# Теория турбокомпрессоров

***Курс лекций. 8 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 8.*

СОДЕРЖАНИЕ

- **Криволинейные каналы. Распределение давлений и скоростей.**
- **Невязкое и вязкое течение в колене. Понятие о местной диффузорности и конфузорности.**
- **Сдвиговый характер течения, его влияние на пограничный слой, зона наибольших потерь.**
- **Число Росби. Стабилизация (ламинаризация) и дестабилизация (усиление турбулентности) на вогнутой и выпуклой поверхностях поворотного колена.**
- **Трехмерный пограничный слой на ограничивающих поверхностях. Введение понятия о вторичных течениях.**
- **Влияние геометрических параметров колена на потери от поворота потока. Течение в криволинейных конфузорах и диффузорах.**
- **Способы уменьшения потерь при повороте потока.**

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

# Течение в криволинейном канале

В проточной части турбокомпрессоров обычно встречаются криволинейные пространственные каналы. Наиболее близкой к действительному потоку схематизацией является деление таких каналов на ряд двумерных криволинейных каналов, для чего по высоте лопаток (в осевых – по оси r, в центробежных – по оси z или по оси, перпендикулярной к средней линии канала в меридиональной плоскости) проводится определенное число осесимметричных поверхностей тока.

Проанализируем общие закономерности движения газа в криволинейных каналах, начав с простейшей схемы криволинейного колена. При этом будем полагать поток идеальным и безвихревым (потенциальным).

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

# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале

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

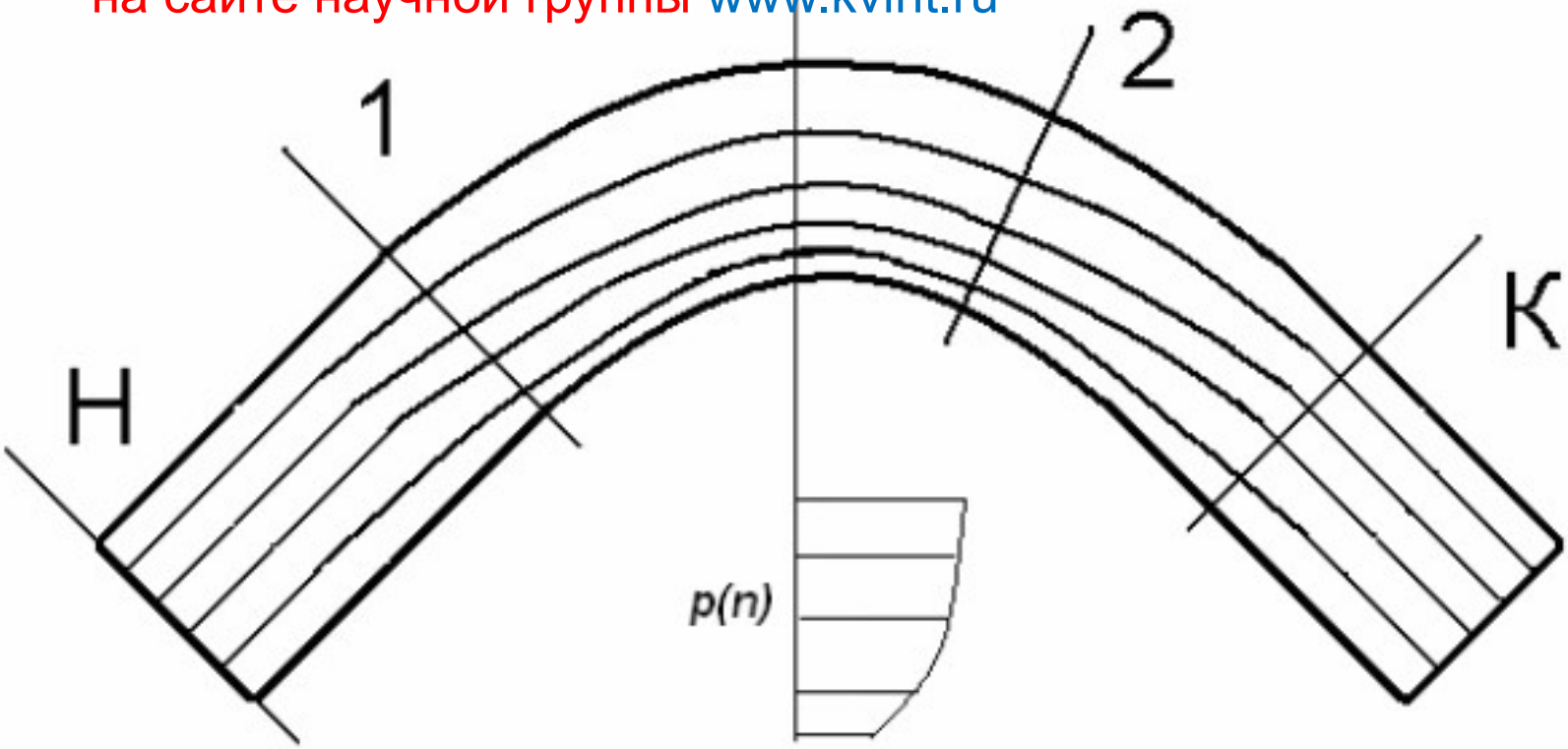
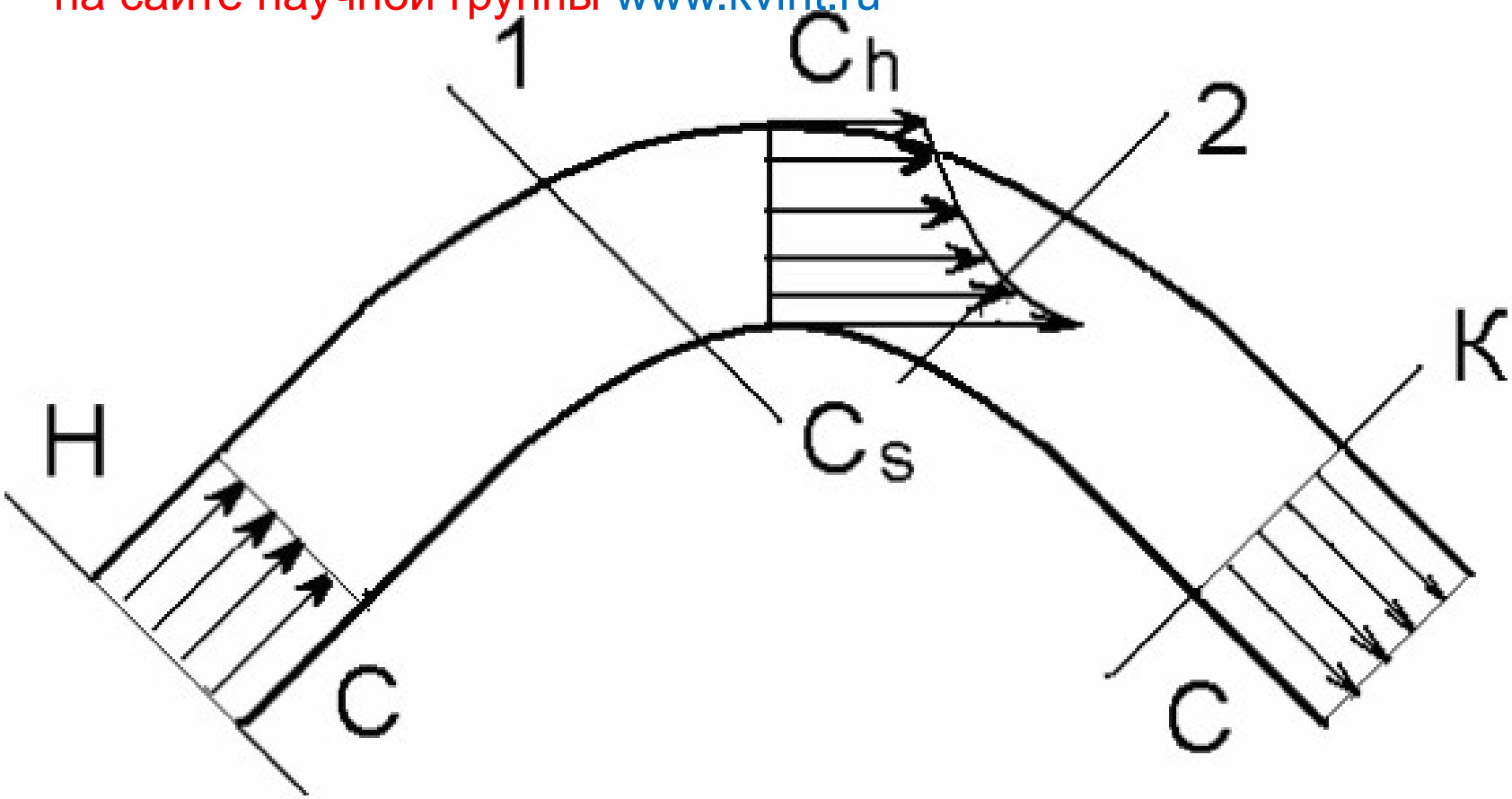



Схема движения невязкого газа в криволинейном колене.

Эпюра давления.

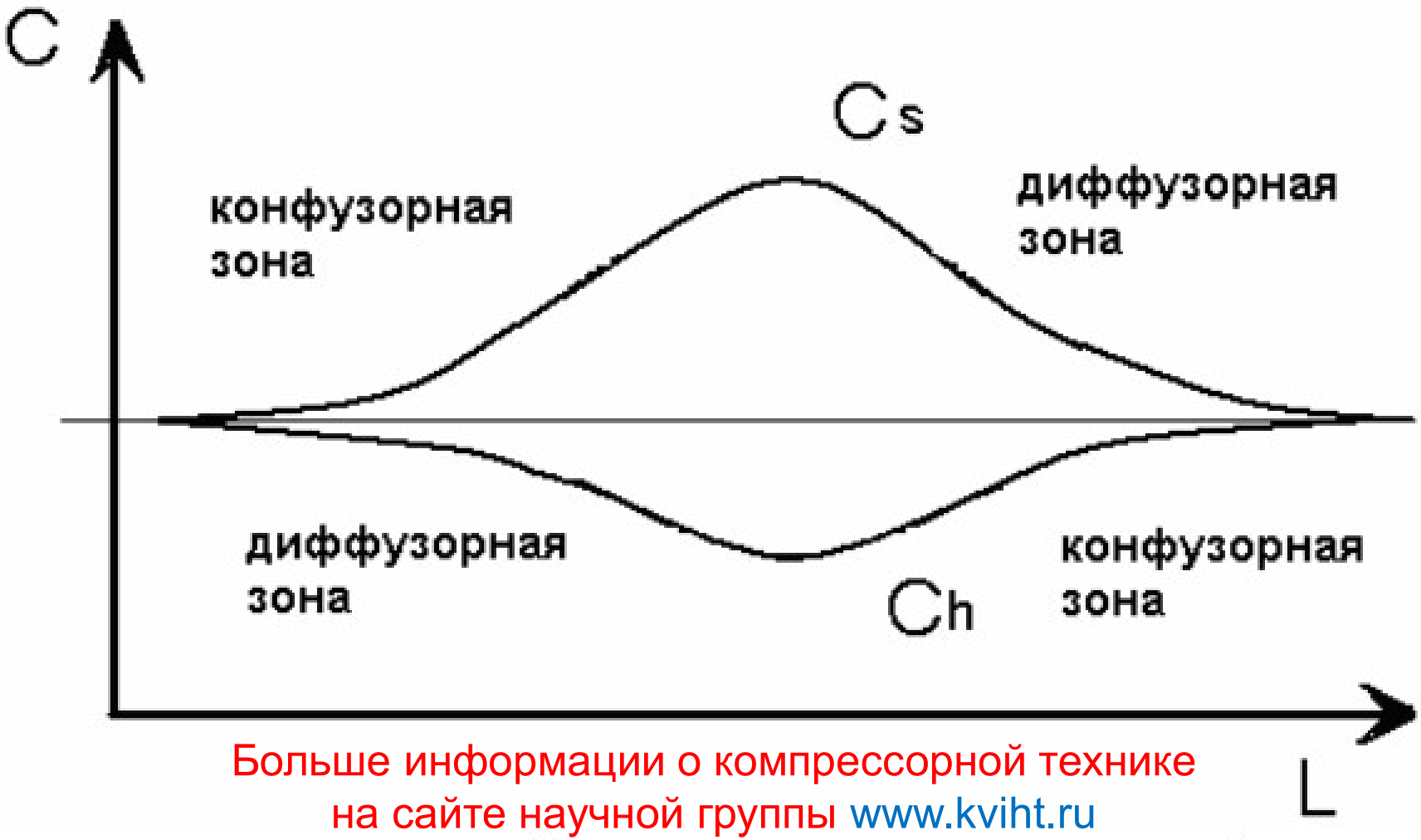
# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале

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




Эпюра скоростей газовых частиц в колене и сопряженных трубопроводах

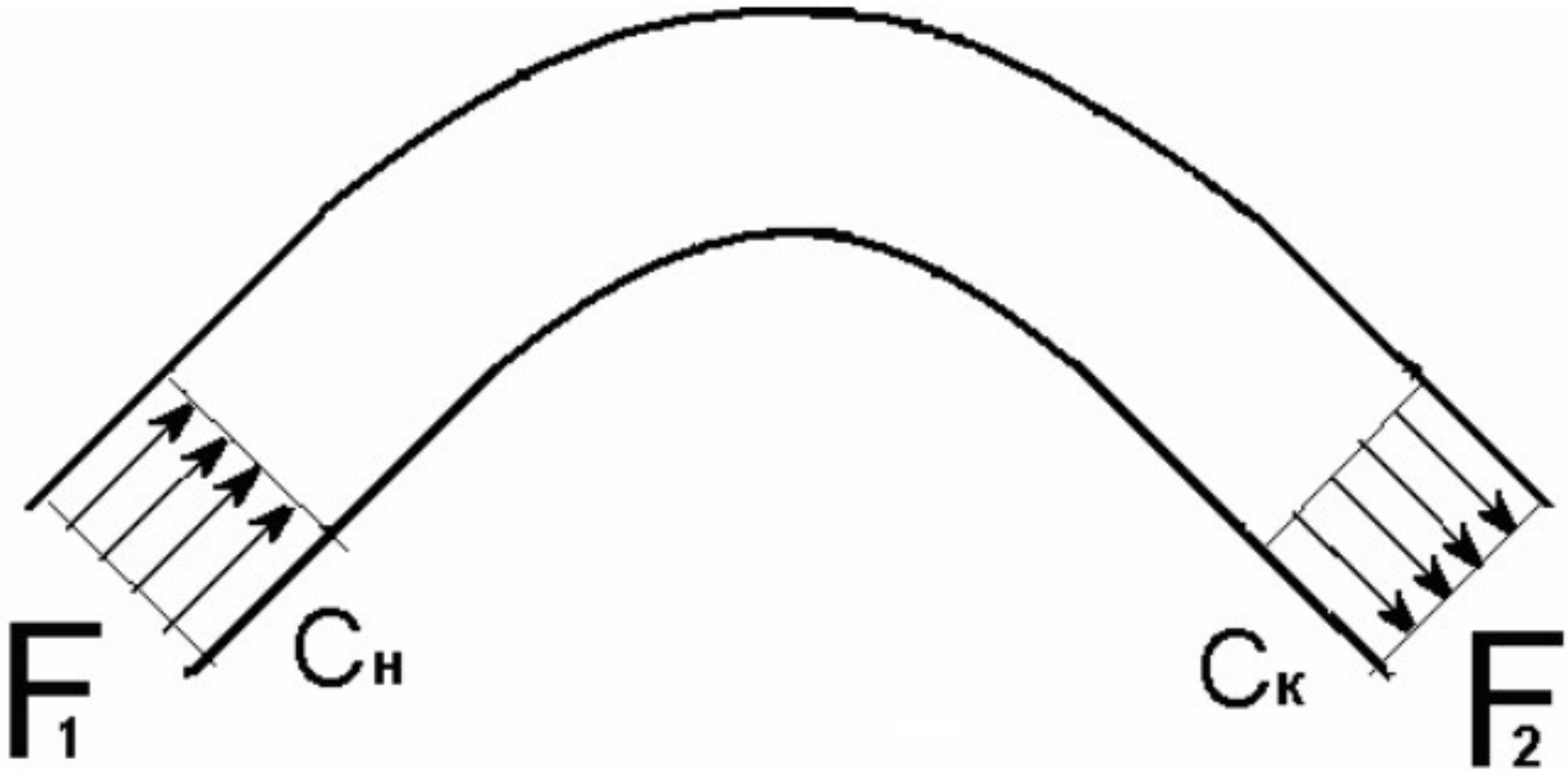
# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале




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

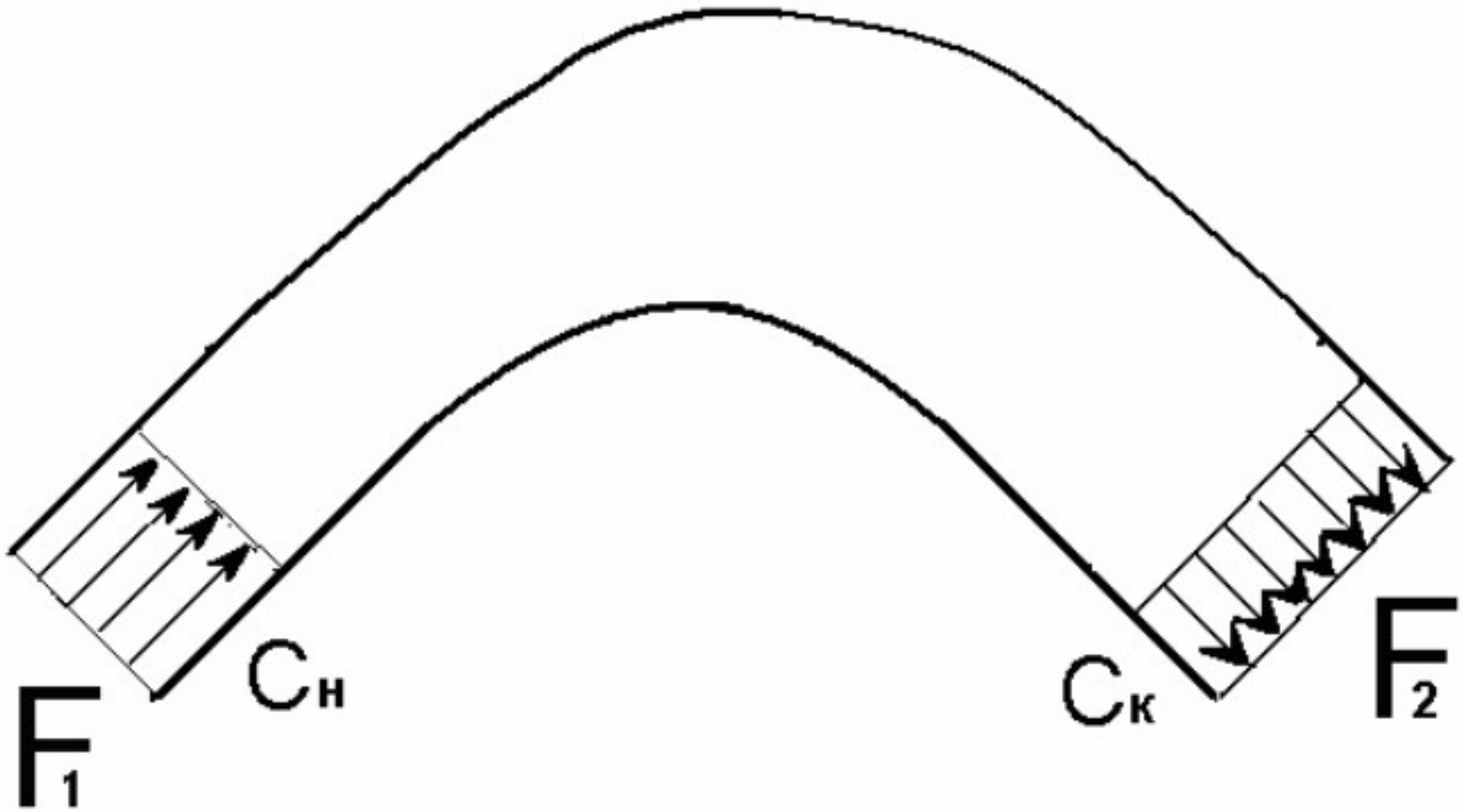
Диаграмма скоростей на поверхностях трубопровода

# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале




Поворотные каналы с разным характером изменения проходного сечения по длине и эпюры скоростей: $F = const$

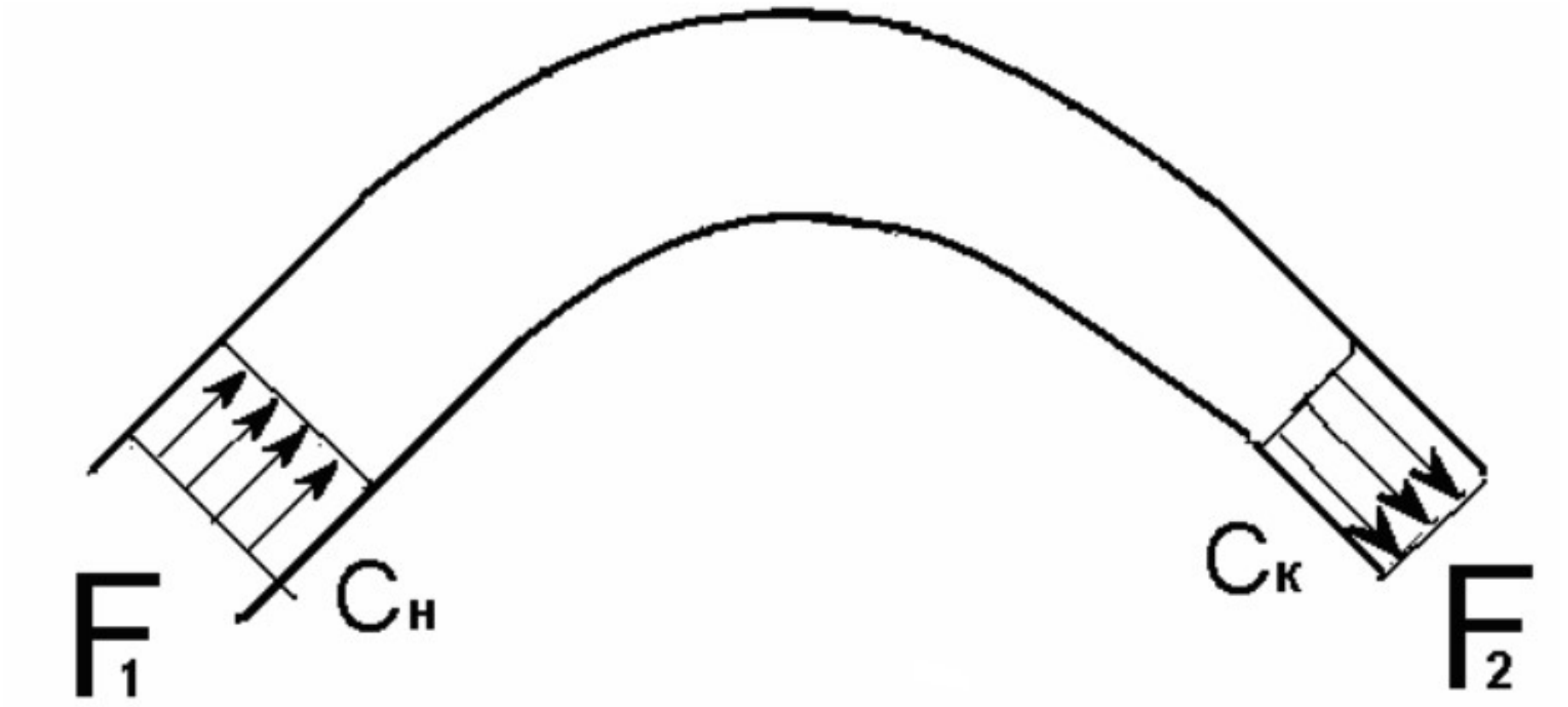
# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале




Поворотные каналы с разным характером изменения проходного сечения по длине и эпюры скоростей: $F_2 \succ F_1$

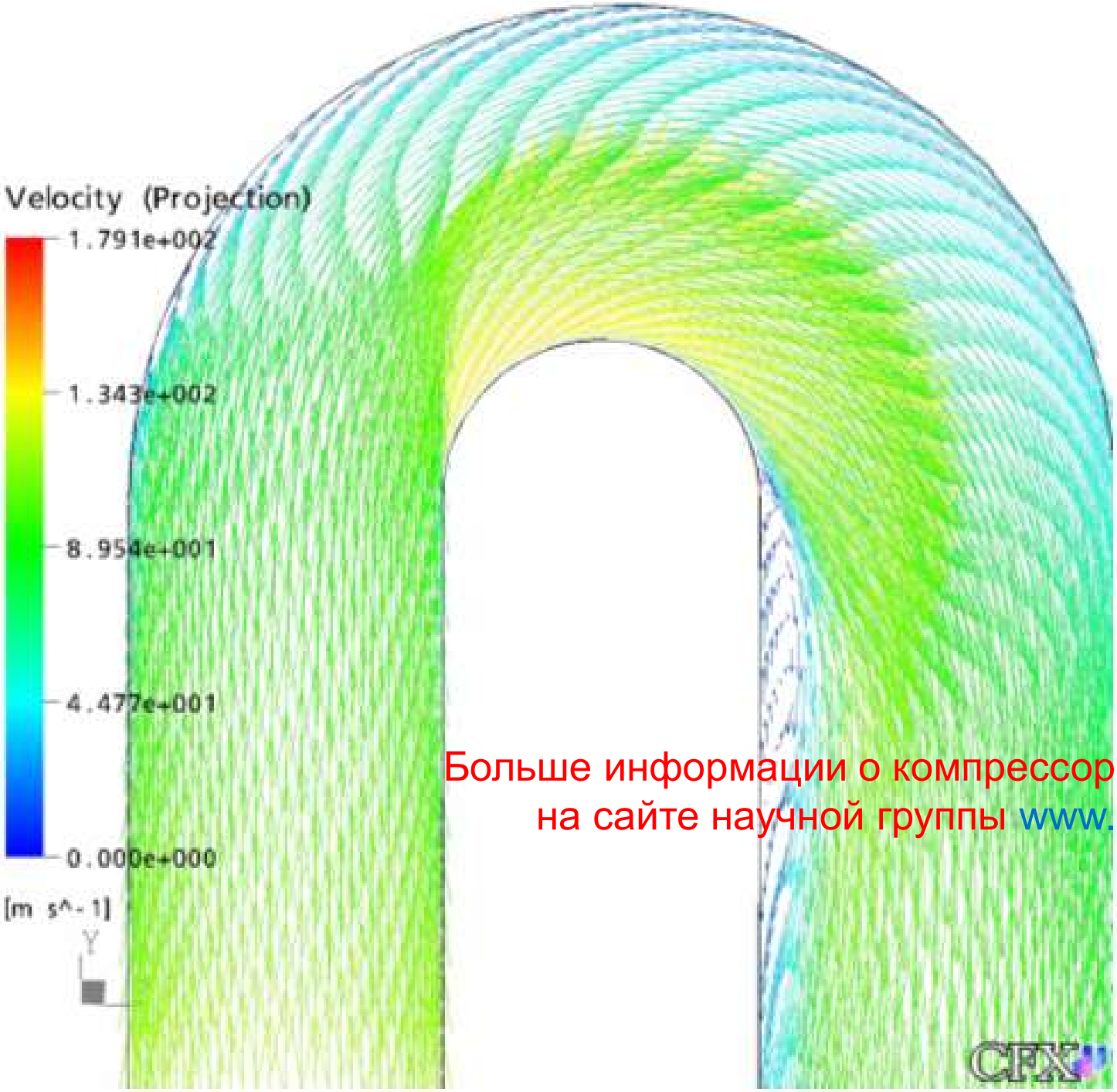
Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале



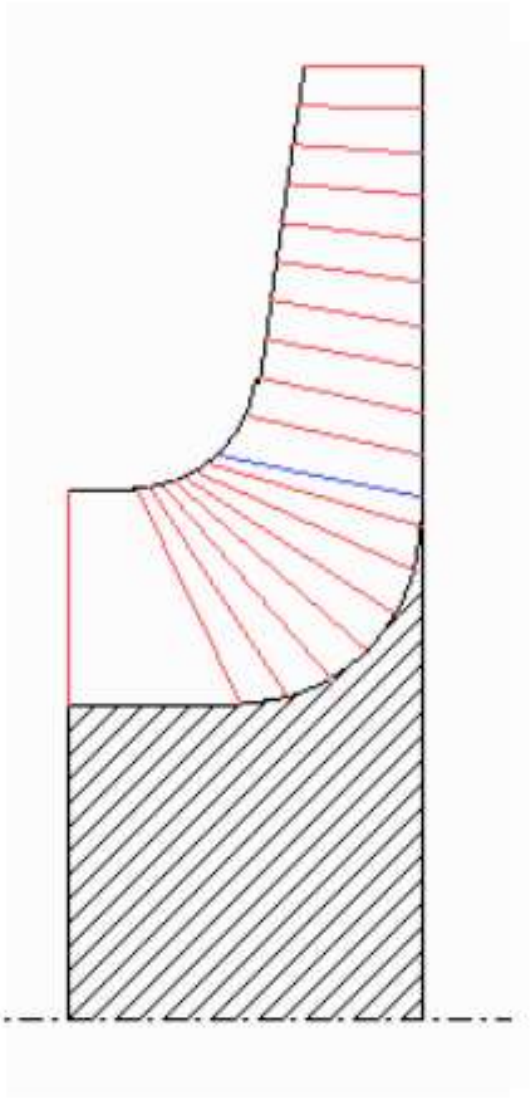

Поворотные каналы с разным характером изменения проходного сечения по длине и эпюры скоростей: $F_2 \prec F_1$

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




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

Векторы скорости в «БЛД – ПК – ОНА» ЦК



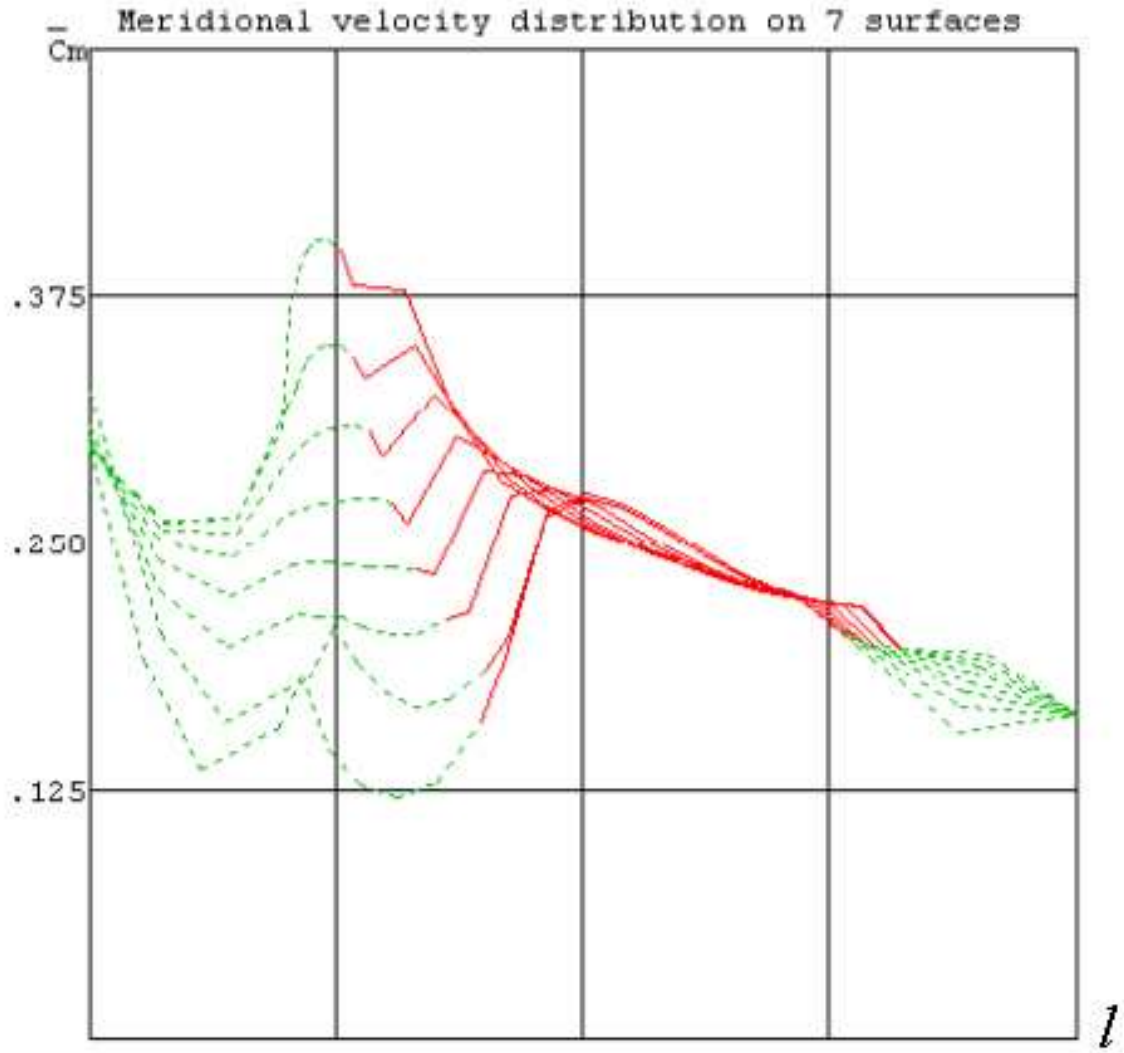


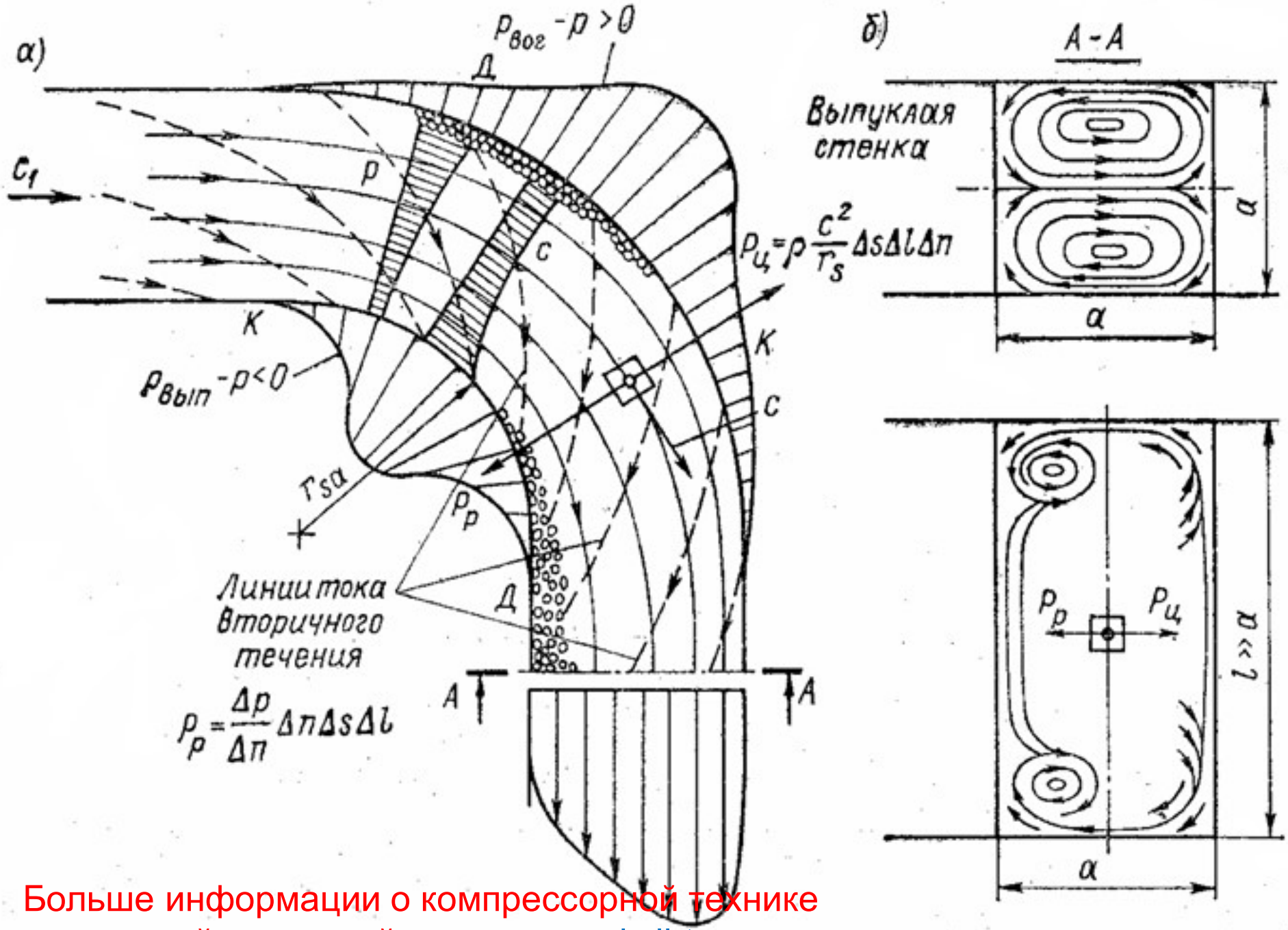

Схема РК ЦК. Изменение меридиональной скорости в невязком ядре потока на нескольких поверхностях тока перед РК и внутри межлопаточного канала

# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале

Уравнение равновесия частицы. В цилиндрических координатах, связанных с частицей, это уравнение для стационарного режима в проекциях на оси ***n*** (направлена по радиусу перпендикулярно вектору скорости потока) и ***s*** (по направлению совпадает с вектором скорости) имеет вид:

$$c^2 / r_s = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n}; \qquad \frac{\partial c}{r\partial\theta}c = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{r\partial\theta}.$$

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




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

Распределение скоростей и давлений в криволинейном канале

# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале

Полагая энергию потока на входе в канал постоянной по сечению и отсутствие подвода энергии к газу извне, т. е. полагая поток потенциальным ($p^* = \text{const}$), можно применить уравнение Бернулли к частицам в различных струйках тока по любому сечению. Тогда:

$$dp/\rho + dc^2/2 = 0$$

$$dp = -\rho\, dc^2/2$$

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

# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале

В частном случае, когда радиусы кривизны линий тока всех точек в рассматриваемом сечении имеют один и тот же центр:

$$dn/r_s + dc/c = 0$$

$$cr_s = \text{const}$$

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

## Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале

Тот же результат можно получить из приближенных рассуждений: в направлении оси ***n*** равновесие частицы газа определяется равенством сил давления $\boldsymbol{P_p}$ и центробежной силы $\boldsymbol{P_ц}$ ($\Delta l$ – размер элемента по высоте канала ):

$$\frac{\Delta p}{\Delta n}\Delta n \Delta s \Delta l = \rho \frac{c^2}{r_s}\Delta s \Delta l \Delta n$$

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

# Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале

Скорость в потоке:

$$c = c_a r_{sa} / r_s$$

где $c_a$ – скорость на выпуклой стенке;

$r_{sa}$ и $r_s$ – радиусы выпуклой стенки и какой-то линии тока в потоке.

Полагая при этом $\rho \approx const$ по сечению, получим:

$$p = p_a + 0{,}5\rho c_a^2 (1 - r_{sa}^2 / r_s^2)$$

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

## Течение в криволинейном канале. Распределение давлений и скоростей при невязком течении в криволинейном канале

Если в канале нет отрывов, то поле скоростей, рассчитанное для идеального потока, хорошо совпадает с опытным распределением. При наличии отрывов такое совпадение имеет место лишь до точки отрыва.

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

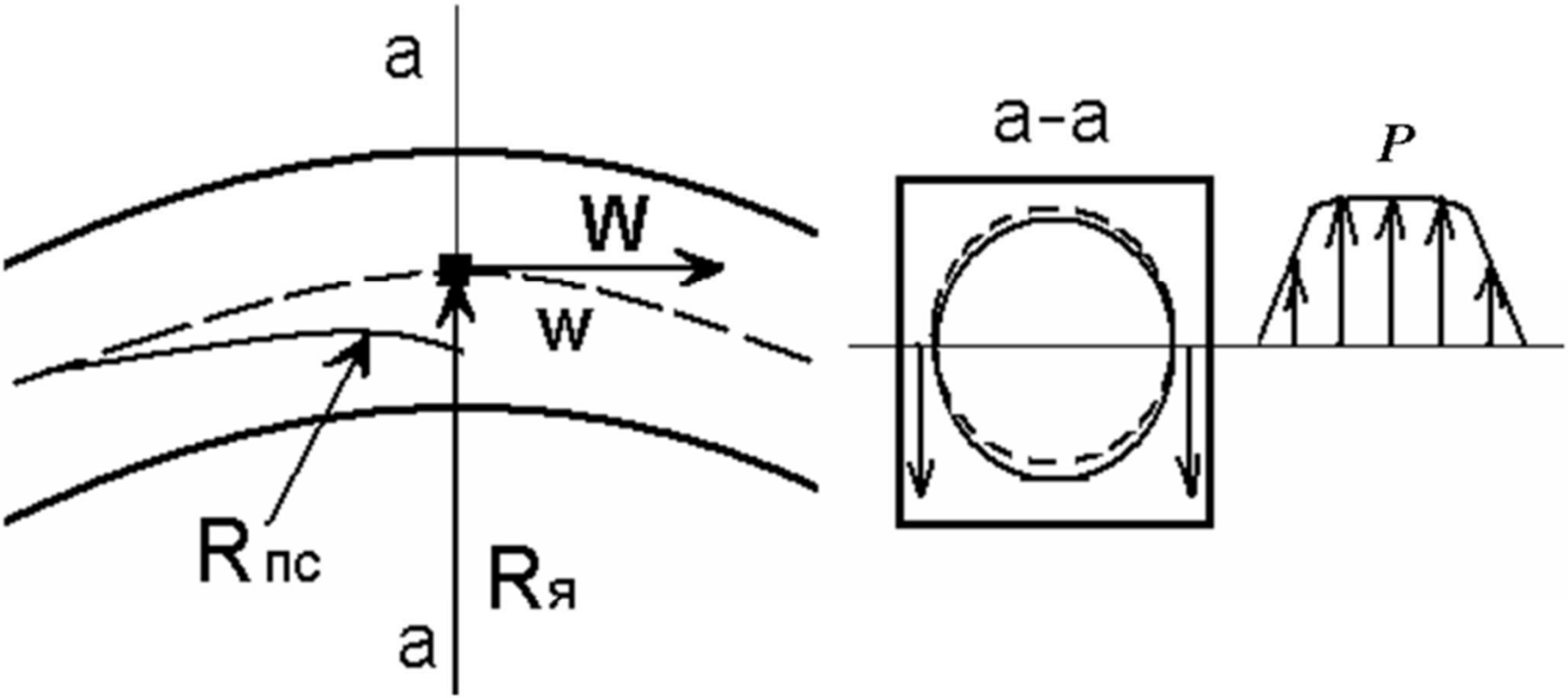
# Течение в криволинейном канале. Вторичные течения

При течении **вязкого газа** в криволинейных каналах возникают так называемые **вторичные течения**, располагающиеся в плоскостях, перпендикулярных к направлению основного потока.

Источником вторичного течения являются **пограничные слои** на ограничивающих канал стенках

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

# Течение в криволинейном канале. Вторичные течения




Условия равновесия газовых частиц в ядре потока и в пограничном слое на ограничивающих поверхностях

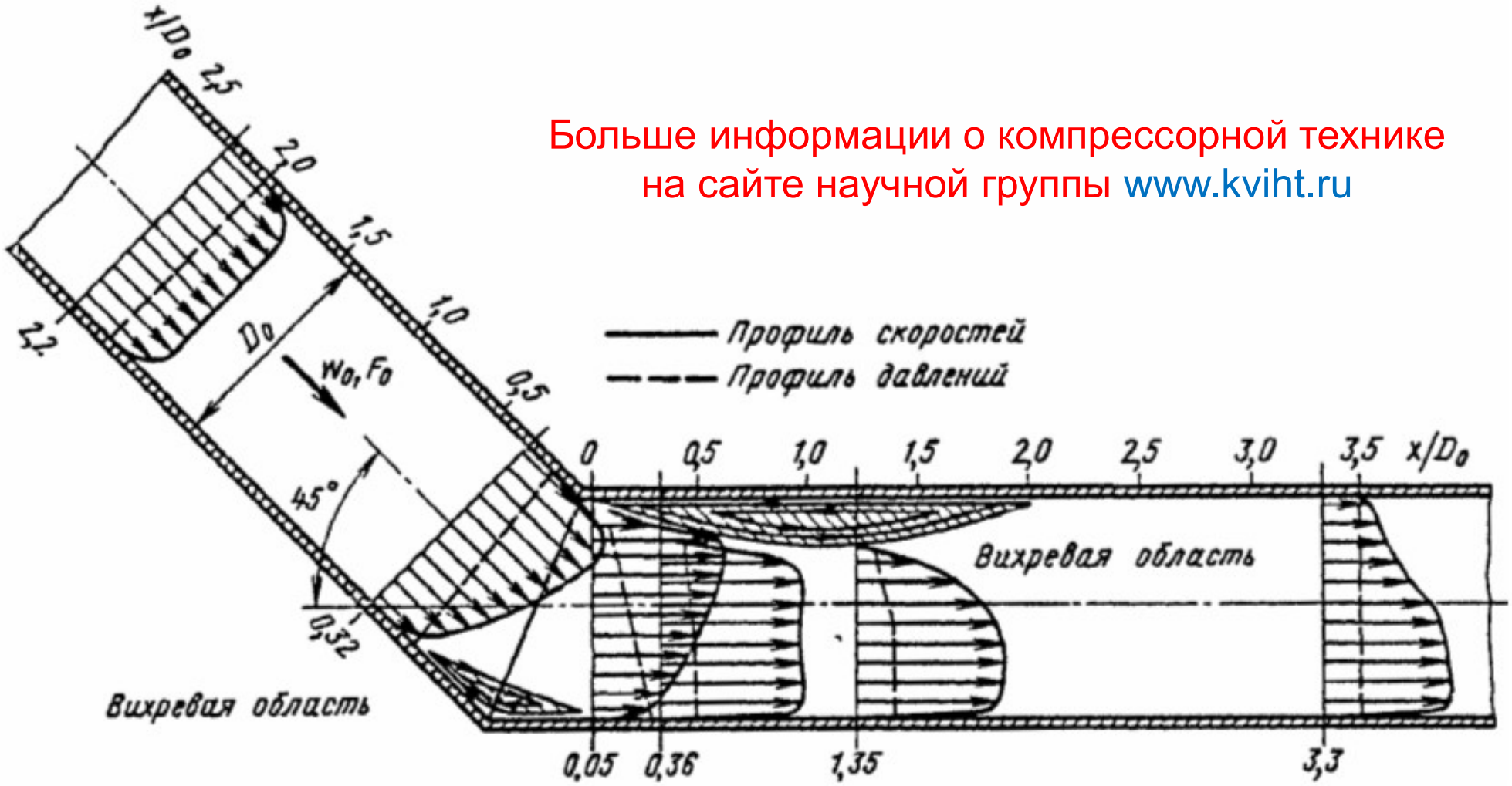
# Течение в криволинейном канале. Вторичные течения

Кинетическая энергия вторичного течения постепенно из-за трения преобразуется в теплоту, в связи с чем **вторичное течение является источником особых вторичных (индуктивных) потерь**. Потери из-за кривизны канала можно рассматривать как сумму дополнительных потерь на трение из-за вторичного движения и потерь, вызванных вихревыми течениями. Одновременно наличие вторичного течения влияет на условия течения в пограничном слое на криволинейных стенках: **ведет к утолщению пограничного слоя па выпуклой и к утонению его на вогнутой поверхности. Утолщение пограничного слоя приводит к более раннему срыву и возрастанию вихревых потерь в зоне наибольших скоростей на выпуклой стенке. Кроме того, вторичные течения приводят к искажению профиля скоростей и давлений на выходе из канала.**

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

# Течение в криволинейном канале.

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




Влияние вихревых областей на профили скоростей и давлений на выходе из колена и в последующем смежном участке трубы постоянного сечения

# Течение в криволинейном канале. Расчёт потерь

Расчёт потерь для каналов с изогнутой осью выполняется по формуле:

$$h_{\text{пов}} = \zeta_{\text{пов}}(c_1^2/2)$$

где коэффициент потерь при повороте $\zeta_{\text{пов}} = K_1K_2K_3$ зависит в основном от угла поворота потока в канале $\delta$ ($K_1$), отношения радиуса поворота оси канала к его высоте $r/a$ или диаметру $r/d$ в случае круглой трубы ($K_2$), и относительной вытянутости поперечного сечения канала $l/a$ ($K_3$).

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

Для $\delta < 70°$ и $r/a < 1$

$$\zeta_{\text{пов}} = 0,9 \sin\delta \frac{0,21}{(r/a)^{0,25}} K_3.$$

При других соотношениях размеров канала $K_1$, $K_2$ и $K_3$ зависят от формы канала следующим образом.

При $\delta = 90°$ $K_1 = 1$.

При $\delta > 100°$ $K_1 = 0,7 + 0,35\delta/90$.

При $r/a \geq 1$ $K_2 = \dfrac{0,21}{\sqrt{r/a}}$.

При $l = a$ $K_3 = 1$, при $l/a = 0,5$ $K_3 \approx 1,12$, при $l/a = 2$ $K_3 \approx 0,85$.

# Течение в криволинейном канале. Расчёт потерь

Таким образом, ясно, что общая диффузорность (или конфузорность) канала $n = f_2/f_1$, закон изменения площади по длине канала $f = f(s)$, местный угол раскрытия канала $\nu$ еще не характеризуют однозначно течение в криволинейном канале. Очень важными характеристиками такого канала являются также его кривизна $1/r_s$ и, как следствие, диффузорность течения в струйках у выпуклой поверхности $c_{a\,\max}/c_{a\,\min}$.

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

## Способы уменьшения потерь при повороте потока:

**1.** Специальное профилирование канала.

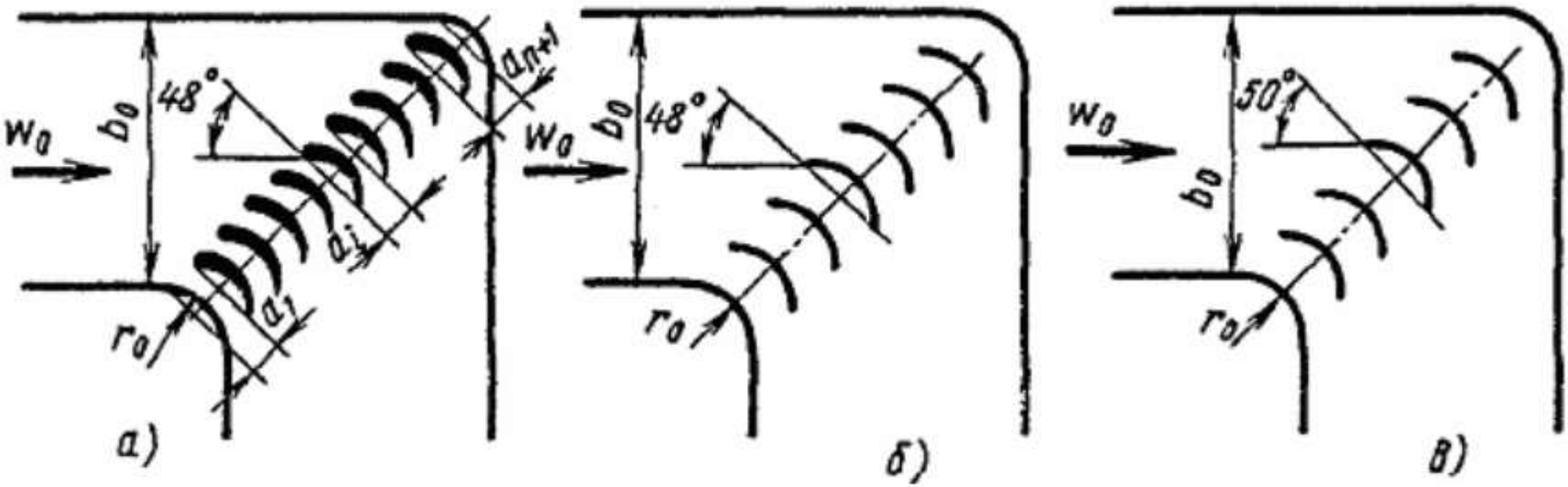
**2.** Наличие разделительных стенок и направляющих лопаток.

**3.** Управление пограничным слоем (отсос пограничного слоя и т.п.)

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

# Течение в криволинейном канале.

# Способы уменьшения потерь при повороте потока




Направляющие лопатки в коленах и отводах:

*а* – профилированные; *б* – тонкие, по дуге 95°; *в* – тонкие, по дуге 107°

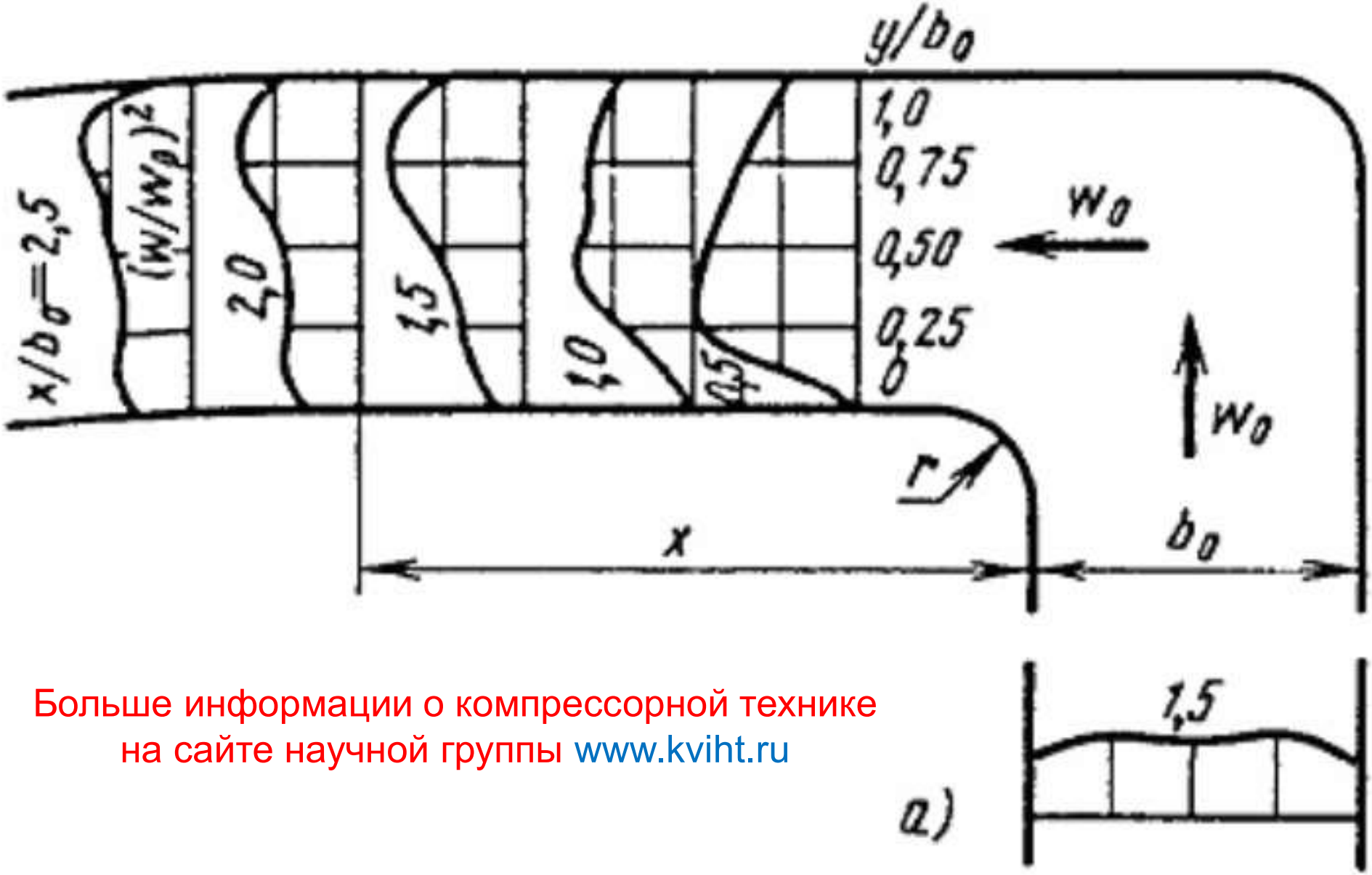
# Течение в криволинейном канале.

# Способы уменьшения потерь при повороте потока

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

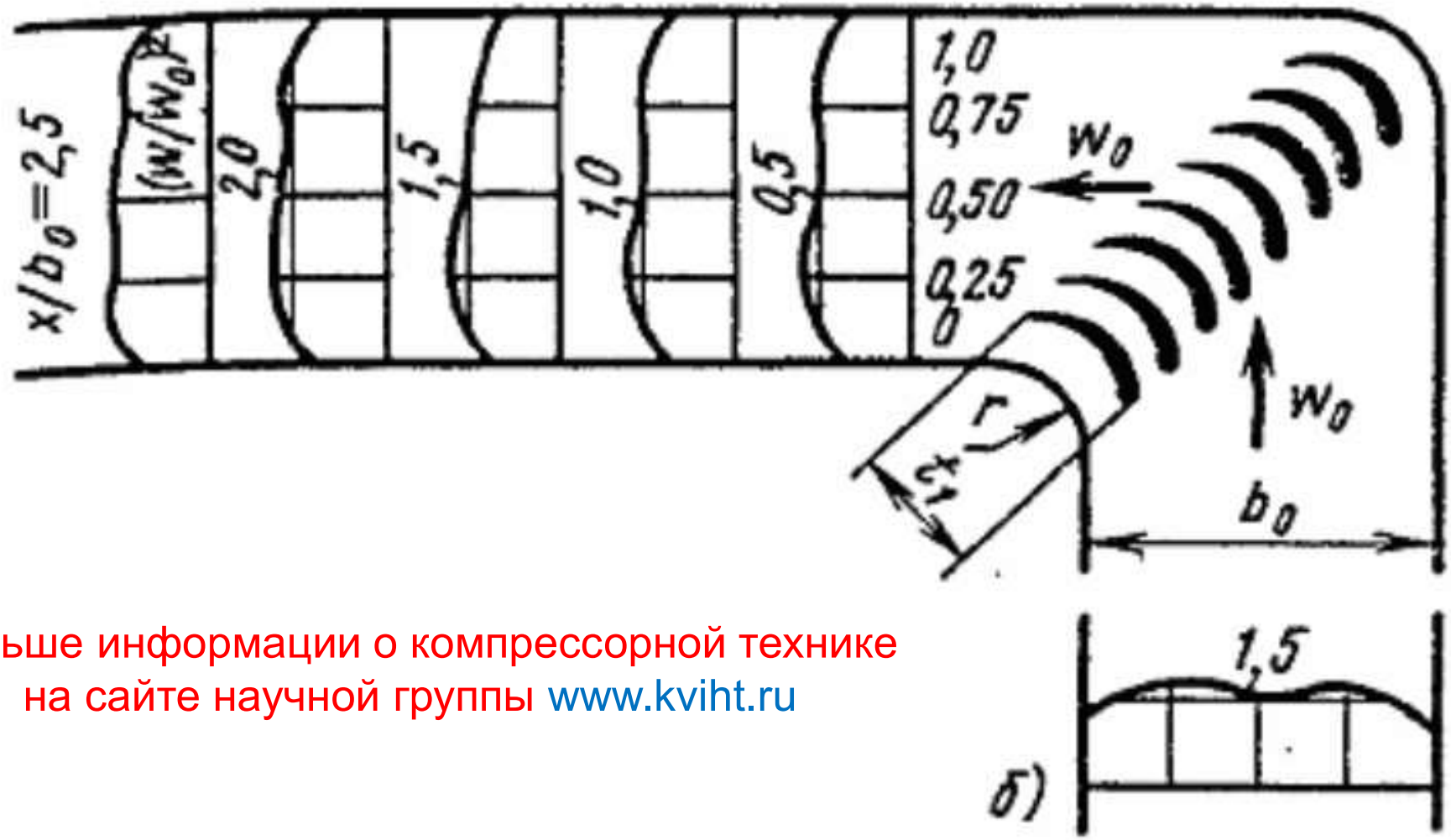
Направляющие лопатки в коленах и отводах:

*г* – концентрические; *д* – разрезные



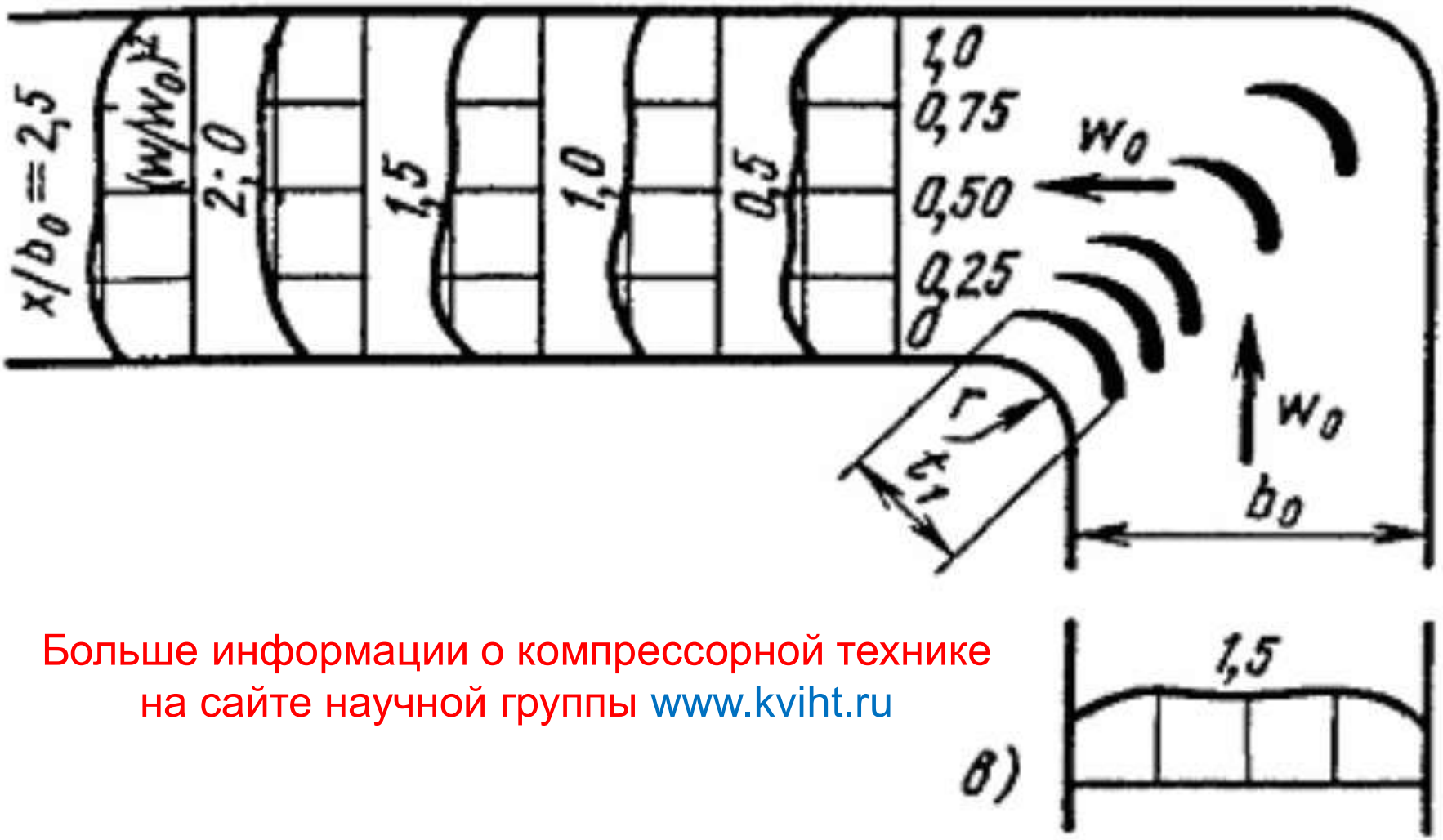

Больше информации о компрессорной технике
на сайте научной группы www.kviht.ru

Схема распределения безразмерных скоростей (скоростных давлений) в колене: *а* – без лопаток;




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

Схема распределения безразмерных скоростей (скоростных давлений) в колене: *б* – с установкой «нормального» числа лопаток;




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

Схема распределения безразмерных скоростей (скоростных давлений) в колене: *в* – с установкой уменьшенного числа лопаток

# Течение в криволинейном канале. Способы уменьшения потерь при повороте потока

Коэффициент сопротивления отвода прямоугольного сечения с нормальным числом оптимально установленных концентрических лопаток может быть найден приближённо по формуле:

$$\varsigma \equiv \frac{\Delta p}{\rho w^2/2} = \left(0,46\,R_0/b_0 + 0,04\right)\varsigma_{б.л}$$

где $\varsigma_{б.л}$ определяется как коэффициент сопротивления $\varsigma$ отвода без лопаток, $R_0$ – радиус поворота по средней линии канала.

# Течение в криволинейном канале.

## Сдвиговый характер течения. Число Росби. Стабилизация и дестабилизация течения в пограничном слое

**Критерий *Ro* – число Росби, характеризует воздействие сил инерции на касательные напряжения, действующие по нормали к поверхностям лопаток.**

Этот критерий представляет собой соотношение между нормальными силами инерции, которые связаны с изменением скорости в ядре потока в нормальном направлении, и силами вязкости, зависящими от изменения скорости в пограничном слое:

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

# Течение в криволинейном канале.

## Сдвиговый характер течения. Число Росби. Стабилизация и дестабилизация течения в пограничном слое

$$Ro = -\frac{\partial W}{\partial n} \Big/ \frac{\partial w}{\partial n}$$

где $W$ – скорость в ядре потока; $w$ – скорость в пограничном слое; $n$ – нормаль (направление от вогнутой к выпуклой поверхности).

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

# Течение в криволинейном канале.

## Сдвиговый характер течения. Число Росби. Стабилизация и дестабилизация течения в пограничном слое

Смысл критерия Росби заключается в том, что силы вязкости являются причиной возникновения турбулентности, а нормальные силы инерции в зависимости от своего направления либо подавляют поперечные пульсации – **стабилизация (ламинаризация) пограничного слоя (сторона разрежения, *Ro* > 0)**, либо способствуют усилению поперечных пульсаций – **дестабилизация (усиление турбулентности) пограничного слоя (сторона давления, *Ro* < 0)**. Таким образом, число Росби характеризует течение в неподвижных каналах, если течение не прямолинейное.

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

# Течение в криволинейном канале.

## Сдвиговый характер течения. Число Росби. Стабилизация и дестабилизация течения в пограничном слое

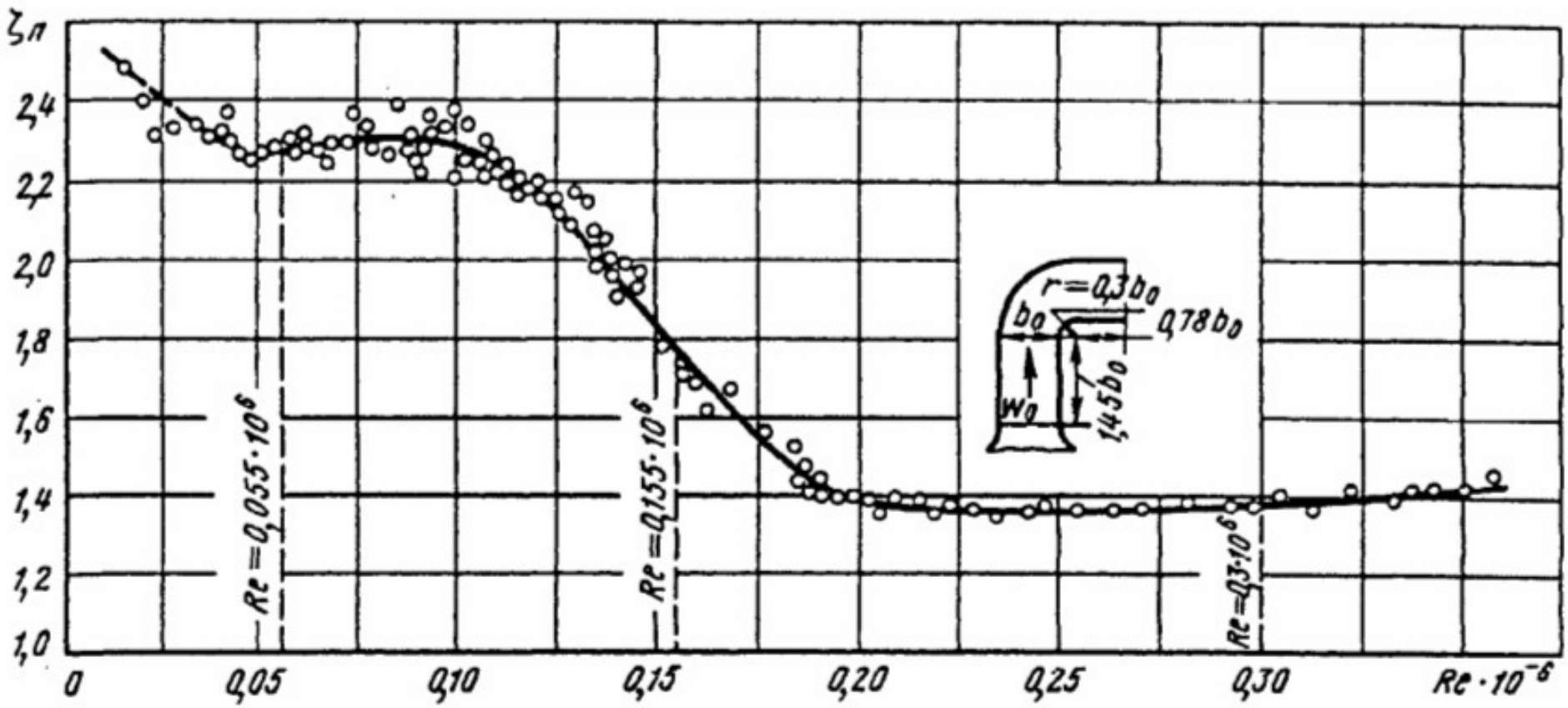
Слои газа движутся с разной скоростью, сдвигаясь друг относительно друга.

**Сдвиговые течения** – движение потока с отклонением от инерциального направления.

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

# Течение в криволинейном канале.

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




Зависимость коэффициента полного сопротивления $\zeta_п$ от числа Re для отвода с $\delta=90^\circ$ и гладкими стенками ($\bar{\Delta} = 0,00003$)

# Течение в криволинейном канале.

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

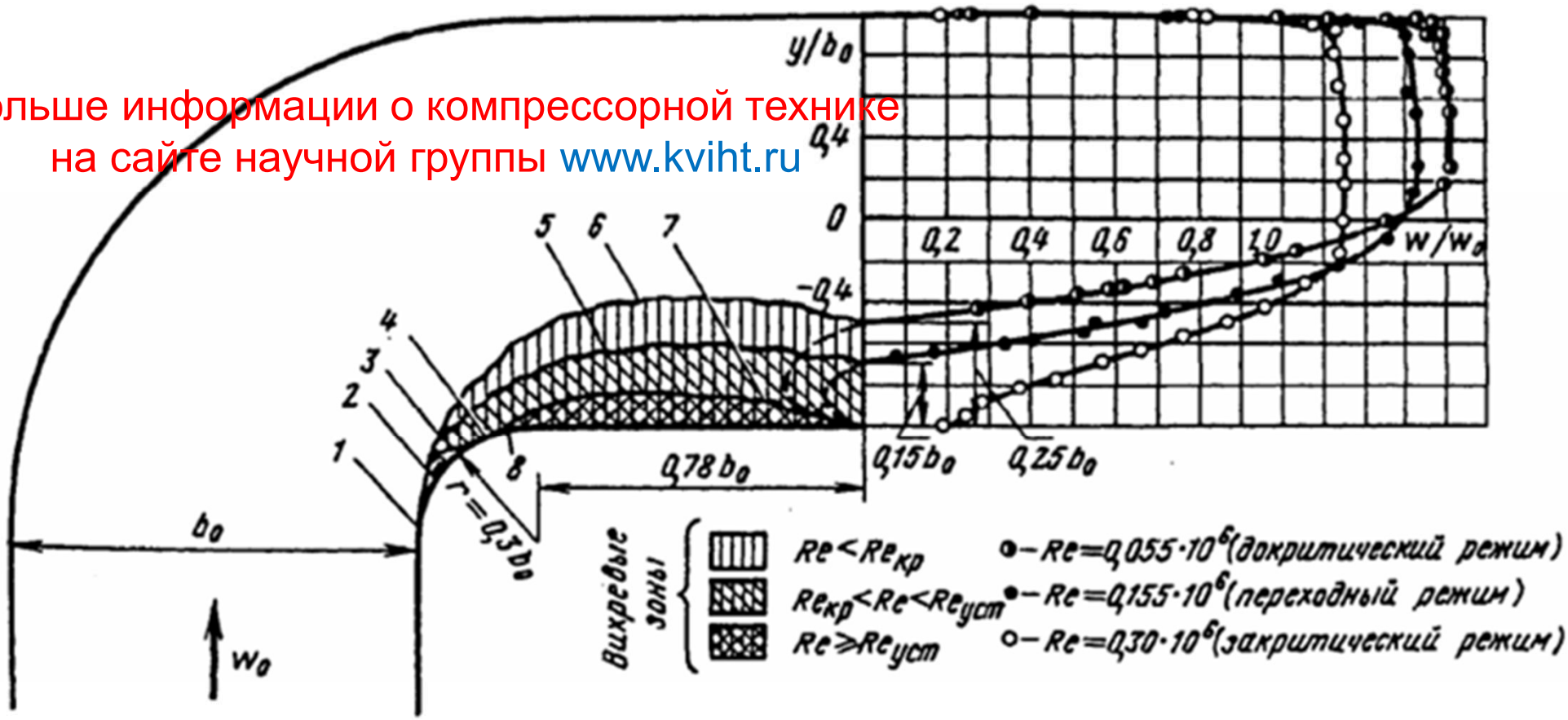



Схема отрыва потока от внутренней стенки и распределение скоростей по средней линии сечения отвода с гладкими стенками при различных режимах течения:

# Течение в криволинейном канале.

На предшествующем рисунке:

1 – точка ламинарного отрыва;

2 – «мёртвая» зона отрыва;

3 – точка перехода;

4 – точка прилипания оторвавшегося слоя;

5 – турбулентное расширение оторвавшегося слоя;

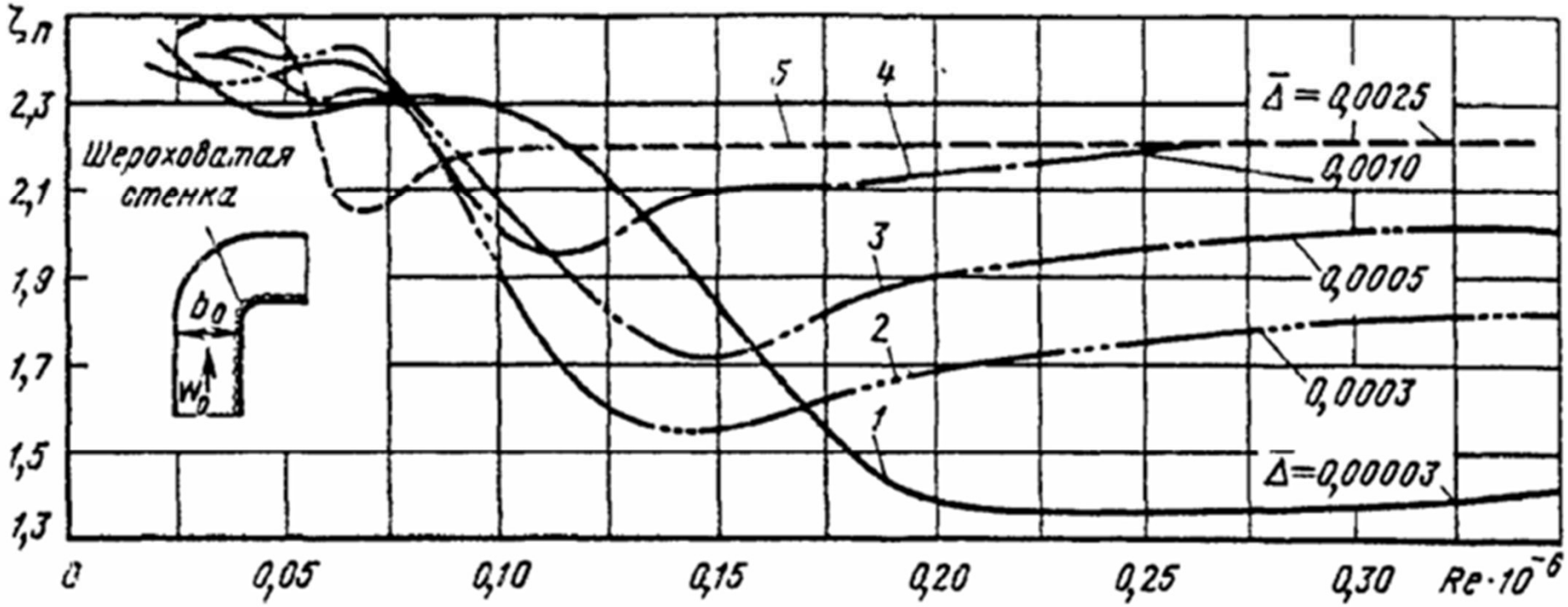
6 и 7 –нижняя граница оторвавшихся соответственно ламинарного и турбулентного слоёв;

8 – точка турбулентного отрыва.

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

# Течение в криволинейном канале.

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




Кривые сопротивления $\varsigma_п = f(\mathrm{Re})$ отвода, с внутренней стенкой:

1 – гладкой; покрытой: 2 – оберточной бумагой; 3 – афишной тисненой бумагой;

4 – шлифовальной шкуркой №140; 5 – шлифовальной шкуркой №60

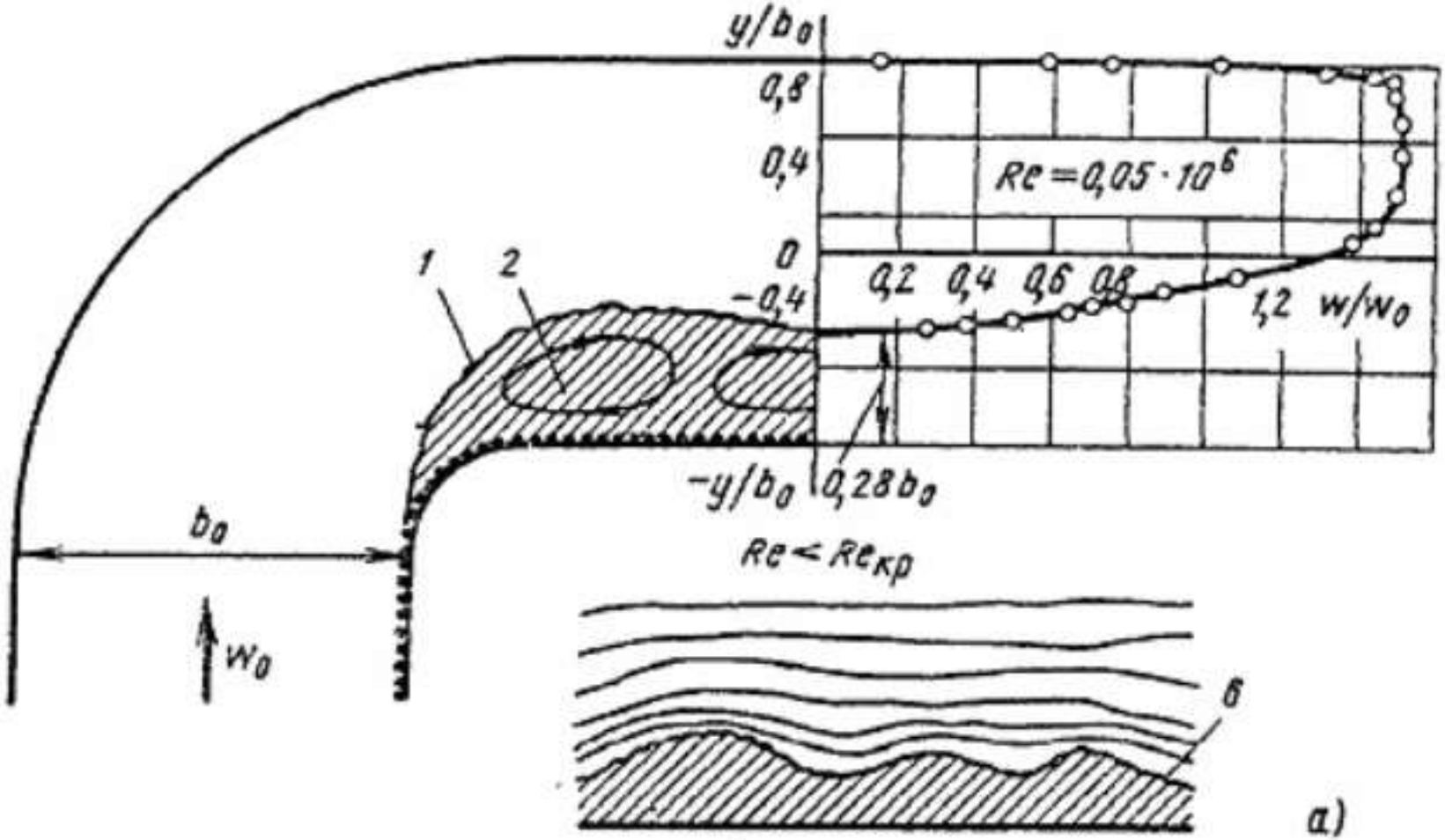



Схема отрыва потока и распределение скоростей по средней линии сечения отвода с шероховатой внутренней стенкой ($\bar{\Delta} = 0{,}001$) при различных режимах течения: *а* – ламинарное обтекание бугорков;

