

**К ВОПРОСУ О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ ГАЗОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ**

С. В. ПОЛОЖИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры ТЭУ)

Изучение адиабатического фазообразования, его количественных и качественных характеристик приобретает исключительно важное значение не только для решения задачи перевода ТЭС на адиабатическое фазообразование, но и для решения других технических вопросов, связанных с использованием двухфазных потоков, и особенно при расширении влажного пара в паровых турбинах.

Проблема влажного пара возникла с момента появления конденсационных паровых турбин, и работы в этой области проводились непрерывно, но эта задача не решена и до настоящего времени. В последнее десятилетие в связи с переходом энергетики на блочные ТЭС сверхвысоких и закритических параметров пара и развитием АЭС этой проблеме стали уделять исключительно большое внимание, особенно в нашей стране. С 1955 года ведутся исследования в области влажного пара в БИТМ и на ХТГЗ. Позднее присоединились к этим работам ЦКТИ, ЛПИ и ЛМЗ, широко поставившие исследования экспериментальных турбин на влажном паре. Обширные исследования физических процессов газодинамики двухфазных потоков поставлены в МЭИ. Были организованы также исследования натуральных турбин на ХТГЗ, ВТИ, ЦКТИ и ОРГРЭС. Наряду с экспериментальными исследованиями, появились работы по теории влажнопаровых турбин. Широко привлекалась теория фазовых переходов в разработке методов расчета процессов конденсации пара при расширении влажного пара. В ЛПИ в 1961—62 годах развили метод расчета рабочего процесса с применением кинетической теории Я. И. Френкеля. Эти работы продолжали в БИТМ и ЦКТИ применительно к расчету отдельных ступеней в многоступенчатых турбинах. В 1968 году подведены итоги многочисленным экспериментальным и теоретическим исследованиям в области влажного пара [1, 2]. В этих работах приведено обобщение отечественных и зарубежных исследований в области влажного пара, широко использованы собственные теоретические и экспериментальные исследования, изложены методы расчетов, кинетика и газодинамика двухфазных сред, определение потерь от влажности пара и т. п., отражены самые последние достижения в этой области.

Выход в свет этих фундаментальных работ [1, 2] в области влажного пара указывает на правильность выделения этой группы явлений как адиабатического фазообразования [3], открытия этого явления как естественного процесса природы, его основных закономерностей и свойств. Становится очевидным, что огромный накопленный материал экспериментальных исследований влажного пара, изложение газодинамики двух-

фазных потоков, определение потерь от влажности в экспериментальных турбинах, методика экспериментальных и теоретических исследований и их обобщение не основываются на представлениях об адиабатическом фазообразовании, его свойствах и закономерностях, являются поэтому в значительной степени искусственными, не отражают физической сущности процессов расширения влажного пара в паровых турбинах [3—6].

Направленность процесса фазообразования при расширении влажного пара в паровых турбинах

Одним из главных недостатков современных представлений о расширении влажного пара в паровых турбинах, теоретических и экспериментальных исследований в этой области является односторонняя оценка этого процесса как процесса только конденсации пара, непрерывного роста капелек жидкости по мере расширения влажного пара в турбине. Такая схема конденсации влажного пара принята в основу кинетики двухфазных сред и теории влажнопаровых турбин [1, 2] и фигурирует во всей учебной, научной и специальной литературе, связанной с вопросами влажного пара.

Односторонняя направленность процесса конденсации при расширении влажного пара без теплообмена с внешней средой имеет свои теоретические обоснования в виде понятия инверсии агрегатного состояния в современной литературе, границы перехода от одного монопроцесса к другому, например, конденсации к парообразованию или наоборот [7, 8]. В [7] значение паросодержания потока, отвечающего инверсии агрегатного состояния при изэнтропическом сжатии, определяется через отношение теплоемкости паровой и жидкой фазы.

$$X_{ин} = \frac{C_{п}}{C_{п} - C_{ж}} \quad \text{или} \quad \frac{r \cdot dX}{d\tau} = -(1 - X) \cdot C_{ж} - X \cdot C_{п},$$

где $(1 - X)C_{ж}$ — количество тепла, поглощенное жидкостью при повышении ее температуры на 1°C , $X, C_{п}$ — количество тепла, выделенное паровой фазой. Если сухой насыщенный пар выделит при изэнтропическом сжатии больше тепла, чем это требуется для нагрева жидкости, то часть жидкости будет испаряться. Если же сухой насыщенный пар недостаточно выделяет тепла для нагрева жидкости до соответствующей температуры, то часть пара конденсируется, и степень сухости убывает [7]. В [8] односторонняя направленность конденсации пара объясняется при адиабатическом охлаждении влажного пара знаком теплоемкости. В области, где теплоемкость C_x положительная, происходит испарение. В области, где C_x — отрицательная, наблюдается конденсация пара. Так как C' положительная, то при малых степенях сухости C_x будет положительная — испарение. При большой степени сухости C_x отрицательная — происходит конденсация влажного пара.

Такая односторонняя оценка конденсации влажного пара в паровых турбинах является результатом наблюдений за процессами изменения агрегатного состояния с внешним теплообменом через стенку, когда подвод (отвод) тепла обеспечивает непрерывный переход пара в жидкость при конденсации или жидкость в пар при кипении. Эта физическая картина образования и роста капелек жидкости, односторонняя направленность процесса конденсации с отводом тепла через стенку некритически были распространены и на процесс конденсации влажного пара без теплообмена в паровых турбинах. По этой же причине не возникало потребности в специальном изучении этого класса явлений, этим же объясняется недооценка исследований ТПИ адиабатического фазообразования,

непризнание даже самой терминологии этого процесса. Попытки ТПИ обратить внимание на необходимость изучения адиабатического фазообразования при решении вопросов потерь от влажности в паровых турбинах [4, 5] не оказали должного воздействия на исследователей. Вследствие этого научные исследования, связанные с решением проблемы влажного пара в паровых турбинах, газодинамика двухфазных сред и теория влажнопаровых турбин, экспериментальные и теоретические исследования в этой области оказались построенными на ошибочной физической основе, без учета основного закона адиабатического фазообразования и других специфических свойств этого процесса.

Теплообмен между фазами при расширении влажного пара

Приняв концепцию односторонней направленности процесса конденсации образования и непрерывного роста капель по мере сброса давления влажного пара в соплах турбины, современники допустили и другую, не менее важную ошибку в оценке физической сущности процесса, в кинетике двухфазных сред, объясняя образование и рост капель жидкости теплообменом — передачей тепла от капелек жидкости к пару при его расширении в турбине.

Теплообмен между жидкостью и паром положен в основу теоретических выводов и расчетных зависимостей в газодинамике двухфазных потоков. Теория теплообмена, в свою очередь, потребовала введения разности температур между паром и капельками жидкости — превышения температуры капелек над температурой окружающего его пара — для того, чтобы можно было в процессе роста капелек жидкости при расширении влажного пара отводить тепло от жидкости. Такая схема теплообмена позволила для расчета роста капелек жидкости при расширении влажного пара подвести математическую базу для расчета этого процесса, использовать обычные уравнения теплообмена. Так, например, в [2] для определения роста капелек жидкости используется уравнение в условиях макроскопического процесса

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{2\lambda'(T' - T)}{r' \cdot \rho'}$$

где T' — температура поверхности капли, T — температура пара, λ' — коэффициент теплопроводности, r' — теплота фазообразования, ρ' — плотность жидкости. Для начальной стадии при $\xi < \lambda$ (длина свободного пробега молекул) рост капель определяется по уравнению

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{3}{8} \frac{P}{r\rho} \sqrt{3 \frac{R}{T} (T' - T)}.$$

Трактовка теплообмена между фазами при расширении влажного пара и соответствующие математические зависимости не согласуются с основным законом адиабатического фазообразования, с физической сущностью этого процесса. Количество сконденсировавшейся жидкости, определяемое по этим уравнениям, не зависит от исходного соотношения фаз и начального состояния. Степень влажности будет меняться в самых различных значениях до перехода процесса от адиабатической конденсации до адиабатического парообразования при относительной влажности, в исходном состоянии — больше половины [3, 6]. Кроме того, передача тепла от одной фазы к другой без внешнего тепло- и энергообмена не может изменить соотношение жидкой и паровой фазы:

$$\left(X_1 + \frac{Q_{1,2}}{r_1} + Y_1 - \frac{Q_{1,2}}{r_1} \right) = 1; \quad (X_1 + \Delta Y) + (Y_1 - \Delta X) = 1.$$

Температурные состояния при расширении влажного пара

Теория теплообмена при конденсации влажного пара в паровых турбинах потребовала построения соответствующей схемы температур в потоке влажного пара при его расширении в турбине и, в частности, превышения температуры капелек жидкости T над температурой пара T'' , «...что необходимо для отвода тепла в процессе конденсации» ([2] стр. 110). В связи с этим в потоке влажного пара различают температуру пара, температуру капелек жидкости, температуру насыщения $T_{s\xi}$ капелек для каждого данного размера и температуру насыщения над плоской поверхностью жидкости T_s ; величину перегрева капелек $\delta T' = T' - T_{s\xi}$, величину переохлаждения пара $\Delta T = T_s - T''$ относительно капли радиуса ξ . В условиях термодинамического равновесия $\Delta T = \delta T' = 0$. В процессе расширения эта величина отличается от нуля, что объясняется условиями отвода тепла от растущей в процессе конденсации капли. В искусственности такой схемы температур в потоке можно убедиться, прежде всего, на основании ошибочных представлений о процессе теплообмена и физической сущности конденсации при расширении влажного пара в турбине, о чем уже говорилось выше, а также ввиду несоответствия такой температурной схемы основному закону адиабатического фазообразования. В частности, эти температурные разности сохраняются для данного интервала и величины сброса давления для любой степени сухости влажного пара и всегда должны обеспечивать каплеобразование — конденсацию пара как при очень большой, так и при очень малой степени сухости влажного пара. В действительности при степени сухости, равной половине, не наблюдается видимого изменения фаз. При более низкой степени сухости процесс конденсации переходит в парообразование.

Падение давления влажного пара в равной степени воздействует как на паровую, так и на жидкую фазу. Ни одна из фаз не имеет превосходства в физическом и термодинамическом состоянии, за исключением количественных различий в начальном состоянии, которое может меняться в общем случае от $X = 1$ до $Y = 1$ и определять собою конечный фазообразующий эффект адиабатического фазообразования.

Метастабильное состояние потока, переохлаждение пара при его расширении в некоторых типах фазообразующих элементов и начального состояния системы связано с поверхностными явлениями. Кинетическая энергия потока в этом случае образуется только за счет паровой однофазной системы, которая приобретает вследствие этого соответствующую более низкую температуру относительно температуры насыщения. Последующий процесс фазообразования обеспечивает генерацию кинетической энергии в соответствии с законом соответственного состояния, с одновременным изменением температуры жидкой и парообразной фазы, с одновременной конденсацией и парообразованием в количествах, пропорциональных весовому содержанию каждой фазы в потоке, с преобладанием конденсации над парообразованием для условий расширения влажного пара в паровых турбинах. При этом приращение жидкой фазы не будет оставаться постоянным по мере расширения влажного пара в проточной части турбины, а будет снижаться от ступени к ступени в связи с уменьшением степени сухости перед каждой последующей ступенью.

Рост капель при расширении влажного пара

Современная теория роста капель при расширении влажного пара основывается на предположении теплообмена между фазами, отвода тепла от капелек жидкости паром. Закон роста капель, в свою очередь,

выведен в предположении неизменного термодинамического состояния среды, которое не меняется во время роста капель. Определив на таких условиях скорость конденсации и размер капель в любом сечении сопла, находим расход сконденсировавшегося пара

$$G' = \int_0^x M_k(X'X) \cdot I(X') \cdot F(X') dX',$$

где X' — координата сечения, в котором выпадает влага со скоростью $I(X')$ и площадью которой $F(X')$;

X — координата, определяющая положение рассматриваемого сечения;

M — масса капель в сечении X ;

$$I = \sqrt{\frac{2}{\gamma}} \left[\exp\left(-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma}{3 \cdot k \cdot T} \xi_{кр}^2\right) \right] \frac{1}{\rho'} \frac{P}{kT} \sqrt{\frac{\sigma N_a}{\mu}} \frac{1}{кг \cdot сек};$$

I — скорость образования капель.

Такое определение количества сконденсировавшегося пара полностью основывается на неправильном представлении физической сущности процесса — на непрерывном росте капель в рассматриваемом сечении. Количество образовавшейся жидкости не зависит от побудителей процесса — величины, характера и интервала сбора давления. Не учитывается одновременное протекание конденсации и парообразования, влияние соотношения фаз в сечении X на конечную влажность пара. Расход сконденсировавшегося пара по такой зависимости всегда пропорционален массе капель в сечении X , в то время как по мере увеличения влажности пара в сечении X конечное количество сконденсировавшегося пара все время будет уменьшаться и при M , равном 50% общего потока, в сечении X не произойдет увеличения влажности в X' . При дальнейшем же увеличении влажности в сечении X процесс конденсации уступит место парообразованию, и вся эта система определения количества влажного пара приходит в нелепость.

Предельная конденсация при расширении влажного пара

Современная теория роста сконденсировавшейся фазы, газодинамика двухфазного потока не ставит вопроса о предельной возможности конденсации пара и влиянии начальной влажности пара на конечный результат перехода пара в жидкость при расширении влажного пара в турбинах, а также вопроса о величине прироста сконденсировавшейся жидкости по ступеням турбины, связанной с изменением фазового состава потока по длине проточной части турбины. Не учитывается также эффект удаления влаги из проточной части турбины на конденсацию пара в последующих ступенях. Современная теория влажнопаровых турбин не в состоянии решить эти вопросы. Современная теория в этом отношении является абстрактной, не связана и не отражает всего комплекса явлений и закономерностей, побудителей и свойств адиабатического фазообразования, на основании которых для данного интервала и величины сброса давления существует свой предел максимального перехода пара в жидкость.

Развитие теории влажнопаровых турбин

Практические задачи развития блочных ТЭС и атомных электростанций вызвали за последнее десятилетие широкое развитие теоретических и экспериментальных исследований двухфазных потоков (БИТМ, ХТГЗ, ЦКТИ, ЛПИ, МЭИ, ЛМЗ и др.). В настоящее время появились работы, обобщающие и систематизирующие исследования в этой обла-

сти, рассматривающие проблему влажнопаровых турбин в целом [1, 2]. Проведена большая работа для решения этой важной задачи. Проведены многочисленные экспериментальные и теоретические исследования термодинамики влажного пара, газодинамики двухфазной среды, по изучению движения капелек жидкости в проточной части турбины, создана кинетическая теория фазовых превращений в турбинной ступени. Предложены методы расчета процессов конденсации в элементах влажнопаровых турбин, определения потерь от влажности в турбинной ступени, а также решения вопросов влагоудаления в турбинах. Намечены дальнейшие пути экспериментальных исследований, необходимых для развития теории влажнопаровых турбин, изучения физических явлений, даны рекомендации экспериментальных исследований влажнопаровых турбин.

Однако все эти исследования, теоретические выводы и методы расчетов не основываются на правильном представлении физической сущности процессов при расширении влажного пара в паровых турбинах, на знании свойств и закономерностей адиабатического фазообразования.

Развитие теории влажнопаровых турбин не может в дальнейшем осуществляться без коренного пересмотра современных взглядов и представлений о кинетике двухфазных потоков в свете основных свойств и закономерностей адиабатического фазообразования, без постановки исследований в этом направлении [3—6].

Теоретическое обоснование экспериментальных данных исследований, связанных с адиабатическим фазообразованием, имеющих в литературе, всегда дает хорошую сходимость экспериментальных и теоретических данных при самых различных представлениях о процессе, схеме потока и т. п. Математический аппарат позволяет сблизить экспериментальные и теоретические расчеты и без правильного представления о физической сущности процессов, и это необходимо иметь в виду при рассмотрении данной проблемы.

Экспериментальные данные по определению расхода при истечении нагретой воды являются хорошим примером этого. Каждый исследователь этого вопроса представлял обоснование своих экспериментальных данных с самыми различными понятиями о физической сущности процесса и схемы потока.

Экспериментальные данные потерь от влажности, полученные при переходе ступени с перегретого на влажный пар, также теоретически обоснованы исследователями, но без учета снижения КПД ступени от изменения термодинамических и физических условий работы ступени на влажном паре [4, 5, 6].

Кинетика двухфазных потоков обосновывается ее авторами экспериментальными и расчетными методами без правильного представления физической сущности процесса расширения влажного пара в соплах, знания основного закона адиабатического фазообразования и других свойств этого процесса [3, 6, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. Газодинамика двухфазных сред. Энергия, 1968.
2. И. И. Кириллов, Р. М. Яблоник. Основы теории влажнопаровых турбин. Машиностроение, 1968.
3. С. В. Положий. Адиабатическое фазообразование. Информ. бюллетень по пробл. перевода ТЭ на АФ № 4, НТБ ТПИ, Томск, 1969.
4. С. В. Положий. К вопросу влияния влажности пара на КПД турбинной ступени. Изв. вузов СССР, Энергетика, № 7, 1962.
5. С. В. Положий. Еще раз к вопросу влияния влажности пара КПД турбинной ступени. Изв. вузов СССР, Энергетика, № 3, 1963.
6. С. В. Положий. К вопросу о кинетике процесса конденсации пара в турбинной ступени. Изв. ТПИ, том 137, 1965.
7. М. Д. Вайсман. Термодинамика парожидкостных потоков. Энергия, 1967.
8. М. П. Вукалович, И. И. Новиков. Техническая термодинамика. ГЭИ, 1962.
9. С. В. Положий. К вопросу об основном законе адиабатического фазообразования. Настоящий сборник.