Теория турбокомпрессоров

Курс лекций. 9 лекция

Доцент, кандидат технических наук

Юрий Владимирович Кожухов

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Доц. Ю.В. Кожухов

Теория турбомашин. *Лекция 9.*

СОДЕРЖАНИЕ

- Показатель изоэнтропы и число Маха как критерии сжимаемости.
- Особенности течения при больших скоростях.
- Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в трубах, диффузорах, конфузорах и решётках ТК.
- Формула Гюгонио, до- и сверхзвуковые диффузоры и конфузоры, сопло Лаваля. Скачек уплотнения, волновые потери.
- Основные условия подобия потоков в каналах проточной части. Критерии подобия и их влияние на движение газа.
- Модельные испытания проточных частей, полное и приближенное подобие.
- Классификация потерь по физической природе и по месту возникновения.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Рассмотрим случай установившегося движения идеального газа без подвода энергии и массо- и теплообмена. Для получения уравнения, устанавливающего связь основных параметров в канале, продифференцируем уравнение расхода $\bar{m} = \rho f c$ и разделим полученное на $\rho f c$:

$$d\bar{m} / \bar{m} = df / f + dc / c + d\rho / \rho$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Дифференцируя уравнение состояния $p = \rho RT$ получим $d\rho/\rho = (1/RT)\, dp/\rho - dT/T$. Подставляя из данного уравнения $d\rho/\rho$ в предыдущее уравнение и заменяя член dp/ρ его значением из уравнения Бернулли и член $c_pT = di$ его значением из уравнения энергии, получим с учетом равенства $M = c/a$ (где $a = \sqrt{kRT}$ – скорость звука) **формулу Гюгонио:**

$$df/f = dc/c\,(M^2 - 1)$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Из последнего уравнения видно, что при $M < 1$ замедление потока может быть достигнуто лишь в расширяющемся канале, а при $M > 1$ – лишь в сужающемся канале. Для ускоряющегося потока картина будет обратной. При скорости, равной скорости звука, канал будет иметь минимальное сечение, поскольку при этом $df = 0$.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Для разгона потока до сверхзвуковой скорости используются каналы с проходными сечениями, площадь которых сначала уменьшается до некоторого значения f_{min} (при этом скорость потока достигает скорости звука $c = a_{кр}$ ($M = 1$)), а затем плавно увеличивается до величины, обеспечивающей заданное значение скорости потока $c > a$ ($M > 1$) на выходе из канала. **Такие конфузоры называют соплами Лаваля.** Торможение сверхзвукового потока можно осуществить в канале переменного сечения, входная часть которого выполняется суживающейся, а выходная – расширяющейся.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

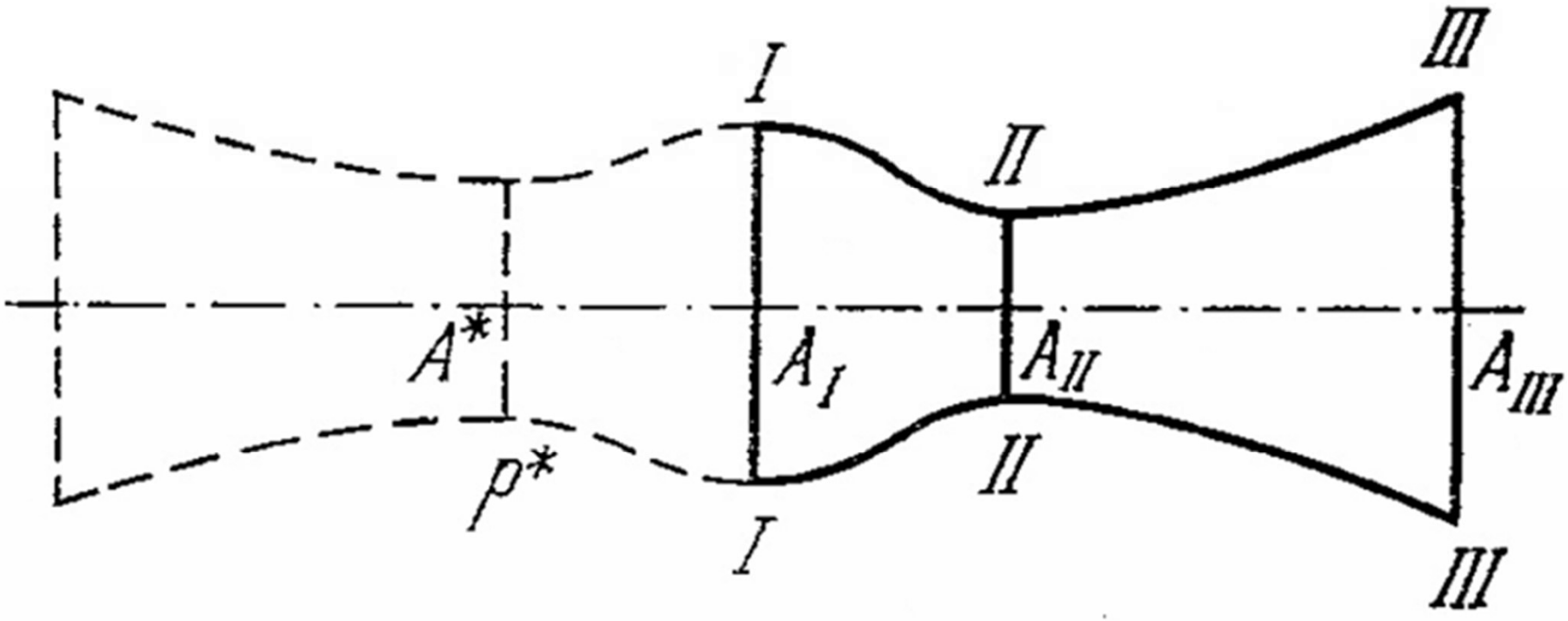


Схема сопла Лаваля и обратного сопла Лаваля (штриховые линии): *I – II* – дозвуковой конфузор, *II – III* – сверхзвуковой конфузор

Больше информации о компрессорной технике на сайте научной группы www.kviht.ru

Скачки уплотнения. Коэффициент скорости. Опытные исследования сверхзвукового течения ($M > 1$) показывают, что при уменьшении сверхзвуковой скорости до дозвуковой этот переход осуществляется скачкообразно. Скачку скорости соответствует и скачкообразное изменение плотности, давления и температуры газа. Такое изменение параметров потока называется **скачком уплотнения** (стоячей ударной волной).

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Скачки уплотнения делятся на прямые и косые. Если поверхность (фронт) скачка перпендикулярна к направлению скорости набегающего потока, т. е. угол $\alpha = 90°$, то скачок называют **прямым**. За прямым скачком скорость всегда **дозвуковая**.

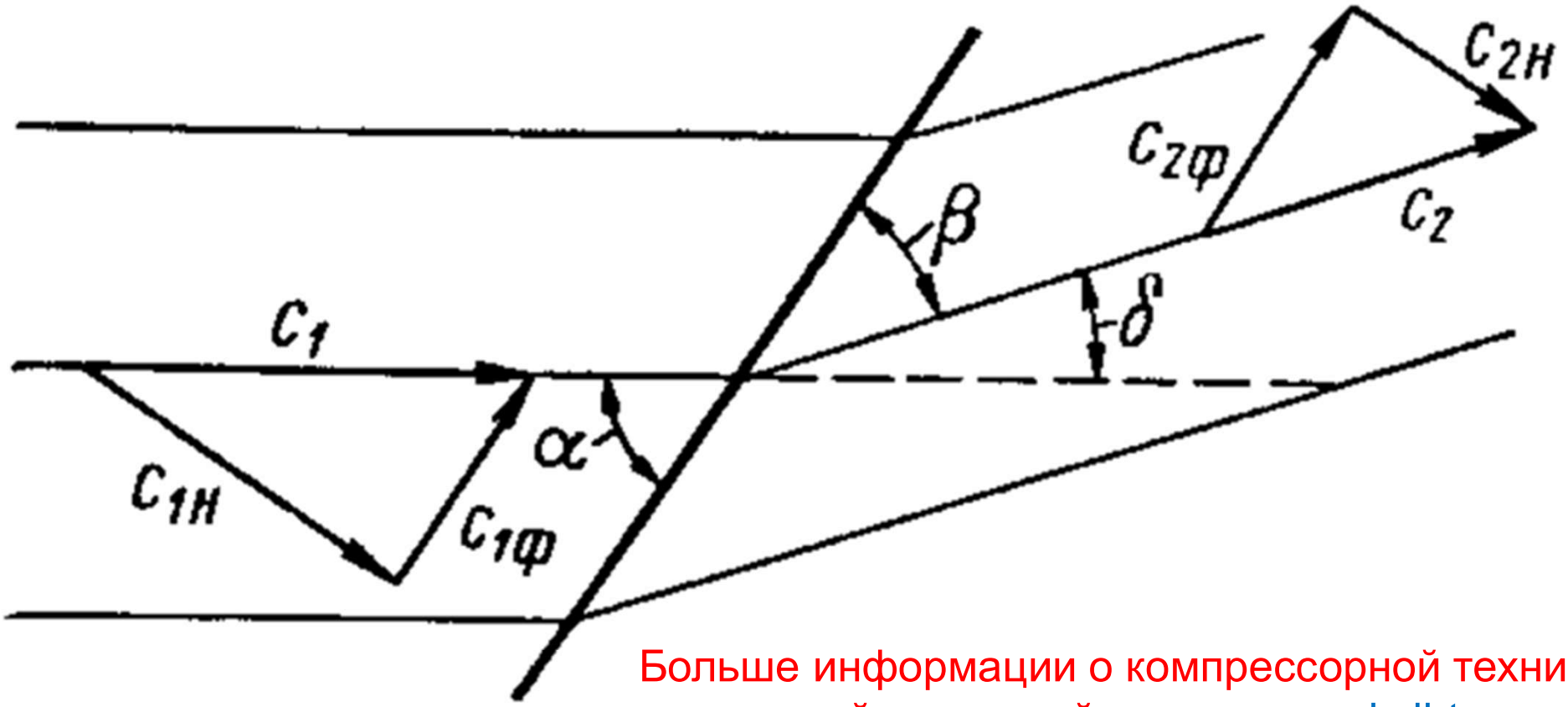
Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Косым называется скачок, поверхность которого образует с направлением скорости набегающего потока острый угол ($\alpha < 90°$). Скорость после косого скачка может быть как **дозвуковой**, так и **сверхзвуковой**.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях



Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Схема косого скачка уплотнения

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Схема косого скачка уплотнения: c_1 и c_2 – скорости потока до и после скачка уплотнения, $c_{1н}$ и $c_{2н}$ – скорости потока по нормали к фронту скачка до и после скачка уплотнения, $c_{1ф}$ и $c_{2ф}$ – скорости потока параллельно фронту скачка до и после скачка уплотнения, α – угол потока к фронту до скачка уплотнения, β – угол потока к фронту после скачка уплотнения, δ – угол отклонения потока после прохождения скачка уплотнения ($\delta = \alpha - \beta$).

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Отношение давлений в потоке до и после косого скачка

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} M_1^2 \sin^2 \alpha - \frac{k-1}{k+1}$$

где $M_1 = c_1/a_1$ – число Маха перед скачком уплотнения.

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Скачки уплотнения, вызывая необратимые преобразования кинетической энергии газа в теплоту, являются источником свойственного только сверх-звуковым потокам **волнового сопротивления**.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Связь между давлением и плотностью до и после скачка устанавливает так называемое **уравнение Гюгонио:**

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{(k+1)\rho_2/\rho_1 - (k-1)}{(k+1) - (k-1)\rho_2/\rho_1}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

или

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(k+1)/(k-1)p_2/p_1 + 1}{(k+1)/(k-1) + p_2/p_1} = \frac{c_{1н}}{c_{2н}}$$

где p_1, ρ_1 – давление и плотность до скачка; p_2, ρ_2 – давление и плотность за скачком; $c_{1н}$ и $c_{2н}$ – проекции скоростей, нормальные к поверхности скачка, до и после него.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Скорости до и после скачка связаны условиями:

$$c_{1н}c_{2н} = (a_{кр\,н})^2; \quad c_{1ф} = c_{2ф},$$

где $c_{1ф}, c_{2ф}$ – проекции скоростей, касательные к поверхности скачка;

$$a_{кр\,н} = \sqrt{a_{кр}^2 - \frac{k-1}{k+1} c_{1ф}^2}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

- **Критической скоростью газа $a_{кр}$** называется скорость потока, равная местной скорости звука в критическом сечении, т.е. где $M = 1$.
- Отношение скорости газа к критической скорости называется **коэффициентом скорости $\lambda = c/a_{кр}$**.
- Отличие $a_{кр}$ от a заключается в том, что a – скорость звука при действительной температуре в данной точке, а $a_{кр}$ – скорость потока, равная скорости звука при температуре $T_{кр}$, соответствующей $M = \lambda = 1$.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

Температура газа при скорости потока, равной скорости звука:

$$T_{\text{кр}} = T^* - a_{\text{кр}}^2/(2c_p), \text{ где } a_{\text{кр}} = \sqrt{kRT_{\text{кр}}}\ .$$

Отсюда можно получить:

$$a_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT}\ ;\ \ T_{\text{кр}} = 2T^*/(k+1).$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Число Маха и показатель изоэнтропы как критерии сжимаемости. Особенности течения при больших скоростях

На потери в рабочем колесе существенное влияние может оказывать критерий сжимаемости – число Маха ***M***, представляющее собой отношение скорости потока к скорости звука. Известно, что при скорости потока, превышающей скорость распространения малых возмущений (скорость звука), обтекание твердых тел сопровождается возникновением скачков уплотнения, в которых кинетическая энергия мгновенно преобразуется в давление и частично в тепло, т.е. имеют место так называемые **волновые потери.**

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в трубах, диффузорах и конфузорах

Характер течения газа, в отличие от несжимаемой жидкости, имеет более сложный характер, что обуславливается его **сжимаемостью**. **Сжимаемость газа характеризуется коэффициентом сжимаемости:**

$$\varepsilon = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{T^* - \dfrac{c_2^2}{2c_p}}{T^* - \dfrac{c_1^2}{2c_p}} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{1 - \dfrac{k-1}{k+1}\lambda_{c2}^2}{1 - \dfrac{k-1}{k+1}\lambda_{c1}^2} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в трубах, диффузорах и конфузорах

Для вышеприведённой формулы ρ_1 и ρ_2 – плотность газа в начале и в конце канала, λ_{c1} и λ_{c2} – коэффициенты скорости соответственно при скорости потока c_1 и c_2. Для коэффициентов скорости выполняются следующие соотношения:

$$\lambda_{c1}\lambda_{c2} = 1 \qquad \lambda_{c2} = \lambda_{c1}\dot{c}$$

где замедление потока:

$$\dot{c} = \frac{f_1}{f_2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

(f_1 и f_2 - площади на входе и выходе из канала соответственно)

Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в трубах, диффузорах и конфузорах

В течениях с $M < 0,4$ влияние сжимаемости не сказывается и параметры газа описываются законом Бернулли:

$$p + \rho c^2/2 = \text{const}$$

$$c_p T + c^2/2 = \text{const}$$

С ростом числа Маха влияние сжимаемости на течение усиливается и при $M > 0,4$ уже начинает проявляться, что вносит существенные погрешности в расчёты по приведённым формулам

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в трубах, диффузорах и конфузорах

«Запирание» трубопровода

При течении газа по трубе с постоянным сечением вследствие возникновения потерь падает давление. Падение давления сопровождается падением плотности газа, что при неизменном сечении трубы является причиной роста скорости газа. При достаточно длинном участке трубы скорость газа достигает скорости звука, которая является максимально возможной скоростью, поскольку переход к сверхзвуковому течению может быть обеспечен только при расширении трубы. При достижении потоком скорости звука происходит так называемое «запирание» трубопровода, т.е. в нём достигается максимально возможный объёмный расход $\bar{V}\left(\text{м}^3/\text{с}\right)$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в трубах, диффузорах и конфузорах

При течении сжимаемого газа в диффузорах вследствие увеличения его плотности поток замедляется быстрее чем при течении несжимаемой среды, что является причиной возникновения отрывов потока от стенок канала на более ранних участках.

Течение сжимаемого газа в конфузоре характеризуется более быстрым увеличением скорости потока по причинам, указанным при течении газа в трубе постоянного сечения, что вызывает дополнительные потери в канале.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

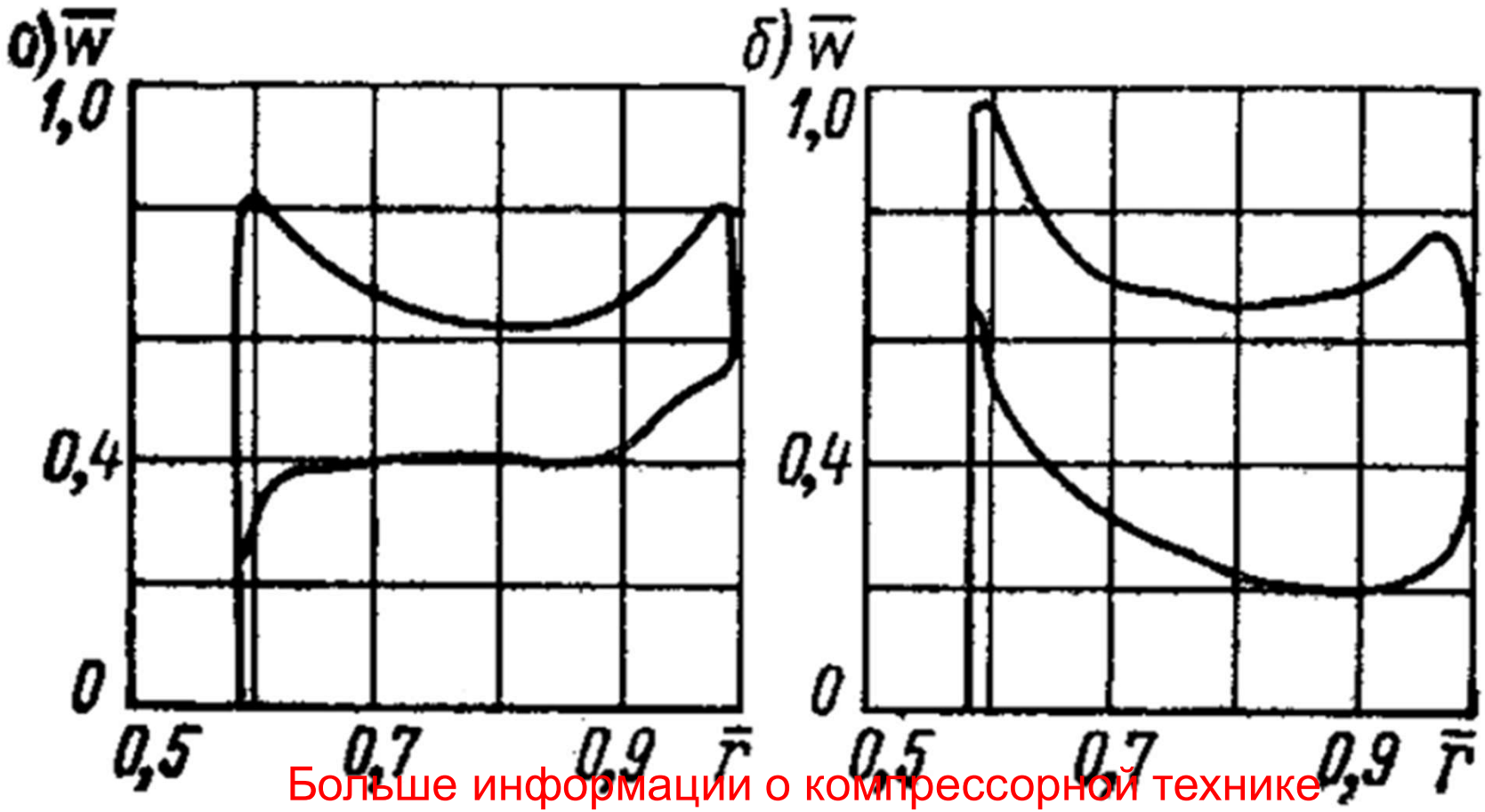
Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в решётках турбомашин на примере турбокомпрессора

В теории решеток используют понятие **критического числа Маха** $M_{кр}$ – такое число M_1 на входе в решетку, при котором местное число Маха на профиле (там, где местная скорость максимальна) достигает единицы.

Как видно из представленного распределения относительных скоростей $\bar{w} = w/u_2$ по передней (нижняя линия) и задней (верхняя линия) поверхностям лопаток РК ЦК, пик скорости, возникающей при обтекании входной кромки, заметно превышает среднюю скорость на входе в решётку.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в решётках турбомашин на примере турбокомпрессора



Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Распределение относительных скоростей по поверхностям лопаток РК ЦК: *а* – $\beta_{л2} = 22°30'$; *б* – $\beta_{л2} = 61°31'$

Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в решётках турбомашин на примере турбокомпрессора

При $M_1 > M_{кр}$ происходит заметное снижение эффективности. При дальнейшем росте M_1 происходит, в конце концов, возникновение скачка уплотнения в горле решетки. При этом решетка "заперта", т.е. не может пропустить большего расхода. На характеристике напора и КПД ступени появляется вертикальный участок, соответствующий максимальному расходу.

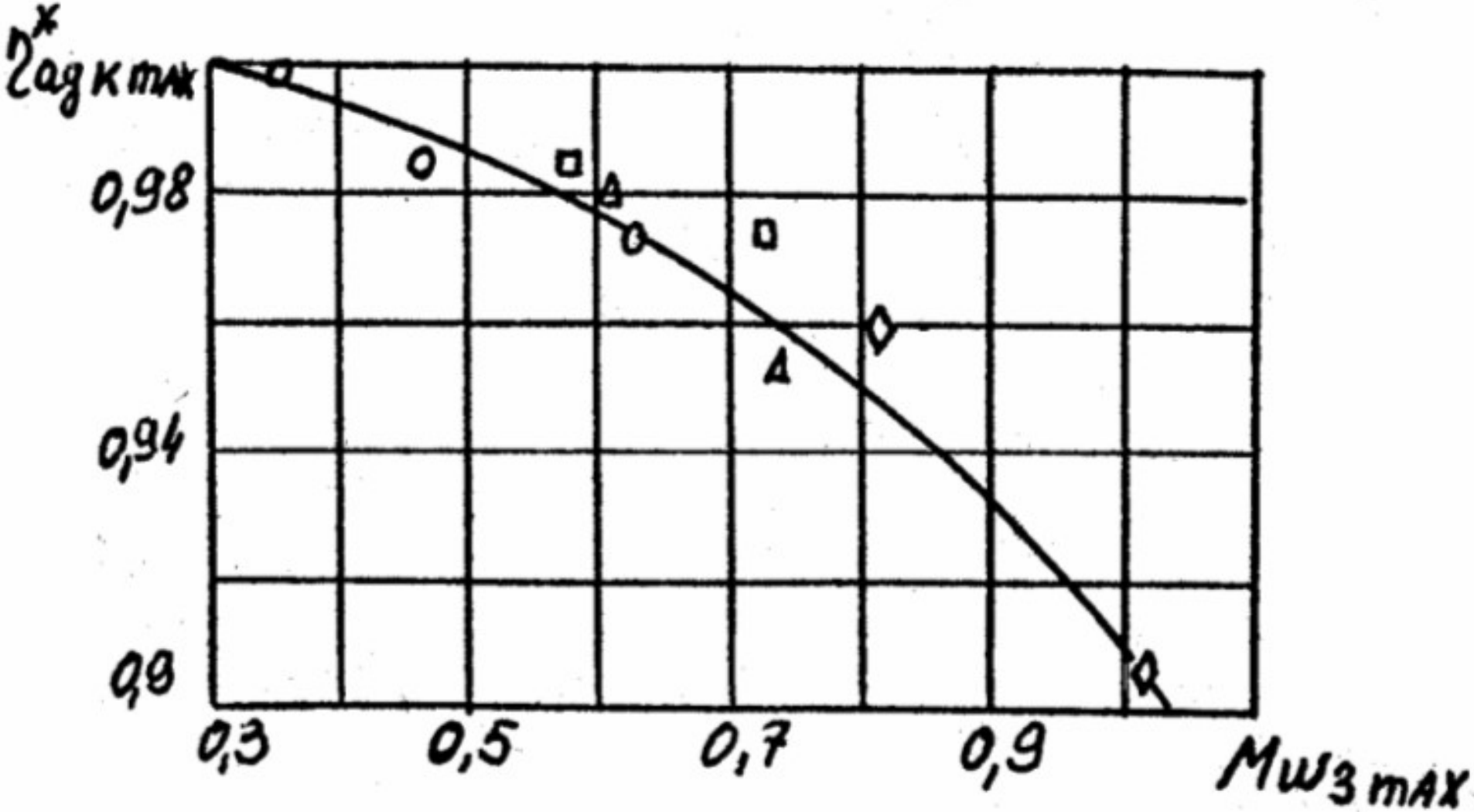
Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Влияние сжимаемости на дозвуковое течение газа в решётках турбомашин на примере турбокомпрессора

Для влияния максимального числа Маха на поверхности лопатки РК на КПД РК рекомендуется следующая эмпирическая зависимость:

$$\eta = 1 - \left(0,2 + \frac{1,1}{\left(100\Phi_{\text{р}} - 1\right)^2} \right) \left(M_{w\max} - 0,3 \right)^2$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Влияние чисел Маха на максимальный КПД РК ЦК.
M_{w3max} – число Маха по максимальной скорости на задней стороне лопатки при обтекании входной кромки.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

Модельная проточная часть обычно меньше натурной, но должна иметь такую же форму – т.е. быть геометрически подобной натурной. Теория подобия устанавливает условия, при которых безразмерные характеристики одинаковы у натурных и модельных компрессоров или ступеней, испытанных в различных условиях, или имеющих различные абсолютные размеры, но **одинаковую форму**. Эти условия называются условиями подобия, а объекты, подчиняющиеся этим условиям, называются подобными (обозначение – **idem**). Применительно к неохлаждаемым компрессорам (неохлаждаемым секциям) для подобия должны быть выдержаны условия подобия **кинематического** и **динамического**.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

Кинематическое подобие – во всех сходственных точках рассматриваемых объектов отношения скоростей должны быть одинаковыми, как и их направления, то есть одинаковыми должны быть углы потока. Это, в частности, означает, что в одинаковых контрольных сечениях треугольники скоростей должны быть подобными. Кинематическое подобие обеспечивается при соблюдении следующих условий:

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

1. **Геометрическое подобие.** Отношения сходственных линейных размеров проточных частей сопоставляемых объектов должны быть одинаковыми. То есть, проточные части имеют одинаковую форму, отличаясь только размерами. Так как линейные размеры проточной части принято представлять в безразмерном виде по отношению к характерному размеру $D_н$ (ОК) или D_2 (ЦК), геометрическое подобие означает равенство этих отношений, а также равенство сходственных углов лопаточных аппаратов, формы и числа лопаток.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

2. Равенство условных коэффициентов расхода Ф и равенство отношения плотностей ρ/ρн*, что гарантирует равенство коэффициентов расхода φ в сходственных контрольных сечениях и подобие треугольников скоростей. Равенство отношения плотностей достигается при выполнении прочих перечисленных условий и равенстве показателей изоэнтропы ***k*** и критериев сжимаемости Маха (***M***) или однозначно связанного с ним коэффициента скорости λ.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

Динамическое подобие – во всех сходственных точках рассматриваемых объектов отношения действующих сил должны быть одинаковыми.

Известно, что на газовые частицы и элементы поверхности действуют две группы сил – нормальные силы давления и касательные силы вязкости. Поле сил давления создается в результате возникновения сил инерции при отклонении потока поверхностями проточной части от инерциального направления. Подобие сил давления является следствием кинематического подобия и не требует дополнительных условий. При подобных полях скоростей подобие сил вязкости обеспечивается равенством критерия вязкости Рейнольдса (**Re**).

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

Критерии подобия и числа подобия. Безразмерные параметры $\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{M}$ (λ), **Re** называются критериями подобия. При их равенстве у двух геометрически подобных компрессоров или ступеней при одинаковых коэффициентах расхода **Ф** оказываются равными коэффициенты полезного действия, потерь, напора и ряд других безразмерных соотношений ($\boldsymbol{c}/\boldsymbol{u}_2$, $\boldsymbol{w}/\boldsymbol{u}_2$ и другие), которые называют числами подобия.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

Приближенное подобие, автомодельность, условия испытания моделей. Одинаковость безразмерных характеристик модели и натуры гарантируется при равенстве критериев подобия натуры и модели. Безразмерные характеристики представляют зависимости КПД и коэффициента напора от коэффициента расхода при критериях подобия, выступающих в качестве параметров:

$$\eta,\ \psi = f(\Phi) = \text{idem} \ \text{при} \ k,\ M\ (\lambda),$$

$$\text{Re} = \text{idem}.$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

По этой причине оказывается возможным использовать критерии подобия ***M*** (λ) и **Re** в условной, но удобной для расчетов проектирования форме (на примере ЦК):

$$M_u = \frac{u_2}{\sqrt{kRT_н^*}}, \quad \mathrm{Re}_u = u_2 D_2/\nu_н = u_2 D_2\, \rho_н/\mu_н$$

где $\nu_н$, $\mu_н$ – коэффициенты кинематической и динамической вязкости по начальным условиям.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

С учетом сказанного, условия подобия можно представить в виде:

$$\eta,\ \psi = f(\Phi) = \text{idem}$$

$$\text{при} \qquad k,\ M_u\ (\lambda_u),\ \mathrm{Re}_u = \text{idem}.$$

Обеспечение всех условий подобия натурному компрессору при испытании его модели чаще всего не выполнимо.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

Обычно испытания моделей проводят на стендах с **открытым контуром**, то есть, модель отдельной ступени или компрессора испытывается на атмосферном воздухе. В открытом контуре условие $\boldsymbol{k}$ **= idem** не может быть выполнено, если сжимаемый в натурном ТК газ имеет показатель изоэнтропы, не равный $\boldsymbol{k}$ **= 1,4**. Для строгого выполнения подобия испытания следует вести испытания на стенде с **замкнутым контуром**, в котором циркулирует газ с $\boldsymbol{k}_{\text{мод}} = \boldsymbol{k}_{\text{нат}}$.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

Стендами с замкнутым контуром располагают не все организации. Кроме того, испытания в замкнутом конуре (**полное подобие**) сложнее, длительнее и дороже испытаний на стендах с открытым контуром. Поэтому испытания моделей чаще ведут на стендах с открытым контуром, вынужденно соблюдая условия подобия лишь **приближенно**.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

Основные условия приближенного подобия:

1. При испытании отдельной ступени наиболее важно выполнить условие M_u = **idem**. Этот критерий сжимаемости определяет отношение плотностей в контрольных сечениях проточной части:

$$\varepsilon = \rho_2 / \rho_1 = (1 + (k-1)\psi_T M_u^2)^{1/(n-1)}$$

Если число подобия $\varepsilon \neq$ **idem** треугольники скоростей модели и натуры в сходственных контрольных сечениях не подобны, что нарушает условие кинематического подобия.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

2. Показатель изоэнтропы k так же определяет отношение плотностей наряду с M_u. Расчеты и опыты показывают, однако, что для отдельных ступеней при $M_u \leq 1$ влиянием k можно пренебречь.

3. Для многоступенчатых ТК с большим, чем у отдельной ступени отношением давлений, важнее выполнить условие ε = **idem**. Поэтому вместо условия M_u = **idem** следует принять условие приближенного моделирования ε = **idem**, из которого определяется значение $M_{u\,мод}$ и $u_{2мод}$, при котором следует вести испытания.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Подобие условий течения в проточной части

4. Движение газа в проточной части носит турбулентный характер. Считается, что переход от ламинарного к турбулентному режиму в лопаточном аппарате имеет место, если “физическое” число Рейнольдса превышает 10^5: $\mathbf{Re}_w = wB / \nu > 10^5$. Здесь w – средняя скорость в лопаточной решетке, B – продольный размер лопатки (хорда), ν – коэффициент кинематической вязкости газа в решетке.

При турбулентном характере течения потери напора слабо уменьшаются с ростом Re, если поверхности ПЧ **гидравлически гладкие**. В этом случае шероховатость не влияет на поверхностное трение. Эмпирическая зависимость для коэффициента силы трения аппроксимируется уравнением: $c_w = 0{,}0307 / \mathbf{Re}_w^{1/7}$.

При столь малой степени для уменьшения сопротивления вдвое число Рейнольдса должно увеличиться почти на два порядка.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Классификация потерь по физической природе и по месту возникновения

В проточной части ТК имеют два основных вида потерь напора:

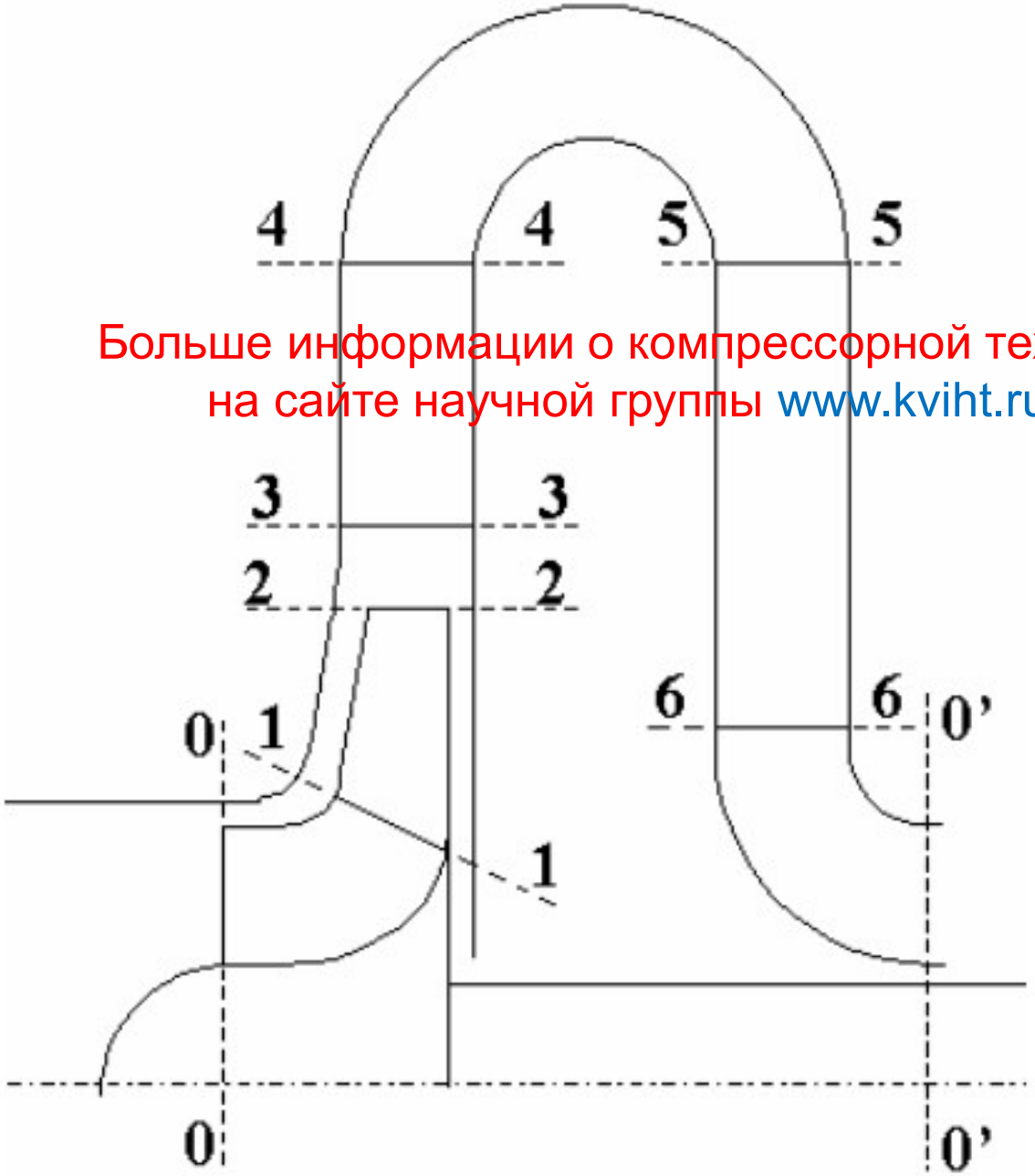
1. **Потери трения** газа о поверхности ПЧ в пограничных слоях (*рассмотрены выше*);
2. **Вихревые потери** в зонах отрыва пограничного слоя.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Классификация потерь по физической природе и по месту возникновения

Вихревые потери практически не зависят от критерия Рейнольдса, если течение турбулентное. При ламинарном течении вихревые потери заметно уменьшаются с ростом **Re**, скачкообразно снижаясь до некоторого практически постоянного уровня при переходе к турбулентному режиму движения газа. При $\mathbf{Re}_{u} > 10^6 \ldots 10^7$ влияние этого критерия на характеристики обычно проявляется слабо. Поэтому, если при испытании модели $\mathbf{Re}_{u\,мод} \geq 10^6$, а у натурного ТК значения $\mathbf{Re}_{u\,нат}$ больше, экспериментальные характеристики модели можно использовать для проектирования натурного компрессора. То есть, условие $\mathbf{Re}_{u} = \mathbf{idem}$ не является обязательным.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru



Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Контрольные сечения центробежной компрессорной ступени промежуточного типа

Классификация потерь по физической природе и по месту возникновения

В соответствии с принятым делением потерь по месту их возникновения потери напора в ступени рассматриваются как сумма потерь в отдельных элементах проточной части:

$$h_w = h_{w0-1} + h_{w1-2} + h_{w2-3} + h_{w3-4} + \\ + h_{w4-5} + h_{w5-6} + h_{w6-0'}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Классификация потерь по физической природе и по месту возникновения

Потери в лопаточной решётке РК (сечения 1–2) также можно разбить на ряд составляющих по месту возникновения и физической сути явления:

1. Потери трения на передней и задней сторонах лопатки и потери трения на ограничивающих поверхностях основного и покрывающего дисков (с учетом так называемых вторичных течений);

2. Потери смешения вследствие образования низкоэнергетической зоны на задней стороне лопаток;

3. Ударные потери при обтекании входных кромок лопаток с положительными или отрицательными углами атаки.

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Классификация потерь по физической природе и по месту возникновения

С учётом сказанного потери в лопаточной решётке рабочего колеса можно представить как сумму двух составляющих – **профильных потерь на поверхности лопатки и потерь на ограничивающих поверхностях основного и покрывающего дисков**:

$$h_{w1-2} = h_{w\text{пр}} + h_{w\text{о}}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Классификация потерь по физической природе и по месту возникновения

В свою очередь, профильные потери делятся на три составляющих – **ударные потери при обтекании входной кромки, потери на стороне давления** (передняя сторона) **и на стороне разрежения** (задняя сторона)

$$h_{w\text{пр}} = h_{w\text{уд}} + h_{w\text{п}} + h_{w\text{з}}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Классификация потерь по физической природе и по месту возникновения

Потери на стороне разрежения состоят из двух составляющих – **потерь трения и потерь смешения:**

$$h_{w\text{з}} = h_{w\,\text{тр}} + h_{w\,\text{см}}$$

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Аналогичные соотношения можно записать и для лопаточных участков неподвижных элементов ступени, добавив **волновые потери** для сверхзвукового потока и потери от **вторичного течения**.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru