УДК 536.248.2

НАБУХАНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

Синцова Т.Г., Трифонов Н.Н., Сухоруков Ю.Г., Николаенкова Е.К.

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ») Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

В настоящее время отсутствуют методы расчета по обоснованию скорости срабатывания защиты паровой турбины, предотвращающей обратный поток пара и попадание влаги, выносимой потоком пара, из подогревателей системы регенерации в проточную часть турбины в динамических режимах работы. Известные методы расчета набухания уровня воды в теплообменных аппаратах основаны на анализе скорости всплытия паровых пузырей в воде при снижении давления. Это позволяет определить величину набухания уровня, но не позволяет рассчитать скорость и время набухания уровня, появление пара и его выделение из воды и, тем самым, обосновать требуемое быстродействие защиты. Предложены методы расчета скорости падения давления в теплообменных аппаратах системы регенерации и связанного с этим образования ядер стабильно растущих пузырей, а также формула для расчета роста пузырей при условии отсутствия газов в воде. Представленные рассуждения позволяют определить время основных стадий образования и роста пузырей в деаэрированной воде теплообменных аппаратов системы регенерации паровых турбин и обосновать время быстродействия защиты турбины от обратного потока пара и попадания влаги, вносимой потоком пара, в турбину.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин повреждения паровых турбин является попадание воды в проточную часть турбины и разгон ротора.

При решении задач защиты турбины от попадания в нее воды и предотвращения разгона ротора требуется учет всех источников воды и пара, связанных с проточной частью.

Одним из источников возможного поступления воды и пара в турбину являются теплообменные аппараты (подогреватели) системы регенерации и подогрева воды теплоснабжения. Давление пара и температура воды в корпусе теплообменных аппаратов системы регенерации составляет 0,012÷8,0 МПа (49,4÷295˚С). При сбросе нагрузки давление пара во всех аппаратах снижается до 0,0035 МПа. При стабильном режиме нагрузки вода в турбину может попасть при отказе клапана, регулирующего уровень воды в корпусе аппаратов, разрыве трубок поверхности теплообмена, отказе линии аварийного слива воды из аппаратов смешивающего типа (деаэратор, смешивающие подогреватели) и др.

Попадание воды в турбину и разгон ротора возможны в режиме сброса нагрузки при резком снижении давления пара (декомпрессия) за счет набухания уровня при вскипании воды, находящейся в теплообменных аппаратах на линии насыщения в начальный момент времени.

Вопросу анализа расхода пара в турбину и связанному с этим разгону ротора посвящено значительное количество работ [1 – 3].

Вопрос об определении скорости роста уровня воды при декомпрессии в подогревателях системы регенерации представляет большой практический интерес, поскольку позволяет обосновать требуемое время быстродействия защиты от обратного потока пара и воды из подогревателей в проточную часть турбины.

Согласно [3], защита от разгона ротора эффективна при времени ее срабатывания за 0,5÷0,7 с. Однако, обоснование данного положения отсутствует.

Известные методы расчета набухания уровня в теплообменных аппаратах основа-

© Синцова Т.Г., Трифонов Н.Н., Сухоруков Ю.Г., Николаенкова Е.К.

ны на анализе скорости всплытия паровых пузырей в воде при снижении давления (декомпрессии). Это позволяет определить величину набухания уровня, но не позволяет рассчитать скорость и время набухания уровня, появление пара и его выделение из воды и, тем самым, обосновать требуемое быстродействие защиты.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ОБОСНОВАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией жидкость находится в метастабильном состоянии между бинодалью и спинодалью (рис. 1, 1 – бинодаль, 2 – спинодаль, 3 – линия постоянной скорости зародышеобразования $J_1 = 1$) [4].

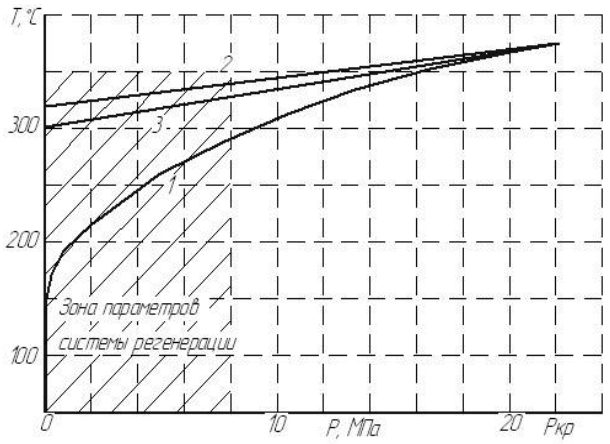

Рис.1 Бинодаль и спинодаль в Т – Р координатах.

Процесс кипения характеризуется скоростью зарождения и роста пузырей, их числом и размером. Зарождение пузырей зависит от недогрева воды до температуры насыщения, наличия газов, скорости возмущения нарушения метастабильного состояния.

