СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ С ВНЕЗАПНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ СКОРОСТИ И ПРИ ПЕРЕТЕКАНИИ ПОТОКА ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ (КОЭФФИЦИЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ УЧАСТКОВ С ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ СЕЧЕНИЯ, ВНЕЗАПНЫМ СУЖЕНИЕМ СЕЧЕНИЯ, ШАЙБ, ДИАФРАГМ, ПРОЕМОВ И ДР.)

4-1. ПОЯСНЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При внезапном расширении поперечного сечения трубы (канала) возникают так называемые потери на «удар». Коэффициент местного сопротивления удара в случае равномерного распределения скоростей по сечению узкого канала и турбулентного течения ($\mathrm{Re}=w_0D_г/\nu>10^4$) зависит только от отношения площадей узкого и широкого сечений F_0/F_2 (степени расширения $n_п=F_2/F_0$) и вычисляется по формуле Борда—Карно:

$$\zeta_м\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)^2. \qquad (4\text{-}1)$$

Суммарный коэффициент сопротивления участка с внезапным расширением*1

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\zeta_м+\zeta_{тр}=\zeta_м+\frac{\zeta'_{тр}}{n_п^2}, \qquad (4\text{-}2)$$

где $\zeta'_{тр}\equiv\dfrac{\Delta p_{тр}}{\rho w_2^2/2}=\lambda l_2/D_{2г}$.

2. При внезапном расширении сечения трубы образуется струя, отделенная от остальной среды поверхностью раздела, которая распадается и свертывается в мощные вихри (рис. 4-1). Длина участка l_2, на котором происходит вихреобразование, постепенное рассасывание вихрей и полное растекание потока по сечению, составляет примерно 8—12 $D_{2г}$ ($D_{2г}$—гидравлический диаметр широкого сечения). Потери на удар при внезапном расширении связаны с указанным вихреобразованием на участке l_2.

3. В случае, когда внезапное расширение сечения трубы происходит только в одной плоскости (рис. 4-2), потери на «удар» уменьшаются с увеличением отношения сторон B/H (B—ширина большего сечения; H—постоянная высота канала); местный коэффициент сопротивления в этом случае

$$\zeta_м=k_1\left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)^2,$$

где $k_1\leqslant1$—поправочный коэффициент, зависящий от отношения сторон B/H.

4. В реальных условиях распределение скоростей на участке перед внезапным расширением, как правило, не бывает равномерным. Это обстоятельство существенно повышает потери по сравнению с вычисленными по (4-1).

Для подсчета коэффициента местного сопротивления удара в потоке с неравномерным распределением скоростей и при больших Re следует применять обобщенную формулу, учитывающую эту неравномерность, если только известен закон распределения скоростей по сечению канала [4-13, 4-15]:

$$\zeta_м\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\frac{1}{n_п^2}+N-\frac{2M}{n_п}. \qquad (4\text{-}3)$$

Суммарный коэффициент сопротивления вычисляют по формуле, аналогичной (4-2).

В (4-3) $M=\dfrac{1}{F_0}\int\limits_{F_0}(w/w_0)^2\,dF$—коэффициент количества движения потока (коэффициент Буссинеска) на выходе из узкого канала в широкий; $N=\dfrac{1}{F_0}\int\limits_{F_0}(w/w_0)^3\,dF$—коэффициент кинетической энергии потока (коэффициент Кориолиса) в том же сечении.

С некоторым приближением можно принять $N\approx3M-2$.

Это тем точнее, чем M и N ближе к единице.

*1 Добавочный коэффициент $\zeta_{тр}$ применяют в том случае, если он не был учтен при определении потерь на трение на всем участке данной сети.

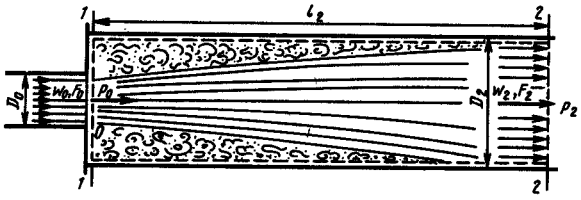


Рис. 4-1. Схема движения потока при внезапном расширении сечения трубы

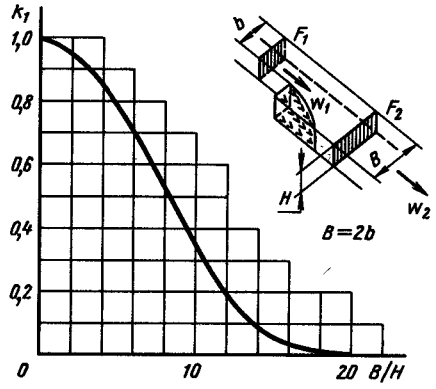


Рис. 4-2. Зависимость k_1 от B/H

Последнее выражение приводит к следующей приближенной формуле для определения коэффициента местного сопротивления:

$$\zeta_{м} \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} \approx N\left(1-\frac{2}{3n_{п}}\right)+\frac{1}{n_{п}^2}-\frac{4}{3n_{п}}.$$

5. Если известен закон распределения скоростей по сечению, то коэффициенты M и N могут быть легко вычислены. Если этот закон неизвестен, то он должен быть определен экспериментально. Тогда на основании полученных кривых распределения скоростей M и N можно найти методом графического интегрирования.

6. В диффузоре с углами расширения до $\alpha=8\div10°$ и на длинных прямых участках постоянного поперечного сечения с развившимся турбулентным профилем скоростей (см. параграф 1-3) распределение скоростей по сечению близко к закону степенной функции

$$\frac{w}{w_{max}}=\left(1-\frac{y}{R_0}\right)^{1/m},$$

где w, w_{max} — соответственно скорость в данной точке и максимальная скорость по сечению, м/с; R_0 — радиус сечения, м; y — расстояние от оси трубы до данной точки, м; m — показатель степени, который может меняться в пределах от 1 до ∞.

7. При $m=1$ профиль скоростей получает форму треугольника (рис. 4-3). При $m=\infty$ профиль скоростей получает форму прямоугольника, т. е. распределение скоростей по сечению совершенно равномерное. Практически профиль скоростей, близкий к прямоугольному, получается уже при $m=8\div10$. Такое значение m может быть принято для длинных прямых участков при турбулентном течении. Значения $m=2\div6$ для длинных диффузоров ($n_1=F_1/F_0>2$) принимают:

при $\alpha=2°$ $m\approx6$; при $\alpha=6°$ $m\approx3$;
при $\alpha=4°$ $m\approx4$; при $\alpha=8°$ $m\approx2$.

8. Значения M и N, входящие в (4-3), при степенном законе распределения скоростей могут быть вычислены по следующим формулам, выведенным автором [4-12, 4-13]:

для труб круглого и квадратного сечений

$$M=\frac{(2m+1)^2(m+1)}{4m^2(m+2)};$$

$$N=\frac{(2m+1)^3(m+1)^3}{4m^4(2m+3)(m+3)};$$

для плоской трубы или плоского диффузора (практически с отношением сторон прямоугольного сечения $a_0/b_0=0{,}3\div3{,}0$)

$$M=\frac{(m+1)^2}{m(m+2)};$$

$$N=\frac{(m+1)^3}{m^2(m+3)}.$$

9. На длинных прямых участках труб и каналов (практически на расстоянии более $10D_г$ от входа) при ламинарном течении устанавливается параболический профиль скоростей

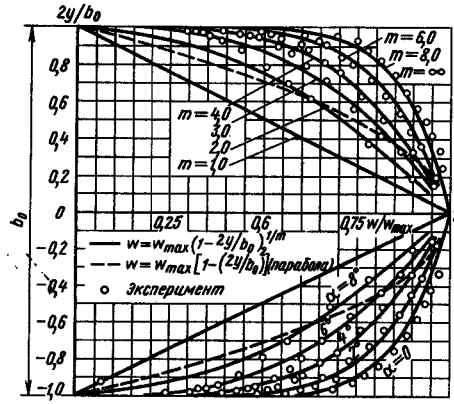


Рис. 4-3. Схемы распределения скоростей в плоских диффузорах с углами расширения α до 8° и сравнения со степенным законом

$$\frac{w}{w_{max}}=1-\left(\frac{y}{R_0}\right)^2.$$

При этом для трубы круглого или квадратного сечения $M=1{,}33$ и $N=2$, а для плоской трубы $M=1{,}2$ и $N=1{,}55$.

10. В трубах и каналах непосредственно за решетками, в коленах за направляющими лопатками и в других подобных случаях устанавливается профиль скоростей, близкий к тригонометрической функции (рис. 4-4), которую для плоского канала вычисляют по формуле автора [4-13, 4-15]:

$$\frac{w}{w_0}=1+\frac{\Delta w}{w_0}\sin 2k_1\pi\frac{2y}{b_0},$$

где b_0 — ширина плоского канала, м; Δw — максимальное отклонение скорости (по модулю) в данном сечении канала от средней по этому сечению скорости w_0, м/с; k_1 — целое число.

В этом случае

$$M=1+\frac{1}{2}\left(\frac{w}{w_0}\right)^2;\quad N=1+\frac{3}{2}\left(\frac{\Delta w}{w_0}\right)^2.$$

11. За такими участками, как диффузор с углами расширения, при которых происходит отрыв потока ($\alpha\geqslant 14°$), колена, отводы и т. п., устанавливается несимметричное поле скоростей (рис. 4-5). В частности, в плоских диффузорах с углом расширения $\alpha=15\div 20°$ и в прямых коленах ($\delta=90°$) распределение скоростей описывается формулой [4-13, 4-15]

$$w/w_0=0{,}585+1{,}64\sin\left(0{,}2+1{,}95\frac{2y}{b_0}\right).$$

При этом $M=1{,}87$ и $N=3{,}7$.

12. При образовании в трубе (канале) с постоянным поперечным сечением неравномерного поля скоростей дальнейшее выравнивание потока также сопровождается невосполнимыми потерями давления (потери на деформацию потока), которые вычисляют по формуле, вытекающей из (4-2) и (4-3):

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=1+N-2M+\zeta_{тр}\qquad(4\text{-}4)$$

или соответственно

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}\approx\frac{1}{3}(N-1)+\zeta_{тр},$$

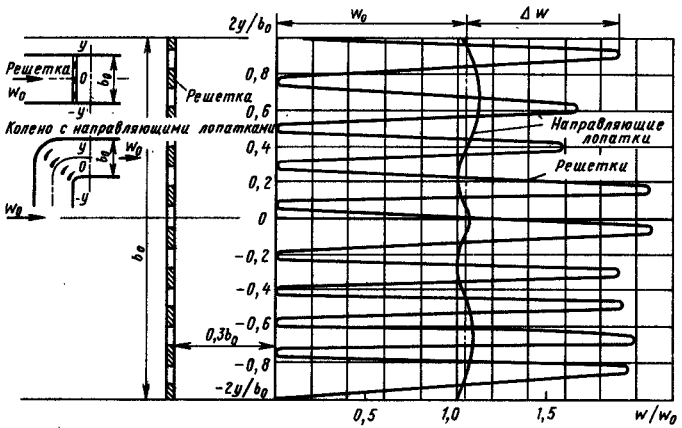


Рис. 4-4. Схема распределения скоростей по тригонометрической функции (за решетками и направляющими лопатками) [4-15]

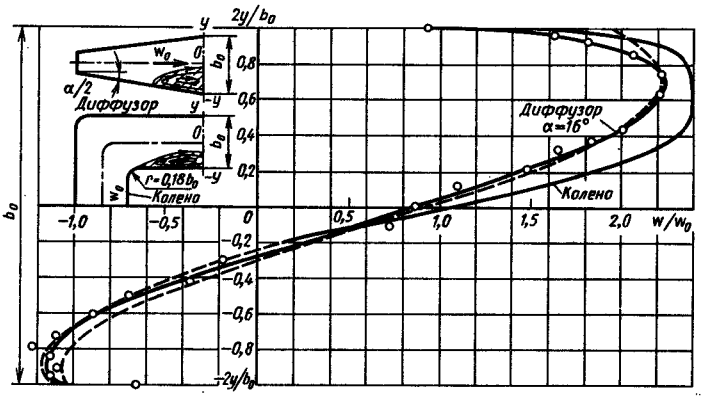


Рис. 4-5. Схема несимметричного распределения скоростей (за коленом и в диффузоре с углом расширения, при котором происходит отрыв струи) [4-15]

где M и N определяются в соответствии с полученным характером неравномерности.

Эти потери учитываются только в том случае, если они не принимались во внимание при определении местного сопротивления фасонной части или препятствия, которыми и было вызвано неравномерное распределение скоростей в прямом участке.

13. Коэффициенты M и N для входного сечения смесительной камеры эжектора при входе в нее «основного»*1 участка свободной струи (рис. 4-6) вычисляются по формулам автора [4-13, 4-15]:

$$M=\frac{1}{\bar{q}^2}\cdot\frac{F_2}{F_0};\quad N=\frac{1}{\bar{q}^3}\left(\frac{F_2}{F_0}\right)^2\bar{e},$$

где F_2/F_0 — отношение площади данного сечения свободной струи (смесительной камеры) к площади начального сечения струи (подводящего сопла); $\bar{q}=Q/Q_0$ — безразмерный расход через данное сечение, т. е. отношение расхода среды, протекающей через трубу (смесительную камеру), к начальному расходу струи (на выходе из подводящего сопла); $\bar{e}=E/E_0$ — безразмерный запас кинетической энергии струи в данном сечении, т. е. отношение запаса энергии струи на входе в трубу (смесительную камеру) к начальной энергии струи.

Величины F_2/F_0, $F_{стр}/F_0$, $\bar{q}$ и $\bar{e}$ зависят от относительной длины свободной струи $s/D_г$ и определяются по диаграммам 11-24 и 11-25.

14. Сопротивление участка с внезапным расширением можно существенно снизить путем установки в нем дефлекторов (рис. 4-7, *а*). При правильной установке дефлекторов*2 потери снижаются на 35—40%, так что коэффициент местного сопротивления такого участка

$$\zeta_{см}\equiv\frac{\Delta p_м}{\rho w_0^2/2}\approx 0{,}6\,\zeta'_{см},$$

где $\zeta'_{см}$ — коффициент сопротивления участка с внезапным расширением без дефлекторов, определяемый как ζ по данным, приведенным на диаграмме 4-1.

15. Существенное уменьшение сопротивления участка с внезапным расширением достигается при устройстве за узким сечением «карманов» (рис. 4-7, *б*), способствующих образованию в них стационарного вихревого кольца (у труб круглого сечения) или двух стационарных вихрей (у плоского канала), которые являются своеобразными «насосами» [4-44].

16. Потери давления на участке с внезапным расширением могут быть значительно уменьшены путем дробления вихрей в этом участке с помощью поперечных перегородок (рис. 4-8) [4-21]. Верхние кромки этих перегородок должны находиться на уровне верхней границы вихревой зоны и не выступать в активный поток. Поперечные ребра, очевидно, уменьшают интенсивность обратного тока в канале, а также заменяют неустойчивые вихри на стационарные [4-21].

17. Если скорость газового потока в сечении *в—в* (рис. 4-9) близка к скорости звука и на участке струи между сечениями *с—с* и *n—n* остается дозвуковой, то [4-7] с достаточной точностью потери на «удар» можно определять по приведенным выше формулам для несжимаемой жидкости [при относительной (приведенной) скорости $\lambda_b=\frac{w}{a_{кр}}\leqslant 0{,}75$ погрешность практически равна нулю, при $\lambda_b=1$ погрешность составляет 8%].

18. В общем случае ступенчатый канал, в котором происходит течение, может иметь на входе сверхзвуковое сопло, и тогда геометрическая форма канала будет характеризоваться размерами трех сечений: площадью критического сечения $F_{кр}$, площадью сечения сопла на выходе F_b, площадью сечения цилиндрического канала $F_п$. В частном случае $F_{кр}=F_b$ и сверхвуковое сопло отсутствует.

19. Если в каком-либо сечении струи на участке *с—n* скорость струи больше скорости звука, то в этом случае следует учитывать потери в скачках уплотнения. Таким образом, потери полного давления являются суммой потерь в прямом скачке уплотнения и потерь на «удар» (по Борда—Карно), возникающих при расширении дозвуковой струи от сечения *2—2* до сечения *n—n* [4-7].

20. Относительные потери полного давления в ступенчатом канале можно определять как

$$\frac{\Delta p_n}{p^*}=1-\sigma,$$

где σ — отношение полных давлений в сечениях *n—n* и *0—0*:

$$\sigma=\frac{p_n^*}{p_0^*}\approx\frac{p_n}{p_0^*}+\frac{\rho_n w_n^2}{2p_0^*}$$

или после соответствующих преобразований

$$\delta=\frac{p_n}{p_0^*}+\frac{k}{2}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\left(\frac{F_{кр}}{F_n}\right)^2\frac{1}{\lambda_1^2}\left(1-\frac{k-1}{k+1}\lambda_1^2\right)^{\frac{1}{k-1}},\qquad(4\text{-}5)$$

где $\lambda_1=\frac{w_1}{a_{кр}}$ — приведенная скорость в сечении *1—1*; она определяется из соотношения

*1 Определение «основного» участка свободной струи см. одиннадцатый раздел.

*2 Основные данные, которыми следует руководствоваться при установке таких дефлекторов, приведены в пятом разделе (п. 65).

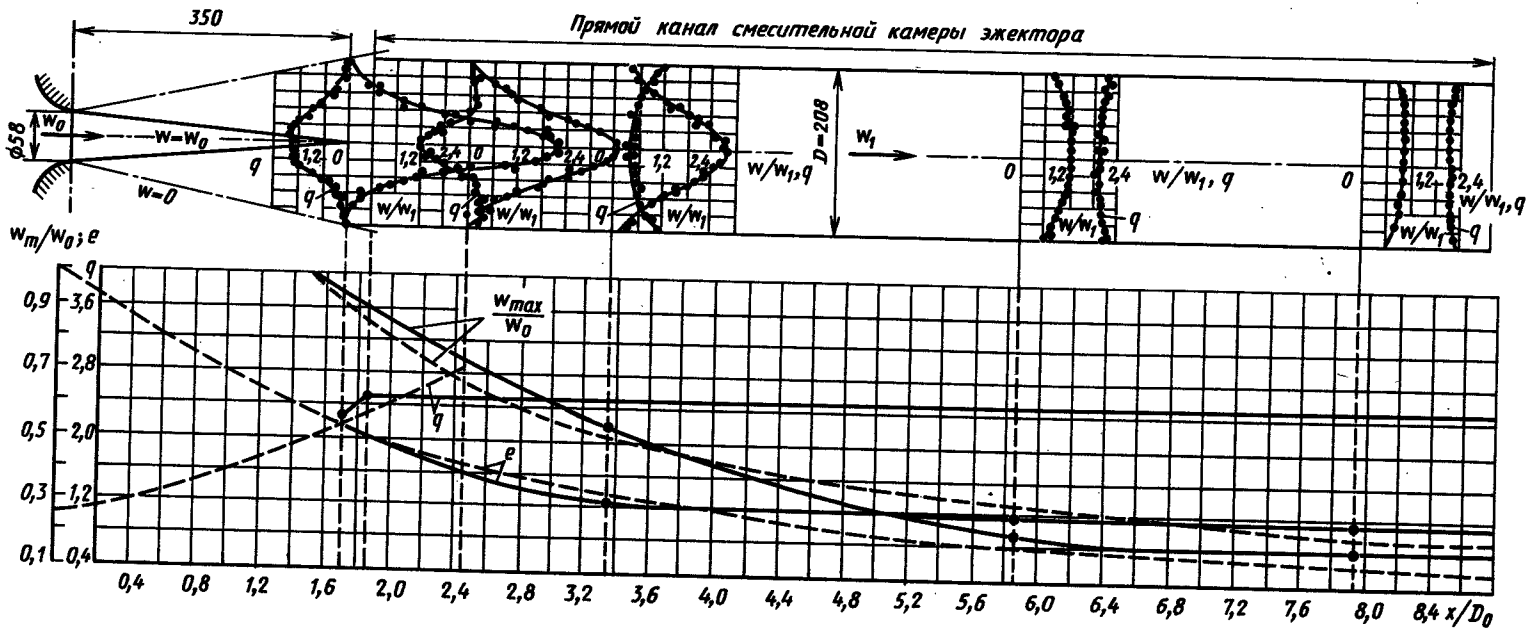


Рис. 4-6. Схемы распределения скоростей на основном участке свободной струи и после входа ее в смесительную камеру эжектора:

штриховые линии — теоретические кривые для свободной струи; сплошные линии — экспериментальные кривые для струи в канале [4-15]; $g \equiv \frac{(p-p_a)}{\rho w_1^2/2}$

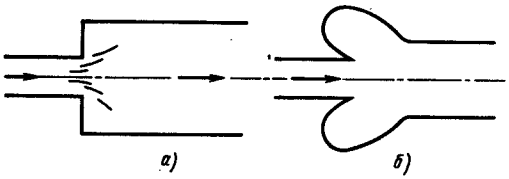


Рис. 4-7. Схемы участков с внезапным расширением сечения

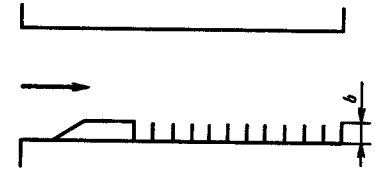


Рис. 4-8. Схемы участка с внезапным расширением сечения и с поперечными перегородками

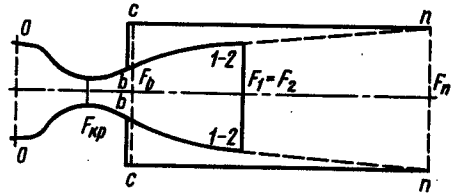


Рис. 4-9. Схема ступенчатого диффузора (внезапное расширение сечения)

$$\frac{p_n}{p_0^*}=\left(\lambda_1^2-\frac{k-1}{k+1}\right)\left(1-\frac{k-1}{k+1}\lambda_1^2\right)^{\frac{1}{k-1}}+$$
$$+\frac{km}{\lambda_1}\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}\left[1-\frac{m}{\lambda_1}\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{1-k}}\times\right.$$
$$\left.\times\left(1-\frac{k-1}{k+1}\lambda_1^2\right)\right]^{\frac{1}{1-k}}, \qquad (4\text{-}6)$$

где $m=F_{кр}/F_n$.

Для воздуха ($k=1{,}41$)

$$\sigma=\frac{p_n}{p_0^*}+0{,}2344\frac{m^2}{\lambda_1^2\left(1-\frac{1}{6}\lambda_1^2\right)^{2{,}5}}$$

и (4-6) принимает вид

$$\frac{p_n}{p_0^*}=\left(\lambda_1^2-\frac{1}{6}\right)\left(1-\frac{\lambda_1^2}{6}\right)^{2{,}5}+0{,}7396\frac{m}{\lambda_1}\times$$
$$\times\left[1-\frac{m}{1{,}5774\left(1-\frac{1}{6}\lambda_1^2\right)^{2{,}5}\lambda_1}\right].$$

21. Зависимость p_n/p_0^* от λ_1 и m при $k=1{,}41$ представлена на рис. 4-10, *а*, а зависимость $\sigma=f(p_0^*/p_n,\ m)$ — на рис. 4-10, *б*.

(При малых значениях λ_1 для заданных значений p_n/p_0^* и m получаются два значения λ_1. Однако вследствие слабой зависимости σ от λ_1 при малых λ_1 выбор λ_1 практически не отражается на величине σ [4-7]).

Представленные формулы применимы для значений $1\leqslant\lambda_1\leqslant\lambda_{lim}$, где λ_{lim} соответствует полному расширению сверхзвуковой струи до $F_1=F_n$.

22. При внезапном сужении сечения схема потока в основном аналогична той, которая наблюдается при внезапном расширении, когда возникают потери на удар. Только в данном случае эти потери проявляются главным образом при расширении струи, сжатой после входа из широкого канала в узкий (сечение *c—c*, рис. 4-11), до полного сечения узкого канала (сечение *0—0*).

23. Коэффициент местного сопротивления внезапному сужению при больших числах Рейнольдса ($Re>10^4$) может быть определен приближенно по расчетной формуле автора ([4-12, 4-13]):

$$\zeta_м\equiv\frac{\Delta p_м}{\rho w_0^2/2}=0{,}5\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)$$

или более точно по формуле, полученной автором на основе обработки результатов опытов различных исследователей:

$$\zeta_м\equiv\frac{\Delta p_м}{\rho w_0^2/2}=0{,}5\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4};$$

при этом суммарный коэффициент сопротивления

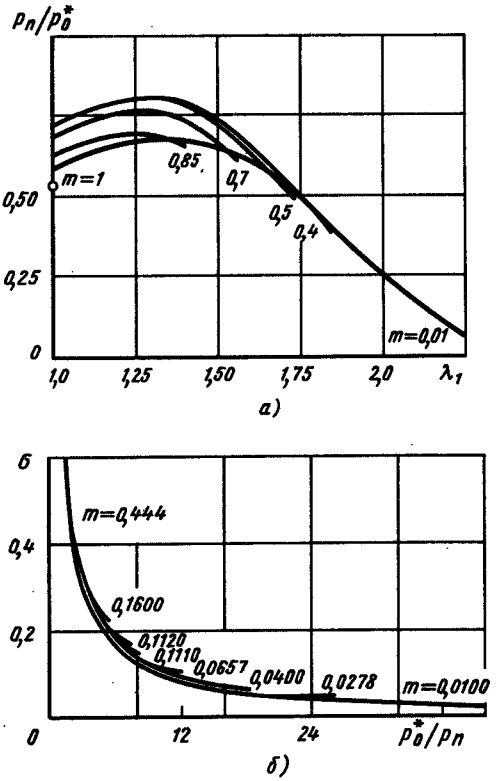


Рис. 4-10. Зависимости отношений давлений p_n/p_0^* от λ_1 (*а*) и коэффициента восстановления давления σ от p_0^*/p_n (*б*) [4-7]

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\zeta_м+\zeta'_{тр},$$

где $\zeta'_{тр}\equiv\frac{\Delta p_{тр}}{\rho w_0^2/2}=\lambda\frac{l_0}{D_{0г}}$ (l_0 — длина прямого участка после сужения).

24. Сопротивление сужающегося участка можно значительно уменьшить при осуществлении перехода от широкого сечения к узкому плавно с помощью коллектора с криволинейными или прямолинейными образующими (см. диаграмму 4-9). Коэффициент

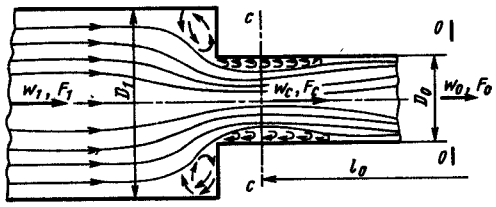


Рис. 4-11. Схема движения потока при внезапном сужении сечения

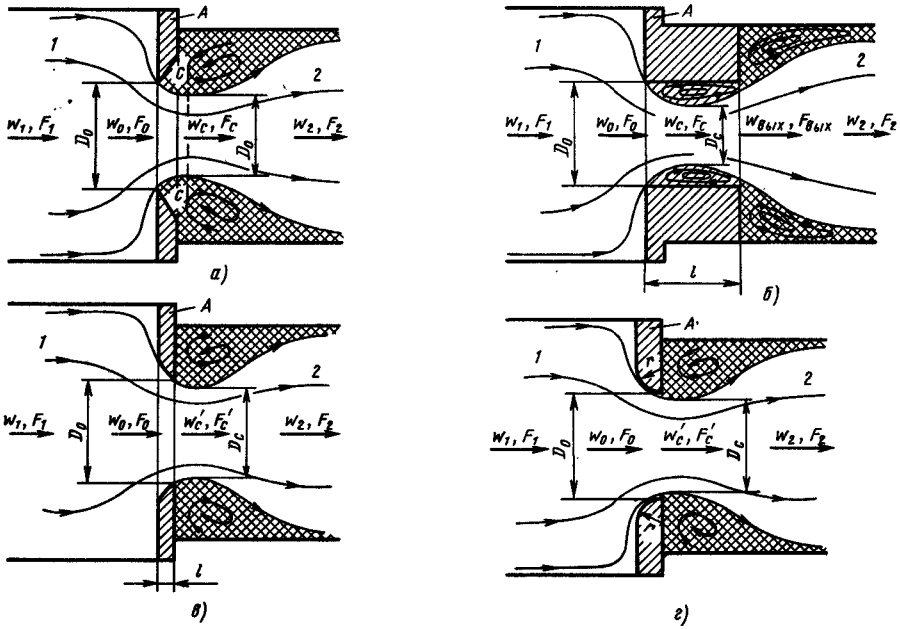


Рис. 4-12. Схемы перетекания потока через отверстие в стенке из одного объема в другой: *а* — отверстие в стенке с тонкими краями ($l/D_г \approx 0$); *б* — отверстие в стенке с утолщенными краями ($l/D_г > 0$); *в* — отверстие в стенке с краями, срезанными по движению потока; *г* — закругленные по потоку края отверстия

местного сопротивления такого сужающегося участка при $\mathrm{Re} > 10^4$ автор рекомендует определять по формуле

$$\zeta_м \equiv \frac{\Delta p_м}{\rho w_0^2/2} = \zeta' \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4} *1,$$

где ζ' — коэффициент, зависящий от формы входной кромки узкого канала, заделанного заподлицо со стеикой (см. диаграммы 3-1, 3-4 и 3-7).

