

## КВАЗИОДНОМЕРНЫЙ РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТУРБИННЫХ СОПЛАХ С КОСЫМ СРЕЗОМ

Косолапов Е.А., Рамс Э.Э., Соленников М.Д., Хрунков С.Н.

*ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, 24), e-mail: kosolap2005@rambler.ru*

В данной статье рассматривается течение газа в осевых турбинах с косым срезом. Для выполнения расчетов криволинейный канал спрямляется. Далее предполагается, что параметры газа остаются постоянными в поперечных сечениях. Это и составляет суть квазиодномерного приближения. Рассмотрены три вида сопловых каналов: сопло Лавалья с косым срезом от критического сечения, прямое сопло Лавалья и конфузорное сопло. Расчеты выполнялись для конкретных сопл, приведенных в публикациях других авторов. В результате расчетов получено, что заданные противодавления соответствуют сверхзвуковым режимам перерасширения для прямого сопла. Были вычислены максимальные числа Маха с учетом заданного противодавления. Также расчеты параметров газа в исследуемых каналах были выполнены в двумерном приближении. Анализ полученных результатов показал, что квазиодномерный расчет течения в конфузорах с учетом соседних каналов наиболее соответствует действительности.

Ключевые слова: турбина, сопло Лавалья, конфузорное сопло, косой срез, течение газа, квазиодномерное приближение.

## QUASI-ONE-DIMENSIONAL CALCULATION OF THE GAS FLOW IN TURBINE NOZZLES WITH THE SLANTING CUT

Kosolapov E.A., Rams E.E., Solennikov M.D., Khrunkov S.N.

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, Minin street, 24), e-mail: kosolap2005@rambler.ru*

In article the gas flow in axial turbines with a slanting cut is considered. The curvilinear channel is straightened for performance of calculations. It is supposed that parameters of gas remain constants in cross sections. It also makes an essence of quasi-one-dimensional approach. Three views of nozzle canals are considered: Laval's nozzle with a slanting cut from critical section, Laval's direct nozzle and a confluence nozzle. Calculations were carried out for the concrete snuffed, other authors brought in publications. As a result of calculations it is received that the set counter-pressures correspond to supersonic modes of reexpansion for a direct nozzle. Output numbers of the Mach taking into account the set counter-pressure were calculated. As calculations of parameters of gas in studied channels were executed in two-dimensional approach. The analysis of the received results showed that quasi-one-dimensional current calculation in confluence nozzle taking into account the neighboring canals, most is true.

Keywords: turbine, Laval's nozzle, konfuzorny nozzle, slanting cut, gas flow, quasi-one-dimensional approach.

Простейшим приближением, в котором можно выполнить расчет течения газа в сопловых каналах турбин, является приближение, подобное одномерному (квазиодномерное). В этом приближении учитывается изменение площади поперечных сечений канала, хотя в каждом таком сечении газодинамические параметры считаются постоянными [4]. У этой математической модели есть по крайней мере два применения. Первое связано с быстрым предварительным расчетом, т.к. расчет уже в двумерном приближении требует использования численных методов. Второе применение квазиодномерного расчета связано как раз с многомерными численными расчетами. В настоящее время в большинстве численных методов для получения стационарного решения используется процедура установления [2; 3]. Для

таких алгоритмов необходимо задавать начальные условия. Оптимальным для этих целей следует считать квазиодномерный расчет.

С наибольшей точностью квазиодномерное приближение применяется к плоско- и осесимметричным каналам с плавно изменяющейся образующей. Для применения этого приближения к турбинным решёткам в работе [1] предлагается процедура спрямления канала.

В данной работе рассчитывается течение воздуха в осевых турбинах, экспериментально исследованных в [7; 8]. Особенностью сопловых каналов этих турбин является наличие косога среза. Один из таких каналов (С-5, по терминологии работы [7]) приведен на рис. 1а. Относительные пропорции геометрии канала на этом рисунке соблюдены. Точка  $D$  расположена там, где касательная из точки  $B$  отходит от образующей спинки лопатки  $BC$ ,  $f^*$  – линейный размер критического сечения  $AB$ ,  $f$  – линейный размер косога  $AC$ .

