

**К ВОПРОСУ ОБ ОСНОВНОМ ЗАКОНЕ АДИАБАТИЧЕСКОГО
ФАЗООБРАЗОВАНИЯ**

С. В. ПОЛОЖИИ

(Представлена научным семинаром кафедры ТЭУ)

Как известно, под адиабатическим фазообразованием понимается изменение агрегатного состояния нагретой жидкости, насыщенного пара или двухфазной системы жидкость — пар без теплообмена с внешней средой путем сброса давления первоначальной системы.

Адиабатическое фазообразование является обобщенным процессом и может протекать по конечному фазообразующему эффекту в трех направлениях, в зависимости от начального состояния системы:

при изэнтропическом сбросе давления нагретой жидкости или двухфазной системы с преобладанием жидкой фазы происходит в конце процесса образования паровой фазы — адиабатическое парообразование (АП);

при изэнтропическом сбросе давления насыщенного пара или двухфазной системы с преобладанием паровой фазы образуется жидкая фаза — адиабатическая конденсация (АК);

при изэнтропическом сбросе давления двухфазной системы равного весового отношения ($X = Y = 0,5$) процесс протекает без видимого изменения агрегатного состояния как в промежуточных, так и в конечном состоянии — соотношение фаз не меняется при любой величине сброса давления $X = Y = 0,5 = \text{const}$ — процесс равного фазообразования.

Основными свойствами адиабатического фазообразования во всех его модификациях являются: образование новой фазы, кинетической энергии и дисперсирование потока.

Образование новой результирующей фазы в конце процесса при изэнтропическом сбросе давления — насыщенного пара или жидкости — всегда происходит в направлении, противоположном исходной фазе при одноагрегатном начальном состоянии или преобладающей фазе при начальном двухфазном состоянии системы.

Кинетическая энергия потока при адиабатическом фазообразовании может иметь различную величину и зависит от соответствующей организации процесса, исходного состояния фазы перед фазообразующим элементом — насыщенный пар, насыщенная жидкость, двухфазное состояние и соотношение между фазами, а также от величины и интервала сброса давления, начального и конечного давления.

Дисперсность потока адиабатического фазообразования также зависит от многих факторов и возрастает с увеличением интервала давления, величины сброса давления, с повышением начального давления, а также зависит от начального состояния системы жидкость — пар, двухфазная система и ряда других факторов.

Все эти особенности и свойства адиабатического фазообразования являются следствием основного закона этого процесса природы.

При изоэнтропическом сбросе давления однофазной или двухфазной системы H_2O одновременно протекают два противоположных процесса — адиабатическая конденсация и адиабатическое парообразование с одинаковой степенью интенсивности и в равных количествах на весовую единицу жидкой или паровой фазы с образованием новой фазы, кинетической энергии и с дисперсированием двухфазного потока.

Естественным источником адиабатического фазообразования являются широко распространенные в природе высокосжатые нагретые воды, пар или двухфазная система. В районах действующих вулканов и в сейсмических районах процесс адиабатического фазообразования протекает в естественных условиях в виде гейзеров или паровых «фонтанов» с проявлением основных свойств этого процесса — генерацией новой фазы, кинетической энергии потока и дисперсирования двухфазного потока. При сбросе давления нагретой высокосжатой воды протекает адиабатическое парообразование; при выходе через трещину или скважину двухфазной системы или насыщенного пара — процесс адиабатической конденсации. Количество новой фазы, кинетическая энергия потока и его дисперсность также зависят от величины и характера сброса давления, от начального состояния системы, гидравлических потерь, которые в той или иной степени могут отличаться от изоэнтропического сброса давления и влиять на соотношение фазообразующего и энергетического эффекта этого процесса.

Как показывают экспериментальные исследования адиабатического фазообразования, экспериментальные исследования и практика использования кинетической энергии во влажнопаровых турбинах, получается высокая степень завершения процесса адиабатического фазообразования, и кинетическая энергия процесса по своей величине оказывается близкой к теоретическому значению изоэнтропического процесса. Эти обстоятельства позволили использовать термодинамические зависимости и теоретическим путем обосновать основной закон адиабатического фазообразования [1, 2, 3]. При изоэнтропическом сбросе давления одного кг насыщенного пара количество жидкости в конце заверщенного процесса определяется из соотношения $Y = \frac{S_0'' - S_1''}{r_1} T_{н1}$. При изоэнтропическом сбросе давления кг насыщенной жидкости в конце заверщенного процесса образуется пар $X_1 = \frac{S_0' - S_1'}{r_1} T_{н1}$.

В промежуточных состояниях, как только возникла новая фаза или при сбросе давления двухфазной системы, в дальнейшем каждая фаза, по мере последующего сброса давления, ведет себя в соответствии с общей природой этого процесса. В какой-то момент сброса давления паровая фаза начинает конденсироваться, а жидкая фаза — испаряться. Дальнейшее падение давления вновь воздействует как на паровую, так и на жидкую фазу. Побудителем этого процесса является непрерывное падение давления системы и стремление паровой и жидкой фазы прийти в соответствие с их термодинамическим состоянием при новом, более низком давлении. Соотношение фаз в процессе элементарного сброса давления системы $(Y_0 - \Delta X) + (X_0 - \Delta Y) = 1$. Жидкая фаза будет испаряться и убывать на величину $\Delta X = \frac{S_0' - S_1'}{r_1} T_{н1} \cdot Y_0$. Паровая фаза

будет конденсироваться и убывать на величину $\Delta Y = \frac{S_0'' - S_1''}{r_1} T_{н1} \cdot X_0$.

В новом состоянии система будет иметь вид $Y_1 + X_1 = 1$. Из этих со-

отношений видно, что образование каждой фазы пропорционально количеству исходной фазы, имея в виду, что $S'_0 - S'_1 \approx S''_0 - S''_1$; r_1 и $T_{н1}$ имеют одинаковое значение как для паровой, так и для жидкой фазы при давлении P_1 . Из уравнения $(Y_0 - \Delta X) + (X_0 - \Delta Y) = 1$ и вышеприведенной зависимости определяются условия конечной направленности и конечный результат адиабатического фазообразования при изоэнтропическом сбросе давления, количественный перевес и преобладание одного процесса (АК, АП) над другим как в промежуточных, так и в конечном состоянии сброса давления системы.

При $Y_0 < \Delta X$; $\Delta Y > \Delta X$ — адиабатическая конденсация;

При $Y_0 > \Delta X$; $\Delta Y < \Delta X$ — адиабатическое парообразование;

При $Y_0 = X_0$; $\Delta Y = \Delta X$ — АФ — процесс равного фазообразования.

Основной закон адиабатического фазообразования, количественные характеристики АФ хорошо иллюстрируются диаграммой фазового состояния H_2O в $T-S$ -координатах [1—3]. Диаграмма фазового состояния H_2O позволяет произвести анализ влияния величины и интервала изоэнтропического сброса давления, начального и конечного давления, соотношения паровой и жидкой фазы на фазообразующий и энергетический эффект, определить предельное значение новой фазы в конце процесса, кинетической энергии потока и т. п., которые уже известны из литературы [1, 3].

Основной закон адиабатического фазообразования, открытый на основании теоретических и экспериментальных исследований, является, в свою очередь, следствием «зеркальности» процессов адиабатического фазообразования, тождественности адиабатического парообразования адиабатической конденсации, их одной и той же природы, обусловленной идентичностью и равенством физических и термодинамических свойств и параметров для одного и того же уровня давления. Для данного конечного давления теплота парообразования при адиабатической конденсации (индекс «к») r_k в точности равна теплоте фазообразования при адиабатическом парообразовании (инд. «п») r_n . Температуры насыщения жидкости и пара не отличаются для данного конечного давления для процесса АП и АК. Энтальпия жидкости этих процессов $i'_{(к)} = i''_n$, насыщенного пара $i''_к = i'_n$, энтропии $S'_к = S'_{(п)}$, $S''_{(к)} = S''_{(п1)}$. Поверхностное натяжение жидкости одно и то же как для образования капелек, так и для пузырьков пара для данного уровня давления системы. Сохраняются одни и те же условия для зарождения паровой и жидкой фазы.

Другим важным свойством адиабатического фазообразования является стремление системы в процессе сброса давления прийти в соответствующее состояние, отвечающее данному уровню давления. При данном конечном давлении двухфазная система при АФ обязательно должна иметь физические и термодинамические свойства и параметры насыщенного пара и жидкости.

Метастабильное состояние системы, нарушение равновесного состояния при АФ является временным, переходным процессом, обеспечивающим зарождение жидкой и паровой фазы, результатом поверхностных сил, пузырьково-капельной природы фазовых переходов H_2O жидкость — пар. Количественные и качественные характеристики адиабатического фазообразования зависят от величины, интервала и характера сброса давления, а также от соотношения жидкой и паровой фазы в исходном состоянии процесса. Условия зарождения паровой и жидкой фазы и дальнейшего развития фаз идентичны как для АП, так и для АК при одних и тех же условиях процесса. При одной и той же температуре насыщения над плоской поверхностью T_n и табличного давления P_n давле-

ние пара в пузырьке и температура в нем при АП будет определяться поверхностными силами $P_{\pi} = P_{\text{н}} - \frac{2\sigma}{\xi}$ и оказывается ниже $T_{\text{н}}$. Давление жидкости в капельке при этих же условиях, наоборот, оказывается на такую же величину выше давления насыщения в потоке.

$$P_{\text{ж}} = P_{\text{н}} + \frac{2\sigma}{\xi} \quad P = P_{\pi} - P_{\text{н}} = P_{\text{ж}} - P_{\text{н}} = \pm \frac{2\sigma}{\xi}.$$

Вследствие этого, одна и та же температура потока одновременно создает условия зарождения как для пузырьков, так и для капелек жидкости в потоке. Каждая фаза при данной величине изоэнтропического сброса давления в соответствии с основным законом фазообразования ведет себя совершенно идентично, одновременно возникая и развиваясь с одинаковой степенью интенсивности и в равных количествах на одно и то же весовое количество жидкой и парообразной фазы.

Интервал сброса давления, в свою очередь, будет оказывать различное влияние на кинетику адиабатического фазообразования при одной и той же величине сброса давления [1, 3].

Адиабатическое фазообразование как изолированный от внешней среды процесс протекает в строгом соответствии с материальным и энергетическим балансом системы. Сохранение этих балансов определяет внутреннюю природу процесса адиабатического фазообразования, его специфические свойства и закономерности. Изменение агрегатного состояния системы при сбросе давления является условием соблюдения закона сохранения энергии и вещества для этого процесса, определяет фазообразующий и энергетический эффект, идентичность процессов АП и АК, кинетику этого процесса. При изоэнтропическом сбросе давления насыщенной жидкости ($Y_0 = 1$) с P_0 до P_1 располагаемый потенциал энергии определяется энтальпией жидкости (при $C=0$) i'_0 в начальном состоянии, который не может быть изменен при более низком давлении системы. Для соблюдения этого жидкость вынуждена менять свое агрегатное состояние — переходить в двухфазную систему с одновременной генерацией кинетической энергии, связанной со сбросом давления.

$$i'_0 = i'_1 \cdot X_1 + i'_2 \cdot Y_1 + H'_1; \quad H'_1 = i'_0 - [i'_1 + (S'_0 - S'_1) T_{\text{н}}]$$

При изоэнтропическом сбросе давления насыщенного пара система также вынуждена менять свое агрегатное состояние ввиду иных параметров жидкости и пара при более низком давлении и перехода части тепловой энергии в кинетическую энергию потока.

При наличии необратимых процессов снижается энергетическая эффективность (АФ) и одновременно изменяется фазообразующий эффект (АФ), без нарушения энергетического и материального баланса системы. При изоэнтропическом сбросе давления двухфазной системы изменение каждой фазы будет также протекать в соответствии с основным законом АФ.

$$X_0 + Y_0 = X_1 + Y_1 = (X_0 - \Delta Y_1) + (Y_0 - \Delta X_1);$$

$$\Delta Y_1 = \frac{S''_0 - S'_1}{r_1} T_{\text{н}} \cdot X_0.$$

$$\Delta X = \frac{S'_0 - S'_1}{r_1} T_{\text{н}} \cdot Y_0; \quad \frac{S''_0 - S'_1}{r_1} T_{\text{н}} = \frac{S'_0 - S'_1}{r_1} T_{\text{н}}.$$

$$\Delta Y_1 = \alpha \cdot X_0; \quad \Delta X_1 = \alpha \cdot Y_0.$$

Сохранение материального и энергетического баланса, действие основного закона АФ определяют предельные возможности этого процесса

по кинетической энергии и по фазообразующему эффекту. В частности, система никогда не может достигнуть однофазного состояния в конце процесса, как это возможно в процессе изменения агрегатного состояния с внешним теплообменом и при неизменном давлении.

Основной закон АФ, сохранение внутреннего энергетического и материального баланса системы определяют кинетику адиабатического фазообразования, фазосбразующий и энергетический эффект этого процесса. В этой связи непригодными являются современные представления газодинамики двухфазных сред, кинетики расширения влажного пара в паровых турбинах, теоретические основы влажнопаровых турбин, методика экспериментальных и теоретических исследований потерь от влажности, построенных на понятиях непрерывного ординарного роста капелек жидкости за счет теплообмена — передачи тепла от жидкости к пару при его расширении в проточной части влажнопаровых турбин и другие представления [4, 5], не связанные с понятием адиабатического фазообразования [4, 5].

Такое традиционное представление кинетики и физической сущности расширения влажного пара в соплах паровых турбин не обеспечило даже правильной постановки теоретических и экспериментальных исследований потерь от влажности в паровых турбинах в отечественной и зарубежной практике [1, 6, 7].

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Положий. К вопросу о кинетике процесса конденсации пара в турбинной ступени. Изв. ТПИ, том. 137, 1965.
2. С. В. Положий. Паросиловые установки с адиабатическим парообразованием. Изв. вузов СССР. Энергетика, № 1, 1965.
3. С. В. Положий. Адиабатическое фазообразование. Информ. бюллетень по проблеме перевода ТЭ на адиаб. фазообр. ТПИ, № 4, 1969.
4. М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. Газодинамика двухфазных сред. Энергия, 1963.
5. И. И. Кириллов, Р. М. Яблоник. Основы теории влажнопаровых турбин. Машиностроение, 1968.
6. С. В. Положий. К вопросу влияния влажности пара на КПД турбинной ступени. Изв. вузов СССР. Энергетика, № 7, 1962.
7. С. В. Положий. Еще раз к вопросу влияния влажности пара на КПД турбинной ступени. Изв. вузов СССР. Энергетика, № 3, 1963.