25. В общем случае перетекания потока через отверстие в стенке из одного объема в другой имеют место явления, иллюстрируемые рис. 4-12. Поток перетекает из канала *1*, расположенного перед перегородкой *А* с отверстием диаметром D_0, в канал *2*, расположенный за перегородкой. Размеры поперечных сечений обоих каналов могут быть бóльшими или равными размеру сечения проходного отверстия. Прохождение потока через отверстие сопровождается искривлением траекторий движения частиц, вследствие чего они по инерции продолжают свое движение к оси отверстия. Это вызывает уменьшение первоначальной площади сечения струи F_1 до площади F_c (сечения $c-c$), меньшей площади сечения отверстия F_0. От сечения $c-c$ траектории движущихся частиц выпрямляются, и в дальнейшем наблюдается внезапное расширение струи.

26. Коэффициент сопротивления перетеканию потока через отверстие в стенке с острыми краями ($l/D_г = 0$, рис. 4-12, *а*) в общем случае вычисляется для автомодельной (квадратичной) области течения $\left(\mathrm{Re} = \frac{w_0 D_0}{\nu} \geqslant 10^5\right)$ по уточненной формуле автора:

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = \left[1 + 0{,}707 \sqrt{\left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}} - \frac{F_0}{F_2}\right]^2 =$$

$$= \left[0{,}707 \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}375} + \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)\right]^2. \qquad (4\text{-}7)$$

27. Утолщение (рис. 4-12, *б*), срез по потоку (рис. 4-12, *в*) или закругление (рис. 4-12, *г*) краев отверстия снижает эффект сжатия струи в отверстии (увеличивает коэффициент заполнения ε), т. е. уменьшает скорость струи в ее самом узком сечении ($F'_c > F_c$ и $w'_c < w_c$). Эта скорость в основном определяет потери на удар, наблюдаемые после выхода из отверстия, чем уменьшается общее сопротивление проходу через него.

*1 Рекомендуемая в [4-3] формула (7.25) дает близкое совпадение с опытом при больших значениях F_0/F_1 и значительное расхождение (до 20%) при малых отношениях F_0/F_1.

28. Коэффициент сопротивления перетеканию потока через отверстия в стенке с любой формой и любой толщиной краев в рассматриваемом (п. 25) общем случае вычисляется при больших числах Рейнольдса (практически при $\mathrm{Re} \geqslant 10^5$) по обобщенной и уточненной формуле автора:

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = \zeta' \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4} + \left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \tau \sqrt{\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}} \left(1-\frac{F_0}{F_2}\right) + \zeta_{\text{тр}} =$$

$$= \zeta' \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0,75} + \tau \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0,375} \left(1-\frac{F_0}{F_2}\right) + \left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \zeta_{\text{тр}}, \qquad (4\text{-}8)$$

где ζ' — коэффициент смягчения входа в отверстие, зависящий от формы его входной кромки и определяемый как ζ по диаграммам 3-1 — 3-4 и 3-7; τ — коэффициент, учитывающий влияние толщины стенки, формы входной кромки отверстия и условия протекания потока через отверстие (определяется при утолщенных краях отверстия по формулам, аналогичным (3-4), (3-5), или по кривой $\tau = f(l/D_{\text{г}})$ на диаграмме 4-12, а при срезанных или закругленных по потоку краях отверстия — приближенно по формуле $\tau \approx 2\sqrt{\zeta'}$, где ζ' определяется по формулам, аналогичным (3-7) и (3-8), или по диаграмме 4-13); $\zeta_{\text{тр}} = \lambda \cdot l/D_{\text{г}}$ — коэффициент сопротивления трения на всей глубине отверстия, определяемый по диаграммам второго раздела.

При срезанных или закругленных по потоку краях отверстия принимается $\zeta_{\text{тр}} = 0$.

29. Общий случай перетекания потока через отверстие в стенке распадается на ряд частных случаев:

а) $F_1 = F_0$ — внезапное расширение сечения (см. рис. 4-1); при этом (4-8) имеет вид (4-1);

б) $F_2 = F_0$ — внезапное сужение сечения (см. рис. 4-11); при этом (4-8) приводится к виду (3-1) при $m = 3/4$;

в) $F_1 = \infty$ — вход с внезапным расширением (вход через шайбу или решетку, помещенную в месте обреза трубы); при этом (4-8) имеет вид (если ζ приведен к скорости w_2 за отверстием) *1

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_2^2/2} = \left[\zeta' + \left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \tau \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right) + \zeta_{\text{тр}}\right] \left(\frac{F_2}{F_0}\right)^2; \qquad (4\text{-}9)$$

г) $F_2 = \infty$ — истечение из отверстия в неограниченное пространство (выход потока через шайбу или решетку в конце трубы, см. диаграмму 11-22); при этом (4-8) имеет вид (если ζ приведен к скорости w_1 перед отверстием) *2

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2} = \left[1 + \zeta' \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4} + \tau \sqrt{\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}} + \zeta_{\text{тр}}\right] \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2; \qquad (4\text{-}10)$$

д) $F_1 = F_2$ — диафрагма (шайба, решетка, см. диаграммы 4-14 — 4-17); в этом случае (4-8) имеет вид (если ζ приведен к скорости w_1 перед отверстием)

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2} = \left[\zeta' \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4} + \tau \sqrt{\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}} \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right) + \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^2 + \zeta_{\text{тр}}\right] \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2 = \left[\zeta' \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0,75} + \tau \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{1,375} + \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^2 + \zeta_{\text{тр}}\right] \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2; \qquad (4\text{-}11)$$

е) $F_1 = F_2 = \infty$ — проем в стенке неограниченной площади (перетекание через отверстие из одного большого объема в другой большой объем, см. диаграмму 4-18); при этом (4-8) имеет вид

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = \zeta' + \tau + 1 + \zeta_{\text{тр}}. \qquad (4\text{-}12)$$

30. Коэффициент сопротивления диафрагмы при различных формах краев отверстия и $\mathrm{Re} \geqslant 10^5$ получает следующие выражения:

а) при острых краях отверстий $\zeta' = 0{,}5$, $\tau = 1{,}41$ и $\zeta_{\text{тр}} = 0$, а (4-8) приводится к формуле автора вида

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2} = \left[0{,}707 \sqrt{\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}} + 1 - \frac{F_0}{F_1}\right]^2 \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2; \qquad (4\text{-}13)$$

*1 Индекс 0 соответствует индексу отв, а индекс 2 — индексу 0 в третьем разделе.

*2 Индекс 0 соответствует индексу отв, а индекс 1 — индексу 0 в одиннадцатом разделе.

б) при утолщенных краях отверстий $\zeta'=0{,}5$; отсюда

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}=\left[0{,}5\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}+\right.$$

$$\left.+\tau\sqrt{\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}}\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)+\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^2+\zeta_{тр}\right]\times$$

$$\times\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2=\left[0{,}5\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}75}+\tau\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{1{,}375}+\right.$$

$$\left.+\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^2+\zeta_{тр}\right]\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2, \qquad (4\text{-}14)$$

где $\tau=(2{,}4-\bar{l})\cdot 10^{-\varphi/\bar{l}}$; (4.15)

$$\varphi(\bar{l})=0{,}25+0{,}535\bar{l}^8/(0{,}05+\bar{l}^7)\quad(\bar{l}=l/D_г); \qquad (4\text{-}16)$$

в) при срезанных или закругленных по потоку краях отверстий $\tau\approx 2\sqrt{\zeta'}$ и $\zeta_{тр}=0$; тогда

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}=\left[1+\sqrt{\zeta'\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}}-\right.$$

$$\left.-\frac{F_0}{F_1}\right]^2\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2=\left[1-\frac{F_0}{F_1}+\right.$$

$$\left.+\sqrt{\zeta'}\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}375}\right]^2+\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2. \qquad (4\text{-}17)$$

Для срезанных по потоку краев отверстий при $\alpha=40\div 60°$

$$\zeta'=0{,}13+0{,}34\cdot\exp\left(-7{,}94\bar{l}-203{,}55\bar{l}^{2,3}\right) \qquad (4\text{-}18)$$

или см. диаграмму 4-13; при других α ζ' принимается как ζ по диаграмме 3-7.

Для закругленных по потоку краев отверстий ζ' определяют так же, как ζ для кругового коллектора с торцовой стенкой, т. е.

$$\zeta'=0{,}03+0{,}47\cdot\exp\left(-17{,}73\bar{r}\right)\quad(\bar{r}=r/D_г) \qquad (4\text{-}19)$$

или по графику диаграммы 4-13.

31. Коэффициент сопротивления проема в стенке неограниченной площади при различных формах краев отверстия и $\mathrm{Re}\geqslant 10^5$ получает следующие выражения:

а) при острых краях отверстия $\zeta'=0{,}5$, $\tau=1{,}41$ и $\zeta_{тр}=0$, так что на основании (4-12)

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}\approx 2{,}9;$$

по опытам автора [4-12]

$$\zeta=2{,}7\div 2{,}8;$$

б) при утолщенных краях отверстия $\zeta'=0{,}5$, а (4-8) принимает вид

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=1{,}5+\tau+\zeta_{тр}=\zeta_0+\zeta_{тр}, \qquad (4\text{-}20)$$

где $\zeta_0=1{,}5+\tau$ получен автором экспериментально и представлен в виде зависимости $\zeta_0=f(l/D_г)$ на диаграмме 4-18. Согласно (4-15)

$$\zeta_0=1{,}5+(2{,}4-\bar{l})\cdot 10^{-\varphi(\bar{l})}, \qquad (4\text{-}21)$$

где $\varphi(\bar{l})$ — по (4-16);

в) при срезанных или закругленных по потоку краях отверстия принимается $\zeta_{тр}=0$ и $\tau\approx 2\sqrt{\zeta'}$; тогда

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\left(1+\sqrt{\zeta'}\right)^2, \qquad (4\text{-}22)$$

где ζ' определяют, как указано в п. 30, *в*.

32. Коэффициент сопротивления внезапному изменению сечения потока зависит (рис. 4-13) не только от геометрических параметров данного участка, но и от режима течения (числа Рейнольдса $\mathrm{Re}=\frac{w_0 D_г}{\nu}$) [4-20]. В рассматриваемом случае, как и для случая трения, можно выделить три характерные области течения:

а) ламинарного режима, в которой зависимость ζ от Re (в логарифмических координатах) прямолинейна;

б) переходного режима, в которой нарушается линейная зависимость $\zeta=f(\mathrm{Re})$;

в) автомодельного турбулентного режима (область квадратичного закона сопротивления), в которой практически отсутствует влияние числа Рейнольдса на коэффициент сопротивления.

Предельные числа Re, после которых нарушается ламинарность течения, а также предельные значения Re, при которых заканчивается переходный режим, зависят от геометрии данного участка.

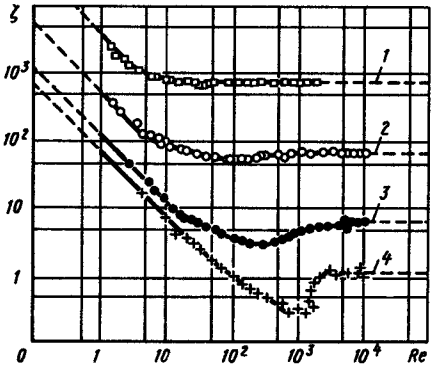


Рис. 4-13. Зависимость коэффициента сопротивления диафрагм от числа Рейнольдса Re для различных значений F_0/F_1 [4-20]:
1 — 0,05; *2* — 0,16; *3* — 0,43; *4* — 0,64

33. В общем виде для всех областей течения коэффициент сопротивления при внезапном изменении сечения может быть выражен по (1-3) при $k_3=1$:

$$\zeta=\frac{A}{\mathrm{Re}}+\zeta_{\text{кв}}, \qquad (4\text{-}23)$$

где A — коэффициент, зависящий от геометрии рассматриваемого участка сопротивления.

34. При внезапном расширении сечения коэффициент сопротивления в переходной области ($10<\mathrm{Re}<10^4$) может быть определен по опытным кривым $\zeta=f\left(\mathrm{Re}, \frac{F_0}{F_1}\right)$, полученным А. Д. Альтшулем [4-3], В. Н. Каревым [4-17] и Р. Е. Везиряном [4-6] (см. диаграмму 4-1).

Для ламинарной области ($\mathrm{Re}<10$) коэффициент сопротивления

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}\approx\frac{30}{\mathrm{Re}}. \qquad (4\text{-}24)$$

35. Для случая внезапного сужения сечения коэффициент сопротивления в переходной области ($10<\mathrm{Re}<10^4$) можно определить (см. [4-18]) по кривым $\zeta=f(\mathrm{Re}, F_0/F_1)$ диаграммы 4-10, а в ламинарной области ($\mathrm{Re}<6-7$) — по (4-24).

