

**О. П. Иванов, В. О. Мамченко**

# **Аэродинамика и вентиляторы**

**Допущено Министерством  
высшего и среднего  
специального образования  
СССР в качестве учебника для  
студентов вузов, обучающихся  
по специальности  
"Холодильные и компрессорные  
машины и установки"**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 030  
ББК 92  
О-11

- О-11 **О. П. Иванов**  
Аэродинамика и вентиляторы: Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности "Холодильные и компрессорные машины и установки" / О. П. Иванов, В. О. Мамченко – М.: Книга по Требованию, 2012. – 280 с.

**ISBN 978-5-458-34848-5**

Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Холодильные компрессорные машины и установки"

**ISBN 978-5-458-34848-5**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Аэродинамика является теоретической основой авиации, метрологии, вентиляции и других отраслей народного хозяйства. Вентиляторы как побудители движения газа используются в энергетических, химических, пищевых и др. системах и установках. В настоящем учебнике рассмотрены вопросы техники вентиляции и кондиционирования воздуха. Поэтому прежде всего определим основные понятия, что такое вентиляция и кондиционирование воздуха.

*Вентиляция* — это регулируемый воздухообмен в помещениях; система мер для создания воздушной среды, благоприятной для здоровья человека, а также отвечающей требованиям технологического процесса, сохранения оборудования и строительных конструкций здания, материалов, продуктов и т. д.

Вентиляция бывает общеобменной (общей), создающей одинаковые температуру, чистоту воздуха и его подвижность во всем помещении, местной и комбинированной. Различают вентиляцию естественную и искусственную (механическую), осуществляемую преимущественно вентилятором. Побочные вредные производственные выбросы, такие как пыль, пары и газы, в промышленных зданиях удаляются пылеосадочными камерами, фильтрами, устройствами местной вытяжки.

*Кондиционирование воздуха* — это создание и автоматическое поддержание температуры, относительной влажности, чистоты, состава, скорости движения воздуха, наиболее благоприятных для самочувствия людей (комфортное кондиционирование) или ведения технологических процессов, работы оборудования и приборов (технологическое кондиционирование) в закрытых помещениях, средствах транспорта и т. д.

Системы кондиционирования могут выполнять функции приточной вентиляции. Кондиционирование воздуха осуществляется системами кондиционирования, представляющими собой совокупность технических средств, служащих для приготовления (кондиционеры), смешения (камеры смешения) и распределения (каналы, воздухо-распределительные устройства) воздуха, автоматического регулирования его параметров, дистанционного контроля и управления всеми процессами.

*Кондиционер* — это агрегат для обработки и перемещения воздуха в системах кондиционирования.

Из широкого круга задач, решаемых системами вентиляции (СВ) и системами кондиционирования воздуха (СКВ), можно выделить следующие: обеспечение требуемой подвижности воздуха в помещении; приготовление воздуха при прохождении его через аппараты

кондиционера; смешение воздуха; транспортировка воздуха по каналам; распределение воздуха в помещении; фильтрация воздуха; аэрация зданий, теоретической базой для которых является аэромеханика.

*Аэромеханика* — раздел механики, изучающий равновесие и движение газообразных сред и механические воздействия этих сред на погруженные в них твердые тела. Аэромеханика подразделяется на аэростатику и аэродинамику.

*Аэростатика* — раздел аэромеханики, изучающий условия равновесия газов и действие неподвижных газов на погруженные в них твердые тела.

*Аэродинамика* — раздел аэромеханики, изучающий законы движения газообразной среды и ее силовое взаимодействие с неподвижными или движущимися в ней обтекаемыми твердыми телами и являющийся теоретической основой авиации, метрологии, вентиляции и кондиционирования воздуха. Основные задачи, решаемые аэродинамикой, — определение подъемной силы и силы сопротивления; распределение давления и скоростей; направления струй на поверхности твердых тел, находящихся в воздушном потоке. Этот раздел связан с решением широкого круга задач, являющихся основными при исследовании, расчете, конструировании, наладке и эксплуатации оборудования и систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

В основу решения этих задач положены следующие уравнения аэродинамики: неразрывности или сплошности потока; энергии; количества и моментов движения; теории деформации; движения и др.

В практике расчетов оборудования СВ и СКВ инженеру приходится решать задачи с использованием этих уравнений.

При расчете потерь давления в воздуховодах (каналах) и арматуре используются основные положения теории пограничного слоя, обусловленного силами вязкости. При решении вопросов, связанных с распределением воздуха в помещении, необходимо знание особенностей струйных течений, также описываемых с помощью уравнений аэродинамики. Наиболее полное исследование этого вопроса принадлежит Г. Н. Абрамовичу. Способы распределения воздуха в помещении предопределяют необходимость знания теории свободных изотермических и неизотермических струй различной конфигурации.

Если в помещении находятся предметы, температура которых отличается от температуры воздуха, то около их поверхности возникают конвективные струи. Эти потоки искажают поля температур, скоростей и влажности в помещении и должны учитываться при организации воздухораспределения в объекте. Для раздачи воздуха используются различные устройства и приспособления: воздуховоды равномерной раздачи, воздухораспределители с продольной щелью переменной ширины, конусные воздухораспределители, воздухораспределители с отверстиями одинаковой площади.

При локальной системе раздачи воздуха используется такой прием, как воздушное душирование. Большой вклад в решение во-

просов распределения воздуха внесли М. И. Гримитлин, И. А. Шепелев и др.

В практике разработки систем вентиляции широкое применение нашел метод моделирования. На моделях, например, изучают вопросы аэрации зданий для выявления законов воздухообмена и их температурного режима.

В результате экспериментальных исследований получают значения аэродинамических коэффициентов подъемной силы  $C_y$ , лобового сопротивления  $C_x$  и момента аэродинамических сил для обтекаемых тел и их частей. Аэродинамические коэффициенты зависят от формы профиля, формы в плане и угла атаки. Аэродинамические коэффициенты применяют при экспериментальных определениях подъемной силы, лобового сопротивления, потерь давления на трение, моментов аэродинамических сил и др., действующих на модель, отдельные части или все оборудование во время продувки их в аэродинамической трубе.

*Аэродинамическое сопротивление* — аэродинамическая сила, тормозящая движение тел в воздухе или газе либо препятствующая движению воздуха или газа около тела. Аэродинамическое сопротивление пропорционально квадрату скорости (до околозвуковых скоростей), площади поперечного сечения и коэффициенту аэродинамического сопротивления, зависящему от формы (профиля) тела и угла атаки.

Основным элементом СВ и СКВ является вентилятор, предназначенный для перемещения воздуха.

*Вентилятор* — устройство, создающее избыточное давление воздуха и других газов до 15 кПа для их перемещения при проветривании помещений, транспортировании аэросмесей по трубопроводам и т. д. Основы теории современного расчета вентиляторов были разработаны в 30-е годы в вентиляторной секции экспериментального аэродинамического отдела Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ). В работах современных ученых эти основы получили дальнейшее развитие.

Вентиляторы находят широкое применение во всех отраслях народного хозяйства. На их привод потребляется огромное количество электроэнергии, вырабатываемой в стране. Поэтому создание новых высокоэкономичных вентиляторов, имеющих устойчивые характеристики, имеет большое народнохозяйственное значение. В настоящее время разработано и производится большое количество типов и видов вентиляторов. Из всего их разнообразия в настоящей книге особое внимание уделяется вентиляторам, используемым в системах кондиционирования воздуха и вентиляции. Как правило, такие системы работают на переменных режимах, именно поэтому экономичность работы вентиляторов в них существенно зависит от правильности выбора способа регулирования производительности, точности согласования аэродинамических характеристик сетей воздухопроводов и вентилятора.

Сети воздухопроводов систем вентиляции и кондиционирования — это сложные разветвленные схемы, наладка которых представляет

собой непростую задачу. Экономичность систем вентиляции и кондиционирования воздуха во многом определяется правильной организацией воздухораспределения в помещении и забора наружного воздуха. Поэтому в настоящей книге рассмотрены основы теории аэродинамики применительно к задачам транспортировки воздуха по сетям воздуховодов, распределения воздуха в объеме помещения, забора наружного воздуха и движения воздуха в проточной части вентилятора, а также методика расчета сетей воздуховодов, воздухо-распределительных и воздухозаборных устройств, отдельных вентиляторов и их аэродинамических и акустических характеристик.

Определенное внимание уделено вопросам испытаний, наладки и монтажа вентиляторных установок, работающих в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. Некоторые разделы снабжены краткими примерами расчетов. В приложении собран минимально необходимый справочный материал для выполнения проектных расчетов вентиляторов и сетей воздуховодов, систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

# Глава 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ АЭРОДИНАМИКИ

---

Для расчета вентиляторов и элементов систем вентиляции и кондиционирования воздуха необходимо вспомнить некоторые основные уравнения гидравлики, термодинамики и газодинамики.

При рассмотрении процессов гидроаэромеханики отказываются от рассмотрения молекулярного строения веществ, а принимают жидкость и газ за сплошные среды, заполняющие пространство канала или русло. Именно это позволило применить в аэродинамике аппарат математического анализа.

## 1.1. УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ

Струюку газа, поперечные размеры которой настолько малы, что в каждом ее сечении можно принять постоянными и одинаковыми скорость  $c$ , плотность  $\rho$ , давление  $p$  и температуру  $T$ , назовем *элементарной струйкой газа*.

Рассмотрим установившееся течение, при котором в любой точке пространства все параметры среды остаются неизменными во времени.

*Траекторией частицы* называется линия, по которой происходит последовательное во времени перемещение частицы.

В струйке рассмотрим объем газа, заключенный между сечениями 1—1 и 2—2 (рис. 1.1). За время  $d\tau$  рассматриваемый объем переместится и займет новое положение между сечениями 1'—1' и 2'—2'.

При установившемся течении и отсутствии разрывов сплошности в движущейся среде приток газа принимается равным его расходу

$$dm_1 = dm_2 = dm. \quad (1.1)$$

Обозначим расстояние между сечениями 1—1 и 1'—1' через  $dl_1 = c_1 d\tau$ , где  $c_1$  — скорость газа в сечении 1—1. Тогда с учетом (1.1) имеем

$$\rho_1 c_1 F_1 d\tau = \rho_2 c_2 F_2 d\tau$$

или

$$\rho_1 F_1 dl_1 = \rho_2 F_2 dl_2. \quad (1.2)$$

Выражение (1.2) и есть уравнение расхода и неразрывности для единичной элементарной струйки. Оно выражает закон сохранения массы для струйки.

Если газ в струйке несжимаем и поток изотермичен, т. е.  $\rho = \text{const}$  и  $T = \text{const}$ , то выражение (1.2) примет вид

$$c_1 F_1 = c_2 F_2, \quad (1.3)$$

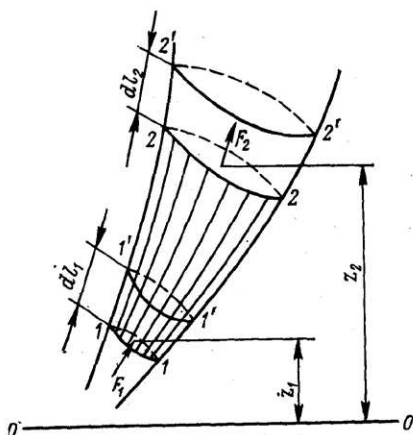


Рис. 1.1. Элементарная струйка

При этом

откуда следует равенство объемных расходов. Произведение  $c\rho = M/F = j$  называется плотностью тока. Массовый расход  $M$  всех элементарных струек также должен быть неизменным

$$\int_{F_1} \rho_1 c_1 dF_1 = \int_{F_2} \rho_2 c_2 dF_2. \quad (1.4)$$

Вводя понятие о средней плотности тока  $(c\rho)_{cp}$ , получаем

$$(\rho_1 c_1)_{cp} F_1 = (\rho_2 c_2)_{cp} F_2. \quad (1.5)$$

Оперируя осевой скоростью  $c_{oc}$  и введя понятие о коэффициенте поля  $k = c_{cp}/c_{oc}$ , получим

$$k_1 F_1 c_{1 oc} = k_2 F_2 c_{2 oc}.$$

$$k = c_{cp}/c_{oc} = \frac{1}{c_{oc} F} \int c dF = \int_0^1 \bar{c} d\bar{F},$$

где

$$\bar{c} = c/c_{oc} \text{ и } d\bar{F} = dF/F.$$

**Пример 1.1.** Определить среднюю скорость воздуха на выходе из круглого конфузора  $d_{вых}/d_{вх} = 0,5$ . Средняя скорость воздуха на входе  $c_{вх} = 1,0$  м/с. Плотность воздуха не меняется.

Запишем уравнение расхода

$$\frac{\pi d_{вх}^2}{4} c_{вх.ср} = \frac{\pi d_{вых}^2}{4} c_{вых.ср}.$$

Отсюда скорость, определяемая по условию задачи, равна

$$c_{вых.ср} = c_{вх.ср} \left( \frac{d_{вх}}{d_{вых}} \right)^2 = 1,0 (2,0)^2 = 4 \text{ м/с}.$$

Уравнение неразрывности для элементарного объема газа может быть выведено следующим образом.

Пусть масса элемента газа остается постоянной за все время движения или же меняется в случае изменения плотности газа. Рассмотрим элементарный объем газа с гранями  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ . В объем параллелепипеда через входные грани за время  $dt$  втекают массы газа, равные:

$$\left. \begin{aligned} dM_1 &= \rho dy dz u dt; \\ dM_2 &= \rho dx dz v dt; \\ dM_3 &= \rho dx dy w dt. \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

За тот же промежуток времени  $dt$  через выходные грани вытекают массы газа, равные:

$$\left. \begin{aligned} dM'_1 &= dy dz \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right) d\tau; \\ dM'_2 &= dx dz \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right) d\tau; \\ dM'_3 &= dx dy \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz \right) d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Вычитая из (1.6) выражение (1.7), найдем увеличение массы газа в объеме параллелепипеда  $dx dy dz$  за время  $d\tau$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_1 &= -dx dy dz \frac{\partial(\rho u)}{\partial x}; \\ \Delta M_2 &= -dx dy dz \frac{\partial(\rho v)}{\partial y}; \\ \Delta M_3 &= -dx dy dz \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Как указывалось ранее, изменение массы возможно лишь вследствие изменения плотности газа. В течение времени  $d\tau$  масса  $\rho dx dy dz$  изменяется на величину

$$dx dy dz \frac{\partial \rho}{\partial \tau} d\tau. \quad (1.9)$$

Просуммировав выражение (1.8) по осям и приравняв его к выражению (1.9), получим

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0. \quad (1.10)$$

Уравнение (1.10) называется уравнением неразрывности в дифференциальной форме.

В случае, когда плотность газа не меняется ( $\rho = \text{const}$ ), уравнение неразрывности принимает вид

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \text{ или } \text{div } c = 0. \quad (1.11)$$

## 1.2. УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Составим баланс энергии в неподвижной системе координат при установившемся движении, используя закон сохранения энергии. Для этого исследуем преобразование энергии в одной и той же массе газа, первоначально занимающей объем между сечениями  $1-1 \div 2-2$ , а через бесконечно малый промежуток времени  $d\tau$  переместившейся в положение между сечениями  $1'-1' \div 2'-2'$  (рис. 1.1). Приращение энергии равно разности количеств энергии.

Приращение кинетической энергии

$$dE_k = dM \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}. \quad (1.12)$$

Приращение потенциальной энергии

$$dE_{\pi} = dMg(z_2 - z_1). \quad (1.13)$$

Приращение внутренней энергии

$$dE_T = dMc_v(T_2 - T_1), \quad (1.14)$$

где  $c_v$  — изохорная теплоемкость.

Приращение энергии сил давления

$$dE_p = \frac{dM}{\rho} (p_1 - p_2). \quad (1.15)$$

Согласно первому закону термодинамики, суммарное количество подведенной к газу теплоты и совершенной работы сил давления равно сумме работ технической  $L_T$  и трения  $L_{тр}$  и изменению кинетической, потенциальной и внутренней энергии газа

$$dQ + \frac{dM}{\rho} (p_1 - p_2) = dL_T + dL_{тр} + dM \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + dMg(z_2 - z_1) + dMc_v(T_2 - T_1). \quad (1.16)$$

Для 1 кг газа имеем

$$q + \left( \frac{p_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} \right) = l_T + l_{тр} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + c_v(T_2 - T_1). \quad (1.17)$$

Заметим, что теплота к газу может быть подведена как извне  $q_{нар}$ , так и в результате преобразования работы трения  $q_{вн} = l_{тр}$ . Общее количество подведенной теплоты равно сумме этих составляющих

$$q = q_{нар} + q_{вн} = q_{нар} + l_{тр}.$$

Из уравнения состояния идеального газа получаем

$$p = \rho RT,$$

а из уравнения Майера —  $c_v = c_p - R$ , тогда выражение для внутренней энергии примет вид

$$c_v(T_2 - T_1) = (c_p - R)(T_2 - T_1) = i_2 - i_1 - \left( \frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} \right), \quad (1.18)$$

а уравнение (1.17) может быть представлено следующим образом:

$$q_{нар} - l_T = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + (i_2 - i_1). \quad (1.19)$$

Заметим, что, если пренебречь изменением потенциальной энергии, скорости и теплообменом с окружающей средой, из уравнения (1.19) получим

$$-l_T = i_2 - i_1, \text{ т. е. } i_2 = i_1 - l_T.$$

Поскольку работа вентилятора, компрессора и газодувки отрицательна  $l_T < 0$ , то энтальпия, а следовательно, и температура воздуха на выходе из нагнетателя должны повышаться. Если скорость изменяется существенно, то

$$-l_T = i_2 - i_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}. \quad (1.20)$$

При изоэнтальпийном процессе  $i_2 = i_1$  техническая работа  $l_T$  полностью расходуется на изменение кинетической энергии потока.

Если  $q_{\text{нар}} = 0$  и  $l_t = 0$ , то уравнение (1.20) принимает вид

$$i_2 + \frac{c_2^2}{2} = i_1 + \frac{c_1^2}{2} = i + \frac{c^2}{2} = \text{const.}$$

Следовательно, если струю воздуха затормозить полностью, энтальпия газа достигает значения  $i_0$  (полная энтальпия)

$$i_0 = i + \frac{c^2}{2}, \quad (1.21)$$

а соответствующая ей абсолютная температура, называемая температурой торможения, — значения  $T_0 = i_0/c_p$ . Следовательно, температурой торможения называется температура, которую принимает газ при изменении его скорости от  $c$  до нуля.

$$T_0 = T + \frac{c^2}{2c_p}. \quad (1.22)$$

**Пример 1.2.** Определить температуру торможения потока воздуха, движущегося со скоростью  $c = 100$  м/с и имеющего температуру  $T = 300$  К.

$$T_0 = T + \frac{c^2}{2c_p} = 300 + \frac{(100)^2}{2 \cdot 1000} = 305 \text{ К.}$$

Для двух бесконечно близких сечений струйки и 1 кг газа уравнение (1.17) может быть записано в виде

$$dq = d(p/\rho) + dl_t + du + dl_{\text{тр}} + d(c^2/2) + g dz. \quad (1.23)$$

Если система координат движется со скоростью газа  $c$ , то газ можно считать неподвижным и для 1 кг этого газа записать первый закон термодинамики в следующем виде:

$$dq = du + p d(1/\rho). \quad (1.24)$$

Вычитая из (1.23) выражение (1.24), получаем

$$-dl_t - dl_{\text{тр}} = d\left(\frac{c^2}{2}\right) + g dz + d(p/\rho) - p d(1/\rho). \quad (1.25)$$

Имея в виду, что  $d(p/\rho) = p d(1/\rho) + (1/\rho) dp$ , получим

$$-dl_t = d(c^2/2) + g dz + dp/\rho + dl_{\text{тр}}. \quad (1.26)$$

Уравнение (1.26) представляет собой уравнение энергии в механической форме. После интегрирования уравнения (1.26) имеем

$$-l_t = (c_2^2 - c_1^2)/2 + g(z_2 - z_1) + \int_1^2 dp/\rho + l_{\text{тр}}. \quad (1.27)$$

Полученное уравнение носит название обобщенного уравнения Бернулли. Оно связывает скорость движения, давление и плотность газа с учетом производимой газом технической работы  $l_t$ , работы сил трения  $l_{\text{тр}}$  и изменения потенциальной энергии  $g(z_2 - z_1)$ .

В случае, когда техническая работа  $l_t = 0$  и отсутствуют потери на трение, уравнение (1.27) принимает вид

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0. \quad (1.28)$$

В этом уравнении первый член выражает энергию давления, второй — кинетическую энергию, третий — запас потенциальной энергии потока 1 кг газа. При этом размерность слагаемых:  $[(Н \cdot м)/кг] = [(кг \cdot м/с^2) \cdot м/кг] = [м^2/с^2]$ . Уравнение (1.28) можно переписать в форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 &= \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gz_2 = \text{const}; \\ \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz &= \text{const}. \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

Последнее выражение представляет собой упрощенную форму записи уравнения Бернулли. Если все члены уравнения (1.29) разделить на  $g$ , размерность их будет  $[м]$

$$H = \frac{p}{g\rho} + \frac{c^2}{2g} + z = \text{const}. \quad (1.30)$$

Уравнение (1.29) составлено для 1 кг, а (1.30) для 1 м<sup>3</sup> газа. Величины  $p/g\rho$ ,  $c^2/2g$ ,  $z$  называют соответственно пьезометрической, скоростной и нивелирной высотами.

Левая часть уравнения Бернулли, записанного в виде

$$p + \frac{\rho c^2}{2} + g\rho z = \text{const}, \quad (1.31)$$

представляет собой сумму статического  $p$ , динамического  $\rho c^2/2$  и нивелирного  $g\rho z$  давлений (размерность каждого из членов  $Н/м^2$ ).

Графическая интерпретация уравнения Бернулли представлена для элементарной струйки на рис. 1.2. Величина  $H$  может быть представлена совокупностью отрезков  $z$ ,  $\frac{c^2}{2g}$  и  $p/(g\rho)$ , как это изображено на рисунке. Соединив между собой концы отрезков  $H$ , получим кривую и плоскость, которые называются соответственно линией и плоскостью полного напора. Соединив концы отрезков  $p/(g\rho)$ , получим линию, которую называют пьезометрической линией или пьезометрической кривой. Из рис. 1.2 можно видеть, как по длине струйки меняются слагаемые, входящие в уравнение Бернулли. Если сечение струйки расширяется, то уменьшается скорость  $c$  и скоростное давление  $\rho c^2/2$ , однако при этом сумма  $z + p/(g\rho)$  возрастает.

В аэродинамике чаще пользуются упрощенной формой уравнения Бернулли, соответствующей режиму, при котором отсутствуют техническая работа ( $l_T = 0$ ), работа трения ( $l_{тр} = 0$ ) и запас потен-

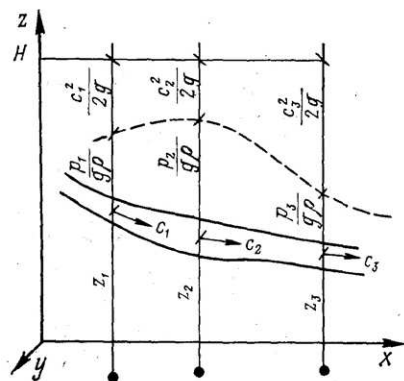


Рис. 1.2. К выводу уравнения Бернулли