментальные точки (темные — для  $Q_2$ , светлые — для  $\tau_2$ ) определялись для значений параметров ( $x/r_0$ ,  $T_2$ , °К,  $\theta_2$ ,  $r_0$  мм): 1 (49.4, 250, 8.09, 1.5); 2 (49.4, 230, 7.37, 1.5); 3 (44.6, 282, 7.84, 0.56); 4 (34.7, 287, 10.4, 1.5); 5 (34.7, 404, 15.1, 1.5); 6 (—, —, 1, 1.5). Теоретические кривые: 1 ( $Q_2$ ,  $\alpha = 0.07$ ); 2 ( $\tau_2$ ,  $\alpha = 0.0665$ ), 3 ( $Q_2$ ,  $\alpha = 0.08$ )

Из сравнения экспериментальных данных в начальном участке струи видно, что границы у низкотемпературной струи азота в начальном участке остаются прямолинейными, как и у изотермической струи. Ширина пограничного слоя у струи холодного азота меньше, чем у изотермической, и, следовательно, струя холодного азота получается более дальнобойной. От перепада давления на сопле  $\Delta p_3$  (скорости истечения  $u_0$ ) угол раскрытия струи не зависит. Профили в начальном участке низкотемпературной



Фиг. 5. Профили скоростного напора и температуры в основном участке струи. Экспериментальные точки (темные — для  $Q_2$ , светлые — для  $\tau_2$ ) определялись для значений параметров ( $x/r_0$ ,  $T_2$ , °К,  $\theta_2$ ,  $r_0$  мм): 1 (132,389, 1.97, 0.56); 2 (92.8, 408, 3.2, 0.56); 3 (66.7, 200, 2.71, 1.5). Теоретические кривые: 1 ( $Q_2$ ,  $\alpha = 0.067$ ), 2 ( $\tau_2$ ,  $\alpha = 0.064$ )

струи получились аффинными и более наполненными по сравнению с профилями изотермической струи.

Исходя из экспериментальных данных (фиг. 2, 3), можно сказать, что струя жидкого азота при закритическом давлении качественно ведет себя, как обычная газовая струя [1]. Или, иначе говоря, у струи жидкого азота (температура ниже критической), распространяющейся в среде газообразного азота (температура выше критической), при закритическом давлении смешение в неизотермическом пограничном слое идет без образования капель.

На экспериментальные профили скоростного напора и температуры, полученные в начальном участке струи, нанесены соответствующие теоретические профили, рассчитанные по уравнениям, приведенным в работе [2].

Сопоставление экспериментальных данных с теоретическим профилем производилось при помощи экспериментальной константы  $a$ . Турбулентное число Прандтля выбиралось так, чтобы значения коэффициента  $a$  минимально отличались для динамических и тепловых профилей. Для изотермической струи было принято  $a = 0.1$ . Для струи холодного азота при числе Прандтля  $P = 0.87$  значение коэффициента  $a$  для профиля скоростного напора ( $a = 0.0905$ ) мало отличается от его значения для профиля температуры ( $a = 0.093$ ). При этих значениях коэффициентов теоретические профили удовлетворительно согласуются с экспериментальными.

Полученные значения экспериментального коэффициента  $a$  свидетельствуют, что его величина не остается постоянной, хотя и меняется незначительно, при достаточно большом изменении относительной плотности  $\theta_2 = \rho_0 / \rho_2$  от  $\theta_2 = 1$  — для изотермической струи до  $\theta_2 = 20$  — для струи холодного азота.

Профили скоростного напора и температуры, полученные в основном участке, представлены на фиг. 4 и 5. Для сравнения на фиг. 4 дан профиль скоростного напора изотермической струи.



Фиг. 6 Изменение скоростного напора по оси струи. Экспериментальные точки: 1 ( $\rho_2/\rho_0 = 1$ ,  $T_2 = 280^\circ \text{K}$ ); 2 (0.061,  $280^\circ$ ); 3 (0.039,  $400^\circ$ ). Теоретические кривые: 1 ( $\rho_2/\rho_0 = 0.061$ ,  $a = 0.072$ ); 2 (0.039, 0.072); 3 (1, 0.083)

Как видно из этих данных, профили скоростного напора в основном участке струи не обнаруживают аффинности.

По опытным данным, в основном участке струю холодного азота можно разбить примерно на две области: первая — с отношением плотностей  $\theta_2 = 15 - 8$  (в начале основного участка — фиг. 4) и вторая — с отношением плотностей  $\theta_2 = 4 - 2$  (на большом удалении от сопла — фиг. 5). Профили в первой области получаются более наполненными по сравнению с соответствующими профилями во второй области. Особенно отчетливо это видно по профилям температуры.

Границы основного участка струи холодного азота получаются криволинейными, а относительная ширина струи холодного азота — меньше, чем у изотермической струи.

На основании проведенных экспериментов можно считать, что профили по длине струи меняются и на большом удалении от сопла приближаются к профилям изотермической струи. Относительная ширина по мере удаления от среза сопла увеличивается и также приближается к ее значению для изотермической струи.

Таким образом, опытные данные подтверждают принятое при теоретических исследованиях предположение о деформации профилей по длине струи реального газа [2,3].

Для основного участка осесимметричной струи холодного азота на основании работы [3] были рассчитаны профили скоростного напора и температуры. Сравнение теоретических профилей с экспериментальными производится (так же как и в начальном участке) при помощи экспериментального коэффициента  $a$ . При турбулентном числе Прандтля  $P = 0.87$  коэффициент  $a$  для динамических профилей ( $a = 0.07 - 0.067$ ) и тепловых ( $a = 0.0665 - 0.064$ ) получается примерно одинаковым. Теоретические профили при данном значении  $a$  удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Для изотермической струи было принято  $a = 0.08$ . Как и в начальном участке, коэффициент  $a$  не получается одинаковым, но меняется в относительно небольшом диапазоне при существенном изменении начального отношения плотностей. Такое изменение коэффициента  $a$  в зависимости от начального подогрева  $T_0 / T_2$  можно объяснить тем, что приближенная теория, приведенная в работах [2,3] не учитывает всех факторов, влияющих на деформацию профилей и положение границ струи.

На фиг. 6 представлены относительные скоростные напоры по длине основного участка струи холодного азота для различных температур окружающей среды  $T_2$ , а также относительный скоростной напор изотермической струи. Как видно, струя холодного азота получается более дальнобойной, чем изотермическая струя. Чем меньше относительный подогрев  $T_0 / T_2$ , тем меньше угол раскрытия струи и струя

получается более дальнобойной. От скорости истечения  $u_0$ , угол раскрытия не зависит.

Из сравнения опытных данных с результатами теоретических расчетов, полученных на основании работы [3], видно, что значения экспериментального коэффициента  $a$  для скоростного напора на оси струи мало отличаются от соответствующего коэффициента, полученного по профилю струи. Теоретическое падение скоростного напора по оси струи удовлетворительно согласуется с экспериментальным.

Поступило 10 III 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А б р а м о в и ч Г. Н. Теория турбулентных струй. Физматгиз, 1960.
2. Б а к у л е в В. И. Расчет турбулентной затопленной струи реального газа. Инж. ж., 1961, т. 1, № 3.
3. Б а к у л е в В. И. Расчет основного участка турбулентной осесимметричной струи реального газа. Инж.- физ. ж., 1964, т. 7, № 10.

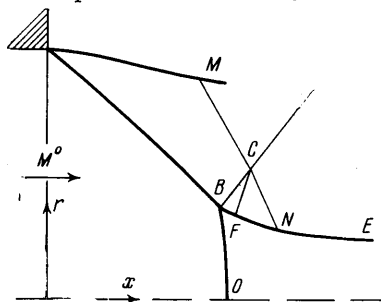
### РАСЧЕТ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУИ, ВЫТЕКАЮЩЕЙ ИЗ СОПЛА, ПРИ ДАВЛЕНИИ В СТРУЕ, МЕНЬШЕМ ДАВЛЕНИЯ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Э. А. АШРАТОВ

(Москва)

Рассматривается задача об истечении сверхзвуковой осесимметричной струи из сопла при давлении в струе, меньшем давления в окружающей среде. Предложен метод расчета с учетом дозвукового течения за центральным скачком, образующимся вблизи оси симметрии. Сравнение результатов расчета на ЭЦВМ с экспериментальными данными указывает на эффективность данного метода для определения структуры начального участка такой осесимметричной струи.

1. **Постановка задачи.** Истечение сверхзвуковой осесимметричной струи из сопла при давлении в струе, меньшем давления в окружающем пространстве, сопровождается образованием скачка уплотнения на срезе сопла. Вблизи оси симметрии этот падающий скачок уплотнения в некоторой точке  $B$  (фиг. 1) обычно разветвляется на два скачка: на отраженный скачок  $BC$ , идущий в направлении от оси симметрии к свободной границе, и на центральный скачок  $BO$ , за которым течение становится дозвуковым. Линия  $BE$  является линией тангенциального разрыва.



Фиг. 1. Схема течения при отражении скачка на уплотнения от оси симметрии с образованием центрального скачка

В работе [1] для расчета течения за центральным скачком было предложено использовать метод интегральных соотношений. Для случая одной полосы (линейное приближение) была выведена система обыкновенных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями, описывающая решение задачи. Однако численных результатов получено не было. [Экспериментальные данные, приведенные в этой работе, показывают, что изменение параметров поперек линий тока

в дозвуковой области течения должно быть незначительным. Основываясь на этом факте, можно существенно упростить задачу, если предположить, что дозвуковой поток за центральным скачком является одномерным. Такое решение, которое по существу можно назвать нулевым приближением метода интегральных соотношений, изложено ниже.

2. **Метод расчета.** Введем цилиндрическую систему координат с началом, расположенным на срезе сопла. Будем считать, что координаты  $x$ ,  $r$  отнесены к радиусу выходного сечения сопла. Исходными параметрами являются число Маха равномерного потока на выходе из сопла  $M^0$ , отношение удельных теплоемкостей  $\gamma$  и отношение статического давления в окружающей среде к статическому давлению невозмущенного потока  $p/p^0$ . По этим параметрам можно методом характеристик рассчитать течение за падающим скачком уплотнения, используя постоянство давления на границе струи. Расчет сверхзвуковых течений методом характеристик на ЭЦВМ достаточно хорошо разработан и изложен, например, в [2]. Отметим лишь, что расчет велся