36. Для случаев перетекания потока через отверстия в стенке (общий случай перетекания см. рис. 4-12, диафрагма, проем) коэффициент сопротивления в переходной и ламинарной областях можно найти:

а) в пределах $30<\mathrm{Re}<10^4\div10^{5\times1}$ — по выражению автора [4-16]

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\left(\frac{1}{\varphi^2}-1\right)+\frac{0{,}342}{\varepsilon_{0\mathrm{Re}}^2}\times$$

$$\times\left[1+0{,}707\sqrt{\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{3/4}}-\frac{F_0}{F_2}\right]^2=$$

$$=\zeta_\varphi+\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}\zeta_{\text{кв}}, \qquad (4\text{-}25)$$

где φ — коэффициент скорости истечения из отверстия с острыми краями, зависящий от числа Рейнольдса и отношения площадей F_0/F_1; $\varepsilon_{0\mathrm{Re}}=F_{\text{сж}}/F_0$ — коэффициент заполнения сечения отверстия с острыми краями при $F_0/F_1=0$ ($F_1=\infty$), зависящий от числа Рейнольдса; $\zeta_\varphi=\left(\frac{1}{\varphi^2}-1\right)$ определяют по кривым $\zeta_\varphi=f_1(\mathrm{Re}, F_0/F_1)$ диаграммы 4-19; $\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}=\frac{0{,}342}{\varepsilon_{0\mathrm{Re}}^2}$ находят по кривой $\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}=f(\mathrm{Re})$ на том же графике; $\zeta_{\text{кв}}$ — коэффициент сопротивления данного типа диафрагмы для автомодельной (квадратичной) области, определяемый как ζ по (4-7) — (4-22), где $\zeta=\Delta p\Big/\left(\frac{rw_0^2}{2}\right)$;

б) в пределах $10<\mathrm{Re}<30$ — по предлагаемой автором приближенной формуле

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\frac{A}{\mathrm{Re}}+\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}\zeta_{\text{кв}}, \qquad (4\text{-}26)$$

а при $\mathrm{Re}<10$

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\frac{A}{\mathrm{Re}}, \qquad (4\text{-}27)$$

где $A=33$ [4-3].

37. Если коэффициент сопротивления приведен к скорости w_1 в сечении F_1 перед отверстием (а не w_0 в самом отверстии), то вместо (4-25) — (4-27) принимают

$$\zeta_1\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}=(\zeta_\varphi+\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}\zeta_{\text{кв}})\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2;$$

$$\zeta_1\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}=\left(\frac{33}{\mathrm{Re}}+\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}\zeta_{\text{кв}}\right)\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2;$$

$$\zeta_1\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}=\frac{33}{\mathrm{Re}}\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2.$$

38. При малых коэффициентах живого сечения F_0/F_1 диафрагмы поток через отверстия приобретает большие скорости (большие числа Маха) даже при сравнительно небольшой скорости в трубопроводе перед диафрагмой. При этом начинает сказываться влияние сжимаемости, резко повышающее коэффициент сопротивления диафрагмы.

В этом случае

$$\zeta_{\text{м}}\equiv\frac{\Delta p}{\rho_1 w_1^2/2}=k_{\text{м}}\zeta,$$

где ζ — коэффициент сопротивления диафрагмы при малых числах Ma_1, определяемый, как указано в пп. 25 — 31; $k_{\text{м}}$ — коэффициент, учитывающий влияние сжимаемости потока в сжатом сечении струи при протекании через отверстие (см. диаграмму 4-20); $\mathrm{Ma}_1=\frac{w_1}{a_1}$ — число Маха в сечении перед диафрагмой.

39. Сопротивление отверстия можно резко уменьшить путем использования кольцевого ребра при входе в прямой канал или уступа при входе в отверстие (рис. 4-14). Так, например, по данным В. И. Ханжонкова [4-27], при установке кольцевого ребра (с $D_1/D_0\approx\approx1{,}22$ и $l/D_0\approx0{,}25$) коэффициент сопротивления отверстия в стенке неограниченной площади уменьшается до $\zeta=1{,}15$ вместо $\zeta\approx2{,}7\div2{,}8$, получаемого при отсутствии ребра.

40. При перетекании потока через плавный коллектор, вделанный в стенку неограниченной

*1 Для отверстий с острыми краями верхний предел Re берут равным 10^5, а для отверстий с краями других форм — порядка 10^4.

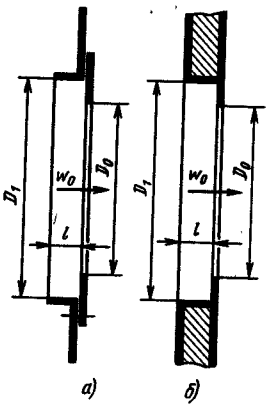


Рис. 4-14. Схемы входа в отверстие:
***а*—через кольцевое ребро; *б*—через уступ**

площади (см. диаграмму 4-21), сопротивление складывается из сопротивления входа в коллектор, сопротивления трения на прямом участке и сопротивления выхода, т. е. коэффициент сопротивления такого участка

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = \zeta' + \zeta_{тр},$$

где ζ'—коэффициент, учитывающий потери входа и выхода, определяемый по кривым $\zeta = f(l/D_г, r/D_г)$ на диаграмме 4-21; $\zeta_{тр} = \lambda l/D_г$—коэффициент сопротивления трения на прямом участке коллектора.

41. В случае истечения через отверстие в стенке при наличии проходящего потока *[1] (см. диаграмму 4-22) коэффициент сопротивления как при входе (отсосе), так и выходе (притоке) является, как показано в [4-27], функцией отношения скоростей w_∞/w_0.

42. При отсутствии проходящего потока ($w_\infty = 0$) жидкость (газ) подтекает к отверстию со всех сторон, а истечение происходит симметрично и с наименьшим поджатием струи.

При наличии проходящего потока жидкость (газ) подтекает к отверстию с одной стороны, а истечение происходит под углом при более поджатой струе за отверстием. Поджатие струи обусловливает повышение в ней динамического давления, которое для данной сети теряется на выходе.

43. При незначительных скоростях проходящего потока ($w_\infty \ll w_0$) указанное повышение динамического давления меньше, чем увеличение разности давлений перед отверстием и за ним (под действием которого происходит истечение струи), вызванное эффектом наддува, создаваемого динамическим давлением набегающего потока. Такой наддув способствует истечению через отверстие, что равносильно уменьшению коэффициента сопротивления ζ.

При больших скоростях w_∞ увеличение динамического давления струи из-за большего поджатия ее за отверстием становится значительнее эффекта наддува; в результате коэффициент ζ возрастает.

44. В случае притока увеличение скорости проходящего потока в пределах $w_\infty/w_0 = 1 \div 2$ также уменьшает ζ. Объясняется это тем, что в результате обтекания набегающим потоком притекающей через отверстие струи на ее наветренной стороне возникает область повышенного давления, а на подветренной стороне—значительная по размерам вихревая зона, в которой создается разрежение. При малой скорости w_∞ размеры вихревой зоны велики, и действительная разность давлений, под влиянием которой происходит истечение потока из отверстия, больше разности давлений, полученной при $w_\infty = 0$.

При более значительных скоростях проходящего потока последний оказывает сильное дросселирующее воздействие на струю, истекающую из отверстия, прижимая ее к стенке, (при $w_\infty > w_0$). Вследствие этого размеры вихревой зоны уменьшаются, а коэффициент ζ увеличивается.

45. Коэффициенты сопротивления ζ как при отсосе, так и притоке остаются практически одинаковыми для квадратных и круглых отверстий, а также для отверстий с закругленными углами. Вместе с тем эти коэффициенты значительно зависят от расположения отверстий вытянутых (прямоугольных) форм. Наибольшие значения ζ получаются при расположении отверстий бóльшими сторонами поперек потока.

46. В случае отсоса увеличение коэффициента ζ при расположении продолговатых отверстий большей стороной поперек потока объясняется тем, что преобладающая часть потока поступает в эти отверстия из пристенной области. Поэтому входящий в отверстие поток имеет малый запас кинетической энергии, и дополнительный эффект наддува оказывается небольшим.

При расположении продолговатых отверстий большей стороной вдоль потока часть периметра, обращенная к потоку, мала, и преобладающая часть потока поступает в отверстие из верхних слоев, имеющих бóльшую скорость. Это усиливает эффект наддува и соответственно уменьшает коэффициент сопротивления.

47. В случае притока увеличение ζ для продолговатых отверстий при расположении их большей стороной поперек потока объяс-

*[1] Проходящий поток движется независимо от истечения через отверстие под влиянием собственного возбудителя, например под влиянием ветра, встречного потока и т. п.

няется тем, что дросселирующее действие, оказываемое проходящим потоком на струю, выходящую из отверстия, проявляется сильнее, чем при расположении отверстий большей стороной вдоль потока, так как в первом случае лобовая поверхность струи больше, чем во втором.

48. На величины ζ как при отсосе, так и притоке значительно влияет установка у краев отверстий козырьков (см. диаграмму 4-22). При этом наклонный козырек повышает, а прямой — понижает коэффициент сопротивления. В первом случае козырек оказывает поджимающее действие на поток, проходящий через отверстие, а следовательно, увеличивается динамическое давление, теряемое после выхода из отверстия. Во втором случае козырек ослабляет эффект поджатия потока, что соответственно уменьшает потери динамического давления на выходе из отверстия.

49. При перетекании жидкости (газа) через проемы в стене, снабженные различными створками, сопротивление больше, чем при отсутствии створок, так как они усложняют траекторию потока. При этом коэффициент сопротивления становится функцией угла открытия створок α и относительной длины створок $l_{\text{ств}}/b_{\text{ств}}$.

50. К участкам с внезапным расширением можно отнести и открытую рабочую часть аэродинамических труб (см. диаграмму 4-25).

Основным источником потерь в открытой рабочей части аэродинамической трубы является эжекционное рассеяние энергии. Вторым источником потерь является отсекание диффузором трубы от свободной струи «присоединенных масс» окружающей среды.

Кинетическая энергия отсекаемой части струи оказывается для труб потерянной и составляет поэтому часть сопротивления открытой рабочей части.

Коэффициент суммарного сопротивления открытой рабочей части вычисляют по формулам Г. Н. Абрамовича [4-1].

Для круглого (или прямоугольного) сечения

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = 0{,}1\frac{l_{\text{р.ч}}}{D_{\text{г}}} - 0{,}008\left(\frac{l_{\text{р.ч}}}{D_{\text{г}}}\right)^2,$$

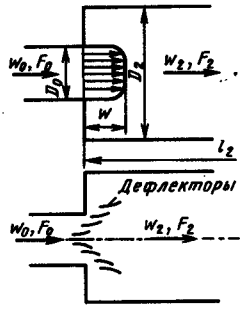
где $D_{\text{г}} = 4F_0/\Pi_0$ — гидравлический диаметр выходного сечения сопла трубы, м.

Для эллиптического сечения

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = 0{,}145\frac{l_{\text{р.ч}}}{D_{\text{г}}} - 0{,}0017\frac{l_{\text{р.ч}}}{a_0 b_0},$$

где $D_{\text{г}} \approx \dfrac{4a_0 b_0}{1{,}5(a_0+b_0) - \sqrt{a_0 b_0}}$; $l_{\text{р.ч}}$ — длина открытой рабочей части трубы, м; a_0, b_0 — полуоси эллипса, м.

Расширение (внезапное) потока с равномерным распределением скоростей [4-13, 4-15, 4-17]	Диаграмма 4-1



$D_г = \dfrac{4F_0}{П_0}$; П — периметр;

$n_п = F_2/F_0$

1. При $Re = \dfrac{w_0 D_г}{\nu} \geqslant 3{,}3 \cdot 10^3$:

а) без дефлекторов

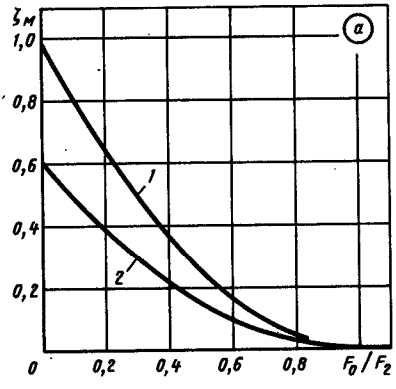
$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \frac{\zeta_{тр}}{n_п^2} = \zeta_м + \frac{\zeta_{тр}}{n_п^2},$$

где $\zeta_м = f\left(\dfrac{F_0}{F_2}\right)$ см. график *а*; $\zeta_{тр} = \lambda l_2 / D_{2г}$; λ см. второй раздел;

б) с дефлекторами

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} \approx 0{,}6\left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \frac{\zeta_{тр}}{n_п^2}$$

Относительные потери при внезапном расширении при сверхзвуковых скоростях см. пп. 20-21 параграфа 4-1.



Значения ζ

$F_0/F_2 = \dfrac{1}{n_п}$										
0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
Без дефлекторов (кривая *1*)										
1,00	0,81	0,64	0,50	0,36	0,25	0,16	0,09	0,04	0
С дефлекторами (кривая *2*)										
0,60	0,49	0,39	0,30	0,21	0,15	0,10	0,05	0,02	0

2. При $500 \leqslant Re < 3{,}3 \cdot 10^3$ $\zeta_м$ см. график *б* или по формуле

$$\zeta_м = -8{,}44556 - 26{,}163\,(1 - F_0/F_2)^2 - 5{,}38086\,(1 - F_0/F_2)^4 + \lg Re\,[6{,}007 + 18{,}5372\,(1 - F_0/F_2)^2 + 3{,}9978\,(1 - F_0/F_2)^4] + (\lg Re)^2\,[-1{,}02318 - 3{,}0916\,(1 - F_0/F_2)^2 - 0{,}680943\,(1 - F_0/F_2)^4]$$

Значения ζ

$\dfrac{F_0}{F_2} = \dfrac{1}{n_п}$	Re												
	10	15	20	30	40	50	10^2	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	10^3	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$\geqslant 3{,}3 \cdot 10^3$
0,1	3,10	3,20	3,00	2,40	2,15	1,95	1,70	1,65	1,70	2,00	1,60	1,00	0,81
0,2	3,10	3,20	2,80	2,20	1,85	1,65	1,40	1,30	1,30	1,60	1,25	0,70	0,64
0,3	3,10	3,10	2,60	2,00	1,60	1,40	1,20	1,10	1,10	1,30	0,95	0,60	0,50
0,4	3,10	3,00	2,40	1,80	1,50	1,30	1,10	1,00	0,85	1,05	0,80	0,40	0,36
0,5	3,10	2,80	2,30	1,65	1,35	1,15	0,90	0,75	0,65	0,90	0,65	0,30	0,25
0,6	3,10	2,70	2,15	1,55	1,25	1,05	0,80	0,60	0,40	0,60	0,50	0,20	0,16

Расширение (внезапное) потока с равномерным распределением скоростей [4-13, 4-15, 4-17]

Диаграмма 4-1

3. При $10 \leqslant Re \leqslant 500$ $\zeta_м$ см. график *б* или по формуле

$$\zeta_м = 3{,}62536 + 10{,}744(1-F_0/F_2)^2 - 4{,}41041(1-F_0/F_2)^4 + \frac{1}{\lg Re}\left[-18{,}13 - 56{,}77855(1-F_0/F_2)^2 + \right.$$

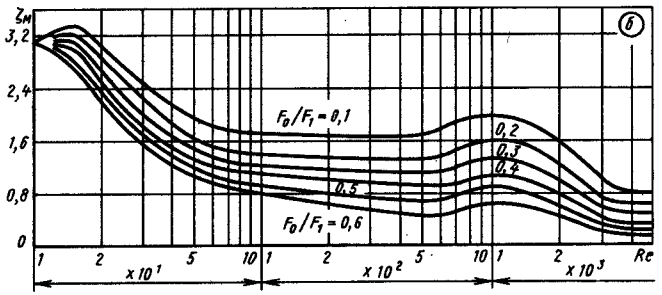
$$\left. + 33{,}40344(1-F_0/F_2)^4\right] + \frac{1}{(\lg Re)^2} \times$$

$$\times \left[30{,}8558 + 99{,}9542(1-F_0/F_2)^2 - \right.$$

$$\left. - 62{,}78(1-F_0/F_2)^4\right] + \frac{1}{(\lg Re)^3} \times$$

$$\times \left[-13{,}217 - 53{,}9555(1-F_0/F_2)^2 + \right.$$

$$\left. 33{,}8053(1-F_0/F_2)^4\right].$$

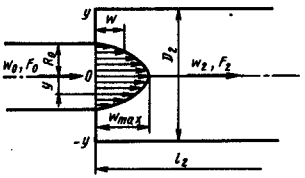


4. При $Re < 10$

$$\zeta_м \approx \frac{30}{Re}$$

Расширение (внезапное) за длинным прямым участком, диффузором и т. н. с распределением скоростей по степенному закону; круглое или прямоугольное сечение; $Re = w_0 D_г/\nu > 3{,}5 \cdot 10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-2



$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = \frac{1}{n_п^2} + N - \frac{2M}{n_п} + \frac{\zeta_{тр}}{n_п^2} = \zeta_м + \frac{\zeta_{тр}}{n_п^2},$$

где $M = \dfrac{(2m+1)^2(m+1)}{4m^2(m+2)}$;

$N = \dfrac{(2m+1)^3(m+1)^3}{4m^4(2m+3)(m+3)}$

} см. график *б*

$D_г = \dfrac{4F_0}{П_0}$; П — периметр; $n_п = \dfrac{F_2}{F_0}$;

$D_{2г} = 4F_2/П_2$;

$\dfrac{w}{w_{max}} = \left(1 - \dfrac{y}{R_0}\right)^{\frac{1}{m}}$; $m \geqslant 1$

$\zeta_м = f(m, F_0/F_2)$ см. график *а*

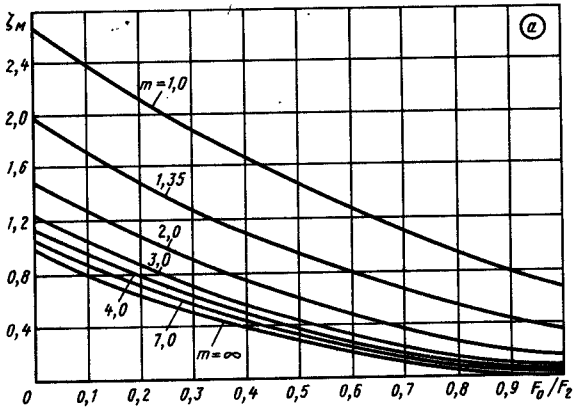
$\zeta_{тр} = \lambda l_2/D_{2г}$; λ см. второй раздел

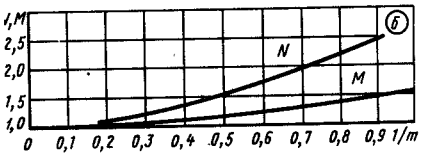
Значения ζ

m	$F_0/F_2 = 1/n_п$									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
1,0	2,70	2,42	2,14	1,90	1,66	1,45	1,26	1,09	0,94	0,70
1,35	2,00	1,74	1,51	1,29	1,00	0,93	0,77	0,65	0,53	0,36
2,0	1,50	1,28	1,08	0,89	0,72	0,59	0,46	0,35	0,27	0,16
3,0	1,25	1,04	0,85	0,68	0,53	0,41	0,30	0,20	0,14	0,07
4,0	1,15	0,95	0,77	0,62	0,47	0,35	0,25	0,17	0,11	0,05
7,0	1,06	0,86	0,69	0,53	0,41	0,29	0,19	0,12	0,06	0,02
∞	1,00	0,82	0,64	0,48	0,36	0,25	0,16	0,09	0,04	0

Расширение (внезапное) за длинным прямым участком, диффузором и т. п. с распределением скоростей по степенному закону; круглое или прямоугольное сечение; $\mathrm{Re}=w_0 D_г/\nu>3{,}5\cdot 10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-2

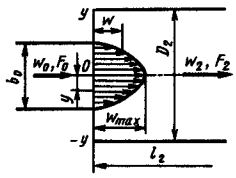




m	1,0	1,35	2,0	3,0	4,0	7,0	∞
N	2,70	2,00	1,51	1,25	1,16	1,06	1,0
M	1,50	1,32	1,17	1,09	1,05	1,02	1,0

Расширение (внезапное) за длинными плоскими прямыми участками, плоскими диффузорами и т. п. с распределением скоростей по степенному закону; $\mathrm{Re}=w_0 D_г/\nu>3{,}5\cdot 10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-3



$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\frac{1}{n_п^2}+N-\frac{2M}{n_п}+\frac{\zeta_{тр}}{n_п^2}=\zeta_м+\frac{\zeta_{тр}}{n_п^2},$$

где $M=\dfrac{(m+1)^2}{m(m+2)}$; $N=\dfrac{(m+1)^3}{m^2(m+3)}$

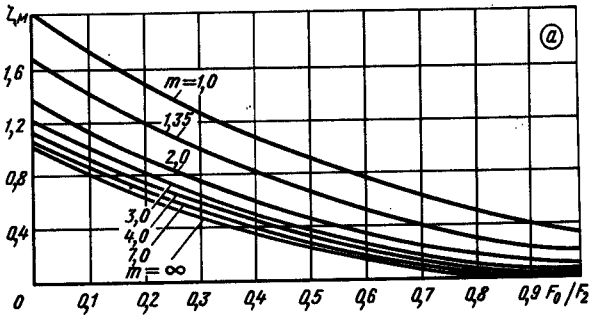
см. график *б*; $\zeta_м=f(m, F_0/F_2)$ см. график *а*; $\zeta_{тр}=\lambda l_2/D_{2г}$; λ см. второй раздел

$D_г=4F_0/П_0$; $D_{2г}=4F_2/П_2$;

П — периметр;

$n_п=F_2/F_0$;

$$\frac{w}{w_{max}}=\left(1-\frac{2y}{b_0}\right)^{\frac{1}{m}};\quad m\geqslant 1$$



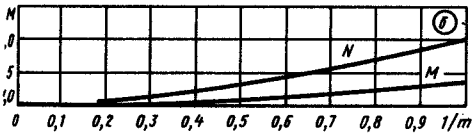
Значения $\zeta_м$

m	$F_0/F_2=1/n_п$									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
1,0	2,00	1,74	1,51	1,28	1,19	0,92	0,77	0,64	0,51	0,34
1,35	1,65	1,40	1,20	1,00	0,83	0,67	0,53	0,41	0,32	0,20
2,0	1,35	1,14	0,94	0,77	0,62	0,48	0,36	0,26	0,19	0,10

Расширение (внезапное) за длинными плоскими прямыми участками, плоскими диффузорами и т. п. с распределением скоростей по степенному закону; $\mathrm{Re}=w_0 D_г/\nu>3{,}5\cdot 10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-3

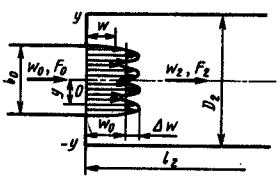
m	$F_0/F_2=1/n_п$									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
3,0	1,19	0,98	0,80	0,64	0,49	0,37	0,24	0,18	0,12	0,05
4,0	1,12	0,92	0,74	0,60	0,46	0,33	0,23	0,14	0,09	0,04
7,0	1,04	0,85	0,64	0,54	0,41	0,28	0,18	0,08	0,05	0,02
∞	1,00	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,15	0,08	0,04	0



m	1,0	1,35	2,0	3,0	4,0	7,0	∞
N	2,00	1,64	1,35	1,18	1,12	1,04	1,0
M	1,33	1,22	1,13	1,07	1,04	1,02	1,0

Расширение (внезапное) плоского канала за решетками, за направляющими лопатками в коленах и т. п. с распределением скоростей по закону тригонометрической функции; $\mathrm{Re}=w_0 D_г/\nu>3{,}5\cdot 10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-4



$$D_г=\frac{4F_0}{П_0};\quad D_{2г}=\frac{4F_2}{П_2};\quad n_п=\frac{F_2}{F_0};$$

П — периметр

$$\frac{w}{w_0}=1+\frac{\Delta w}{w_0}\sin 2k_1\pi\frac{2y}{b_0};$$

k_1 — целое число;

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\frac{1}{n_п^2}+N-\frac{2M}{n_п}+\zeta_{тр}/n_п^2=\zeta_м+\frac{\zeta_{тр}}{n_п^2},$$

где $M=1+\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta w}{w_0}\right)^2$; $N=1+\frac{3}{2}\left(\frac{\Delta w}{w_0}\right)^2$ см. график *б*;

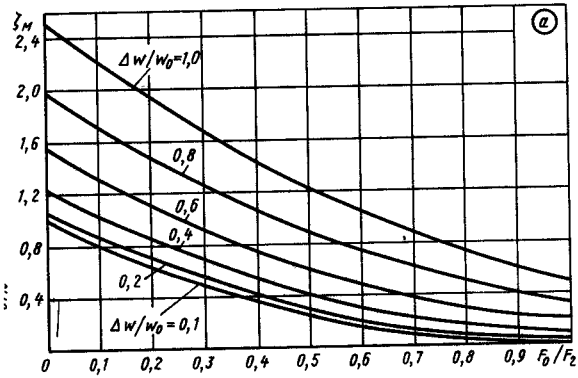
$\zeta_м=f\left(m,\frac{F_0}{F_2}\right)$ см. график *а*; $\zeta_{тр}=\lambda l_2/D_{2г}$; λ см. второй раздел

Значения $\zeta_м$

$\Delta w/w_0$	$F_0/F_2=1/n_п$									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
0,1	1,01	0,83	0,66	0,50	0,38	0,26	0,17	0,10	0,06	0,01
0,2	1,06	0,88	0,70	0,54	0,40	0,29	0,20	0,13	0,07	0,02
0,4	1,24	1,04	0,84	0,68	0,54	0,41	0,30	0,22	0,16	0,08
0,6	1,54	1,31	1,18	0,92	0,75	0,61	0,48	0,39	0,29	0,18
0,8	1,96	1,70	1,47	1,27	1,07	0,89	0,75	0,60	0,49	0,32
1,0	2,50	2,21	1,95	1,70	1,46	1,25	1,05	0,88	0,74	0,50

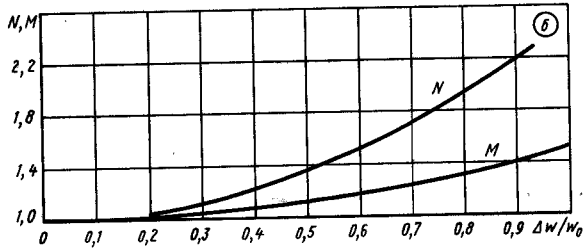
Расширение (внезапное) плоского канала за решетками, за направляющими лопатками в коленах и т. п. с распределением скоростей по закону тригонометрической функции;
$\mathrm{Re} = w_0 D_г/\nu > 3{,}5 \cdot 10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-4



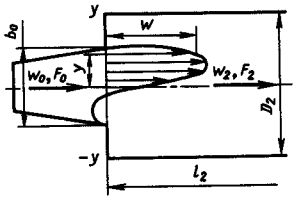
$\Delta w/w_0$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
N	1,02	1,06	1,13	1,24	1,37
M	1,00	1,02	1,04	1,08	1,12

$\Delta w/w_0$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
N	1,54	1,73	1,96	2,22	2,50
M	1,18	1,24	1,32	1,40	1,50



Расширение (внезапное) за плоскими диффузорами при $\alpha > 10°$, за колеиами и т. п. с несимметричным распределением скоростей;
$\mathrm{Re} = w_0 D_г/\nu > 3{,}5 \cdot 10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-5



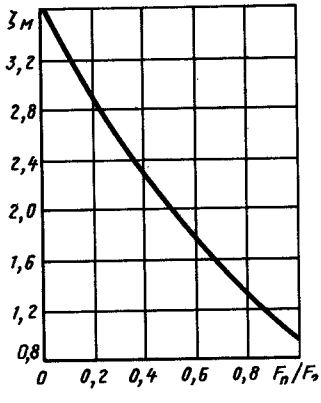
$$D_г = \frac{4F_0}{\Pi_0};\quad D_{2г} = 4F_2/\Pi_2;$$

Π — периметр;

$$n_п = \frac{F_2}{F_0};$$

$$\frac{w}{w_0} = 0{,}585 + 1{,}64 \sin\beta;$$

$$\beta = \left(0{,}2 + 1{,}95\frac{2y}{b_0}\right)$$



$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = \frac{1}{n_п^2} + 3{,}7 - \frac{3{,}74}{n_п} + \frac{\zeta_{тр}}{n_п^2} = \zeta_м + \frac{\zeta_{тр}}{n_п^2},$$

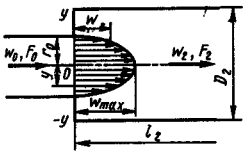
где $\zeta_м = f(F_0/F_2)$

см. график; $\zeta_{тр} = \lambda l_2/D_{2г}$;
λ см. второй раздел

$F_0/F_2 = 1/n_п$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
ζ	3,70	3,34	2,99	2,67	2,36	2,08	1,82	1,57	1,35	0,96

Расширение (внезапное) за участками с параболическим распределением скоростей; $\mathrm{Re}=w_0D_г/\nu>3{,}5\cdot10^3$ [4-13, 4-15]