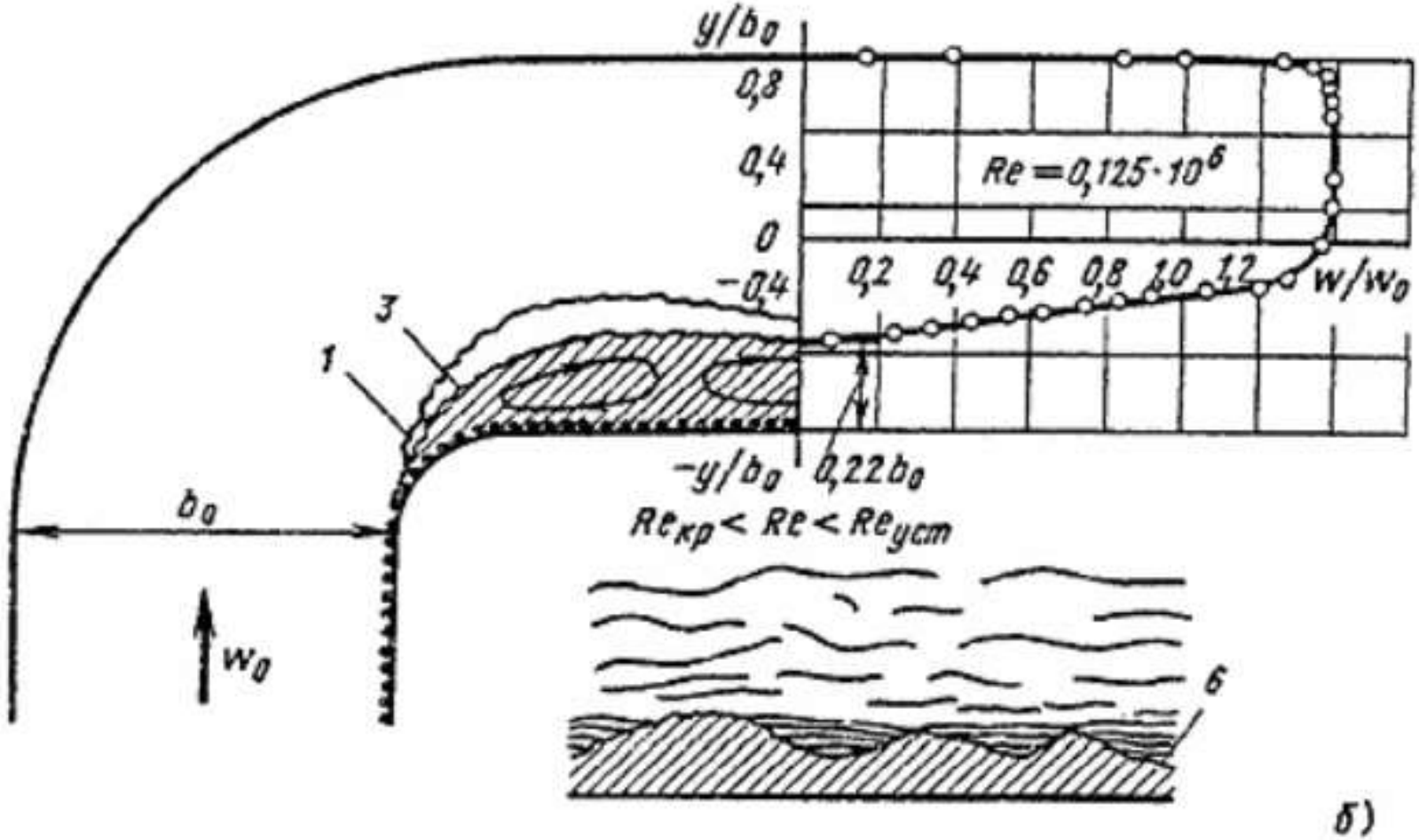



Схема отрыва потока и распределение скоростей по средней линии сечения отвода с шероховатой внутренней стенкой ($\bar{\Delta} = 0{,}001$) при различных режимах течения: *б* – переходный режим.

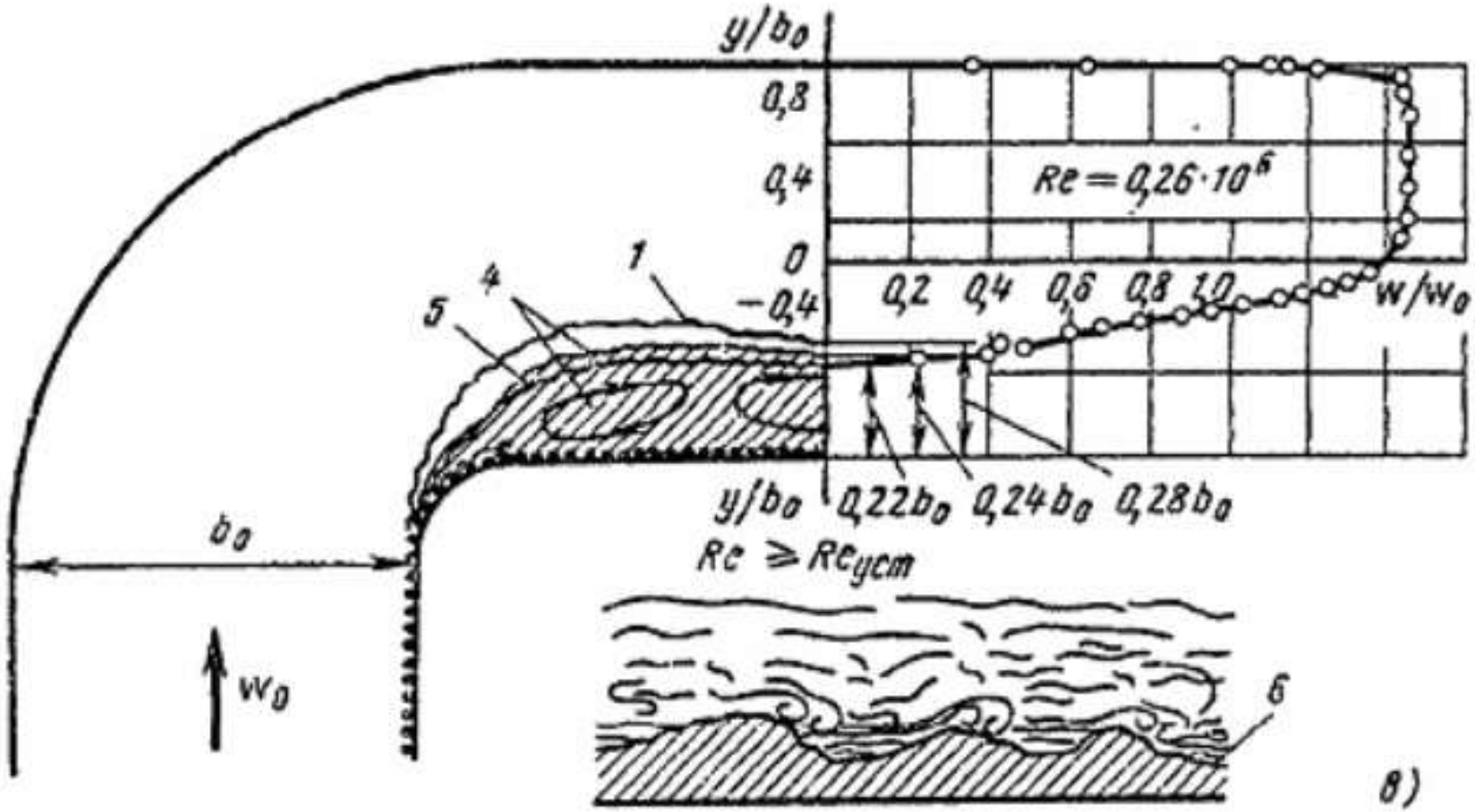



Схема отрыва потока и распределение скоростей по средней линии сечения отвода с шероховатой внутренней стенкой ($\bar{\Delta} = 0{,}001$) при различных режимах течения: *в* – турбулентное обтекание бугорков

# Течение в криволинейном канале.

На предшествующих рисунках:

*1* – нижняя граница оторвавшегося ламинарного слоя при $Re \prec Re_{кр}$;

*2* – ламинарный отрыв;

*3* – турбулентное расширение оторвавшегося слоя при $Re_{кр} \prec Re \prec Re_{уст}$;

*4* – турбулентный отрыв при $Re \succ Re_{уст}$;

*5* – нижняя граница оторвавшегося турбулентного слоя при $Re_{кр} \prec Re \prec Re_{уст}$;

*6* – бугорки на шероховатой стенке.

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

# Течение в криволинейном канале.

## Выводы по движению газа в криволинейных каналах

1. При отклонении потока от инерциального направления, действующие по нормали к вектору скорости силы инерции, приводят к появлению нормальных градиентов давления и скорости. В криволинейном канале на вогнутой поверхности давление возрастает, а скорость уменьшается. На выпуклой поверхности давление пониженное, а скорость больше среднерасходной. Движение газа со скольжением слоев в невязком ядре потока называют **сдвиговым течением**.
2. Изменение скоростей и давлений по нормали к потоку приводит появлению местных диффузорных зон в начале выпуклой поверхности и во второй половине выпуклой поверхности. Это приводит к появлению отрывов потока, увеличивающих потери напора.

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

# Течение в криволинейном канале.

## Выводы по движению газа в криволинейных каналах

3. В пограничных слоях на ограничивающих поверхностях под воздействием повышенного давления на вогнутой стороне газ движется по траекториям с меньшим радиусом, чем в ядре потока. Пограничные слои на ограничивающих поверхностях становятся трехмерными. Для упрощения анализа вводится схема вторичных течений, образованных проекциями векторов скорости на сечение перпендикулярное оси канала. Вторичное течение носит вихревой характер. Из-за трения газовых частиц друг о друга кинетическая энергия вторичного течения постепенно преобразуется в тепло. Потери трения на поверхностях с вторичными течениями больше, чем при просто продольном движении. Эти увеличенные потери выделяют в группу вторичных потерь. Возрастающие по сравнению с прямыми каналами вторичные потери и потери из-за отрывов в местных диффузорных зонах иногда выделяют в отдельную группу **потерь на поворот потока.**

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

# Течение в криволинейном канале.

## Выводы по движению газа в криволинейных каналах

4. Интенсивность зоны отрыва на выпуклой поверхности в большой степени определяет потери на поворот. Это связано с тем, что точка отрыва расположена в зоне наибольших местных скоростей в канале. Раннему отрыву способствует утолщение пограничного слоя за счет переноса низкоэнергетических частиц вторичными течениями. Второе важное обстоятельство – влияние нормальных сил инерции на поперечные турбулентные пульсации. Пограничный слой на выпуклой поверхности ламинаризируется и утолщается, что способствует более раннему отрыву.

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

# Течение в криволинейном канале.

## Выводы по движению газа в криволинейных каналах

5. Потери на поворот потока при прочих равных условиях тем больше, чем больше угол изогнутости канала, и чем больше его поперечный размер к радиусу кривизны. Особо опасная местная диффузорность на выпуклой поверхности уменьшается или исключается вообще, если криволинейный канал конфузоный. Уменьшение проходного сечения криволинейного канала по длине – эффективное средство снижения потерь поворота. Диффузорность канала усиливает опасность отрыва. Диффузорные межлопаточные каналы ТК характеризуются небольшими углами поворота потока. Конфузорные каналы турбин могут отклонять поток на очень большие углы.

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

# Течение в криволинейном канале.

## Выводы по движению газа в криволинейных каналах

6. Эффективное средство снижения потерь поворота в сильно изогнутых каналах – установка направляющих лопаток. При этом поток поворачивает не в одном канале с большим , а в системе каналов со значительно меньшими отношениями размера по нормали к радиусу кривизны.
7. Рассмотренные особенности течения в криволинейных каналах проявляются в межлопаточных каналах турбомашин и оказыают решающее влияние на их эффективность. Приемы уменьшения потерь на поворот потока в разной мере используются в проточных частях компрессоров и турбин.

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

# *БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ*

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