

ВВЕДЕНИЕ

Механика жидкости и газа или гидроаэромеханика – это наука о равновесии и движении жидкостей и газов. Она устанавливает закономерности движения и равновесия жидкостей и газов, взаимодействия между жидкостями, газами и твердыми телами, полностью или частично в них погруженными. Гидроаэромеханика разрабатывает методы решения практических задач, связанных с различными областями техники, она является теоретической основой таких отраслей техники, как авиация, судостроение, гидротехническое строительство и гидроэнергетика, энергомашиностроение, водоснабжение и канализация и пр.

В зависимости от теоретической или прикладной направленности употребляются наименования «теоретическая» и «техническая» (или прикладная) гидромеханика. Одна ветвь технической гидромеханики исторически сложилась в самостоятельную дисциплину, получившую название *гидравлики*. Специфика гидравлики – главным образом одномерные задачи, широкое применение упрощенных и эмпирических методов решения задач для получения результатов, пригодных и удобных в инженерной практике.

В гидроаэромеханике используются строгие математические методы. С одной стороны, благодаря этому получаются строгие и точные решения. Однако такие решения удается получить, как правило, только для упрощенной модели жидкости, называемой «идеальной». Сложность движения реальных жидкостей и газов не позволяет получить такие результаты для большинства случаев, важных для практики.

Гидроаэромеханика изучает движение жидкостей и газов, обусловленное макроскопическими причинами, молекулярное строение этих сред в гидроаэромеханике, как правило, не учитывается. Оно заменено упрощенной моделью *сплошной среды*.

То есть *предметом* механики жидкости и газа является модель *сплошной текучей среды*, обладающая присущими ей свойствами, которые и определяют процессы равновесия и движения этой среды.

Из сказанного становится ясно, какое важное место занимает гидро-аэромеханика как научная дисциплина в системе образования инженера. В свою очередь, при изучении этого предмета мы опираемся на такие общетехнические дисциплины, как физика, высшая математика и теоретическая механика.

ГЛАВА I. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

1.1. Механические модели жидкостей и газов

Важнейшими механическими свойствами, обусловливающими состояние и движение жидких и газообразных сред, являются: *сплошность, текучесть и деформируемость*.

Как известно, материальные тела могут находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии.

В твердых кристаллических телах молекулы расположены на определенных расстояниях друг от друга, образуя кристаллическую решетку. Тепловые колебания молекулы совершают около фиксированных устойчивых положений, этим объясняется то, что твердые тела сохраняют форму и объем.

В газах межмолекулярные расстояния велики, силы притяжения малы. Каждая молекула практически не испытывает действия связей с другими молекулами (исключая моменты столкновения). Модель газа, при которой отсутствуют силы притяжения между молекулами, называют *совершенным газом*. Такая модель предполагает, что молекулы газа движутся прямолинейно до момента столкновения, при котором происходит резкое изменение направления движения молекулы. Это неупорядоченное движение молекул газа приводит к тому, что они разлетаются в разные стороны и газ, не имея определенного объема и формы, стремится занять все предоставленное ему пространство, принимая форму сосуда, в который он заключен.

Жидкости по молекулярному строению занимают промежуточное положение между кристаллическими твердыми телами и газами. С точки зрения молекулярного строения тепловые движения молекул жидкости представляют собой колебания около некоторых центров. Однако связи

между молекулами здесь не так сильны, как в твердых телах. И когда кинетическая энергия отдельных молекул оказывается достаточной для преодоления межмолекулярных связей, такие молекулы скачком изменяют свое положение, переходя в другой центр колебаний. То есть некоторое время, называемое временем «оседлой жизни», молекула находится в одной упорядоченной структуре, а совершив переход, оказывается среди нового окружения, никак не предопределенного прежним положением.

Текучесть

Именно непрерывно и в большом количестве совершающиеся скачкообразные переходы молекул с места на место и обусловливают такое свойство жидкостей, как текучесть.

Текучесть (или легкая подвижность) – свойство вещества неограниченно деформироваться и приходить в движение под действием малых сил. Благодаря текучести жидкость приобретает любую форму, предоставленную ей в пространстве, без нарушения своей структуры, а газы занимают весь отведенный им объем.

При приложении к жидкости или к газу сдвигающей силы хаотические скачки молекул приобретают преимущественную направленность, и возникает течение в направлении действия силы.

Если время действия силы t_c много больше времени «оседлой жизни» молекулы жидкости t_T , то при действии этой силы происходит необратимая деформация жидкого тела и, следовательно, тело ведет себя как текучая среда. Если $t_c \ll t_T$, то тело ведет себя как твердое.

Естественно, что с ростом температуры амплитуды теплового колебательного движения возрастают, молекулам легче переместиться из одного положения в другое, t_T уменьшается и среда становится более текучей.

В случае газообразного состояния вещества отсутствие межмолекулярных связей обуславливает не только текучесть, но и сжимаемость газа. Заметим, что в упорядоченных структурах – твердых и жидких телах – сжимаемость практически отсутствует.

Сплошность

Для упрощения изучения жидкостей и газов в гидроаэромеханике их молекулярное строение и движение молекул, как правило, не рассматриваются. Жидкости и газы представляются непрерывной сплошной средой, в которой нет разрывов и пустот.

Гипотеза о сплошности жидкой среды была введена в науку Ж. Даламбером и Л. Эйлером в XVIII в. И. Ньютон представлял себе жидкость состоящей «из равных частиц, свободно расположенных на равных расстояниях». Но всегда линейные размеры тех «частиц» жидкости (элементарных объемов), которые рассматриваются в рамках этой модели, значительно больше, чем длина свободного пробега молекул. Это и есть условие *сплошности*, при выполнении которого жидкость и газ можно считать средой без разрывов и пустот.

Под *сплошной средой* понимается непрерывное, безграничное или ограниченное множество материальных точек с непрерывным распределением кинематических, динамических и других физических характеристик, обусловленных как внешними воздействиями, так и внутренними свойствами среды.

В рамках этой модели принимается, что масса вещества непрерывно распределена («размазана») по объему. При этом и все остальные физические, в том числе и термодинамические, параметры среды также непрерывным образом распределены по объему, занимаемому жидкостью или газом. В отличие от классической механики, имеющей дело с системой материальных точек с характеристиками, сосредоточенными в этих точках,

в рамках модели сплошной среды мы имеем дело с непрерывным распределением физических величин в пространстве. Такая идеализация позволяет использовать для описания процессов в жидкой или газообразной среде математический аппарат теории непрерывных функций и предельные переходы к бесконечно малым величинам. Использование предельных переходов позволяет эффективно использовать аппарат дифференциального и интегрального исчисления.

Параметры, характеризующие термодинамическое состояние и движение среды, считаются при этом непрерывно изменяющимися по объему, занимаемому средой, кроме, может быть, некоторых точек, линий и поверхностей, где могут существовать разрывы.

В механике жидкости и газа используется понятие *жидкой частицы* или *элементарного объема*. Это малый объем сплошной среды, в пределах которого можно пренебречь изменением какой-либо физической величины (плотности, скорости, температуры и пр.).

С точки зрения механических свойств жидкости и газы имеют много общего. Характер поведения и законы, описывающие состояние и движение среды, для жидкостей и газов во многих случаях одинаковы.

Тем не менее в некоторых случаях проявляются особенности их строения. Отметим, при изучении каких явлений следует отличать жидкости от газов.

Первое основное отличие заключается в том, что газы – это среды, которые обладают свойством легко сжиматься и в которых скорость распространения механических возмущений (скорость звука) значительно меньше, чем в жидкостях. Эту особенность следует учитывать, если рассматриваются случаи, когда скорость движения газа (или скорость движения твердого тела в нем) становится соизмеримой со скоростью звука или превышает ее. Область механики жидкости и газа, в которой возникает необходимость учитывать сжимаемость изучаемой среды, выделена в от-

дельный раздел, называемый *газовой динамикой*. В рамках этого раздела изучается движение сверхзвуковых самолетов, космических объектов, высокоскоростных паровых и газовых турбин.

Второе отличие жидкости от газа заключается в способности жидкости иметь граничную поверхность между нею и окружающим ее газом. Такая граница называется *свободной поверхностью*. Как будет показано в дальнейшем, в поле силы тяжести свободная поверхность покоящейся жидкости представляет собой горизонтальную плоскость. В условиях невесомости в результате действия сил поверхностного натяжения свободная поверхность жидкости является сферической.

Эти два отличия свойств жидкости и газа обусловлены разницей их молекулярной структуры. Как уже было отмечено, в жидкости существенную роль играет постоянное взаимодействие соседних молекул. В газах молекулы взаимодействуют только в моменты столкновения друг с другом, большую часть времени они свободно перемещаются в пространстве. Поэтому вследствие хаотического характера теплового движения молекул газ он стремится равномерно распределиться по всей занимаемой им части пространства. Часть пространства, занимаемая газом, как правило, ограничена твердыми или жидкими границами, если эта часть пространства не замкнута, то объем газа может неограниченно возрастать.

Третье отличие жидкости от газа заключается в том, что в газе можно неограниченно уменьшать давление или повышать температуру, при этом свойства газа меняются непрерывно. В жидкости при уменьшении давления ниже определенного значения образуются паровоздушные пузырьки, то есть возникают фазовые переходы. Это явление носит название *кавитации* и играет существенную роль в процессах движения жидкостей. При возникновении кавитации качественно меняются свойства текучей среды и характер течения. Аналогичные явления могут иметь место и при повышении температуры жидкости.

Таким образом, при изучении механики жидкости и газа будем иметь в виду, что все получаемые результаты можно относить как к жидкостям, так и к газам, но с учетом трех отмеченных выше отличий (сжимаемость газа, наличие свободных поверхностей и фазовых переходов). Как правило, ограничения, накладываемые этими различиями, сравнительно легко устанавливаются.

Поэтому встречающийся далее термин «жидкость», как правило, используется для упрощения изложения, если особо не оговорено, следует понимать, что в широком смысле речь идет о жидкостях и газах.

1.2. Основные физические свойства жидкостей и газов

Для механики жидкости и газа наиболее интересны и существенны те свойства, которые связаны с проявлением инерции, вязкости и сжимаемости. Иногда учитывают теплоемкость, теплопроводность, объемное тепловое расширение.

Свойства реальных жидкостей и газов характеризуются следующими основными физическими характеристиками:

- плотностью;
- сжимаемостью;
- вязкостью;
- температурным расширением.

Есть свойства, характерные только для жидкостей, например поверхностное натяжение.

Плотность

В рамках гипотезы сплошности считается, что масса жидкости или газа распределена в объеме занимаемого ею пространства непрерывно и в общем случае неравномерно.

Плотность – это масса единицы объема среды, то есть величина, характеризующая распределение массы тела в пространстве, занятом жидкостью или газом.

Численно плотность однородной среды определяется как

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где m – масса жидкости или газа, заключенная в объеме V .

Если среда неоднородна, плотность в какой-либо точке определяется предельным переходом:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V},$$

где Δm – масса малого объема среды ΔV , содержащего рассматриваемую точку.

Единица измерения плотности в СИ $[\rho] = \frac{M}{L^3} = \text{кг}/\text{м}^3$, в технической системе – $\text{кГ}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$.

Наряду с плотностью иногда используется понятие объемного веса.

Объемный вес – это вес единицы объема среды,

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ или } \gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V},$$

где G – вес однородной среды в объеме V ; ΔG – вес жидкости или газа в малом объеме ΔV .

Единицы измерения объемного веса в СИ – $\text{Н}/\text{м}^3$, в технической системе – $\text{кГ}/\text{м}^3$, $\text{Г}/\text{см}^3$ и т. д.

Связь плотности и объемного веса устанавливается из второго закона Ньютона, записанного для силы тяжести: $G = mg$, откуда

$$\frac{G}{V} = \frac{m}{V} g \text{ или } \gamma = \rho g.$$

Плотность – скалярная величина, которая может быть функцией координат и времени $\rho = \rho(x, y, z, t)$. Однако эта зависимость не является непосредственной, плотность зависит от термодинамических параметров – давления и температуры, которые, в свою очередь, при движении среды зависят от координат и времени.

Связь между плотностью, температурой и давлением устанавливается уравнением состояния, которое выводится из молекулярно-кинетической теории.

Зависимость плотности от давления и температуры различна для жидкостей и газов. Для жидкостей плотность с ростом давления изменяется мало. А для газов, наоборот, с ростом давления плотность изменяется значительно. Это свидетельствует о разной степени *сжимаемости* газов и жидкостей.

Сжимаемость

Сжимаемость среды – это свойство изменять свой объем под действием внешнего давления. Несмотря на то что у жидкостей это свойство проявляется значительно слабее, чем у газов, для некоторых технических приложений оно может играть существенную роль.

Сжимаемость характеризуется коэффициентом объемной сжимаемости, который представляет собой изменение объема среды на единицу изменения давления, отнесенное к единице объема (относительное изменение объема):

$$\beta_V = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp},$$

где V – первоначальный объем жидкой или газообразной среды (при исходном давлении); dV – изменение объема при увеличении давления на величину dp .

Коэффициент объемной сжимаемости измеряется в СИ в $\text{м}^2/\text{Н}$ ($1/\text{Па}$), в технической системе – в $\text{см}^2/\text{кГ}$, $\text{м}^2/\text{кГ}$.

Знак «минус» в формуле для коэффициента объемной сжимаемости обусловлен тем, что положительному приращению давления соответствует уменьшение, то есть отрицательное приращение, объема среды.

Величину, обратную коэффициенту объемного сжатия, называют *модулем объемной упругости среды*:

$$E = \frac{1}{\beta_V}.$$

В соответствии с законом сохранения массы можно записать, что при изменении давления масса жидкости или газа не меняется:

$$d(\rho V) = 0,$$

откуда

$$V \cdot d\rho = -\rho dV \text{ и } \frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}.$$

Тогда модуль упругости среды:

$$E = \rho \frac{dp}{d\rho}. \quad (1.1)$$

Для совершенных газов соотношение между давлением и объемом (плотностью) описывается уравнением Клапейрона – Менделеева:

$$p \cdot V = RT \quad \text{или} \quad p = \rho RT.$$

Здесь $V = \frac{1}{\rho}$ – удельный объем, то есть объем единицы массы газа.

При постоянной температуре газа, то есть при изотермическом процессе, модуль объемной упругости будет (см. (1.1)):

$$E_{\text{газа изотерм}} = p \quad (1.2)$$

и соответственно коэффициент объемного сжатия:

$$\beta_V = \frac{1}{p}.$$

Для адиабатического случая (в случае незначительного теплообмена с окружающей средой) справедливо соотношение

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const},$$

где k – показатель адиабаты, $k = \frac{c_p}{c_v}$.

Тогда

$$E_{\text{газа адиабат}} = k p,$$

$$\beta_v = \frac{1}{k p}. \quad (1.3)$$

Формулы (1.2) и (1.3) свидетельствуют о высокой сжимаемости газа.

В жидкостях велико внутримолекулярное давление, поэтому сжимаемость их очень мала. Например, для воды при не очень больших давлениях и температуре 20°C модуль упругости

$$E = 2,1 \cdot 10^9 \text{ Па} \approx 210 \ 000 \ 000 \text{ кгс/м}^2,$$

то есть коэффициент объемной сжимаемости:

$$\beta_v \approx \frac{1}{210 \ 000 \ 000} \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}.$$

Иначе говоря, если на воду, находящуюся при атмосферном давлении, наложить дополнительно еще такое же давление, то объем воды уменьшится на 1/21 000, то есть практически незаметно. Поэтому воду и другие жидкости обычно считают несжимаемыми и принимают их плотность постоянной и независящей от давления.

Очень большое значение в механике жидкости и газа имеет понятие скорости распространения возмущений в сжимаемой среде. Как известно, скорость распространения малых возмущений в газе – это скорость распространения звука, то есть скорость перемещения в сжимаемой среде волн слабого разрежения и сжатия. Скорость распространения малых возмущений определяется выражением

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}.$$

Для несжимаемой среды плотность не изменяется ($\rho = \text{const}$). Тогда $d\rho = 0$ и из последней формулы следует, что $a = \infty$. Это означает, что в несжимаемой жидкости возмущения распространяются с бесконечной скоростью, то есть мгновенно. Всякое изменение давления в одном месте мгновенно сказывается в любом другом месте объема, занимаемого данной жидкостью. Иначе обстоит дело в сжимаемой жидкости (газе). При возникновении возмущения (например, при перемещении поршня) в среде перед ним возникает уплотнение – газ сжимается. Это уплотнение перемещается по объему газа с конечной скоростью, зависящей от физических свойств и состояния газа. Чем больше сжимаемость среды, тем меньше скорость звука. То есть скорость звука также может служить характеристикой сжимаемости среды.

Если предположить, что процесс распространения звука происходит достаточно быстро, чтобы пренебречь влиянием отвода тепла, то его можно считать адиабатическим. Для адиабатического процесса:

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const} ; \frac{dp}{d\rho} = k \frac{p}{\rho}.$$

Здесь, как и ранее, k – показатель адиабаты, $k = \frac{c_p}{c_v}$.

Тогда адиабатическая скорость звука будет равна

$$a_{\text{адиаб}} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}.$$

Формула для скорости звука при адиабатическом процессе выведена Лапласом, эксперименты подтвердили ее правильность. Применяя уравнение Клапейрона – Менделеева, перепишем выражение для скорости звука в виде

$$a = \sqrt{k R T}.$$

Отсюда видно, что скорость распространения звука в совершенном газе зависит лишь от абсолютной температуры и физических свойств газа.

Скорость распространения малых возмущений или скорость звука является важной характеристикой потока сжимаемой среды. В зависимости от того, будут ли скорости движения частиц жидкости или газа меньше или больше скорости звука, принципиально разными будут и процессы, происходящие в среде.

Отношение скорости потока V к скорости звука a называется числом Маха:

$$M = \frac{V}{a}.$$

Если скорость движения жидкости или газа V мала по сравнению со скоростью звука, то число Маха будет значительно меньше единицы, при таком движении влияние сжимаемости мало и жидкость или газ можно считать практически несжимаемыми. С увеличением числа Маха влияние сжимаемости возрастает.

При $M < 1$ движение будет *дозвуковым*, при $M = 1$ – *звуковым* (или *околозвуковым*), при $M > 1$ – *сверхзвуковым*.

Температурное расширение

Объем жидкости и газа изменяется не только при изменении давления, но и при изменении температуры. Как правило, с повышением температуры жидкости и газы расширяются. Количественно изменение объема при изменении температуры и постоянном давлении оценивается *коэффициентом теплового объемного расширения*:

$$\beta_T = \frac{1}{V} \left. \frac{dV}{dT} \right|_{p=\text{const}},$$

где V – первоначальный объем жидкости; dT – изменение температуры.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru