

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ И ПСИХРОМЕТРИИ

Глава 1. Введение в ОВКВ

1.1 Введение

1.2 ОВКВ: Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха

1.3 Основные процессы кондиционирования

1.4 Термодинамика и психрометрия

1.1 Введение

Кондиционирование воздуха (КВ) является частью повседневной жизни человека. Служит оно комфорту человека дома или на работе, что позволяет ему сконцентрироваться на задании, которое он выполняет. По любому КВ делает нашу жизнь более здоровой, приятной и продуктивной.

КВ улучшает продукты и производственные процессы, поскольку многие товары производятся лучше, быстрее и экономичнее в должным образом контролируемой среде.

КВ позволяет создать комфортную обстановку в помещении независимо от того, какая погода на улице, будь то изнуряющий жаркий августовский день или холодная январская ночь. Однако КВ сопряжено с издержками в виде расхода энергии. До 1973 года мало кто обращал на это внимание, поскольку энергия считалась доступной и недорогой. Мало кто беспокоился о потенциально негативном воздействии потребления энергии в широких масштабах на окружающую среду.

Времена изменились. Сегодня энергосбережение является ключевым компонентом в проектировании систем КВ. Результаты усилий по энергосбережению привели к некоторым интересным сдвигам на рынке систем кондиционирования воздуха. Конфигураций КВ стало побольше, поскольку проектировщики пытаются воспользоваться любой возможностью для экономии энергии, и необходимо находить компромисс между энергосбережением и производительностью.

Помимо проектирования таких компонентов, как компрессоры, печи, холодильники, теплообменники, значительно расширилась логика и сложность элементов контроля в системах КВ.

Помимо энергосбережения, в последнее время большое внимание уделяют вопросам здоровья и качества воздуха.

Энергетические соображения требуют минимизации соотношения наружного воздуха к рециркулируемому воздуху. Для вентиляции необходимо достаточное количество свежего наружного воздуха, чтобы избежать накопления загрязняющих газов, таких как углекислый газ. Что представляет собой правильный баланс? Существуют стандарты и руководящие принципы для этих требований, но они должны постоянно пересматриваться в связи с новыми ситуациями и пересмотренными медицинскими данными.

Изучить историю КВ - значит совершить увлекательное путешествие по огромному техническому и научному наследию нашего общества, трудам таких первопроходцев как Роберт Бойл, Сади Карно, Джон Далтон, Джеймс Уотт, Бенджамин Франклин, Джон Горри, Лорд Кельвин, Фердинанд Карре, Уиллис Кэрриер, Томас Мидгли и многие другие.

Многие из этих известных имен связаны с изучением термодинамики. Термин термодинамика был впервые использован лордом Кельвином в 1849 году. Первый учебник по термодинамике был написан Уильямом Рэнкином в 1859 году. Термодинамика является краеугольным камнем для понимания процессов кондиционирования воздуха.

1.2 ОВКВ: Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха

Долгое время термин "кондиционирование воздуха" ассоциировался только с охлаждением воздуха. Но термин был расширен и включает весь спектр ОВКВ. Этот спектр охватывает отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха (охлаждение).

В современном понимании кондиционирование воздуха - это контроль температуры, влажности, чистоты, качества воздуха и циркуляции воздуха в соответствии с требованиями пользователей, технологии или продукта. Это определение, данное Уиллисом Кэрриером (1876-1950) в книге "Отец кондиционирования», включает множество целей кондиционирования воздуха.

Кондиционирование воздуха - это нечто большее, чем роскошь. Оно важно для нашего повседневного комфорта, здоровья и благополучия, независимо от того, находимся ли мы дома, на рабочем месте, в супермаркете или в транспортном средстве. КВ включает в себя нагрев, охлаждение, увлажнение, осушение, вентиляцию и контроль качества воздуха круглый год. Помимо того, что КВ важно для людей и животных, оно также необходимо для многих производственных процессов. Например, есть изделия, которые должны изготавливаться в строго контролируемых условиях.

1.3 Основные процессы КВ

Семь основных процессов КВ - это нагрев, охлаждение, увлажнение, осушение, очистка, вентиляция и движение воздуха.

- *Нагрев* - это процесс ввода тепловой энергии (тепла) в воздух кондиционируемого помещения с целью повышения или поддержания в нем температуры воздуха.
- *Охлаждение* - это процесс удаления тепловой энергии (тепла) из воздуха в кондиционируемом помещении с целью снижения или поддержания температуры воздуха.
- *Увлажнение* - это процесс ввода водяного пара (влаги) в воздух кондиционируемого помещения с целью повышения или поддержания влажности воздуха.
- *Осушение* - это процесс удаления водяного пара (влаги) из воздуха в кондиционируемом помещении с целью снижения или поддержания влажности воздуха.
- *Очистка* - это процесс удаления твердых частиц, химических и биологических загрязняющих веществ из воздуха в кондиционируемом помещении с целью улучшения или поддержания качества воздуха.
- *Вентиляция* - это процесс обмена внутреннего воздуха на наружный в помещении с целью разбавления газообразных загрязняющих веществ в воздухе, улучшения или поддержания качества, состава и свежести воздуха.
- *Движение воздуха* (циркуляция и смешивание) - это процесс перемещения воздуха через кондиционированные помещения в здании с целью достижения требуемой вентиляции

и облегчения передачи тепловой энергии, увлажнения (или осушения) и процессов очистки.

Отопление и охлаждение - это самые основные и, вероятно, наиболее узнаваемые читателем процессы. Если в помещении слишком жарко или слишком холодно, то обитатели вряд ли будут чувствовать себя комфортно или продуктивно, и возникает необходимость регулировать температуру воздуха, добавив в него или удалив из него тепловую энергию. Отопление существует уже давно и может использовать различные источники тепла, такие как газ, солянка, электричество и т.д. Охлаждение – процесс более сложный. Оно требует удаления тепловой энергии из воздуха и обычно включает холодильный цикл или процесс испарительного охлаждения. Для приведения в действие холодильного цикла требуется энергия.

Для обозначения смеси сухого воздуха и водяного пара как правило пользуются термином *воздух*. Вообще-то, надо бы использовать термин *влажный воздух*. Влажный воздух имеет несколько параметров: относительная влажность, влагоемкость, влагосодержание и т.д. Важно понимать, что лишь ограниченный по свойствам воздух считается удобным для человека. Этот диапазон также зависит от температуры. Соотношение водяного пара к сухому воздуху в смеси изменяется путем добавления в смесь водяного пара (увлажнение) или его удаления (осушения).

Увлажнение может быть достигнуто путем обдува воздухом воды на влажной пористой поверхности, распыления мелких капель воды в потоке воздуха, увлажнения с помощью ультразвукового распылителя или впрыска пара. С другой стороны, осушение воздуха в основном обычно происходит путем охлаждения. Охлаждение удаляет энергию из водяного пара, превращая его в воду. Лишь ограниченное количество водяного пара может удерживаться воздухом. Его так и называют – пределом насыщения, и он уменьшается с понижением температуры. Если температура насыщенного воздуха снижается, то пар конденсируется в капли воды и капает (или идет дождем) из смеси. В результате в воздухе становится меньше водяного пара.

Переход водяного пара в воду (конденсация) или наоборот (испарение) включает в себя передачу значительного количества тепловой энергии, известной под названием скрытого или латентного тепла. Поскольку нагрев и охлаждение связаны с использованием тепловой энергии для изменения и поддержания температуры, очевидно, что эффекты увлажнения и осушения тоже будут взаимосвязаны с нагревом и охлаждением в системах кондиционирования воздуха. Существует много типов загрязняющих веществ в воздухе. Твердые частицы, такие как пыльца, пыль и дым, являются обычными загрязняющими веществами, которые необходимо удалять из кондиционируемого помещения. Микроскопические организмы, такие как бактерии, грибы и вирусы, могут быть важны по соображениям здоровья. Некоторые из этих загрязняющих веществ раздражают, но другие могут быть смертельно опасны. Удаление этих загрязнений часто достигается путем фильтрации или обработки воздушного потока. Нагрев и осушение воздуха являются мощными сдерживающими факторами для многих мелких организмов.

Воздухообмен между наружным воздухом и воздухом в кондиционируемом помещении осуществляется либо путем вентиляции (намеренный воздухообмен), либо путем инфильтрации (непреднамеренный воздухообмен). Это важно, потому что наружный воздух часто используется для разбавления загрязняющих веществ (таких как углекислый газ) и пополнения кислородом воздуха в помещении. Принудительная вентиляция обеспечивает

наилучший контроль скорости воздухообмена и распределения воздуха в здании и обычно обязательна в больших зданиях, где требуется минимальная скорость воздухообмена. С другой стороны, естественная вентиляция определяется давлением ветра, разницей температур внутри и снаружи помещения, открытием окна, и она не контролируется должным образом. Инфильтрацией называют проникновение воздуха внутрь помещения через трещины, неполные уплотнения и непреднамеренные проемы. В большинстве жилых домах именно инфильтрация обеспечивает адекватный воздухообмен.

Движение воздуха, циркуляция и смешивание - это все процессы механики сред. Движение воздуха может быть принудительным или свободным. Принудительное движение воздуха, создаваемое вентиляторами, можно тщательно контролировать. Однако свободное движение воздуха часто обусловлено температурными градиентами в кондиционируемом пространстве и происходит естественным образом. Смешивание - важный процесс, который происходит, когда наружный воздух смешивается с воздухом в помещении в рамках вентиляции или когда вновь кондиционированный воздух смешивается с воздухом, уже находящимся в кондиционируемом помещении.

1.4 Термодинамика и психрометрия

Чтобы лучше понять и проанализировать каждый из процессов ОВКВ, важно изучать и развивать понимание термодинамики и психрометрии. Термины *термодинамика* и *психрометрия* на первый взгляд могут показаться довольно страшными, но это не так.

Изучение термодинамики предоставит инструменты для количественной оценки, анализа и интерпретации практических вопросов ОВКВ. Изучение психрометрии обеспечит понимание, необходимое для контроля влажности.

Термодинамику можно определить как науку об энергии. Она описывает взаимосвязи между различными формами энергии и превращения одной формы энергии в другую. Они проявляются почти во всех аспектах нашей повседневной жизни. Например, как можно преобразовать электроэнергию источника питания в холод? Как можно воспользоваться солнечной энергией? Как рассчитать энергозатраты на отопление дома зимой? На эти и многие другие вопросы можно ответить, проведя энергетический, или термодинамический, анализ.

Из школьного курса вы должны быть знакомы с принципом сохранения энергии. В нем говорится, что во время взаимодействия энергия может переходить из одной формы в другую, но общее количество энергии остается постоянным. Другими словами, энергия не исчезает и не создается, она только меняет свою форму. Энергия бывает различных форм: внутренней (химической, физической, тепловой, ядерной и электрической), потенциальной и кинетической. Чтобы эффективно пользоваться законом сохранения энергии, необходимо понимать различные формы энергии, преобразование одной формы энергии в другую, потоки энергии через границы и способность накапливать энергию.

Термодинамика - это наука о преобразовании одной формы энергии в другую. Преобразования энергии описывают различными свойствами веществ и изменениями этих свойств. Термодинамика основана на экспериментальных наблюдениях, которые выражаются в ряде законов. Например, первый закон термодинамики основан на принципе сохранения энергии. Наблюдение о том, что некоторые процессы происходят в одном направлении, но не в

обратном, (например, передача тепла от горячего объекта к холодному или выделение тепла при трении), воплощено во втором законе термодинамики.

С другой стороны, психрометрия - это раздел термодинамики, который занимается термодинамическими свойствами и процессами влажного воздуха. Термин "влажность" используется в связи с тем, что в воздухе содержится водяной пар. Существует комфортный диапазон, который определяется ограничениями температуры и влажности. Изучению психрометрии будет способствовать диаграмма свойств влажного воздуха, известная как i-d диаграмма.

Области применения термодинамики многочисленны. В ОВКВ термодинамикой пользуются в

- Холодильниках и тепловых насосах
- Теплообменниках
- Холодных и горячих змеевиках
- Радиаторах
- Печах
- Вентиляторах
- Насосах
- Системах распределения воды и воздуха
- Расчетах нагрузок
- Профессиях и уровнях активности человека

Законы термодинамики и психрометрии используются в:

- Воздушном потоке, омывающем холодный или горячий змеевик
- Увлажнителях и осушителях воздуха
- Погодных условиях
- Воздухе кондиционируемого помещения (с учетом требований к комфорту)
- Дыхании людей и животных

Основные тезисы Главы 1:

- определение КВ
- семь основных процессов ОВКВ (отопление, охлаждение, увлажнение, осушение, вентиляция, очищение и движение воздуха)
- каждый процесс может быть реализован с помощью отдельного оборудования и связан с преобразованием энергии из одной формы в другую
- Первый закон термодинамики основан на законе сохранения энергии
- Второй закон термодинамики основан на необратимости природных явлений
- Психрометрия – наука о влажном воздухе (смеси сухого воздуха и водяного пара)

Глава 2. Системы, свойства, состояния и процессы

2.1 Введение

2.2 Закрытые и открытые системы в термодинамике

2.3 Формы энергии

2.4 Свойства системы

2.5 Состояния равновесия

2.6 Процессы и циклы

2.1 Введение

Термодинамика - это наука о превращении одной формы энергии в другую. Превращения энергии, в частности, описываются с помощью свойств веществ и их изменений, имеющих место в результате энергетических преобразований. Термодинамика основана на экспериментальных наблюдениях, на которых базируются основные законы.

Например, первый закон термодинамики основан на законе сохранения энергии. Наблюдение, что некоторые процессы происходят в одном направлении, но не в обратном, (например, поток тепла от горячего объекта к холодному или выделение тепла при трении), воплощено во втором законе термодинамики. Однако, прежде чем мы сможем применять эти законы в качестве инструментов анализа для решения практических задач, мы должны разработать методологию анализа. Эта методология начинается с определений систем, свойств, состояний, процессов и циклов.

Изучение термодинамики строится вокруг системы и определяется анализом этой системы и взаимодействием между ней и ее окружением. Условие, или состояние равновесия, системы определяется через ее свойства в данном состоянии. Свойства - это любые характеристики системы. Динамическая часть термодинамики включает идею изменения, и поэтому изменения состояния описываются через процессы и циклы.

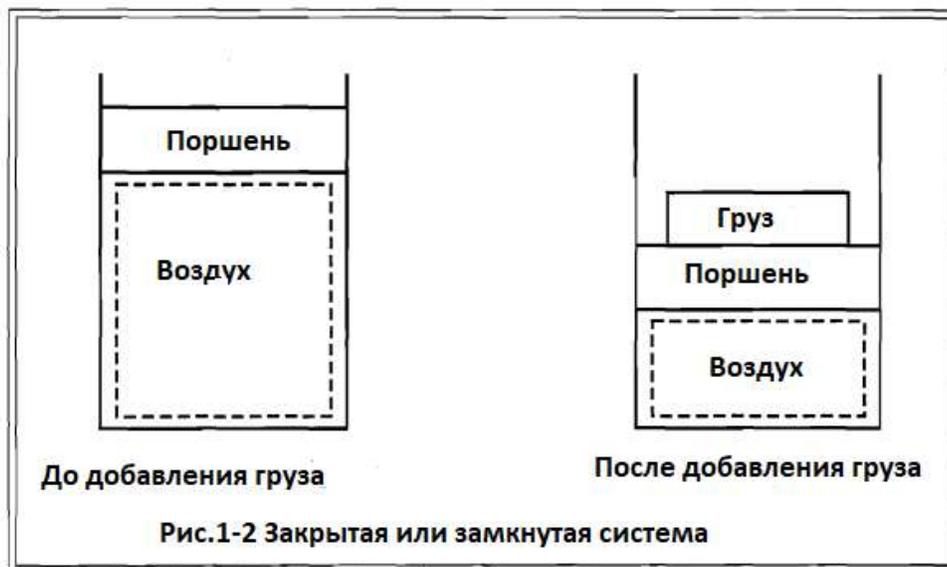
2.2 Закрытые и открытые системы

Первый шаг любого инженера в термодинамике – это идентификация системы, которую следует анализировать. Термин *термодинамическая система* имеет особое значение в этом контексте, поскольку подчеркивает какое-то количество или какую-то область в пространстве. Система имеет границы, и все, что находится за пределами границы, называют *окружением*. Тепло и работа могут пересекать границу в рамках взаимодействия системы и ее окружения. Существует два типа систем: закрытый и открытый.

Закрытая система - это система, в которой изучают определенное количество вещества. Закрытую систему часто называют *контрольной массой*. Это значит, что количество вещества в системе фиксировано на протяжении всего анализа. Вещество в системе может менять форму, фазу или местоположение в пространстве, но система идентифицируется как вещество, которое изначально предназначалось для изучения. Существует воображаемая граница, которая удерживает вещество. Местоположение вещества и, следовательно, форма границы могут меняться со временем; но чтобы оставаться закрытой, массобмен через границу отсутствует. Несмотря на это, работа и тепло могут пересечь границу, когда система взаимодействует со своим окружением.

Открытая система - это система, в которой для изучения определяют область в пространстве, а не количество вещества. Поэтому открытую систему часто называют *контрольным объемом*. В открытой системе масса может пересекать воображаемую границу между системой и ее окружением. Это важно, потому что масса, пересекающая границу, может стать средством переноса энергии через границу. Область в пространстве не обязательно должна быть зафиксирована во времени, хотя ее часто выбирают таковым для удобства. В некотором смысле закрытая система является частным случаем открытой системы, при котором отсутствует переход массы через границу.

Пример закрытой системы показан на рисунке 2-1. Объект, выбранный для демонстрации, представляет собой комбинацию поршня и цилиндра с воздухом. Воздух находится в цилиндре, и не может выйти из него, как и нет возможности для поступления нового воздуха в цилиндр. Системой является масса воздуха, удерживаемая в цилиндре. Граница системы показана пунктирной линией. Поршень, стенка цилиндра и головка блока цилиндров являются окружением системы. Поршень перемещается и уменьшает объем в цилиндре, воздух сжимается, меняет форму, но сохраняет свой количественный показатель.



Открытые системы показаны на рисунках 2-2 и 2-3. На рисунке 2-2 показаны тот же поршень и цилиндр, только теперь к ним добавлен открытый клапан, соединяющий головку цилиндра с накопительным баком. Система идентифицируется как количество вещества (масса воздуха) в цилиндре в любой момент времени. Однако при открытой системе количество воздуха в цилиндре изменится, когда на поршень будет помещен груз и поршень начнет двигаться вниз. Часть массы, первоначально находящейся в системе, перемещается через границу системы в накопительный бак, который является элементом окружения. Масса переходит через границу. Хотя анализ открытой системы также называют анализом контрольного объема, объем не обязательно должен оставаться фиксированным во времени или пространстве. Как видно в этом случае, контрольный объем меняет форму и размеры.

Заметьте, что корпус цилиндра и накопительного бака можно было бы рассматривать как замкнутую систему, если бы веществом в системе являлся воздух в цилиндре и накопительном баке. Можно также отметить, что другой вариант открытой системы мог бы заключаться в том, чтобы провести границу, включающую поршень и грузы в дополнение к воздуху. Какая граница будет лучше, зависит от того, что является известным, что следует найти и какие процессы происходят во время изменения.

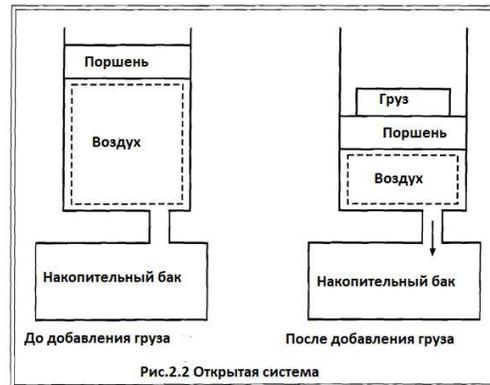


Рис.2.2 Открытая система

На рис. 2-3 показан другой пример открытой системы; в данном случае поршневой компрессор. Граница системы включает компрессор и воздух внутри компрессора. Масса поступает через границу на входе и выходит через границу на выходе. В открытой системе объем управления остается неизменным во времени и пространстве.

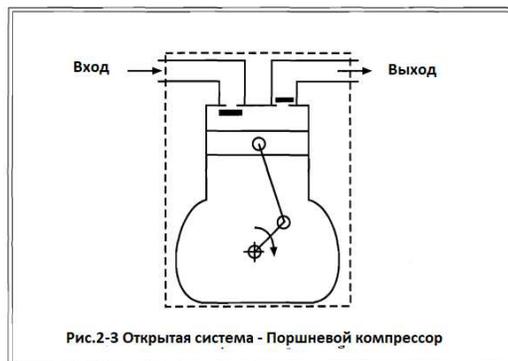


Рис.2-3 Открытая система - Поршневой компрессор

Есть много вариантов систем. Надо так выбрать систему, чтобы удобно было ее анализировать и находить неизвестные.

Концептуальная модель системы, границы системы и окружения будет использоваться позже для применения законов термодинамики таким образом, чтобы можно было рассчитывать и получать практические и полезные результаты. Существует только один набор законов, но термодинамические формулы, применимые к закрытым и открытым системам, различны, поэтому перед началом анализа важно распознать тип системы. Прежде чем применять законы (такие как

закон сохранения энергии), мы должны описать состояние системы и определить, что мы подразумеваем под энергией.

2.3 Формы энергии

Общая энергия системы E состоит из суммы энергетических составляющих (например, тепловая, механическая, кинетическая, потенциальная, электрическая, магнитная, химическая и ядерная). Суммарную энергию единицы массы можно определить с помощью следующей формулы:

$$e = \frac{E}{m} \text{ (W/кг}_m\text{)}$$

В термодинамическом анализе принято группировать формы энергии в две широкие категории: макроскопические и микроскопические. Макроскопические формы энергии - это те, которыми обладает система в целом по отношению к некоторой внешней системе отсчета. Кинетическая и потенциальная энергии являются примерами макроскопических форм энергии, потому что, как мы увидим позже они определяются в терминах внешней системы отсчета. Микроскопические формы энергии - это те, которые связаны с молекулярной структурой системы и степенью молекулярной активности. Микроскопические формы не зависят от внешней системы отсчета. Сумма всех микроскопических форм энергии известна как внутренняя энергия системы, U . Удельная внутренняя энергия единицы массы равна:

$$u = \frac{U}{m} \text{ (W/кг}_m\text{)}$$

Внутренняя энергия измеряется на молекулярном уровне. Отдельные молекулы системы находятся в непрерывном движении, и это движение способствует поступательной, вращательной и колебательной молекулярной энергии. Часть внутренней энергии, связанной с этим молекулярным движением, называют явной энергией. Степень молекулярной активности возрастает с повышением температуры; следовательно, явная энергия выше при более высоких температурах.

Внутренняя энергия также связана с межмолекулярными силами между молекулами системы. Силы, связывающие молекулы, наиболее высоки в твердых телах и наиболее слабы в газах. Если к твердому или жидкому веществу добавить достаточное количество энергии, оно изменит фазу и превратится в газ. Такую энергию называют скрытой или латентной. Скрытая энергия - это часть внутренней энергии. Явные и скрытые изменения энергии не влекут за собой никаких химических изменений в веществе системы.

Химическая энергия - это часть внутренней энергии. Химическая энергия связана с химическими связями между различными веществами. В случаях химических изменений (например, происходящих при горении или химической реакции) происходит разрыв некоторых связей и образование новых связей, приводящий к изменению химической энергии системы.

Внутри ядра атома существуют сильные связующие силы, которые также вносят свой вклад во внутреннюю энергию системы. Эти ядерные связи, а следовательно, и ядерная энергия, изменяются только во время реакций деления или термоядерного синтеза. Поскольку термодинамика касается изменения форм энергии и поскольку ОБКВ обычно не включает ядерное деление или термоядерный синтез, мы не будем рассматривать ядерные связи.

Макроскопическая энергия, которой обладает система в силу ее возвышения в гравитационном поле, называется потенциальной энергией. Потенциальная энергия, PE , и потенциальная энергия единицы массы равны:

$$PE = mgh$$

$$pe = gh$$

где g – ускорение силы тяжести ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$) на уровне моря, m – масса в кг_м, а h – высота центра тяжести системы массы относительно некоторой произвольно выбранной системы отсчета, в метрах.

Термодинамика - это изучение изменения энергии, а не изучение ее абсолютных значений. Когда вы поднимаете груз со стула на столешницу важно знать только разницу в высоте между стулом и столешницей, а не то, насколько высоко стол и стул находятся над полом. В термодинамике важно изменение энергии, а эталонный уровень абсолютной полной энергии выбирается на некотором удобном базовом уровне. В качестве примера изменения потенциальной энергии и единиц измерения энергия, рассмотрим массу 214 кг, поднятую на 1 м со стула на стол:

$$\text{Увеличение } PE = mgh = (214 \text{ кг}_m \times 9,8 \text{ м/с}^2 \times 1 \text{ м}) = 2097,2 \text{ W}$$

$$\text{Увеличение } pe = gh = (9,8 \text{ м/с}^2 \times 1 \text{ м}) = 9,8 \text{ W/кг}_m$$

Макроскопическая энергия, которой обладает система в силу своего движения относительно некоторой системы отсчета, известна как кинетическая энергия. Когда все части системы перемещаются вместе с ней с одной и той же скоростью v (м/с), кинетическая энергия KE и кинетическая энергия единицы массы равны:

$$KE = mv^2/2$$

$$ke = v^2/2$$

В ОВКВ магнитные, электрические, ядерные силы, а также силы поверхностного натяжения не являются сколь-нибудь значимыми. Общая энергия E и общая энергия единицы массы e могут быть записаны как сумма внутренней, потенциальной и кинетической энергий:

$$E = U + PE + KE = U + mgh + mV^2/2$$

$$e = u + pe + ke = u + gh + V^2/2$$

2.4 Свойства системы

Свойство системы - это любая наблюдаемая ее характеристика. Общими свойствами являются масса m , температура t , давление p , объем V , удельный объем v , плотность ρ , удельные теплоемкости C_p и C_v , внутренняя энергия U , энтальпия H и энтропия S . Некоторые характеристики вам знакомы, о других поговорим позже.

Свойства, которые не зависят от размера системы (такие как давление, температура и плотность), являются *интенсивными* свойствами. Свойства, которые изменяются в зависимости от размера или протяженности системы (такие как масса, объем и общая энергия), известны как *экстенсивные* свойства.

Когда экстенсивные свойства выражаются для единицы массы, они становятся интенсивными свойствами или удельными характеристиками. Например, удельная общая энергия ($e = E/m$), удельная внутренняя энергия ($u = U/m$) и удельная энтальпия ($h = H/m$).

Свойства играют ключевую роль в проведении термодинамического анализа на основе следующего закона:

Состояние простой сжимаемой системы полностью определяется двумя независимыми интенсивными свойствами.

Чтобы полностью понять влияние этого закона, мы должны дополнительно уточнить, что подразумевается под термодинамическим состоянием, а затем подробно остановиться на свойствах и независимых свойствах системы.

2.5 Состояния равновесия

Рассмотрим систему, которая не претерпевает никаких изменений. Можно рассчитать все свойства такой системы. Этот набор свойств полностью определяет состояние системы. Другими словами, термодинамическое состояние - это состояние системы, в которой все свойства имеют фиксированное значение. Если значение какого-либо свойства изменится, то система будет находиться в другом состоянии.

Мы говорили о системе, в которой нет изменений. В термодинамике это состояние называют равновесным. Для системы, находящейся в состоянии равновесия, внутри системы нет несбалансированных движущих сил. Для обеспечения теплового равновесия внутри системы отсутствуют внутренние температурные градиенты, которые будут вызывать тепловой поток внутри системы. Для механического равновесия нет изменения давления, вызывающего массовый расход. Распределение статического давления не нарушает равновесия и не вызывает внутреннего массового потока. При фазовом равновесии не происходит относительного изменения массы каждой присутствующей в системе фазы. При химическом равновесии не происходит никаких химических реакций.

Состояние равновесия системы полностью задается путем указания значений свойств этого состояния, или, наоборот, набор значений свойств полностью описывает состояние в системе.

Свойства не зависят от пути, по которому система переходит в заданное состояние. Свойством можно назвать любую величину, которая зависит от состояния системы и не зависит от ее предыстории, вследствие чего система достигла данного состояния.

2.6 Процессы и циклы

Изменение состояния равновесия, определяемое изменением свойств, называют процессом. Последовательность состояний, через которые проходит система во время процесса, называют траекторией процесса. Описание процесса включает в себя указание начального и конечного состояний равновесия, траекторию и любые взаимодействия, которые происходят между системой и окружением на границах системы во время процесса.

Когда система претерпевает изменения, она по определению не находится в равновесии. Однако, когда процесс протекает таким образом, что система все время остается бесконечно близкой к

состоянию равновесия, тогда процесс называется квазистатическим, или квазиравновесным. Квазиравновесный процесс - это идеализация реальных процессов, но он может быть очень мощным инструментом, помогающим анализировать системы. Большинство систем в ОВКВ можно таким образом идеализировать и анализировать. Квазиравновесный процесс можно рассматривать как процесс, который протекает достаточно медленно, чтобы система могла внутренне адаптироваться таким образом, чтобы свойства в одной части системы не изменялись значительно быстрее, чем свойства в другой части системы.

На рисунке 2-4 изображен квазиравновесный процесс сжатия воздуха в цилиндре.



Рис.2.4 Изменение состояния в замкнутой системе

Поршень и цилиндр показаны горизонтально в нижней части диаграммы. Закрытая система - это воздух, удерживаемый в цилиндре в любой момент времени. Поршень изначально находится в требуемом положении.

С поршнем в поз.1 свойства системы – это масса m_1 , давление p_1 , температура t_1 , объем V_1 , удельный объем v_1 , внутренняя энергия U_1 , удельная внутренняя энергия u_1 , энтропия S_1 , удельная энтропия s_1 . Эти параметры определяют начальное состояние системы (поз.1).

Поршень медленно перемещается влево и через некоторое время переходит в конечную позицию 2. Свойства системы меняются. Мы можем видеть, что объем изменился на новый, меньший объем V_2 . Поскольку это замкнутая система и масса не изменилась ($m_2 = m_1$), удельный объем изменился на v_2 . Давление может увеличиться до p_2 . Неизвестно, изменились ли другие значения, но ясно, что система перешла в поз.2, и поэтому свойства обозначены t_2 , U_2 , u_2 , S_2 и s_2 .

На рис.2-4 показана диаграмма давления, построенная в зависимости от объема. Начальное и конечное состояния (1 и 2) показаны в виде точек на диаграмме p-V. Траектория процесса показывает на переход из состояния 1 в состояние 2.

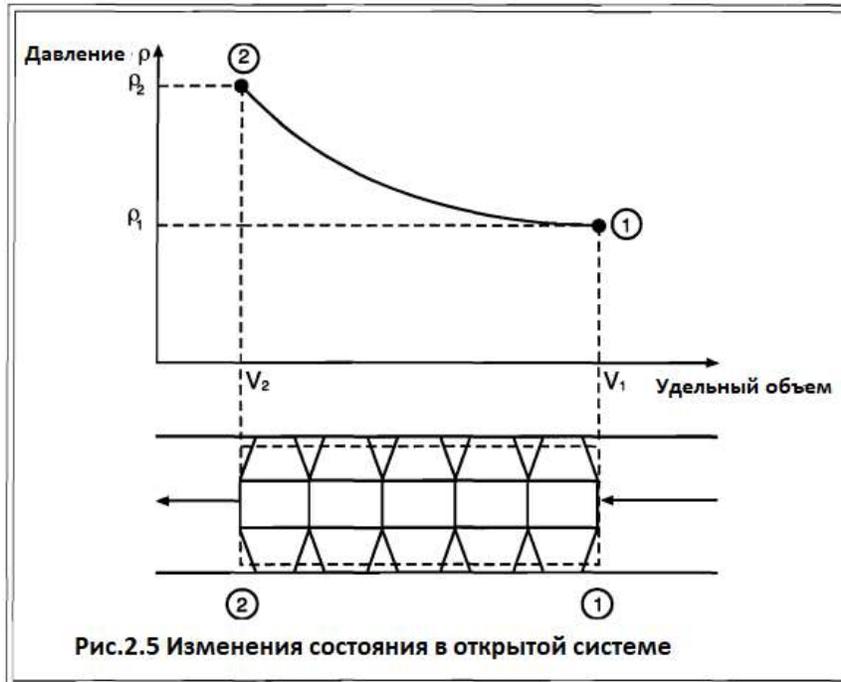


Диаграмма удельного объема давления ($p-v$) для открытой системы (осевой вентилятор) показана на рис.2-5. Диаграмма $p-v$ выглядит очень похожей на диаграмму для закрытой системы, описанную ранее, но состояния 1 и 2 здесь относятся к состояниям входа и выхода воздуха, проходящего через вентилятор. Многие практические ситуации, которые мы захотим проанализировать, принимают форму открытой системы, показанной на рис. 2-5. Зачастую они имеют несколько входов и выходов.

Мы разберемся с ними, когда перейдем к применению законов сохранения массы и энергии. Существует множество различных возможных путей процесса в зависимости от характера взаимодействия между системой и ее окружением и физического устройства системы. Например, если контейнер фиксированного объема нагреть, как показано на рис. 2-6, то температура и давление увеличатся, но объем останется постоянным. Или, если вес поршня на рис. 2-7 можно будет опускать по мере выпуска воздуха из цилиндра, тогда давление останется постоянным, даже несмотря на изменение объема.

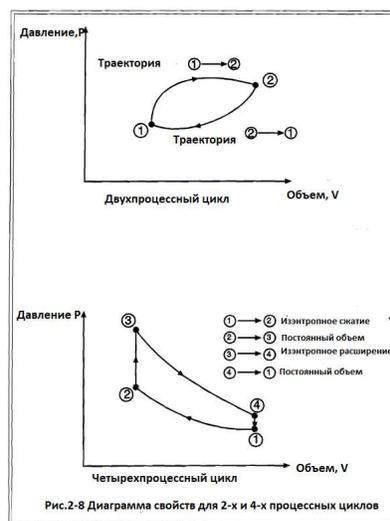




Если одно из свойств системы в процессе остается постоянным, то эти процессы называют

- Изобарным (постоянное давление)
- Изотермическим (постоянная температура)
- Изометрическим (постоянный объем)
- Изохорным (постоянный удельный объем)
- Изоэнтропийным (постоянная энтропия)
- Адиабатическим (отсутствует теплообмен между системой и окружением)

Последний процесс, адиабатический, отличается от других тем, что он не относится к какому-либо свойству, а связан с теплообменом между системой и ее окружением. Тепло - это не свойство, и мы поговорим о нем в следующей главе. Система считается прошедшей цикл, если после прохождения серии процессов, система возвращается в свое начальное состояние. Начальное и конечное состояния цикла идентичны, что означает идентичность начальных и конечных свойств.



Примеры двухпроцессных и четырехпроцессных циклов показаны на диаграммах p - V на рисунке 2-8. Четырехпроцессный цикл - это идеальный термодинамический цикл в бензиновом двигателе.

Основные тезисы Главы 2:

- Стартовая точка термодинамического анализа – это идентификация системы.
- Определение открытой и закрытой термодинамических систем, их границы и окружение.
- Общая энергия равна сумме макроскопической и микроскопической энергий.
- К макроскопической энергии относятся потенциальная и кинетическая энергия, к микроскопической энергии относится внутренняя (тепловая, химическая и т.д.) энергия.
- Свойство системы – это наблюдаемая ее характеристика.
- Интенсивные и экстенсивные свойства. Свойства, не зависящие от размера системы (давление, температура, плотность и т.п.), являются интенсивными. Свойства, меняющиеся в зависимости от размера системы, (масса, объем, энергия и т.п.), называются экстенсивными. Экстенсивные свойства единицы массы являются интенсивными или удельными свойствами. Набор свойств определяет равновесное состояние системы.
- Процесс – это траектория перехода системы из одного в другое состояние.
- Цикл – ряд процессов, когда начальное и конечное состояния идентичны.