

Р. ЛЯНЭ, Ю. ИВАНОВ

## О РАЗВИТИИ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ С НЕДИАФРАГМИРОВАННЫМ ВЫХОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Закрученный поток в камерах характеризуется сложной аэродинамической структурой, приводящей к необходимости экспериментальных исследований.

К настоящему времени более изученными являются модели циклонно-вихревых камер горения с относительной длиной  $L_k/D_k < 1,5 \div 2,0$  [1, 2]. Однако в коротких камерах выяснение ряда закономерностей развития закрученного потока усложнено из-за наложения входных и выходных условий. Возможность распространения установленных закономерностей на камеры большей длины, применяемые в практике, остается открытой.

Данная работа была проведена с целью установить особенности развития закрученного потока в недифрагмированной камере с  $L_k/D_k = 8,5$ . Полученные результаты могут быть использованы и для выяснения закономерностей развития закрученного потока в коротких камерах.

### 1. Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрическую камеру из гладкой оцинкованной жести с внутренним диаметром  $D_k = 296$  мм и длиной  $L_k = 2500$  мм, закрытую с переднего торца и с открытым (недифрагмированным) выходом.

В предварительных опытах для выбора закручивающего тангенциального устройства измерения производились при вводах различной ширины и высоты. Оказалось, что равномерность заполнения камеры потоком по периметру определяется в основном числом вводных тангенциальных сопел и их шириной. При тангенциальных вводах шириной  $l/D_k = 0,8$  обеспечивалась осесимметричность потока в камере.

Интенсивность крутки потока регулировалась высотой вводов, которая изменялась с помощью специальных вставок. Основные серии опытов проводились при вводах высотой  $h = 40; 18$  мм и длиной  $l = 240$  мм. Для установления влияния степени тангенциальности закручивающего устройства на развитие потока опыты проводились при трех тангенциальных вводах:  $40 \times 240$  мм (два ввода),  $18 \times 240$  мм (два ввода),  $18 \times 240$  мм (один ввод).

Для введения зонда в двух перпендикулярных направлениях в стенке камеры вдоль ее образующей было просверлено два ряда отверстий с интервалами в 80 мм. Ввиду осесимметричности потока, замеры в основной серии опытов производились шаровым зондом в одном направлении по всему диаметру.

Замеры осредненных по времени скоростей и статического давления производились при помощи тарированного пятиканального зонда с диаметром шарика 8 мм. Регистрация напоров производилась микроманометрами типа ММН. Расчет статического давления, продольных и тангенциальных составляющих скоростей производился по известной методике (см. [3]). Радиальные составляющие скорости оказались в камере малыми и в дальнейшем не рассматривались.

Расход воздуха измерялся предварительно протарированной, нормальной, острой диафрагмой  $m = d^2/D^2 = 0,64$ .

## 2. Результаты исследований

Характер продольных течений. На рис. 1 приведен общий характер продольных течений в объеме камеры. Для удобства рассмотрения разобьем его на зоны: зона I — пристеночная, зона II — промежуточная между пристеночной и приосевой ( $R/R_k = 0,2 \div 0,6$ ), зона III — приосевая и зона IV — выходная часть камеры.

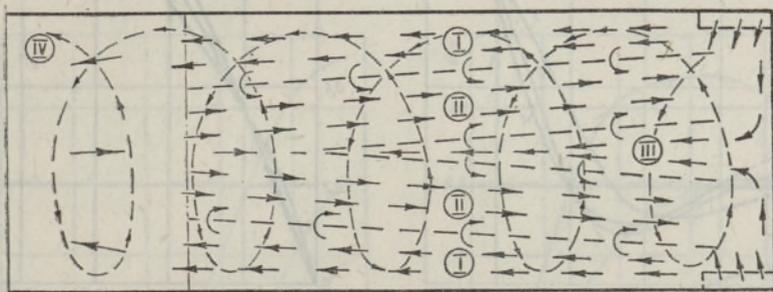


Рис. 1. Схема общего продольного движения в камере.

Закрученный поток представляет собой полую вращающуюся струю с малоинтенсивным вихрем в центре. По мере продвижения вдоль камеры струя (зона I) постепенно утолщается вследствие затухания крутки под воздействием сил трения на стенке. Согласно закону сохранения момента количества движения, утолщение струи сопровождается некоторым ростом тангенциальной составляющей скорости потока, а тем самым и возникновением положительного градиента статического давления вдоль камеры в промежуточной кольцевой области (зона II) (см. опытные профили на рис. 2, б, в). Положительный градиент  $dp_{ст}/dx > 0$  приводит к образованию обратного кольцевого потока аналогично отрыву пограничного слоя с поверхности тела в области положительных градиентов давления [4].

В приосевой части от входного торца на расстояние  $L/D_k \approx 4$  распространяется поток (зона III), возникающий вследствие перетекания воздуха к оси, что, в свою очередь, происходит из-за падения крутки у торцевой стенки. Вдоль камеры он вырождается.

Аэродинамика потока в выходной части камеры (зона IV) определяется не только трением о стенку, как это было во внутренней ее части, но и влиянием всасываемого из атмосферы воздуха. Различие аэродинамических характеристик в IV зоне и внутренней части камеры проявляется в изменении статических давлений и угловых скоростей потока вдоль камеры в ее приосевой области. Если внутри камеры они приблизительно постоянны, то в выходной части камеры как статическое давление, так и угловые скорости значительно изменяются.

В данной статье рассматриваются характеристики потока в части камеры, от ее входа до области влияния выхода. Особенности течения в выходной части камеры (составляющей примерно два ее диаметра от выходного сечения) здесь не рассматриваются.

Изменение профилей скоростей вдоль камеры. Изменение профилей продольных и тангенциальных составляющих скоростей, а также статического давления в различных поперечных сечениях вдоль недиафрагмированной камеры дано опытными кривыми на рис. 2, а, б, в.

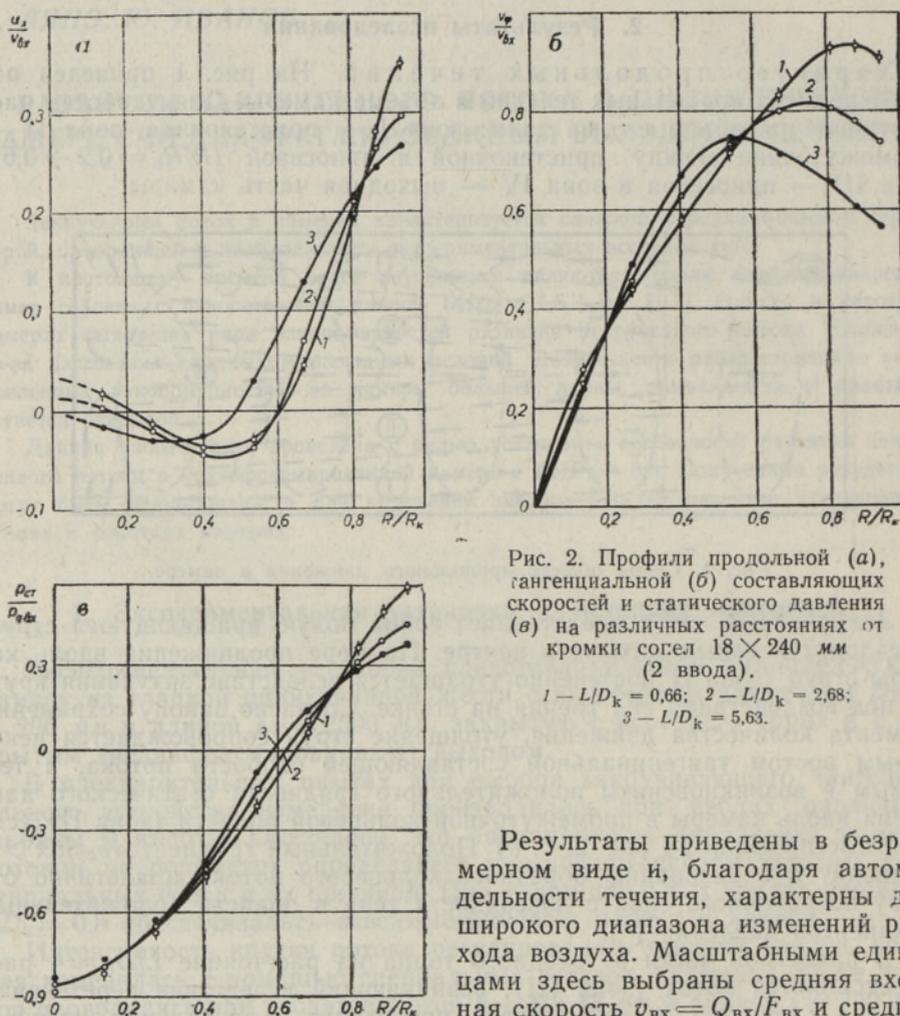


Рис. 2. Профили продольной (а), тангенциальной (б) составляющих скоростей и статического давления (в) на различных расстояниях от кромки сопел  $18 \times 240$  мм (2 ввода).

1 —  $L/D_k = 0,66$ ; 2 —  $L/D_k = 2,68$ ;  
3 —  $L/D_k = 5,63$ .

Результаты приведены в безразмерном виде и, благодаря автомодельности течения, характерны для широкого диапазона изменений расхода воздуха. Масштабными единицами здесь выбраны средняя входная скорость  $v_{вх} = Q_{вх}/F_{вх}$  и среднее динамическое давление на входе

$$p_{д-вх} = \frac{\rho v_{вх}^2}{2},$$
 где  $Q_{вх}$  — расход воздуха,  $F_{вх}$  — входное сечение сопел и  $\rho$  — удельная плотность воздуха.

Опытные точки на рис. 2 получены в трех сечениях  $L/D_k = 0,66$ ; 2,68; 5,63. Здесь  $L$  — расстояние от кромки входных сопел до исследуемого сечения. По характеру кривых видно, что по мере продвижения вдоль камеры в пристеночной части как продольная, так и тангенциальная скорости падают. При этом в пристеночной области падение тангенци-

альной скорости более существенно по сравнению с изменением продольной скорости.

Исследования подтвердили, что хотя наличие тангенциальной составляющей скорости и создает противоположные по направлению продольные потоки в камере, ее влияние на форму безразмерных поперечных профилей продольной скорости не обнаружено. Приведенные на рис. 2, а опытные профили продольных скоростей вполне соответствуют известному профилю Шлихтинга [5]

$$\frac{u - u_{\text{обр}}}{u_{\text{ст}} - u_{\text{обр}}} = \left[ 1 - \left( \frac{b}{b_{\text{гр}}} \right)^{1/2} \right]^2. \quad (1)$$

Здесь  $u$  — текущее значение скорости,  $u_{\text{обр}}$  — максимальная продольная скорость обратного потока,  $u_{\text{ст}}$  — максимальная продольная пристеночная скорость потока,  $b = R_{u_{\text{ст}}} - R_u$  — расстояние между точками измерения скоростей  $u_{\text{ст}}$  и  $u$ , а  $b_{\text{гр}} = R_{u_{\text{ст}}} - R_{u_{\text{обр}}}$  — расстояние между точками измерения  $u_{\text{ст}}$  и  $u_{\text{обр}}$ .

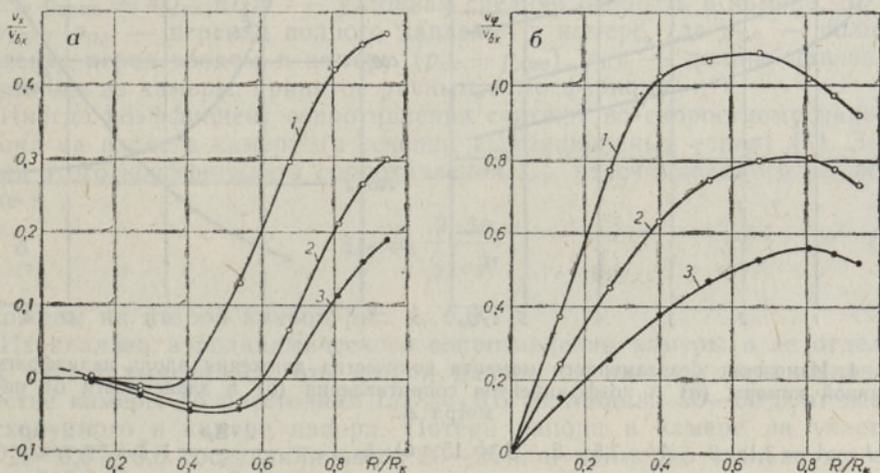


Рис. 3. Профили продольной (а) и тангенциальной (б) составляющих скорости на расстоянии  $L/D_k = 2,68$  от кромки сопел при различных значениях параметра  $A$  (или  $n$ ).

1 —  $A = 3,1 (n = 3,9)$ ; 2 —  $A = 7,5 (n = 9,5)$ ; 3 —  $A = 15 (n = 19)$ .

Влияние входного сечения. На рис. 3, а, б сопоставлены профили продольной и тангенциальной составляющих скоростей, измененные в сечении камеры  $L/D_k = 2,63$  при трех тангенциальных входах:  $40 \times 240$  мм (2 ввода),  $18 \times 240$  мм (2 ввода),  $18 \times 240$  мм (1 ввод). При этом геометрическая характеристика камеры, используемая в теории центробежной форсунки Г. Абрамовича [5] для определения интенсивности крутки и вычисляемая по формуле

$$A = \frac{\pi \cdot R_{\text{вх}} \cdot R_k}{F_{\text{вх}}}, \quad (2)$$

составляла соответственно для данных входов 3,1; 7,5 и 15.

