

ВОПРОСЫ ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ОБОРУДОВАНИИ И ТРУБОПРОВОДАХ АЭС С ВВЭР

© 2010 г. В. И. Скалозубов, Хадж Фараджаллах Даббах А. *, К. В. Скалозубов

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

** Одесский национальный политехнический университет*

Приведен обзорный анализ исследований неустойчивости теплогидродинамики двухфазных потоков. Рассмотрены основные причины и механизмы возникновения теплогидродинамической неустойчивости двухфазных потоков, а также их влияние на надежность и работоспособность систем и оборудования АЭС.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, двухфазный поток, теплогидродинамическая неустойчивость, термоакустическая неустойчивость, апериодическая неустойчивость, низкочастотная колебательная неустойчивость, теплогидродинамические параметры.

В общепромышленной теплотехнике уже на протяжении многих десятков лет ведутся активные теоретические и экспериментальные исследования в области выявления причин/механизмов возникновения теплогидродинамической неустойчивости (ТГН) двухфазных потоков в оборудовании и трубопроводах, а также разработки технических решений/мероприятий по устранению или смягчению последствий возникновения ТГН. Многие из результатов этих исследований приведены (например, [1 - 4] и др.). Обычно под ТГН подразумевается отклонение теплогидродинамических параметров потока (давления, скорости, температуры и т. п.) от стабильных (квазистационарных) значений под действием внешних воздействий/возмущений.

В качестве простейшего примера возможности возникновения ТГН ниже приведены основные причины/механизмы апериодической неустойчивости парогенерирующего канала. Из уравнения движения перепад давления на канале

$$\Delta P \sim \frac{G^2}{\rho(x)}, \quad (1)$$

где G , $\rho(x)$ – соответственно расход, плотность и паросодержание потока. Из уравнения сохранения энергии изменение паросодержания потока

$$\Delta x \sim \frac{q}{G}, \quad (2)$$

где q - плотность внешнего теплового потока.

Таким образом, с одной стороны, случайное увеличение расхода ($\uparrow \delta G$) приводит в соответствии с формулой (1) к увеличению перепада давления ($\uparrow \delta \Delta P$) - фактор 1. Но с другой стороны, ($\uparrow \delta G$) в соответствии с формулой (2) приводит к уменьшению паросодержания ($\downarrow \delta X$), а значит, и к относительному увеличению плотности потока ($\uparrow \delta \rho$), что согласно формуле (1) способствует уменьшению перепада давления на канале ($\downarrow \delta \Delta P$) – фактор 2.

В случае преобладания 1-го фактора случайное увеличение расхода в конечном итоге приводит к его уменьшению:

$$\uparrow \delta G \Rightarrow \uparrow \delta \Delta P \Rightarrow \downarrow \delta G \text{ – параметры потока стабилизируются.}$$

В случае преобладающего влияния 2-го фактора - поток неустойчив:

$$\uparrow \delta G \Rightarrow \downarrow \delta \Delta P \Rightarrow \uparrow \delta G.$$

В этом случае происходит скачкообразное изменение расхода (апериодическая неустойчивость) до значений, соответствующих устойчивой области или областей других ви-

дов неустойчивости. Доминирование устойчивого или неустойчивого факторов зависит от технических характеристик канала краевых условий и условий межфазного взаимодействия.

Возникновение неустойчивости оказывает отрицательное влияние на надежность и работоспособность оборудования/систем, а также к дополнительным динамическим и термическим нагрузкам, которые способствуют ускорению из разрушения.

Анализ известных исследований в области ТГН (приведенных, например, в [1 - 4] и др.) определяет следующие основные положения:

1. Возникновение ТГН наиболее характерно для двухфазных и сжимаемых сред. Для однофазных и несжимаемых сред основные причины ТГН связаны с неэффективной работой регуляторов.

2. По основным причинам/механизмам и характерным частотам процессов можно выделить три основных вида ТГН двухфазных потоков:

1) *АН – аperiodическая неустойчивость* (скачкообразное изменение теплогидродинамических параметров – ТГП);

2) *ТАН – термоакустическая неустойчивость* (характерные частоты колебаний ТГП сопоставимы с частотой распространения звуковых возмущений в потоке);

3) *НН - низкочастотная неустойчивость* (характерные частоты колебаний ТГП сопоставимы с отношением скорости потока к длине канала).

Каждый вид неустойчивости имеет специфические причины возникновения и механизмы развития неустойчивых процессов, которые существенно зависят от условий межфазного взаимодействия.

Основные причины и механизмы возникновения АН двухфазных потоков рассмотрены выше. Возникновение АН в оборудовании характерно для условий относительно малых скоростей и больших паросодержаний потока (при существенной чувствительности плотности среды потока от расхода).

Возникновение и развитие ТАН двухфазного потока определяется процессами межфазного взаимодействия под воздействием акустических возмущений. Все известные теоретические подходы обоснования ТАН можно условно разделить на два основных [2]: резонансный принцип и термодинамический принцип Рэлея. Согласно резонансному подходу возникновение ТАН определяется резонансом частот импульсов конденсирующейся и/или разноплотностной структуры и частот акустических возмущений в потоке. Резонансный механизм ТАН является доминантным в относительно коротких каналах, для которых характерны высокие собственные частоты акустических колебаний (тысячи Герц).

Принцип Рэлея основан на термодинамических закономерностях, согласно которым в случае одновременного подвода (отвода) массы и увеличения (уменьшения) давления в системе возникает неустойчивый (колебательный) процесс. В рамках этого принципа упрощенный механизм возникновения ТАН в двухфазном потоке при генерации и конденсации паровой фазы можно представить следующим образом: при возникновении акустического возмущения по давлению P (для конкретности, $\uparrow\delta P$) происходит относительное уменьшение площади конденсирующейся фазы ($\downarrow\delta S$), а соответственно – уменьшение межфазного теплового потока ($\downarrow\delta Q$) и уменьшение массы сконденсировавшейся фазы ($\downarrow\delta M$) относительно невозможного состояния. Такая последовательность обратных связей межфазного взаимодействия согласно принципу Рэлея приводит к устойчивости потока относительно акустических возмущений. Однако относительное увеличение давления ($\uparrow\delta P$) приводит также к относительному увеличению разности температур ($\uparrow\delta T$) между потоком и конденсируемой фазой, что приводит к увеличению межфазного теплового потока и массы сконденсировавшейся фазы ($\uparrow\delta M$) относительно невозмущенного состояния – поток неустойчив в соответствии с принципом Рэлея:

$$\begin{array}{l} \downarrow\delta S \Rightarrow \downarrow\delta Q \Rightarrow \downarrow\delta M - \text{поток устойчив} \\ \uparrow \\ \uparrow\delta P \Rightarrow \uparrow\delta T \Rightarrow \uparrow\delta Q \Rightarrow \uparrow\delta M - \text{поток неустойчив.} \end{array} \quad (3)$$

Доминирование каждой из цепей обратных механизмов (3) зависит от конструкции оборудования, краевых условий и условий межфазного взаимодействия.

Применение неравновесных полидисперсных моделей двухфазных пузырьковых потоков позволило авторам [3] разработать обобщенные области ТАН теплоносителя в координатах определяющих ТГП, которые вошли в основу системы оперативной диагностики ТАН (СОД ТАН) активной зоне реактивов с ВВЭР.

Возникновение различных разновидностей НН в парогенерирующих и/или конденсирующихся потоках связано, в основном, с инерционностью процессов межфазного взаимодействия и процессов переноса потока. Для различного энергетического оборудования важным является оценка условий возникновения низкочастотной *межканальной неустойчивости* (МН):

флуктуационные возмущения в одном из системы параллельных каналов (физически или условно разделенных по различию ТГП) оказывают определенное влияние на развитие теплогидродинамических процессов в других каналах, которые могут вызывать процессы неустойчивости. Упрощенным примером низкочастотной МН могут быть процессы в объеме парогенераторов АЭС с ВВЭР вблизи "горячего" и "холодного" коллекторов. Так, случайное увеличение расхода питательной воды вблизи условно выделенного канала "горячего" коллектора ($\uparrow \delta G_r$) приводит к интенсификации парообразования, увеличению паросодержания ($\uparrow \delta x_r$) и уменьшению плотности среды ($\downarrow \delta \rho_r$) относительно невозмущенного состояния, что определяет увеличение нивелирного перепада давлений между каналами "холодного" и "горячего" коллекторов ($\uparrow \delta \Delta P$). Увеличение этого перепада ($\delta \Delta P$) через определенный промежуток времени (вызванный инерционностью процессов межфазного взаимодействия и переноса) приводит к, с одной стороны, к выбросу в паровой объем парогенератора среды с высоким паросодержанием у "горячего" коллектора, а с другой стороны, к снижению уровня котловой воды вблизи "холодного" коллектора ($\downarrow \delta H_x$). Таким образом, через определенный промежуток времени Δt возникнут условия уменьшения нивелирного перепада давлений между "холодным" и "горячим" коллектором [$\downarrow \delta \Delta P(\Delta t)$], а соответственно и дальнейшее уменьшение расхода вблизи "горячего" коллектора [$\downarrow \delta G_r(\Delta t)$]:

$$\uparrow \delta G_r \Rightarrow \uparrow \delta x_r \Rightarrow \downarrow \delta \rho_r \Rightarrow \uparrow \delta \Delta P \Rightarrow \downarrow \delta H_x \Rightarrow \downarrow \delta \Delta P(\Delta t) \Rightarrow \uparrow \delta G_r(\Delta t)$$

В нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) реакторов типа ВВЭР двухфазные режимы потенциально опасные для условий возникновения ТГН реализуются в следующем оборудовании/системах: активная зона реактора (режим недогретого до насыщения поверхностного кипения); парогенератор (кипение рабочей среды 2-го контура в объеме парогенератора); система промпрегрева пара (СПП) и деаэрации турбоустановки (конденсация греющего пара); насосное оборудование (кавитация и вскипание на рабочих элементах); теплообменники подогрева питательной воды парогенератора (конденсация греющего пара) и др. Возможные виды ТГН и рекомендуемые контрмеры по устранению/смягчению условий неустойчивости приведены в таблице.

Возникновение ТАН в активной зоне реактора имеет очень важное значение для безопасности: возбуждение высокочастотных и высокоамплитудных (до 50 % от стационарных значений) колебаний ТГП приводит к существенным циклическим нагрузкам, под действием которых возможны разрушения конструкции активной зоны реактора (в первую очередь оболочек ТВЭЛов). Наиболее эффективными контрмерами в данном случае являются организация диагностики возникновения ТАН (например, СОД ТАН), а при попадании реактора в область ТАН – снижение оператором мощности реактора.

При кипении питательной воды в объеме парогенератора в определенных условиях возможно возникновение межканальной аperiодической или низкочастотной неустойчивости, вызванных разными условиями теплообмена на отдельных участках кипения в объеме парогенератора (см. выше), возникновение межканальной АН или НН приводит к дополнительным циклическим термическим нагрузкам на теплообменных трубках парогенера-

тора и способствует ускорению их разрушения. Эффективными мероприятиями для подавления возникновения ТГН в данном случае является модернизация внутрикорпусных устройств парогенератора для обеспечения равномерности распределения ТГП питательной воды в объеме парогенератора и увеличение гидравлических сопротивлений вблизи "холодного" коллектора.

№	Оборудование, система	Возможная ТГН	Контрмероприятия
1	реактор	термоакустическая	Оператор: контроль СОД ТАН; снижение мощности при ТАН
2	парогенератор	межканальная низкочастотная и апериодическая	модернизация распределительных конструкций для увеличения гидросопротивлений вблизи "холодного" коллектора; обеспечение равномерности распределения ТГП в объеме парогенератора
3	система промпрогрева пара турбоустановки, дренажи конденсата	межканальная низкочастотная	увеличение гидросопротивления участков с однофазным конденсатом (шайбование)
4	регенеративная система теплообменников турбоустановки	низкочастотная	увеличение гидросопротивления участков с однофазным конденсатом (шайбование)
5	насосное оборудование	низкочастотная	увеличение гидравлического сопротивления подводящей магистрали

Устранение низкочастотной неустойчивости в насосном оборудовании и в оборудовании с конденсацией пара (СПП, теплообменники подогрева питательной воды и др.) возможно на основе увеличения гидравлических сопротивлений участков с жидкой фазой. Механическим аналогом процессов колебаний в данном случае может быть система из груза (водяной участок) на пружине (пароводяной участок). Увеличение гидравлического сопротивления на водяном участке (коэффициента трения для груза) способствует устранению колебательных процессов. Для повышения гидравлического сопротивления на водяных участках широкое применение в теплотехнике имеет установка дополнительных дроссельных шайб.

До настоящего времени вопросы возникновения ТГН двухфазных потоков в аварийных режимах и при нарушении нормальных условий эксплуатации АЭС с ВВЭР изучены недостаточно. Основная причина такой ситуации, на наш взгляд, связана с тем, что эти вопросы не отражены как в технических обоснованиях проектов ВВЭР, так и в лицензионных отчетах по анализу безопасности (ОАБ). Так, например, расчетные теплогидродинамические обоснования аварийных последовательностей в ОАБ ВВЭР направлены, в основном, на оценку выполнимости установленных критериев безопасности (обычно по температуре оболочек твэлов) и запасов времени для организации эффективных действий персонала по управлению авариями. Тем не менее анализ результатов теплогидродинамических расчетов критериев успеха (например, доминантных для безопасности течей 1-го контура и межконтурных течей) показал, что во многих случаях процессе развития аварий возникают неустойчивые режимы с колебаниями ТГП, которые приводят к дополнительным циклическим термодинамическим нагрузкам на оборудование/системы, способствуя их преждевременному разрушению. Кроме того, заложенные в расчетные средства теплогидродинамического моделирования (коды) математические модели обладают ограниченными возможностями. Так,

используемая в коду RELAP 5 двухскоростная двухтемпературная модель двухфазного потока принципиально не позволяет анализировать возможность возникновения ТАН теплоносителя в активной зоне реактора [3] .

Вместе с тем реализация мероприятий отраслевых программ по повышению безопасности АЭС Украины определила решение ряда доминантных задач, связанных с возможностью возникновения неустойчивости теплогидродинамических процессов в аварийных режимах:

обоснование работоспособности быстродействующих редуцирующих устройств (БРУ-А) в условиях двухфазного режима для управления авариями;

обоснование возможности регулирования расходов систем аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) реактора и др.

При запроектных авариях с межконтурными течами в системе трубопроводов БРУ-А при неквалифицированных по проекту двухфазных режимах может возникнуть межканальная НН, приводящая к существенно нестационарным гидроударам на рабочие органы клапанов БРУ-А и снижающая их надежность и работоспособность.

Установка регуляторов на напорных магистралях САОЗ может привести к возникновению неустойчивых колебаний ТГП, способствующих дополнительным циклическим термическим и динамическим нагрузкам.

Решению указанных задач будут посвящены следующие публикации авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабенский В.Б., Герлига В.А. Нестабильность потока теплоносителя в элементах энергооборудования. - СПб: Наука, 1994. - 288 с.
2. Герлига В.А., Скалозубов В.И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС – М: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
3. Коврижский Ю.Л., Скалозубов В.И. Термоакустическая неустойчивость теплоносителя в активной зоне водоводяных реакторов. - Одесса: ТЭС, 2003. - 171 с.
4. Развитие и оптимизация систем контроля АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Д. В. Билей и др. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. – 512с.

ПИТАННЯ ТЕПЛОГІДРОДИНАМІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ В ОБЛАДНАННІ ТА ТРУБОПРОВОДАХ АЕС ІЗ ВВЕР

В. І. Скалозубов, Хадж Фараджаллах Даббах А., К. В. Скалозубов

Наведено оглядовий аналіз досліджень нестійкості теплогидродинаміки двофазних потоків. Розглянуто основні причини та механізми виникнення теплогидродинамічної нестійкості двофазних потоків, а також їхній вплив на надійність і працездатність систем та устаткування АЕС.

Ключові слова: водяний енергетичний реактор, двофазний потік, теплогидродинамічна нестійкість, термоакустична нестійкість, аперіодична нестійкість, низькочастотна коливальна нестійкість, теплогидродинамічні параметри.

PROBLEMS OF THERMOHYDRODYNAMICAL INSTABILITY IN EQUIPMENTS AND CONDUITS OF APP WITH WATER POWER REACTOR

V. I. Skalozubov, Haj Farajallah Dabbach A., K.V. Skalozubov

The paper presents a review of studies of instability of thermohydrodynamic two-phase flows. The basic causes and mechanisms of thermohydrodynamical instability of two-phase flows. As well as their impact on reliability and efficiency systems and equipment plant.

Keywords: water power reactor, two-phase flow; thermohydrodynamical instability, thermoacoustic instability, aperiodic instability, low-frequency oscillatory instability, thermohydrodynamical parameters.

Поступила в редакцію 29.06.10