Из экспериментальных исследований выявлено, что при вскипании жидкости ее температура должна быть выше соответствующей температуры насыщения. При этом различают три значения температуры: температуру начала кипения ($T_{нк}$), температуру кипения ($T_к$) и температуру насыщения (T_s), причем $T_{нк} > T_к > T_s$. В пределах теоретических рассуждений принято, что $T_{нк} = T_{сп}$ ($T_{сп}$ – температура спинодали).

Переход жидкости в метастабильное состояние может производиться мгновенным и постепенным созданием метастабильности. Мгновенное создание метастабильности возможно, если время возмущения меньше времени последующего фазового перехода. Фазовый переход имеет две стадии: первая из них – стадия нуклеации, при которой образуются устойчиво растущие зародыши новой фазы. По окончании стадии нуклеации наступает вторая стадия – стадия коллапса, при которой происходит рост зародышей новой фазы при неизменном их количестве. При этом вещество переходит в новое стабильное состояние.

В теплообменных аппаратах системы регенерации вода, как правило, находится на линии насыщения (бинодали) и деаэрирована (содержание кислорода 10 мкг/кг). При образовании и росте пузырьков пара следует учитывать высоту столба воды (1÷1,5 м). В начальный период снижения давления верхние слои будут перегреты, а нижние – недогреты. После падения давления, эквивалентному высоте столба воды, вся жидкость будет перегрета и находится на линии спинодали.

При отсутствии газов в воде первоначальное образование и рост паровых пузырей затруднено и требует более глубокого возмущения, что снижает требования к быстродействию защиты.

Образование и рост зародышей пузырька на стенке аппарата требует меньшей работы, чем внутри объема жидкости. Центрами роста пузырьков на стенке аппарата являются микронеровности (впадины).

В качестве центров парообразования в объеме воды могут быть пузырьки $R = 10 \div 100$ Å (так называемые бабстоны), динамическое равновесие которых обеспечивается за счет диффузии молекул пара и ионов через пленку [5]. Для пузырька $R = 20$ Å в среднем содержится одна молекула газа, которая, соударяясь со стенкой пузырька, передает единице площади его поверхности в единицу времени импульс $kT/(12\pi R^3)$ равный внешнему давлению.

Кроме того, в воде содержатся объединения, состоящие из 20÷21 молекулы воды (так называемые клатраты), которые соединены между собой, а в центре объединения находится ион H_3O^+. При колебании молекул в месте нахождения иона образуется пустота, которая также служит источником образования пузырька.

Чем больше величина и скорость нанесения возмущения (скорость падения давления), тем интенсивнее образование центров появления и роста пузырьков.

Данному давлению и температуре воды соответствует только одно значение диаметра пузырька $d_{кр}$, находящегося в метастабильном состоянии, после которого начинается его интенсивный рост, что должно быть учтено при расчете роста пузырька для теплообменного аппарата системы регенерации.

Время роста уровня воды в аппарате может быть определено по следующему выражению:

$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$,

где τ_1 – время конденсации пара в корпусе аппарата;

τ_2 – характерное время ожидания образования жизнеспособного парового пузырька в метастабильной жидкости;

τ_3 – время роста пузырька.

Время первоначального снижения давления в аппарате τ_1 может быть определено из следующих соображений, при прекращении поступления пара в аппарат на поверхности теплообмена происходит конденсация пара, находящегося в аппарате. Время конденсации и снижения давления от P_0 до P_1 соответствующего температуре холодного теплоносителя определится по выражению:

$$\tau_1 = \frac{V_n \rho_n r}{G_в \left(i_{вых} - i_{вх}\right)}, \qquad (1)$$

где V_n – объем пара; ρ_n – плотность пара; r – теплота парообразования; $G_в$ – расход воды; $i_{вх}$, $i_{вых}$ – энтальпия на входе и выходе из подогревателя.

Дальнейшее падение давления в аппарате определяется:

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{\sum\left(\frac{r\rho'}{\rho'-\rho''} - (i''-i_n)\right)G_n + \sum\left(\frac{r\rho''}{\rho'-\rho''} - (i'-i_в)\right)G_в}{V'\left(\rho'\frac{\partial i'}{\partial p} + \frac{r\rho''}{\rho'-\rho''}\frac{\partial \rho'}{\partial p}\right) + V''\left(\rho''\frac{\partial i''}{\partial p} + \frac{r\rho'}{\rho'-\rho''}\frac{\partial \rho''}{\partial p}\right) + c_M M_M \frac{\partial T''}{\partial p}},$$

где c_M – удельная теплоемкость металла; M_M– масса металла.

Расчет по (1) показал, что время падения давления составляет 0,6÷1,0 с для смешивающих подогревателей системы регенерации низкого давления, поэтому спонтанное, взрывное вскипание невозможно [4]. Основное влияние на образование пузырей оказывает гетерогенная нуклеация.

Поскольку возникновение парового зародыша носит случайный характер, то под временем τ_2 следует понимать среднее время ожидания зародыша. Величина $J = 1/\tau_2$ определяет частоту зародышеобразования, т.е. среднее число зародышей, образующихся в данном объеме жидкости в единицу времени. Скорость зародышеобразования в единице объема $J_1 = J/V$ и тогда $\tau_2 = 1/(J_1 V)$.

Частота зародышеобразования может быть определена по уравнению Фольмера-Деринга [4]:

$$J_1 = B\sqrt{\frac{6\sigma}{(3-b)\pi m}}\, exp\left(-\frac{h}{kT}\right) exp\left(-\frac{W_k}{kT}\right),$$

где B – число молекул в единице объема; σ – поверхностное натяжение; m – масса молекулы; h – теплота парообразования в расчете на одну молекулу; k – постоянная Больцмана; W_k – работа по образованию критического зародыша. Величина $W_k/(kT) = G$ – число Гиббса, определяет глубину проникновения жидкой фазы в паровую область, т.е. степень метастабильности.

Время τ_3 определится как время роста пузырька до критической величины (до разрушения).

Рост пузырька при декомпрессии предлагается определять при следующих допущениях:

Пузырек имеет сферическую форму с одинаковой температурой и давлением, равными температуре насыщения и давлению насыщения пара.

Влиянием вязкости и сжимаемости в паре и воде пренебрегаем ввиду больших скоростей звука в воде и паре. Влиянием инерционных сил пренебрегаем ввиду малой плотности пара. Тогда уравнение движения границы пузырька радиуса R в воде можно записать в следующем виде:

$$R\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{[P(R) - P_0]}{\rho}, \qquad (2)$$

где P_0 – давление в воде; P(R) – давление в воде на границе пузыря; ρ – плотность воды.

$$P(R) = P_V(T) - \frac{2\sigma}{R}, \qquad (3)$$

где $P_V(T)$ – давление насыщенного пара при температуре T на границе пузырька.

Введем радиус R_0, величина которого определится соотношением

$$\frac{2\sigma}{R_0} = P_V(T_0) - P_0. \qquad (4)$$

С физической точки зрения R_0 – начальный радиус пузырька (бабстона). Подставив (3) и (4) в (2), получим выражение для скорости

роста пузырька в деаэрированной воде при параметрах, характерных для анализа системы регенерации:

$$R\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{3}{2}\dot{R}^2=\frac{P_V(T)-P_V(T_0)+\frac{2\sigma}{R_0}\left(1-\frac{R_0}{R}\right)}{\rho}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные рассуждения позволяют определить время основных стадий образования и роста пузырей в деаэрированной воде теплообменных аппаратов системы регенерации паровых турбин и обосновать время быстродействия защиты турбины от обратного потока пара и попадания влаги в турбину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сухоруков Ю.Г., Ермолов В.Ф., Трифонов Н.Н. Методика расчета набухания уровня воды и защитных средств исключающих ее попадание в проточную часть турбины с обратным поток пара из смешивающих подогревателей. Теплоэнергетика, 2008, №2, с. 72 – 76. Sukhorukov, Yu.G., Yermolov, V.F. and Trifonov, N.N. (2008), “Method of calculating the level of the water swelling and protective equipment excluding her from entering the flow part of the turbine with a reverse flow of steam from the mixing heaters”, Teploenergetika, no.2, pp. 72 – 76.
2. Фрагин М.С., Новоселов В.Б. О влиянии объемов пара и воды в регенеративных и сетевых подогревателях на работу паровой турбины при сбросе нагрузки. Электрические станции, 2011, № 2, с.24 – 31. Fragin, M.S. (2011), “The effect of the volume of steam and water in regenerative heaters and network to work with the steam turbine load shedding”, Elektricheskie stantsii, no.2, pp. 24 – 31.
3. Фрагин М.С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшая перспектива. – СПб.: Энерготех, 2005. – 248 с. Серия «Проблемы энергетики», вып. 6. Fragin, M.S. (2005), Regulirovanie I maslosnabzhenie parovych turbin. Seriya “Problemy energetiki”, vypusk 6 [Regulation and oil supply steam turbines: the present and the near future. Series “Problems of power”, issue 6], Energotekh, St. Petersburg, Russia.
4. Хлесткин Д.А. Теория и расчет метастабильных потоков. – М.: ИИКЦ «Эльф-3». 2007. – 255 с. Khlestkin, D.A. (2007), Teoriya i raschet metastabylnykh potokov [Theory and Design of metastable flows], IIKTS “Elf-3”, Moscow, Russia.
5. Рассадкин Ю.П. Вода обыкновенная и необыкновенная. – М.: «Галерея СТО», 2008. – 840 с. Rassadkin, Yu.P. (2008), Voda obyknovennaya i neobyknovennaya [Water ordinary and extraordinary], Galereya STO, Moscow, Russia.