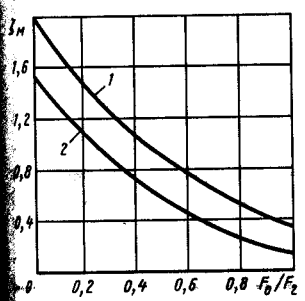
Диаграмма 4-6



$$D_г=\frac{4F_0}{\Pi_0};\quad D_{2г}=\frac{4F_2}{\Pi_2};$$

П — периметр;

$$n_п=\frac{F_2}{F_0};\quad \frac{w}{w_{max}}=1-\left(\frac{y}{R_0}\right)^2$$



1. Труба круглого сечения:

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\frac{1}{n_п^2}+2-\frac{2{,}66}{n_п}+\frac{\zeta_{тр}}{n_п^2}=\zeta_м+\frac{\zeta_{тр}}{n_п^2}.$$

2. Плоский канал:

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\frac{1}{n_п^2}+1{,}55-\frac{2{,}4}{n_п}+\frac{\zeta_{тр}}{n_п^2}=\zeta_м+\frac{\zeta_{тр}}{n_п^2},$$

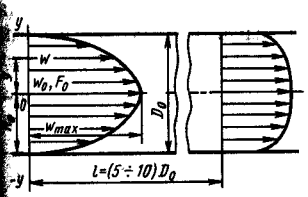
где $\zeta_м=f(F_0/F_2)$; $\zeta_{тр}=\lambda l_2/D_{2г}$; λ см. второй раздел

Значения ζ

$\frac{F_0}{F_2}=1/n_п$									
0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
1. Труба круглого сечения									
2,00	1,75	1,51	1,30	1,10	0,92	0,78	0,63	0,51	0,34
2. Плоский канал									
1,55	1,32	1,11	0,92	0,75	0,60	0,47	0,36	0,27	0,15

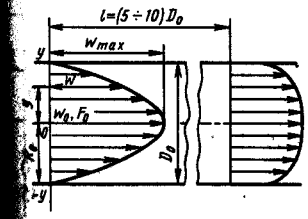
Деформация потока в прямой трубе (канале); $\mathrm{Re}=w_0D_г/\nu>3{,}5\cdot10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-7



$$D_г=4F_0/\Pi_0;$$

П — периметр



Степенной закон распределения скоростей:

$$\frac{w}{w_{max}}=\left(1-\frac{y}{R_0}\right)^{\frac{1}{m}};\ m\geqslant1;\quad \zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=1+N-2M+\zeta_{тр}=\zeta_м+\zeta_{тр};$$

$$\zeta_м=f\left(\frac{1}{m}\right);\ M\text{ и }N\text{ см. график }б\text{ диаграмм 4-2 и 4-3;}$$

$$\zeta_{тр}=\lambda l_0/D_0;\ \lambda\text{ см. второй раздел.}$$

Параболический закон распределения скоростей:

$$\frac{w}{w_{max}}=1-\left(\frac{y}{R_0}\right)^2.$$

1. Труба круглого сечения:

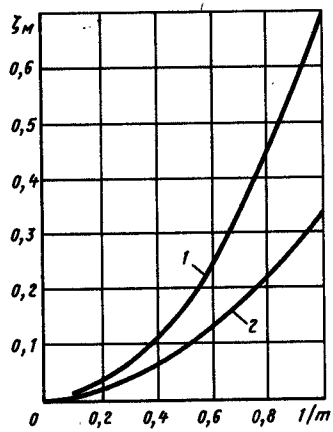
$$\zeta_м\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=0{,}34.$$

2. Плоский канал:

$$\zeta_м\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=0{,}15$$

Деформация потока в прямой трубе (канале);
$\mathrm{Re}=w_0 D_г/\nu>3{,}5\cdot10^3$ [4-13, 4-15]

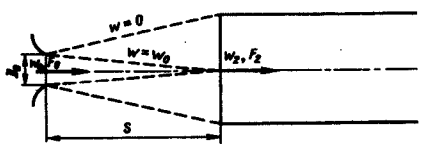
Диаграмма 4-7



m	1,0	1,35	2,0	4,0	7,0	∞
1. Труба круглого сечения						
$\zeta_{см}$	0,7	0,36	0,16	0,05	0,02	0
2. Плоский канал						
$\zeta_{см}$	0,31	0,19	0,10	0,04	0,02	0

Деформация потока в прямой трубе круглого сечения при входе в нее свободной струи (эжектор);
$\mathrm{Re}=w_0 D_г/\nu>3{,}5\cdot10^3$ [4-13, 4-15]

Диаграмма 4-8

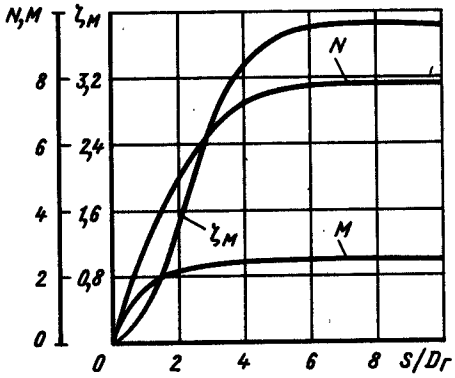


$$D_г=\frac{4F_0}{\Pi_0};\quad D_{2г}=4F_2/\Pi_2$$

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_2^2/2}=1+N-2M+\zeta_{тр}=\zeta_{см}+\zeta_{тр};$$

$$M=\frac{1}{\bar{q}^2}\left(\frac{F_2}{F_0}\right);\quad N=\frac{1}{\bar{q}^3}\left(\frac{F_2}{F_0}\right)^2\bar{e}.$$

Величины $\zeta_{см}$, M и N определяют по графику в зависимости от длины свободной струи $S/D_г$; $\bar{F}=F_2/F_0=F_{стр}/F_0$, $\bar{q}$ и $\bar{e}$ находят в зависимости от длины свободной струи $S/D_г$ по диаграммам 11-28 и 11-29; $\zeta_{тр}=\lambda l_2/D_{2г}$; λ см. второй раздел

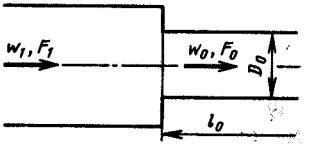
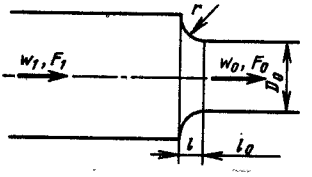
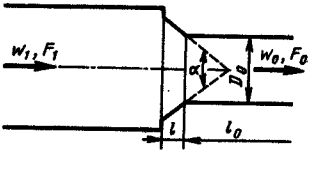


Параметры	$S/D_г$					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\zeta_{см}$	0,16	0,46	0,84	1,43	2,02	2,54
N	1,65	2,89	3,90	4,85	5,65	6,35
M	1,25	1,71	2,00	2,20	2,30	2,40

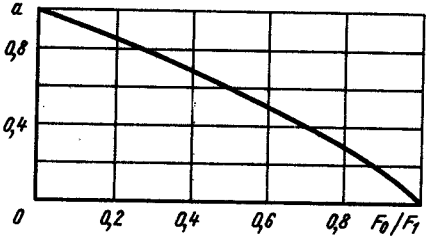
Параметры	$S/D_г$				
	4,0	5,0	6,0	8,0	10
$\zeta_{см}$	3,26	3,65	3,80	3,81	3,81
N	7,20	7,55	7,68	7,70	7,70
M	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45

Сужение (внезапное) при $b/D_г=0$; $\mathrm{Re}=w_0D_г/\nu>10^4$ [4-12, 4-13]
(b см. диаграмму 3-9)

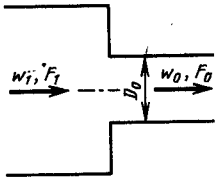
Диаграмма 4-9

№ по пор.	Тип кромки на входе	Схема	Коэффициент сопротивления $\zeta\equiv\dfrac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}$
1	Острая	 $D_г=4F_0/\Pi_0$	$\zeta=0{,}5(1-F_0/F_1)^{3/4}+\zeta_{тр}=0{,}5a+\zeta_{тр}$, где a см. кривую $a=f(F_0/F_1)$; $\zeta_{тр}=\lambda\dfrac{l_0}{D_г}$; λ см. второй раздел
2	Закругленная		$\zeta=\zeta'(1-F_0/F_1)^{3/4}+\zeta_{тр}=\zeta'a+\zeta_{тр}$, где ζ' см. кривую $\zeta=f(r/D_г)$ диаграммы 3-4 (кривая *б*); a см. кривую $a=f\left(\dfrac{F_0}{F_1}\right)$ (п.1); $\zeta_{тр}=\lambda l_0/D_г$; λ см. второй раздел
3	Срезана под углом		$\zeta=\zeta''(1-F_0/F_1)^{3/4}+\zeta_{тр}=\zeta''a+\zeta_{тр}$, где ζ'' см. кривую $\zeta=f(\alpha,\ l/D_г)$ диаграммы 3-7; a см. кривую $a=f(F_0/F_1)$ (п. 1); $\zeta_{тр}=\lambda l_0/D_г$; λ см. второй раздел

F_0/F_1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
a	1,0	0,850	0,680	0,503	0,300	0,178	0



Сужение (внезапное) в переходной и ламинарной областях; $\mathrm{Re}=w_0D_г/\nu>10^4$ [4-3, 4-18]	Диаграмма 4-10



$$D_г=\frac{4F_0}{\Pi_0}$$

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\zeta_м+\zeta_{тр}$$

1. При $10\leqslant\mathrm{Re}<10^4$ $\zeta_м$ см. кривые $\zeta_м=f(\mathrm{Re}, F_0/F_1)$ или по формуле

$$\zeta_м=A\cdot B(1-F_0/F_1),$$

где $A=\sum_{i=0}^{7}a_i(\lg\mathrm{Re})^i$; $a_0=-25{,}12458$; $a_1=118{,}5076$; $a_2=-170{,}4147$; $a_3=118{,}1949$; $a_4=-44{,}42141$; $a_5=9{,}09524$; $a_6=-0{,}9244027$; $a_7=0{,}03408265$;

$$B=\sum_{i=0}^{2}\left\{\left[\sum_{j=0}^{2}a_{ij}(F_0/F_1)^j\right](\lg\mathrm{Re})^i\right\},$$ a_{ij} см. ниже.

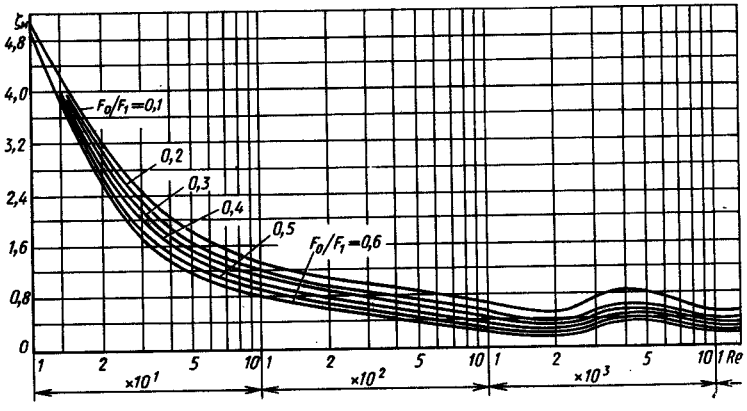
2. При $\mathrm{Re}<10$ $\zeta_м\approx\frac{30}{\mathrm{Re}}$

Значения a_{ij}

i/j	$10\leqslant\mathrm{Re}\leqslant2\cdot10^3$			$2\cdot10^3<\mathrm{Re}<4\cdot10^3$		
	0	1	2	0	1	2
0	1,07	1,22	2,9333	0,5443	−17,298	−40,715
1	0,05	−0,51668	0,8333	−0,06518	8,7616	22,782
2	0	0	0	0,05239	−1,1093	−3,1509

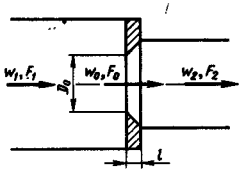
Значения $\zeta_м$

F_0/F_1	Re													
	10	20	30	40	50	10^2	$2\cdot10^2$	$5\cdot10^2$	10^3	$2\cdot10^3$	$4\cdot10^3$	$5\cdot10^3$	10^4	$>10^4$
0,1	5,00	3,20	2,40	2,00	1,80	1,30	1,04	0,82	0,64	0,50	0,80	0,75	0,50	0,45
0,2	5,00	3,10	2,30	1,84	1,62	1,20	0,95	0,70	0,50	0,40	0,60	0,60	0,40	0,40
0,3	5,00	2,95	2,15	1,70	1,50	1,10	0,85	0,60	0,44	0,30	0,55	0,55	0,35	0,35
0,4	5,00	2,80	2,00	1,60	1,40	1,00	0,78	0,50	0,35	0,25	0,45	0,50	0,30	0,30
0,5	5,00	2,70	1,80	1,46	1,30	0,90	0,65	0,42	0,30	0,20	0,40	0,42	0,25	0,25
0,6	5,00	2,60	1,70	1,35	1,20	0,80	0,56	0,35	0,24	0,15	0,35	0,35	0,20	0,20



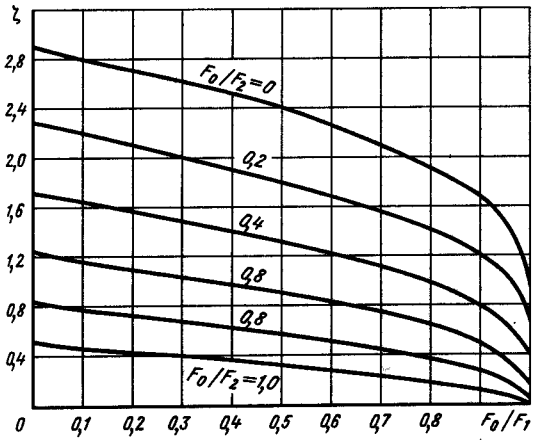
Диафрагма с острыми краями $(l/D_r = 0 \div 0{,}015)$, **установленная на переходном участке;** $\mathrm{Re} = w_0 D_r/\nu > 10^4$ [4-13, 4-14]

Диаграмма 4-11



$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = \left[0{,}707\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}375} + \left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)\right]^2 = f\left(\frac{F_0}{F_1}; \frac{F_0}{F_2}\right)$$

$D_r = 4F_0/\Pi_0$



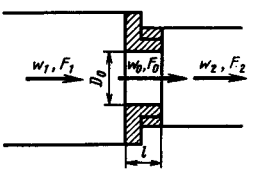
Значения ζ

F_0/F_2	F_0/F_1					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	2,91	2,82	2,72	2,61	2,51	2,39
0,2	2,27	2,19	2,10	2,01	1,91	1,81
0,4	1,71	1,64	1,56	1,48	1,40	1,31
0,6	1,23	1,17	1,10	1,03	0,97	0,89
0,8	0,82	0,77	0,72	0,67	0,61	0,56
1,0	0,50	0,46	0,42	0,38	0,34	0,30

F_0/F_2	F_0/F_1				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	2,25	2,10	1,92	1,68	1,00
0,2	1,69	1,56	1,41	1,20	0,64
0,4	1,21	1,10	0,97	0,80	0,36
0,6	0,81	0,72	0,62	0,48	0,16
0,8	0,49	0,42	0,34	0,25	0,04
1,0	0.25	0,20	0,15	0,09	0

Диафрагма с утолщенными краями $(l/D_r > 0{,}015)$, **установленная на переходном участке;** $\mathrm{Re} = w_0 D_r/\nu > 10^5$ [4-13, 4-14]

Диаграмма 4-12



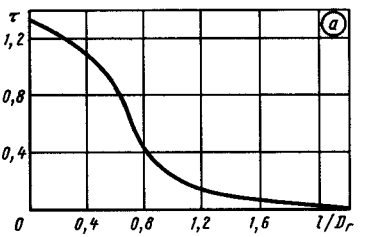
$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} \approx 0{,}5\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}75} + \left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \tau\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}375}\left(1-\frac{F_0}{F_2}\right) + \lambda\frac{1}{D_r},\quad \tau = (2{,}4-\bar{l})\cdot 10^{-\varphi(\bar{l})},\quad \varphi(\bar{l}) = 0{,}25 + 0{,}535\bar{l}^8/(0{,}05+\bar{l}^7),$$

где $\tau = f\left(\dfrac{l}{D_r}\right)$ см. график или λ — см. второй раздел

$D_r = 4F_0/\Pi_0$

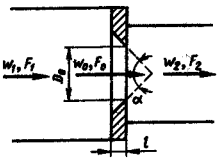
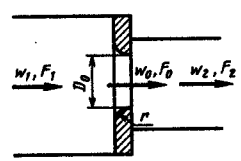
$\bar{l} \equiv l/D_r$	0	0,2	0,4	0,6	0,8
τ	1,35	1,22	1,10	0,84	0,42

$\bar{l} \equiv l/D_r$	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4
τ	0,24	0,16	0,07	0,02	0

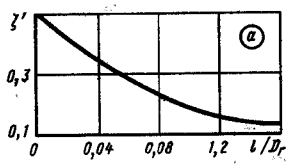


Диафрагма со срезанными и закругленными по потоку краями, установленная на переходном участке; $\mathrm{Re}=w_0 D_г/\nu>10^4$ [4-13, 4-14]

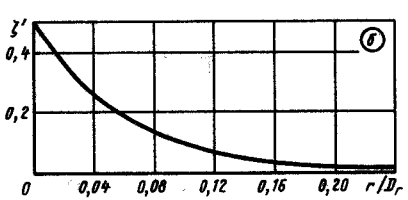
Диаграмма 4-13

Диафрагма	Схема	Коэффициент сопротивления
Со срезанными по потоку краями	$D_г=4F_0/\Pi_0$ 	$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\zeta'\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0,75}+\left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)^2+2\sqrt{\zeta'}\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0,375}\left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)$, где при $\alpha=40\div60°$ ζ' см. график *а* или $\zeta'=0,13+0,34\cdot10^{-(3,47+88,47l^{2,3})}$. При других α ζ' — как ζ по диаграмме 3-7
С закругленными краями		$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\zeta'\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0,75}+\left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)^2+2\sqrt{\zeta'}\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0,375}\left(1-\frac{F_0}{F_2}\right)$, где $\zeta'=f(r/D_г)$ см. график *б* или $\zeta'=0,03+0,47\times\exp(-17,73\bar{r})$, $\bar{r}=r/D_г$

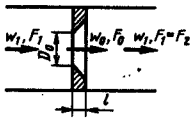
$l/D_г$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,12	⩾0,16
ζ'	0,46	0,42	0,38	0,35	0,29	0,23	0,16	0,13



$r/D_г$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,12	0,16	⩾0,2
ζ'	0,50	0,44	0,37	0,31	0,26	0,22	0,19	0,15	0,09	0,06	0,03



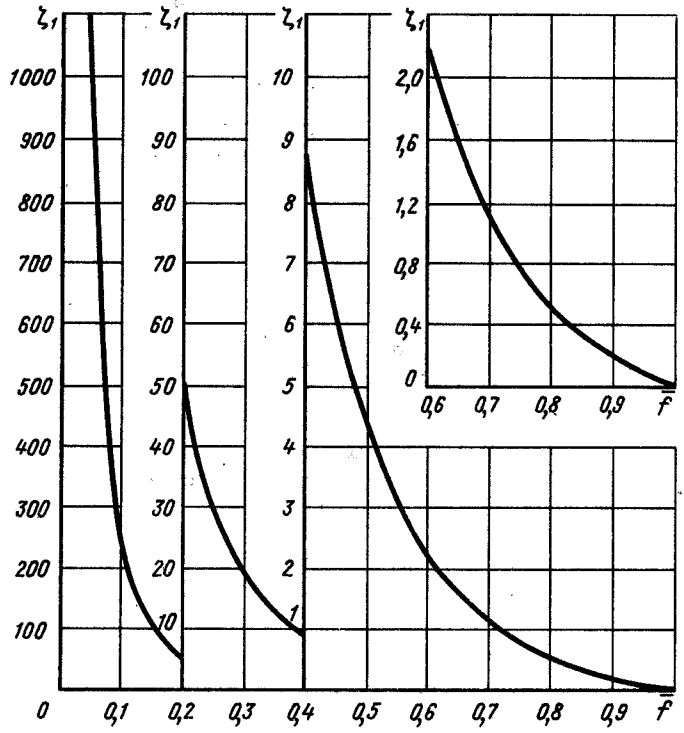
Диафрагма с острыми краями ($l/D_т = 0 \div 0.015$) в прямой трубе; $\mathrm{Re} = w_0 D_т/\nu \geqslant 10^5$ [4-13, 4-14]	Диаграмма 4-14



$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2} = \left[\left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right) + 0{,}707\left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}375}\right]^2 \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2$$

см. кривую $\zeta = f(F_0/F_1)$; $\bar{f} = F_0/F_1$

$$D_т = \frac{4F_0}{\Pi_0}$$

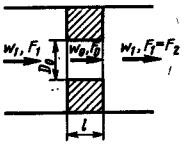


F_0/F_1	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
ζ	7083	3089	1716	1082	733	402	250	168	119	88,1	67,2	52,6

F_0/F_1	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,45	0,47
ζ	41,8	33,8	27,7	23,0	19,2	16,2	13,8	11,8	10,1	8,75	7,57	6,12	5,31

F_0/F_1	0,50	0,52	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
ζ	4,37	3,81	3,10	2,24	1,60	1,13	0,79	0,54	0,34	0,19	0,09	0

Диафрагма с утолщенными краями ($l/D_г > 0{,}015$) в прямой трубе (канале); $Re = w_0 D_г/\nu > 10^5$ [4-13, 4-14]	Диаграмма 4-15



$$\zeta_1 \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2} = \left[0{,}5\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}75} + \tau\left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^{1{,}375} + \left(1-\frac{F_0}{F_1}\right)^2 + \lambda\frac{l}{D_г}\right]\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2,$$

где τ см. таблицу (ниже), график *а* диаграммы 4-12 или $\tau = (2{,}4-\bar{l})\cdot 10^{-\varphi(\bar{l})}$; $\varphi(\bar{l}) = 0{,}25 + 0{,}535\bar{l}^8/(0{,}05+\bar{l}^7)$ см. второй раздел. При $\lambda = 0{,}02$ значения $\zeta_1 = f(l/D_г,\ F_0/F_1)$ см. график

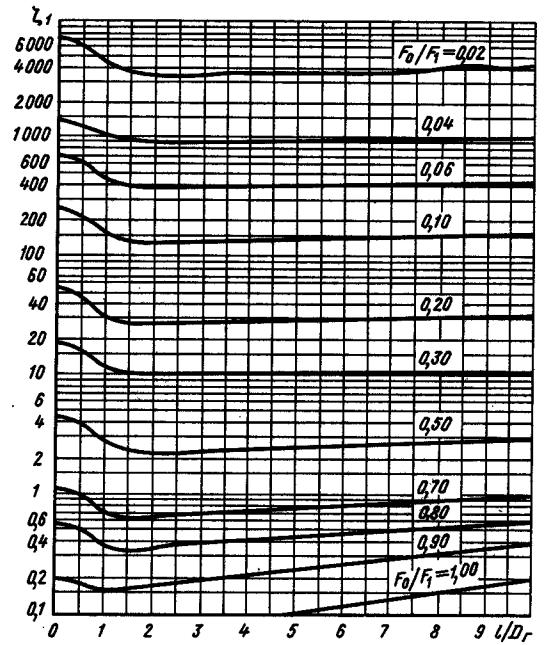
$$D_г = \frac{4F_0}{\Pi_0};\quad \bar{l} = l/D_г$$

Значения ζ_1 при $\lambda = 0{,}02$

$\bar{l}=l/D_г$	τ	F_0/F_1															
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
0	1,35	6915	1676	716	394	244	99,5	51,4	30,0	18,8	8,56	4,27	2,19	1,11	0,53	0,19	0
0,2	1,22	6613	1602	684	376	233	95,0	49,0	28,6	18,0	8,17	4,08	2,09	1,07	0,51	0,19	0
0,4	1,10	6227	1533	655	360	223	91,0	47,0	27,4	17,2	7,83	3,92	2,01	1,03	0,50	0,19	0,01
0,6	0,84	5708	1382	591	324	201	81,9	42,3	24,6	15,5	7,04	3,53	1,82	0,94	0,46	0,18	0,01
0,8	0,42	4695	1137	485	266	165	67,2	34,6	20,2	12,7	5,77	2,90	1,50	0,78	0,39	0,16	0,02
1,0	0,24	4268	1033	441	242	150	61,0	31,4	18,3	11,5	5,24	2,64	1,37	0,72	0,37	0,16	0,02
1,4	0,10	3948	956	408	224	139	56,4	29,1	17,0	10,7	4,86	2,45	1,29	0,68	0,36	0,16	0,03
2,0	0,02	3783	916	391	215	133	54,1	27,9	16,3	10,2	4,68	2,38	1,26	0,68	0,36	0,17	0,04
3,0	0	3783	916	391	215	133	54,3	28,0	16,4	10,3	4,75	2,43	1,30	0,71	0,39	0,20	0,06
4,0	0	3833	929	397	218	135	55,2	28,6	16,7	10,6	4,88	2,51	1,35	0,75	0,42	0,22	0,08
5,0	0	3883	941	402	221	137	56,0	29,0	17,0	10,8	5,00	2,59	1,41	0,79	0,45	0,24	0,10
6,0	0	3933	954	408	224	139	56,9	29,6	17,4	11,0	5,12	2,67	1,46	0,83	0,48	0,27	0,12
7,0	0	3983	966	413	227	141	57,8	30,0	17,7	11,2	5,25	2,75	1,52	0,87	0,51	0,29	0,14
8,0	0	4033	979	419	231	143	58,7	30,6	18,0	11,4	5,38	2,83	1,57	0,91	0,54	0,32	0,16
9,0	0	4083	991	424	234	145	59,6	31,0	18,3	11,6	5,50	2,91	1,63	0,95	0,58	0,34	0,18
10,0	0	4133	1004	430	237	147	60,5	31,6	18,6	11,9	5,62	3,00	1,68	0,99	0,61	0,37	0,20

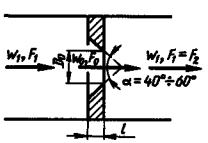
Диафрагма с утолщенными краями ($l/D_г > 0{,}015$) в прямой трубе (канале); $\mathrm{Re} = w_0 D_г/\nu > 10^5$ [4-13, 4-14]

Диаграмма 4-15



Диафрагма (отверстие) со срезаными по потоку краями ($\alpha = 40 \div 60°$) в прямой трубе; $\mathrm{Re} = \dfrac{w_0 D_г}{\nu} > 10^4$ [4-13, 4-14]

Диаграмма 4-16



$$\zeta_1 \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}\left[1 - \frac{F_0}{F_1} + \sqrt{\zeta'}\left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0{,}375}\right]^2 \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2$$ см. график;

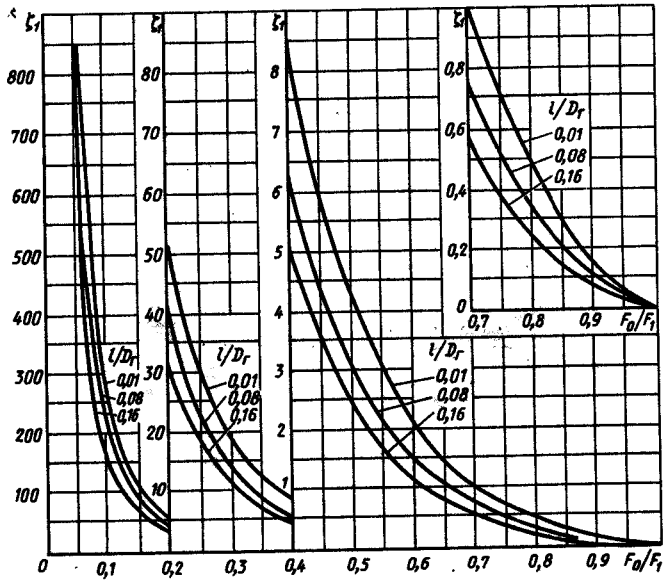
$\zeta' = f\left(\dfrac{l}{D_г}\right)$ см. таблицу (ниже), график *а* диаграммы 4-13 или $\zeta' = 0{,}13 + 0{,}34 \exp\left(-7{,}94\bar{l} - 203{,}55\bar{l}^{2,3}\right)$; $\bar{l} = l/D_г$

Значения ζ_1

$\bar{l} = l/D_г$	ζ'	F_0/F_1															
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0
0,01	0,46	6840	1656	708	388	241	98,2	50,7	29,5	18,5	8,39	4,18	2,13	1,08	0,51	0,18	0
0,02	0,42	6592	1598	682	374	232	94,5	48,7	28,4	17,8	8,05	4,00	2,03	1,02	0,48	0,17	0
0,03	0,38	6335	1535	655	360	223	90,6	46,7	27,2	17,0	7,69	3,80	1,93	0,97	0,45	0,16	0
0,04	0,35	6140	1488	635	348	216	87,7	45,2	26,2	16,4	7,40	3,66	1,84	0,92	0,43	0,15	0
0,06	0,29	5737	1387	592	325	201	81,5	41,9	24,4	15,2	6,83	3,35	1,68	0,83	0,38	0,13	0
0,08	0,23	5297	1281	546	300	185	75,0	38,5	22,3	13,9	6,20	3,02	1,51	0,74	0,33	0,11	0
0,12	0,16	4748	1147	488	267	165	66,7	34,1	19,7	12,2	5,40	2,61	1,29	0,62	0,27	0,09	0
0,16	0,13	4477	1081	460	251	155	62,7	32,0	18,4	11,4	5,02	2,42	1,18	0,56	0,24	0,08	0

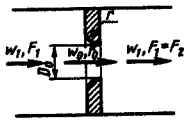
Диафрагма (отверстие) со срезанными по потоку краями ($\alpha = 40 \div 60°$) **в прямой трубе;** $\mathrm{Re} = \dfrac{w_0 D_r}{\nu} > 10^4$ [4-13, 4-14]

Диаграмма 4-16



Диафрагма с закругленными по нотоку краями в прямой трубе; $\mathrm{Re} = w_0 D_r/\nu > 10^4$ [4-13, 4-14]

Диаграмма 4-17



$$D_r = \frac{4F_0}{\Pi_0}$$

$$\zeta_1 \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2} = -\left[1 - \frac{F_0}{F_1} + \sqrt{\zeta'}\left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0,75}\right]^2 \left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2$$ см. график;

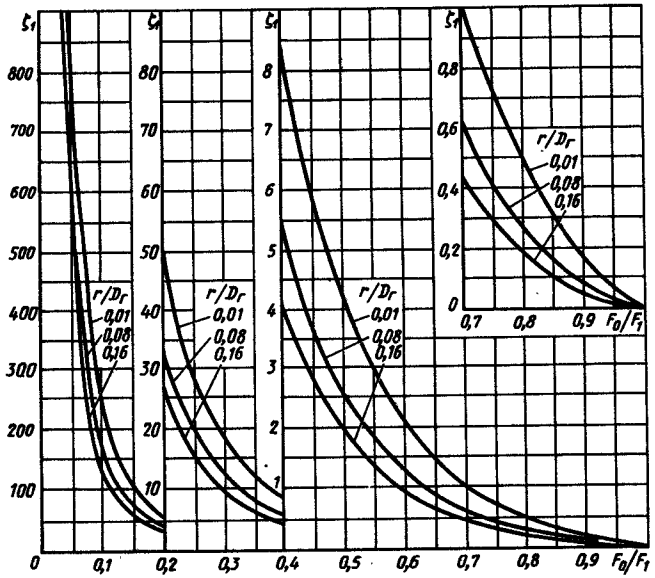
$\zeta' = f_1\left(\dfrac{r}{D_r}\right)$ см. таблицу (ниже), график *б* диаграммы 4-13 или $\zeta' = 0{,}03 + 0{,}47 \exp(-17{,}73\bar{r})$; $\bar{r} = r/D_r$

Значения ζ_1

r/D_r	ζ'	F_0/F_1																				
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,0
0,01	0,44	6717	1628	695	382	236	96,4	49,7	29,0	18,2	12,0	8,24	5,75	4,10	2,91	2,08	1,49	1,05	0,73	0,49	0,18	0
0,02	0,37	6273	1520	648	356	221	89,7	46,2	26,9	16,8	11,1	7,59	5,29	3,75	2,65	1,90	1,35	0,95	0,66	0,44	0,15	0
0,03	0,31	5875	1421	607	332	206	83,6	43,0	25,0	15,6	10,3	7,01	4,87	3,45	2,43	1,74	1,23	0,86	0,59	0,40	0,14	0
0,04	0,26	5520	1336	570	312	193	78,3	40,2	23,4	14,6	9,54	6,51	4,51	3,19	2,24	1,60	1,13	0,79	0,54	0,36	0,12	0
0,06	0,19	4982	1206	513	281	174	70,3	36,0	20,8	12,9	8,46	5,76	3,97	2,79	1,96	1,38	0,97	0,67	0,46	0,30	0,10	0
0,08	0,15	4657	1125	479	262	162	65,3	33,4	19,3	12,0	7,80	5,29	3,63	2,55	1,78	1,25	0,88	0,60	0,41	0,26	0,08	0
0,12	0,09	4085	986	428	229	141	56,8	29,0	16,6	10,2	6,65	4,48	3,06	2,14	1,48	1,03	0,71	0,48	0,33	0,21	0,06	0
0,16	0,06	3745	902	384	210	129	51,8	26,3	15,0	9,3	5,99	4,02	2,73	1,90	1,31	0,91	0,62	0,42	0,28	0,17	0,05	0

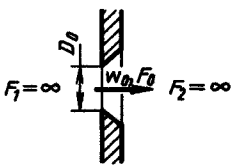
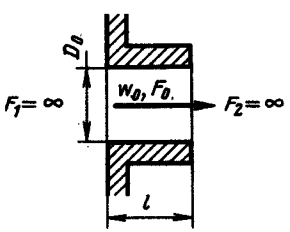
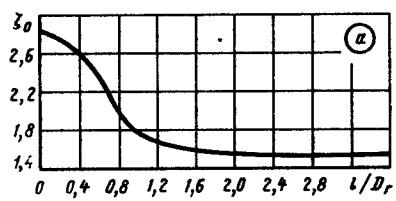
Диафрагма с закругленными по потоку краями в прямой трубе; $Re = w_0 D_r/\nu > 10^4$ [4-13, 4-14]

Диаграмма 4-17

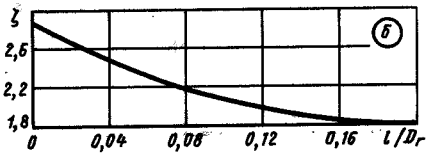


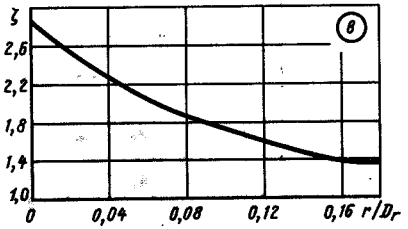
Отверстия с различными краями в стенке с неограниченной площадью [4-13, 4-14]

Диаграмма 4-18

Края отверстия	Схема	Коэффициент сопротивления $\zeta = \dfrac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}$
1	2	3
Острые ($l/D_r = 0 \div 0{,}015$)	$D_r = \dfrac{4F_0}{\Pi_0}$ 	$Re = w_0 D_r/\nu \geqslant 10^4$ $\zeta = 2{,}7 \div 2{,}8$
Утолщенные (глубокое отверстие) ($l/D_r > 0{,}015$)		 $Re \geqslant 10^4$ $\zeta = \zeta_0 + \lambda \dfrac{l}{D_r}$,

Отверстия с различными краями в стенке с неограниченной площадью [4-13, 4-14]	**Диаграмма 4-18**

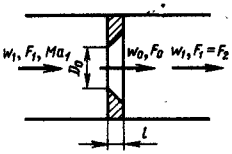
<table>
<tr><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td>где $\zeta_0=f(\bar{l})$ см. график а или $\zeta=1{,}5+(2{,}4-\bar{l})\times 10^{-\varphi(\bar{l})}+\lambda\bar{l}/D_г$ $\varphi(\bar{l})=0{,}25+0{,}535\bar{l}^8/(0{,}05+\bar{l}^7)$; λ см. второй раздел
<table>
<tr><td>$\bar{l}\equiv l/D_г$</td><td>0</td><td>0,2</td><td>0,4</td><td>0,6</td><td>0,8</td><td>1,0</td></tr>
<tr><td>ζ_0</td><td>2,85</td><td>2,72</td><td>2,60</td><td>2,34</td><td>1,95</td><td>1,76</td></tr>
<tr><td>$\bar{l}\equiv l/D_г$</td><td>1,2</td><td>1,4</td><td>1,6</td><td>1,8</td><td>2,0</td><td>4,0</td></tr>
<tr><td>ζ_0</td><td>1,67</td><td>1,62</td><td>1,60</td><td>1,58</td><td>1,55</td><td>1,55</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Срезанные по потоку</td><td></td><td>$\mathrm{Re}\geqslant 10^4$ $\zeta=f(\bar{l})$ см. график б или $\zeta=(1+\sqrt{\zeta'})^2$, где $\zeta'=0{,}13+0{,}34\cdot\exp(-7{,}94\bar{l}-203{,}55\bar{l}^{2,3})$


$\alpha=40\div 60°$
<table>
<tr><td>$\bar{l}\equiv l/D_г$</td><td>0</td><td>0,01</td><td>0,02</td><td>0,03</td><td>0,04</td><td>0,05</td></tr>
<tr><td>ζ</td><td>2,85</td><td>2,80</td><td>2,70</td><td>2,60</td><td>2,50</td><td>2,41</td></tr>
<tr><td>$\bar{l}=l/D_г$</td><td>0,06</td><td>0,08</td><td>0,10</td><td>0,12</td><td>0,16</td><td>0,20</td></tr>
<tr><td>ζ</td><td>2,33</td><td>2,18</td><td>2,08</td><td>1,98</td><td>1,84</td><td>1,80</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Закругленные по потоку</td><td></td><td>$\mathrm{Re}\geqslant 10^4$
$\zeta=f(\bar{r})$ см. график в или $\zeta=(1+\sqrt{\zeta'})^2$, где $\zeta'=0{,}03+0{,}47\cdot\exp(-17{,}73\bar{r})$


<table>
<tr><td>$\bar{r}\equiv r/D_г$</td><td>0,01</td><td>0,02</td><td>0,03</td><td>0,04</td><td>0,06</td><td>0,08</td><td>0,12</td><td>0,16</td><td>0,20</td></tr>
<tr><td>ζ</td><td>2,72</td><td>2,56</td><td>2,40</td><td>2,27</td><td>2,06</td><td>1,90</td><td>1,67</td><td>1,54</td><td>1,46</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

Диафрагмы (отверстия) с любыми формами краев для различных условий перетекания потока в переходной и ламинарной областях $(\mathrm{Re}=w_0 D_г/\nu<10^4\div10^5)$ [4-16]

Диаграмма 4-19



$$D_г=\frac{4F_0}{\Pi_0}$$

1. При $30<\mathrm{Re}<10^4\div10^5$ $\zeta=\dfrac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\zeta_{\varphi}+\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}\zeta_{0кв}$ и соответственно

$$\zeta_1\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}=\zeta_{\varphi}\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2+\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}\zeta_{1кв}.$$

2. При $10<\mathrm{Re}<30$ $\zeta=\dfrac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\dfrac{33}{\mathrm{Re}}+\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}\zeta_{0кв}$ и $\zeta_1=\dfrac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}=\dfrac{33}{\mathrm{Re}}\left(\dfrac{F_1}{F_0}\right)^2+$ $+\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}\zeta_{1кв}$, где $\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}$ см. ниже.

3. При $\mathrm{Re}<10$:

$$\zeta\equiv\frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}=\frac{33}{\mathrm{Re}}\ \text{и}\ \zeta_1=\frac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}=\frac{33}{\mathrm{Re}}\left(\frac{F_1}{F_0}\right)^2;$$

$\zeta_{0.кв}\equiv\dfrac{\Delta p}{\rho w_0^2/2}$, $\zeta_{1.кв}=\dfrac{\Delta p}{\rho w_1^2/2}$ — как ζ при $\mathrm{Re}>10^4$ по соответствующим диаграммам 4-1—4-18;

ζ_{φ} см. табл. 1 или по формуле

$$\zeta_{\varphi}=[18{,}78-7{,}768F_1/F_0+6{,}337(F_1/F_0)^2]\exp\{[-0{,}942-7{,}246F_0/F_1-3{,}878(F_0/F_1)^2]\lg\mathrm{Re}\};$$

$\bar{\varepsilon}_{0.\mathrm{Re}}$ см. табл. 2 или по формуле

$$\bar{\varepsilon}_{0.\mathrm{Re}}=\sum_{i=0}^{5}a_i(\lg\mathrm{Re})^i,\ \text{где}\ a_0=0{,}461465;$$

$a_1=-0{,}2648592$; $a_2=0{,}2030479$; $a_3=-0{,}06602521$; $a_4=0{,}01325519$; $a_5=-0{,}001058041$

1. Значения ζ_{φ}

F_0/F_1	Re													
	30	40	60	10^2	$2\cdot10^2$	$4\cdot10^2$	10^3	$2\cdot10^3$	$4\cdot10^3$	10^4	$2\cdot10^4$	10^5	$2\cdot10^5$	10^6
0	1,94	1,38	1,14	0,89	0,69	0,64	0,39	0,30	0,22	0,15	0,11	0,04	0,01	0
0,2	1,78	1,36	1,05	0,85	0,67	0,57	0,36	0,26	0,20	0,13	0,09	0,03	0,01	0
0,3	1,57	1,16	0,88	0,75	0,57	0,43	0,30	0,22	0,17	0,10	0,07	0,02	0,01	0
0,4	1,35	0,99	0,79	0,57	0,40	0,28	0,19	0,14	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0
0,5	1,10	0,75	0,55	0,34	0,19	0,12	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0
0,6	0,85	0,56	0,30	0,19	0,10	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0	0	0	0
0,7	0,58	0,37	0,23	0,11	0,06	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0
0,8	0,40	0,24	0,13	0,06	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0
0,9	0,20	0,13	0,08	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,95	0,03	0,03	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. Значения $\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}$

Re	10	20	30	40	60	80	10^2	$2\cdot10^2$	$4\cdot10^2$	$6\cdot10^2$	10^3	$2\cdot10^3$	$4\cdot10^3$	$6\cdot10^3$	10^4	$2\cdot10^4$	$4\cdot10^4$	$6\cdot10^4$	10^5	$2\cdot10^5$	$3\cdot10^5$	$4\cdot10^5$
$\bar{\varepsilon}_{0\mathrm{Re}}$	0,34	0,35	0,36	0,37	0,40	0,43	0,45	0,52	0,58	0,62	0,65	0,69	0,74	0,76	0,80	0,82	0,85	0,87	0,90	0,95	0,98	1,0