Здесь  $R_k$  — радиус камеры;  $F_{\text{вх}} = 2hl$  — входное сечение сопел, где  $l$  — ширина сопел,  $h$  — высота сопел;  $R_{\text{вх}} = R_k - h/2$  — средний радиус входного сечения.

Если использовать параметр интенсивности крутки  $n$  [6]

$$n = \frac{D_k(D_k - h)}{hl}, \quad (3)$$

то в исследуемом случае он принимает значения 3,9; 9,5 и 19.

На рис. 3 видно, что чем меньше площадь сечения ввода (т. е. чем больше значения  $A$  и  $n$ ), тем быстрее падают безразмерные продольная и тангенциальная составляющие скорости в пристеночной области. Подчеркнем, что в то же время при меньших сечениях входа из-за большей входной скорости абсолютные значения скоростей продолжают оставаться выше, чем при больших сечениях входа.

Можно отметить, что с увеличением характеристики  $A$  (или  $n$ ) происходит сужение пристеночной струи (см. рис. 3,  $a$ ), но при  $A > 8$  это сужение будет уже менее заметным.

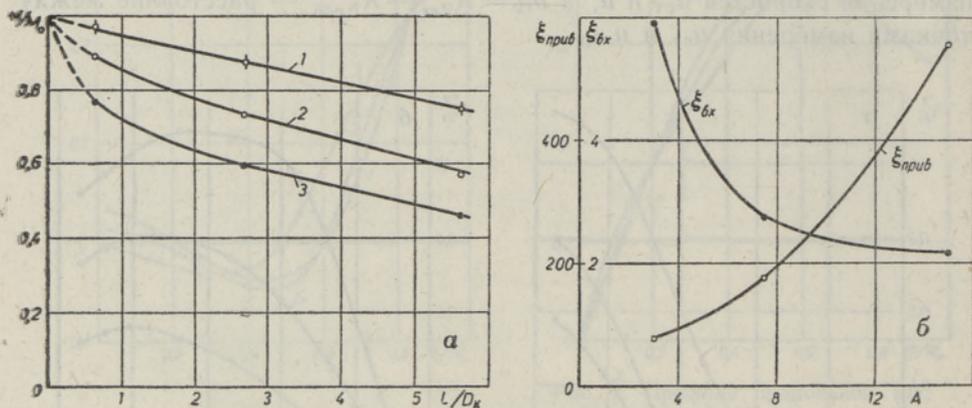


Рис. 4. Изменение безразмерного момента количества движения вдоль недиафрагмированной камеры ( $a$ ) и коэффициентов сопротивления ( $b$ ) в зависимости от параметра  $A$ .

$a$ ): 1 —  $A = 3,1$ ; 2 —  $A = 7,5$ ; 3 —  $A = 15$ .  $b$ ):  $\xi_{\text{прив}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v_{\text{прив}}^2}$ ;  $\xi_{\text{nx}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v_{\text{nx}}^2}$ .

На рис. 4,  $a$  приводится изменение момента количества движения  $M/M_0$  вдоль камеры при тех же значениях  $A = 3,1; 7,5; 15$  ( $n = 3,9; 9,5; 19$ ).

Значение момента количества движения  $M$  определялось по формуле

$$M = 2\pi\rho \int_0^{R_k} u_x \cdot v_\varphi \cdot R^2 dR, \quad (4)$$

где  $u_x$  и  $v_\varphi$  — текущие значения продольной и тангенциальной составляющих скоростей.

Наибольшие изменения момента количества движения происходят в начальной части развития закрученного потока и они тем больше, чем больше значение параметра  $A$ . Начиная с расстояния порядка 0,5—1,0 калибра от кромки входного тангенциального сопла, относительное падение момента количества движения принимает характер, близкий к линейной зависимости

$$\frac{M}{M_0} = \frac{M_1}{M_0} - 0,05 \left( \frac{L}{D_k} - 1 \right). \quad (5)$$

Здесь  $M_0$  — начальный момент количества движения, вычисляемый по входным геометрическим условиям  $M_0 = QF_{\text{вх}}v_{\text{вх}}R_{\text{вх}}$ ;  $M_1$  — значение момента количества движения на расстоянии  $L/D_{\text{к}} = 1$  от входной кромки сопла. Значение  $M_1$  отличается от входного момента количества движения  $M_0$  потерями, связанными с формированием закрученного потока, потерями на трение и др. В данных опытах оказалось, что значение  $M_1/M_0$  изменялось от 0,7 до 1,0 соответственно изменению  $A$  от 15 до 3,1. На рис. 4, а приведены изменения момента количества движения в зависимости от длины камеры до  $L/D_{\text{к}} = 5,5$ . Эта зависимость может быть экстраполирована и на камеры несколько большей длины.

Камеры со значениями параметра  $A > 8$  должны иметь повышенное сопротивление из-за резкого падения момента количества движения в начальной части камеры. Это подтверждается кривыми на рис. 4, б, где коэффициент сопротивления  $\xi_{\text{прив}}$  подсчитывается по формуле

$$\xi_{\text{прив}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{Q \cdot v_{\text{прив}}^2} \quad (6)$$

Здесь  $v_{\text{прив}} = 4Q_{\text{вх}}/\pi D_{\text{к}}^2$  — условная средняя скорость в камере;  $\Delta p = p_{\text{п.о}} - p_{\text{п.к}}$  — перепад полного давления в камере, где  $p_{\text{п.о}}$  — полное давление перед вводом в камеру ( $p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}}$ ),  $p_{\text{п.к}}$  — полное давление на выходе из камеры, принятое равным атмосферному.

Иногда коэффициент сопротивления считают по скоростному напору потока на входе в камеру (в сечении тангенциальных сопел) [1]. Значения этого коэффициента сопротивления  $\xi_{\text{вх}}$ , рассчитываемого по формуле

$$\xi_{\text{вх}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{Q \cdot v_{\text{вх}}^2}, \quad (7)$$

отложены на второй кривой рис. 4, б.

Из анализа аэродинамического сопротивления камеры в ее отдельных частях выяснилось, что потери напора на входе и на начальном участке камеры до расстояния  $L/D_{\text{к}} = 0,6$  составляли 50—60% от всего расходуемого в камере напора. Потери напора в камере на участке  $L/D_{\text{к}} = 0,6 \div 5,6$  составляли всего 20—25% и примерно столько же составляли выходные потери.

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Падение крутки потока вдоль камеры приводит к утолщению струи, к росту тангенциальной составляющей скорости и статического давления вдоль кольцевой зоны камеры ( $R/R_{\text{к}} = 0,2 \div 0,6$ ). Возникший положительный градиент давления приводит к образованию кольцевого обратного потока.

2. Влияние окружающей среды, подсосываемой на выходе из камеры, распространяется на ограниченную область  $L/D_{\text{к}} \approx 2$  от выходного сечения. Остальная часть камеры в приосевой области характеризуется незначительным изменением характеристик.

3. Наибольшие изменения момента количества движения потока происходят в начальной части камеры на расстоянии до одного калибра от входной кромки сопел. Дальнейшее падение момента количества движения, выраженного в безразмерном виде, имеет приближенно линейный характер и определяется по формуле (5).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Циклонные топки, Сб. под ред. Кнорре Г. Ф. и Наджаров М. А., М.—Л., 1958.
2. Штым А. Н., Михайлов П. Н., Изв. ВУЗов, Энергетика, № 11, 50 (1965).

3. Повх И. Л., Аэродинамический эксперимент в машиностроении. М.—Л., 1959.
4. Лойцянский Л. Г., Ламинарный пограничный слой, М., 1962, с. 205.
5. Абрамович Г. Н., Прикладная газовая динамика, М., 1953.
6. Ахмедов Р. Б., Теплоэнергетика, № 6, 9 (1962).

*Институт термofизики и электрофизики  
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
20/III 1970

R. LÄÄNE, J. IVANOV

### POORISVOOLU LEVIMINE DIAFRAGMEERIMATA VÄLJUMISAVAGA SILINDRILISES KAMBRIS

Esitatakse eksperimentaalse uurimise tulemused suhtelise pikkusega  $L_k/D_k = 8,5$  silindrilises kambri erinevatel sisenemistingimustel leviva telgsümmeetrilise pöörivoolu levimise iseloomu kohta olenevalt kambri pikkusest. Antakse kambri takistustegurid ja selgitatakse pöörlemishulga vähenemise iseloomu piki kambrit.

R. LÄÄNE, J. IVANOV

### THE DEVELOPMENT OF VORTEX FLOW IN A CYLINDRICAL CHAMBER WITH AN OPEN OUTLET SECTION

The results of an experimental study on the development of axisymmetrical vortex flow in cylindrical chamber with the relative length of  $L_k/D_k = 8.5$  are given. The influence of the length of the chamber on the characteristics of the development of vortex flow under different input conditions is discussed.

The coefficients of resistance of the chamber and the character of decay of angular momentum along the chamber are given.