### Квазиодномерные расчеты

Применим процедуру спрямления [1] для канала 1а. Получим несимметричный канал, приведенный на рис. 1б. Для применения квазиодномерного приближения рассмотрим два симметричных канала: сопло Лавала (рис. 1в) и конфуззорное сопло (рис. 1г).

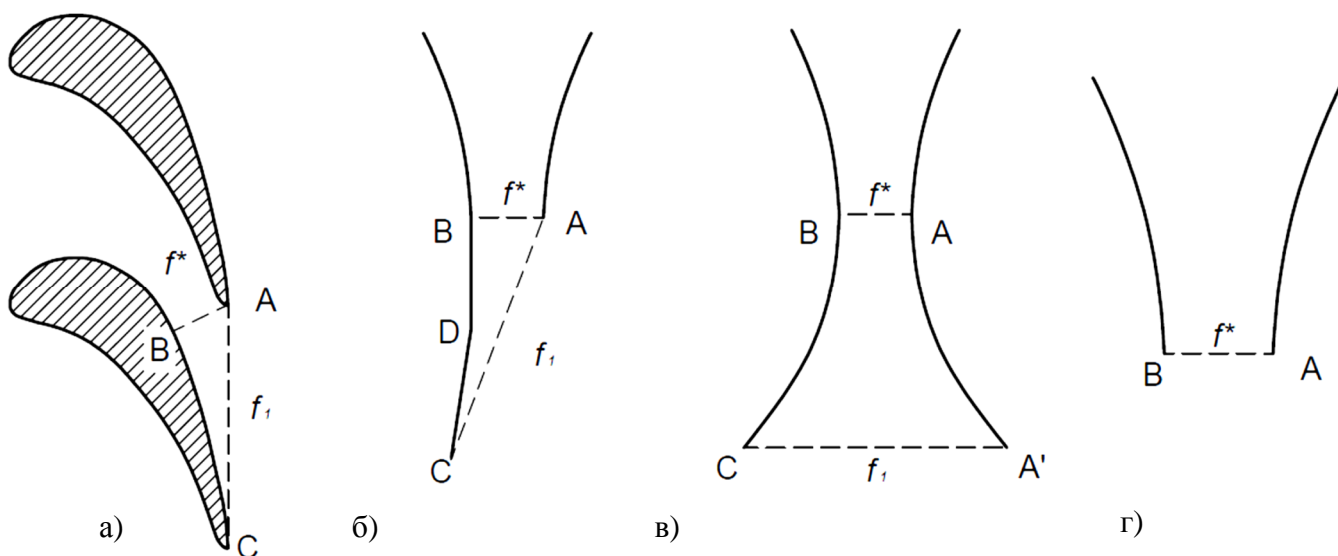


Рис. 1. Межлопаточный канал: а – исходный; б – спрямленный, несимметричный; в – спрямленный, симметричный, сопло Лавала; г – спрямленный, симметричный, конфузор.

Выполним расчеты течения воздуха в этих каналах (рис. 1 в, г) с целью решения вопроса о наибольшей эквивалентности течению в исходном канале (рис. 1а). Исходными данными для расчетов являются следующие значения [7];  $f/f^*=2.36$ ;  $p_a/p_0=0,203$ ; где  $p_0$  – давление торможения на входе;  $p_a$  – противодавление.

Рассмотрим сильно упрощенную модель – сопло Лавая (рис. 1в). По отношению  $f/f^*$ , которое равно отношению площадей поперечных сечений, найдем характерные числа Маха ( $M$ ) из уравнения

$$\frac{f}{f^*} = \frac{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{M \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}, \quad (1)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

Трансцендентное уравнение (1) решалось численным методом. Получены два характерных числа Маха для до- и сверхзвукового истечения:  $M'=0,255$  и  $M''=2,38$ . Соответствующие давления  $p'$  и  $p''$  найдены из газодинамической функции

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k}{1-k}} \quad (2)$$

Характерные отношения давления будут иметь значения  $p'/p_0=0,956$ ;  $p''/p_0=0,071$ .

Отметим, что давление торможения здесь также относится к области входа в канал. Отношение критического давления к давлению торможения для воздуха имеет значение  $p^*/p_0=0,528$ .

Характерные значения отношения давлений приведены на рис. 2. Ось  $X$  направлена по тракту сопла, верхняя кривая соответствует дозвуковому истечению, а нижняя – сверхзвуковому, расчетному.

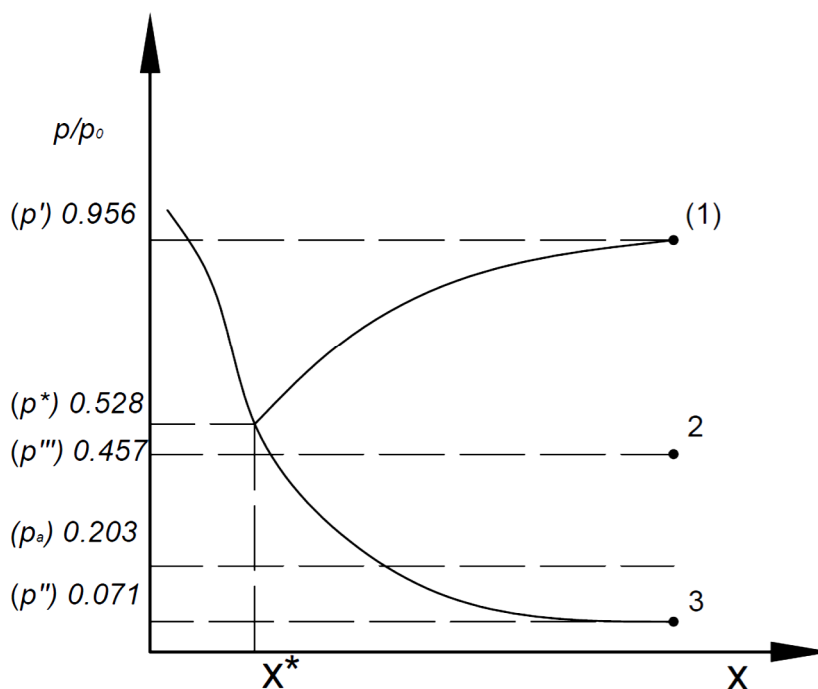


Рис. 2. Характерные давления для сопла Лавая.

Ещё одно характерное значение давления находится из соотношения для прямого скачка уплотнения на срезе

$$\frac{p'''}{p''} = \frac{p'''}{p_0} \cdot \frac{p_0}{p''} = \frac{2k}{k+1} M''^2 - \frac{k-1}{k+1}. \quad (3)$$

В формуле (3) также предполагаем, что давление торможения до среза сопла не изменится. Из этой формулы получаем следующее значение:  $p'''/p_0=0,457$ .

Таким образом, при противодавлениях выше точки (1) будет происходить дозвуковое истечение (режим трубки Вентури); при противодавлениях между точками (1) и (2) – также дозвуковое истечение, но с прямым скачком уплотнения внутри сверхзвуковой части сопла; при противодавлении, расположенном ниже точки (2), будет осуществляться сверхзвуковой расчетный режим. При этом если противодавление расположено между точками (2) и (3) – режим перерасширения, с образованием скачков уплотнения за срезом, в которых выходное давление  $p''$  повышается до противодавления  $p_a$ . При противодавлении ниже точки (3) осуществляется режим недорасширения. В этом случае выходное давление за срезом будет понижаться до противодавления за счет волн разряжения.

Заданное противодавление  $p_a/p_0=0,203$  соответствует сверхзвуковому режиму перерасширения. Таким образом, истечение будет происходить с числом Маха  $M''=2,38$ ; за срезом сопла давление будет повышаться от  $p''/p_0=0,071$  до противодавления  $p_a/p_0=0,203$  за счет косых или мостообразных скачков уплотнения в струе. Скорость течения при этом будет понижаться, а струя сужаться.

Особенностью спрямленного сопла (рис. 1б) является то, что угловая точка  $A$  в критическом сечении одновременно расположена на косом срезе  $AC$ . Таким образом, можно рассмотреть течение газа в конфузормом сопле (рис. 1г).

Если  $p_a/p_0 < p^*/p_0$ , что соответствует нашему случаю ( $0,203 < 0,528$ ), то течение в критическом сечении будет звуковым. Часто констатацией этого факта и ограничиваются при рассмотрении течений в конфузормом сопле [1]. Однако пониженное противодавление будет приводить к расширению потока и ускорению его. При этом необходимо учитывать, что из-за периодичности решетки существует поджатие «свободной» струи от соседних сопел. Если бы течение за срезом происходило без потерь, то максимальное значение числа Маха могло быть найдено по газодинамической функции (2). Отсюда выражение для числа Маха примет вид:

$$M_a = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[ \left( \frac{p_a}{p_0} \right)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right]}. \quad (4)$$

Для заданного  $p_d/p_0=0,203$  максимальное число Маха будет иметь следующее значение  $Ma=1,7$ .

Таким образом, можно предположить, что конфузорное сопло (рис. 1г), с учетом поджатия струи от соседних каналов, будет сверхзвуковым на некотором удалении от среза. Особенностью истечения из этого сопла является то, что максимальное значение числа Маха зависит от противодавления, в отличие от сопла Лавалья (рис. 1в).

Для проверки этой гипотезы были выполнены расчеты течения воздуха в межлопаточном канале (рис. 1а) в двумерном приближении.

### Сравнение с двумерными расчетами

Течение воздуха в межлопаточном канале реактивной турбинной решетки (рис. 1а) было также рассчитано в двухмерном приближении разработанным комплексом программ. Алгоритм расчета и особенности его применения описаны в работах [3; 5; 6].

Отметим здесь, что исходной математической моделью являлись интегральные уравнения газовой динамики. Это позволило использовать неортогональную разностную сетку. Такая сетка дает возможность избежать измельчения разностных ячеек вблизи твердых границ и не вносить нерегулярного проявления схемной вязкости в расчетах [3].

Результаты двумерных расчетов приведены на рис. 3 и 4. На этих рисунках изображены рассчитанные изолинии чисел Маха для разных противодавлений. Пунктирные линии, исходящие из угловой точки А, соответствуют волнам разряжения. Веер слабых волн разряжения должен также исходить и из точки D. Для их точной локализации по расчетным данным необходимо использовать значительно более мелкую разностную сетку.

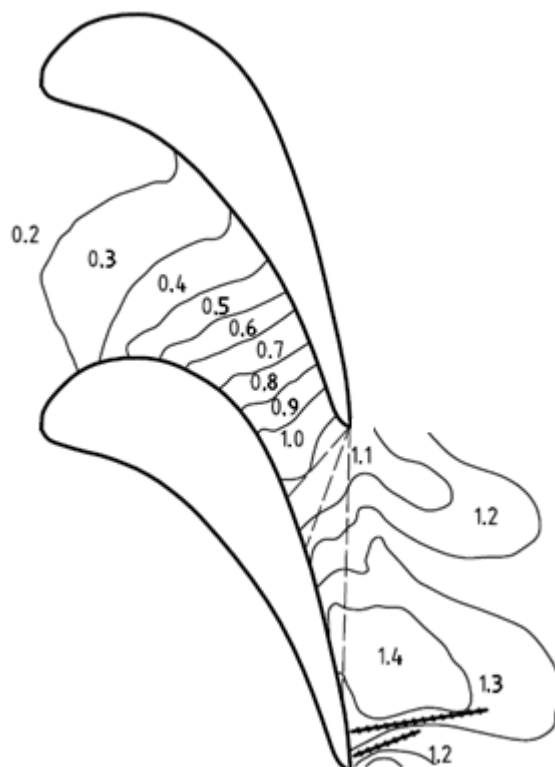


Рис. 3. Двухмерный расчет течения газа в сопле с косым срезом;  $p_a/p_0=0,203$ .

На рис. 3 и 4 «цепными» линиями отмечены косые скачки уплотнения, расположенные внизу спинки лопатки. Перед ними, вблизи точки D, находится область максимальных чисел Маха. При этом значения этих чисел зависят от противодавления за косым срезом.

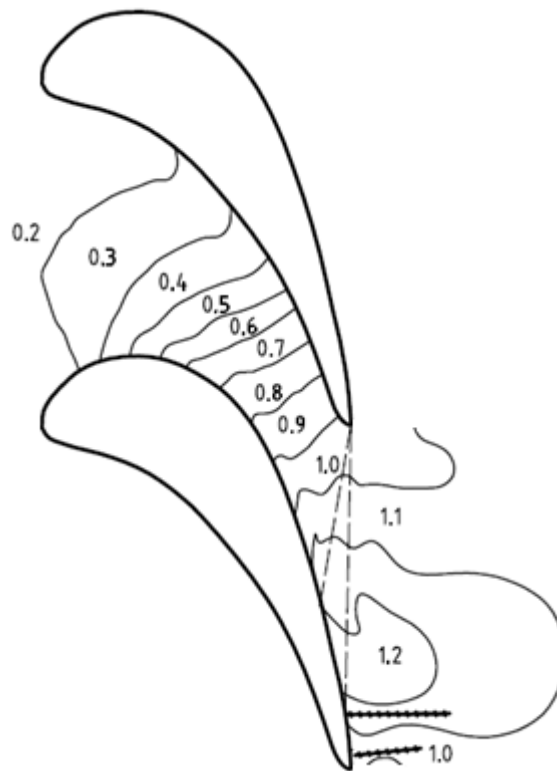


Рис. 4. Двухмерный расчет течения газа в сопле с косым срезом;  $p_a/p_0=0,297$ .

### Заключение

Выполненные двумерные расчеты показали, что максимальное значение числа Маха зависит от противодавления за срезом сопла.

В случае спрямления межлопаточного канала, для квазиодномерного приближения, такая же зависимость есть для течения в конфузторных каналах, с учетом поджатия струи от соседних сопел.

В квазиодномерных расчетах числа Маха получились завышенными по сравнению с двумерными расчетами (табл. 1).

Таблица 1

$p_a/p_0$	Максимальное число Маха	
	квазиодномерный расчет	двумерный расчет
0,203	1,7	1,4
0,297	1,5	1,2

Это можно объяснить образованием косых скачков уплотнения, полученных в двумерных расчетах (рис. 3 и 4). Отсюда получаются дополнительные потери, приводящие к потере скорости потока.

Таким образом, для расчетов в квазиодномерном приближении можно рекомендовать канал, приведенный на рис. 1г. При этом, с учетом поджатия струи соседними каналами, максимальное число Маха можно рассчитывать по газодинамической функции (4). Естественно, необходимо в этом приближении рассчитывать поворот потока в косом срезе по известной методике.

### Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
2. Белоцерковский О.М, Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. - Наука, 1982. - 392 с.
3. Давыдов Ю.М., Косолапов Е.А. Численное моделирование двухфазных течений в соплах методом крупных частиц. - М. : Изд. Нац. академии прикл. наук, 1998. – 86 с.
4. Косолапов Е.А., Соленников М.Д. Квазиодномерное приближение для расчета течений газа в каналах энергетических установок // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород. - 2013 - Т. 5, № 102. - С. 260-267.
5. Косолапов Е.А., Кузнецов Ю.П., Соленников М.Д. Объектно-ориентированный пакет программ для расчета течения газа в турбинных решетках // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. – 2012. – № 93. – С. 120-121.
6. Косолапов Е.А., Соленников М.Д. Метод расчета течений газа в турбинных решетках на основе интегральных уравнений // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 1.
7. Кузнецов Ю.П. Создание неавтономных турбоприводов на базе синтеза высокоэффективных микротурбин различных кинематических схем : дис. ... д.т.н. – Н. Новгород, 1994.
8. Кузнецов Ю.П., Чуваков А.Б. Экспериментальная установка для исследования мало-размерных турбинных ступеней // Известия вузов. Машиностроение. - 2013, № 4 – С. 54-64.

### Рецензенты:

Зуев В.А, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника» НГТУ им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород.

Грамузов Е.М, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» НГТУ им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород.