**Пар – основные понятия**

С водяным паром человек встречается в различных формах повсеместно - и в парилке, и на кухне, и на улице. Пар поднимается над влажными полями, стоит столбом над котельными, идет на морозе изо рта. Применение в промышленности пара многообразно, в ряде отраслей невозможно представить технологии, которые могли бы вытеснить применение пара. Только **пароувлажнение воздуха** обладает бактерицидными свойствами.
Фазовый переход из жидкого состояния в газообразное называется испарением, обратный переход - конденсацией. Продукты испарения называются паром.
Следует различать пар, реальный газ и идеальный газ.
Для *идеальных* газов (температура конденсации которых равна абсолютному нулю) давление всегда обратно пропорционально объему и описывается уравнением состояния
РV = mRT,
где
Р – давление,
V – объем,
m – масса,
R – газовая постоянная,
Т – температура.
Для *реальных* газов (азот, кислород, водород, …), у которых температура конденсации находится в достижимых пределах, необходимо учитывать внутреннее давление, которое является следствием межмолекулярного взаимодействия молекул в реальном объеме газа, т.е. уменьшенного на собственный объем молекул.
Уравнение состояния реального газа
(Р + a ρ2)(V – bm) = mRT
Здесь
ρ - плотность газа (m/V),
a, b – постоянные Ван-дер-Ваальса.
Газ может преобразоваться в жидкое состояние только при температурах ниже критической температуры Ткр для данного газа. Для водяного пара Ткр = 375 оС.

**Насыщенный и перегретый пар**
Жидкость и пар, находящиеся в состоянии динамического равновесия (когда число молекул, вылетающих из жидкости, равно числу молекул, возвращающихся в жидкость из пара), образуют двухфазную систему. Пар, у которого скорости процессов испарения и конденсации одинаковы, называют **насыщенным паром**. Насыщенный пар является однофазной средой, хотя может содержать фракцию жидкости во взвешенном и/или капельном состоянии. Тогда насыщенный пар является влажным. В трубопроводе пар охлаждается и при определенных условиях может выпадать конденсат. В этом случае транспортируется, вообще говоря, двухфазная среда – газообразная (пар) и жидкая фазы.
Равновесное состояние пара и жидкости определяется температурой, однозначно связанной с значением давления, и не зависит от объема. К насыщенному пару можно применять законы идеального газа при условии, что давление насыщения определяется кривой равновесия Ро(Т). При повышении температуры равновесие устанавливается за счет повышения концентрации молекул в паре и, соответственно, повышения давления насыщения и плотности пара.
Изотермы реальных газов на плоскости (р,V) имеют горизонтальные участки, соответствующие состоянию равновесия или насыщения. Данные участки описываются уравнениями, однозначно связывающими температуру и абсолютное давление насыщения пара при отсутствии влажной фазы в паре. Числовые значения «уравнения насыщения» для водяного пара приводятся в таблицах свойств насыщенного водяного пара.
При других условиях пар является *ненасыщенным* и более близок к состоянию идеального газа. В идеальных газах повышение температуры не изменяет концентрацию молекул газа в отличие от насыщенного состояния, поэтому повышение давления насыщенного пара с ростом температуры идет значительно быстрее. Если изотермически сжимать ненасыщенный пар (уменьшать объем) при Т<Ткр, то его давление будет возрастать до давления насыщенного пара. Далее, в состоянии равновесия, давление насыщенного пара сохраняется постоянным, пока он весь не сконденсируется. Затем давление жидкости при уменьшении объема резко возрастает из-за ее несжимаемости.
Ненасыщенный пар называют **перегретым** по отношению *к температуре насыщенного пара при том же давлении*. Перегретый пар получается дополнительным нагревом насыщенного пара. Любое количество воды или жидкой фракции в паре препятствует перегреву пара, так как прежде всего теплота будет использоваться для нагрева и испарения жидкости.

**Энтальпия**
Теплота, содержащаяся в жидкости при температуре кипения, называется ее **энтальпией**.
Испарение происходит не только с поверхности жидкости, но и в ее объеме. В жидкости всегда имеются мельчайшие пузырьки газа. Если давление насыщенного пара равно *внешнему давлению* (или давлению в пузырьках), жидкость испаряется внутрь пузырьков. Пузырьки, наполненные паром, начинают всплывать на поверхность жидкости и выпускать пар и газ, заключенные в пузырьках. Этот процесс называется **кипением жидкости**. Следовательно, кривая фазового равновесия Ро(Т) определяет однозначно температуру кипения жидкости при давлении насыщения, равном внешнему давлению.
**Скрытой теплотой парообразования** (энтальпия пара) называется количество тепловой энергии, необходимой для перехода (вскипания) одного кг кипящей жидкости в пар при данном давлении.
Очевидно, что жидкость должна быть нагрета предварительно до температуры кипения. Чем выше температура кипения, тем выше энтальпия воды и ниже энтальпия пара. *Полная энтальпия насыщенного пара* (или теплота в насыщенном паре) равна сумме вышеназванных значений теплоты в жидкости и в паре.
Данное состояние фазового равновесия для воды описывается **Таблицей свойств насыщенного водяного пара** .
Таблица устанавливает соответствие между температурой кипения воды при данном давлении, энтальпией воды (теплосодержанием) hw и энтальпией пара (скрытой теплотой парообразования) hs, плотностью пара и удельным объемом. Она является главным инструментом при расчетах и понимании поведения паровых систем.
Следует помнить, что данная таблица составлена для *идеального* насыщенного водяного пара, отличающегося отсутствием влаги в паре, или **насыщенного сухого пара**.
Насыщенный сухой пар является неустойчивой однофазной средой. В реальных процессах при генерации пара часть влаги уносится с паром, при длительном прохождении по паропроводам пар охлаждается, и потеря теплоты ведет к конденсации и появлению жидкости (конденсата) и влаги в паре. Иначе говоря, в природе мы имеем дело с влажным насыщенным паром, провоцирующим формирование двухфазной среды. Неустойчивость равновесного состояния в данном случае понимается как переход к устойчивому жидкому состоянию (полной конденсации) при исчезновении внешнего источника теплоты.
На практике используются различные способы поддержания насыщенного пара в «неустойчивом» состоянии, т.е. в состоянии с малой долей влажной фракции и не допущения конденсата.

**Влажность насыщенного пара**
Влажность насыщенного пара характеризуется наличием капельной и взвешенной влаги в паре. Под степенью сухости понимается отношение массы газовой фазы к общей массе насыщенного пара. Степень сухости θ есть противоположный показатель степени влажности пара ζ:
θ = 1 – ζ
Здесь
ζ = Μ/(Μ + Q),
где
М – масса жидкой фазы в паре;
Q – масса газовой фазы в паре.
Таким образом, насыщенный пар принимается сухим при степени сухости, равной 1, и влажным при степени сухости, меньшей 1.
Реальное значение полной энтальпии пара Hr отличается от табличного Hi, так как насыщенный пар практически всегда является влажным в той или другой степени.
При степени сухости водяного насыщенного пара, скажем, θ = 0,95 при давлении 5 бари,
Hi = 160,2 + 498,1 = 658,2 (ккал/кг),
Hr = hw + θ\*hs = 160,2 + 0,95 х 498,1 = 633,395 (ккал/кг).
Потеря почти 25 ккал/кг в паре проявляется в повышенном уровне конденсата при температуре насыщения и ведет к дальнейшей потери устойчивости насыщенного пара. Наличие конденсата, в свою очередь, повышает гидросопротивление потоку пара, влечет дополнительные потери давления и ведет к интенсификации образования конденсата. При транспортировке пара влажность пара может оказать существенное влияние на эффективность всей системы в целом, а на технологическом оборудовании привести к недостатку теплоты, необходимой для нормального протекания технологических процессов.
**Замечание**. При **пароувлажнении** воздуха следует учитывать влажность воздуха подаваемого в помещение.
Различают **влажность воздуха максимально возможную** при данном давлении и температуре, определяемую количеством насыщенного пара в единице объема воздуха,

Нм = (Мпара)мах/ м3.

**Абсолютную влажность** воздуха определяется фактическим содержанием водяных паров в единице воздуха:

На = (Мпара)факт/ м3.

**Относительную влажность (%)**:

Rh = На/Нм.

При охлаждении воздуха до определенной температуры водяной пар в воздухе конденсируется на поверхности твердых тел. Эта температура называется **точкой росы**, при которой Rh = 100%. Номограммы, определяющие взаимосвязь температуры, давления и влажности, называются “i - d” диаграммами.
При нагреве воздуха, имеющего определенное влагосодержание или абсолютную влажность, фактическое содержание паров не увеличивается, максимально возможное растет. Иначе говоря, относительная влажность падает. Воздух становится сухим.
Многие люди это ощущают достаточно остро. Деревянные предметы, бумага, краски и другие материалы пересыхают и теряют свои качества. В сухом воздухе потенциал статического электричества может достигать опасных значений.
Любой способ увлажнения воздуха должен обеспечивать требуемый уровень относительной влажности при условии отсутствии выпадения влаги, т.е. при отсутствии переувлажнения воздуха до точки росы.

**Энтропия**
**Перегретый пар** не может быть влажным. Чем выше температура пара по отношению к температуре кипения, тем ближе состояние пара к состоянию газа. Если в насыщенном паре температура и давление находятся в взаимнооднозначном соответствии, то в перегретом паре при постоянном давлении пар может иметь различные значения температуры и, соответственно, различные значения теплосодержания.
Удельное теплосодержание перегретого пара Ср[kJ/kg\*K] может быть определено как изменение теплосодержания на некотором перепаде температур при заданном давлении. Оно не является постоянной величиной. Прежде чем отдавать скрытую теплоту при передаче тепла, перегретый пар должен охладиться до температуры насыщения. При этом удельное теплосодержание перегретого пара зависит от значений температуры и давления, при которых начался процесс нагрева.
Изменение количества теплоты dQ, подводимое к системе, к термодинамической температуре T (Кельвина) определяет изменение **энтропии** dS системы. Энтропия S, абсолютное давление, температура и влажность пара характеризуются взаимным соответствием, отображающим текущее состояние термодинамической системы.

Энтропия перегретого пара равна
dS = loge(T1/273) + θ(L1/T1)+ Cp (loge(Ts/ T1),

где
Т1 – температура кипения;
Ср – удельное теплосодержание пара при постоянном давлении на интервале
температур Ts – Т1;
L1 – скрытая теплота парообразования;
Ts – температура перегретого пара.

**Чем отличается насыщенный пар от перегретого**
Насыщенный пар высвобождает скрытую теплоту при постоянной температуре, что является удивительным природным явлением, обеспечившим человеку возможность создания огромного количества технологий. Постоянная температура на всей площади, разделяющей источник теплоты и нагреваемую среду, сохраняется на всем периоде конденсации (фазового перехода), если конденсат устойчиво отводится, не допуская обводнения парового пространства.
Перегретый пар при передаче теплоты может охлаждаться по «разной траектории» в пространстве «температура-давление» и не позволяет иметь стабильные условия теплопередачи до тех пор, пока не остынет до состояния насыщенного пара. Начиная охлаждаться в одной точке поверхности теплообмена, перегретый пар не может сохранить температуру и давление по всей поверхности. Поэтому коэффициент теплопередачи G, имеющий размерность [W/m2 \* oC], где W – тепловая мощность, для фиксированной площади не может быть единым при перегретом паре и является некоторой осредненной величиной по площади и температуре. Количество теплоты, передаваемой перегретым паром при охлаждении, существенно ниже количества теплоты (как правило, на порядок), передаваемой паром при том же давлении в состоянии насыщения.
Как всякий газ, перегретый пар формирует воздушную пленку на поверхности теплообмена. При транспортировке пара это явление способствует снижению теплопотерь. В теплообменных аппаратах этот пограничный слой, наоборот, снизит теплопередачу. У насыщенного пара граница фазового перехода формируется на поверхности теплообмена. В то же время эффективность теплопередачи будет сохраняться постоянной при условии оперативного отвода конденсата.

Таким образом, хотя температура перегретого пара всегда выше температуры насыщенного пара при одинаковом давлении, эффективность теплопередачи перегретого пара не может сравниться с эффективностью теплопередачи насыщенного пара и всегда хуже. Важнейший фактор энергоэффективности – стабильность условий теплопередачи в пространстве параметров «температура-давление» и времени. Так как отдаваемая теплота перегретым паром ниже, чем у насыщенного пара при том же давлении, то при использовании перегретого пара поверхность теплообмена должна быть больше. На поверхностях теплообмена интенсивнее образуется при высоких температурах накипь (прикипают солевые включения в паре), а гидросопротивления подвергаются более интенсивным процессам эрозии.

Отсутствие капельной влаги в перегретом паре является одним из главных достоинств этого состояния пара. Перегретый пар, подаваемый на паровую турбину, обеспечивает длительные условия эксплуатации лопаток турбины (главный аспект применения перегретого пара с точки зрения эффективности паровой турбины – это ее КПД. Чем выше температура пара на входе, тем выше КПД цикла Карно). Транспортировка перегретого пара по протяженным магистральным паропроводам обеспечивает минимум образования конденсата и потерь пара. Оптимальным является режим транспортировки, при котором перегретый пар доходит до потребителя в состоянии, близком к насыщенному (не более 10 оС от температуры кипения), не требуя установки дополнительных охладительных установок.

Транспортируя перегретый пар при повышенном давлении, используются паропроводы меньших сечений и веса, что снижает капитальные затраты. На технологических процессах при использовании пара следует помнить, что скрытая теплота парообразования выше у насыщенного пара при более низком давлении. Поэтому теплообменные аппараты должны иметь запас поверхности теплообмена для охлаждения пара до насыщенного состояния в зависимости от условий снижения давления пара.
Редукция насыщенного пара не является однозначным процессом. Пар на выходе может быть насыщенным влажным или более сухим, чем на входе, а также перегретым на температуру, зависящую от давления на входе и выходе. Переход в то или другое состояние зависит от давления пара на входе клапана, требуемого падения давления и влажности пара. При давлении ***сухого*** *насыщенного* пара на входе ***ниже 30 бари***, на выходе всегда будет *перегретый пар*.
При редукции (снижении давления) насыщенного пара всегда пар переходит в состояние перегретого пара. Перегретый пар можно привести к состоянию насыщения за счет увеличения концентрации молекул пара либо путем испарения дополнительного объема жидкости (без изменения давления) и соответствующего уменьшения температуры пара, либо за счет адиабатического расширения и охлаждения пара до температуры насыщения.
Поскольку на практике сухого пара не бывает, пар более низкого давления («мятый» пар) может быть после редукции либо перегретым, либо влажным насыщенным, но с меньшим содержанием влаги («подсушенным») по отношению к влажности пара на входе. При большом количестве капельной влаги в паре перед редукционной станцией пар на выходе может быть влажным насыщенным. Однако наличие конденсата на входе клапана может привести к интенсивной конденсации влажной фракции и преждевременному выходу его из строя. Поэтому желательно удалить конденсат перед клапаном и работать на слегка перегретом паре, который охладится либо в теплообменном аппарате, либо в подводящих паропроводах.