

В. И. Скалозубов¹, С. И. Клевцов², С. И. Косенко³, В. Ю. Кочнева¹

¹ Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина

² НТУУ «Киевский политехнический институт», просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

³ Одесский национальный политехнический университет, просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

МЕТОД АДАПТАЦИИ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ «ВОЛНОВОГО» РЕАКТОРА

Предложен метод адаптации условий возникновения термоакустической неустойчивости теплоносителя в реакторах с квазистационарным и волновым энерговыделением. Критерием адаптации является анализ соотношения мощности квазистационарных и волновых энерговыделений при идентичных конструктивно-технических характеристиках и внешних теплогидродинамических условиях. В случае выполнения условий адаптации отсутствует необходимость дополнительного анализа возможности возникновения и влияния на целостность оболочек твэлов термоакустической неустойчивости теплоносителя в активной зоне «волнового» реактора.

Ключевые слова: адаптация, авария, «волновой» реактор, термоакустическая неустойчивость.

Одним из ограничений традиционного методического обеспечения анализа безопасности реакторных установок является недостаточный спектр исходных событий аварий (ИСА) [1]. Так, в отношении активной зоны реактора рассматривается фактически одно «техническое» ИСА – отказ на срабатывание аварийной защиты реактора.

Вместе с тем возможны, например, также ИСА, связанные с нарушением герметичности оболочек твэлов под воздействием различных механизмов теплогидродинамической неустойчивости теплоносителя. Приведенный в [1] анализ показал, что для реакторных установок с реакторами типа ВВЭР в определенных условиях рабочих режимов возможно возникновение термоакустической неустойчивости (ТАН) теплоносителя. Необходимым условием возникновения ТАН являются относительно высокие тепловые нагрузки, приводящие к поверхностному кипению «холодного» теплоносителя (недогретого до температуры насыщения в объеме потока теплоносителя). Достаточными условиями возникновения ТАН являются определяющие механизмы межфазного взаимодействия конденсирующейся в потоке паровой фазы. Наибольшее развитие в отношении теории возникновения ТАН при поверхностном кипении получили фундаментальные термодинамические принципы, развитые в научной школе В. А. Герлига [1]. Состояние активной зоны в отношении ТАН определяется знаком суммарной работы A_{Σ} , которую совершает конденсирующаяся фаза под действием акустических возмущений: если $A_{\Sigma} > 0$, то поток теплоносителя неустойчив; если $A_{\Sigma} < 0$, то поток устойчив.

Возникновение ТАН сопровождается высокоциклическими (сотни – тысячи герц) динамическими нагрузками на оболочки твэлов (амплитуды до 50 % от среднего уровня давления в потоке теплоносителя), которые могут привести к потере герметичности твэлов (разрушение защитного барьера безопасности) и последующему развитию аварийных процессов.

Проведенные в [1] экспериментально-теоретические исследования позволили определить обобщенную область ТАН для активной зоны реакторов типа ВВЭР в критериях (рис. 1)

$$K_1 = \frac{N_m}{G_{A3} \cdot \Delta i} \sqrt{\frac{P_{кр}}{P} \frac{F_{np}}{F_{об}}}; \quad K_2 = \frac{T_{ex}}{T_s}, \quad (1)$$

где N_m – тепловая мощность реактора; G_{A3} – расход теплоносителя через активную зону; Δi – скрытая теплота парообразования; $P_{кр}$ – критическое давление; P – давление; F_{np} – площадь проходного сечения активной зоны; $F_{об}$ – площадь обогрева твэла; T_{ex} – температура теплоносителя на входе в активную зону; $T_s(P)$ – температура насыщения.

Проведенный для реакторов ВВЭР-1000 (с проектным ядерным топливом) анализ показал, что в рабочих режимах эксплуатации активная зона устойчива по отношению к термоакустическим воздействиям. ТАН возникает лишь в отдельных переходных режимах, когда скорость снижения расхода теплоносителя превышала скорость снижения тепловой мощности реактора. В процессе планово-предупредительных ремонтов на запорожской АЭС при перегрузке ядерного топлива в ряде случаев действительно были обнаружены значительные дефекты твэлов. Конечно, нет достаточных основа-

© В. И. Скалозубов, С. И. Клевцов, С. И. Косенко, В. Ю. Кочнева, 2015

ний полагать, что основной причиной обнаруженных дефектов была ТАН теплоносителя в активной зоне реакторов, но и исключить возможное влияние ТАН также нельзя

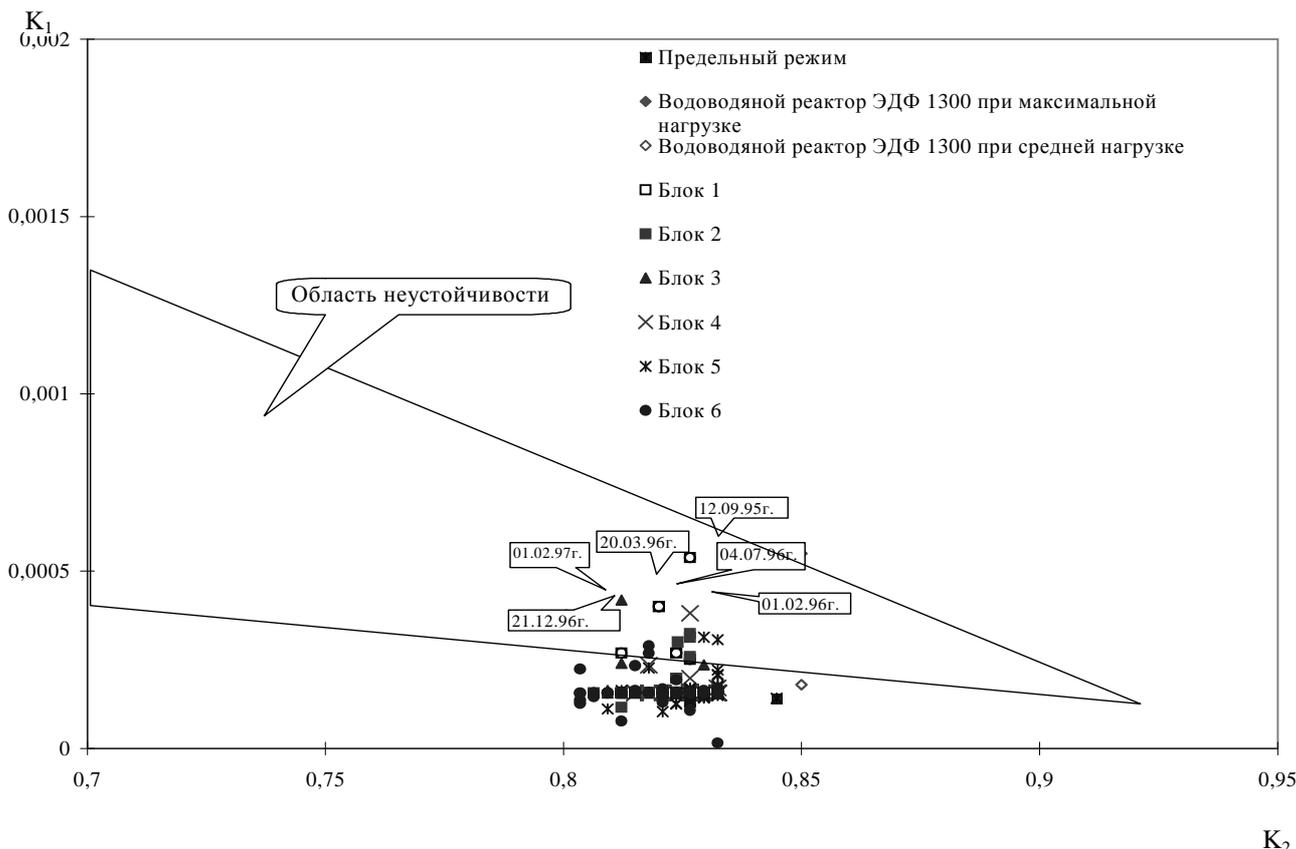


Рис. 1. Области ТАН для ВВЭР-1000 (на примере энергоблоков Запорожской АЭС).

На рис. 1 приведены для примера также результаты анализа областей ТАН для французских реакторов PWR (подобных ВВЭР), из которых следует, что при определенных условиях даже в рабочих режимах могут возникать условия ТАН теплоносителя в активной зоне.

Перспективным для будущего атомной энергетики является применение реакторов, основанных на формировании нейтронно-делительной волны энерговыделений в ядерном топливе [2, 3]. В этом случае происходит «саморегулирование» нейтронно-физических процессов, что может существенно повысить ядерную безопасность за счет снижения возможных ошибочных действий операторов при управлении реактором. Кроме того, такие «волновые» реакторы могут способствовать решению крайне актуальных проблем по «сжиганию» высокорadioактивного плутония.

Однако внедрение «волновых» реакторов требует глубокого дополнительного анализа обеспечения ядерной и радиационной безопасности. В частности, одним из таких вопросов является оценка области ТАН теплоносителя в активной зоне «волнового» реактора при формировании нейтронно-делительной волны.

Далее представлен метод адаптации условий возникновения ТАН теплоносителя в активной зоне «волнового» реактора и ВВЭР.

При идентичных конструктивно-технических характеристиках и внешних теплогидродинамических условиях из критериев области ТАН теплоносителя (1) следует, что возможные различия состояний «волнового» реактора и ВВЭР в отношении ТАН определяются тепловой мощностью реакторов, зависящей напрямую от удельной мощности внутренних энерговыделений ядерного топлива Q при прочих равных условиях. Поэтому критерием адаптации по отношению к ТАН можно полагать условия

$$Q^s \leq Q^c, \tag{2}$$

где Q^s – интегральная мощность в «волновом» реакторе с нейтронно-делительной волной энерговыделений, Вт/м³; Q^c – интегральная мощность энерговыделений в реакторе с квазистационарным распределением энерговыделений по высоте твэла, Вт/м³.

Модель ТАН в реакторах с квазистационарным и волновым распределением энерговыделений представлена на рис. 2. В соответствии с представленной моделью интегральные по высоте твэла мощности энерговыделений

$$Q^c = \int_0^H Q_m^c \Psi^c(h) dh = Q_m^c \int_0^H \Psi^c(h) dh, \quad (3)$$

$$Q^e = \int_0^H Q_m^e(h,t) \Psi^e(h,t) dh = \int_0^{t_e} Q_m^e(h,t) \Psi^e(h,t) D(h,t) dt, \quad (4)$$

где Q_m^c – максимальная мощность в реакторе с квазистационарным распределением энерговыделений; Ψ – функция распределения энерговыделений вдоль твэла, 1/м; Q_m^e – амплитуда мощности энерговыделений в нейтронно-делительной волне; D – скорость распространения нейтронно-делительной волны [2]; t, t_e – текущее время и время распространения волны по высоте твэла соответственно.

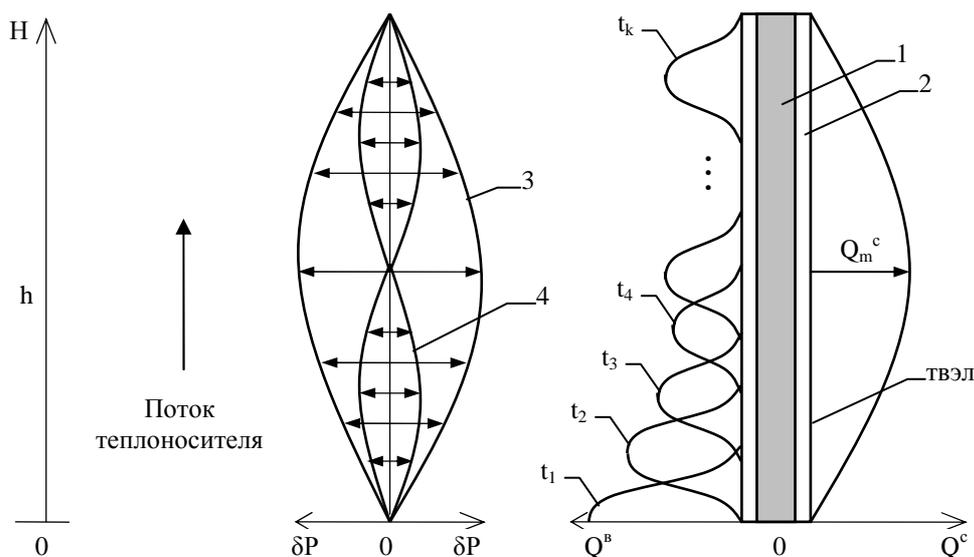


Рис. 2. Модель ТАН в активной зоне реактора с квазистационарным распределением энерговыделений (Q^c) и при нейтронно-делительной волне (Q^e):

1 – ядерное топливо; 2 – оболочка твэла; 3 – первая мода термоакустических пульсаций давления δP ; 4 – вторая мода термоакустических пульсаций давления δP ; H – высота твэла.

Для установившейся (устойчивой) нейтронно-делительной волны критерий адаптации по ТАН

$$Q_m^e \Psi^e H \leq Q_m^c \int_0^H \Psi^c(h) dh. \quad (5)$$

Амплитуды Q_m^e и функции распределения Ψ^e мощности энерговыделений в нейтронно-делительной волне, входящие в критерий (5), определяются через нейтронно-физические характеристики ядерного топлива [3].

Для проектного ядерного топлива ВВЭР можно применять $Q_m^c \approx 10^9$ Вт/м³ и гармонический закон квазистационарного продольного распределения энерговыделений Ψ^c .

Таким образом, в случае выполнения условия (5) отсутствует необходимость дополнительного анализа возможности возникновения и влияния на целостность оболочки твэла ТАН теплоносителя. В противном случае необходим дополнительный анализ безопасности в отношении условий возникновения ТАН в активной зоне «волнового» реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР* / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров, А. В. Шавлаков. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. – 200 с.
2. *Феокистов Л. П.* Безопасность – ключевой момент возрождения ядерной энергетики // *Успехи физических наук.* – 1993. – Т. 163, № 8. – С. 89 – 102.

3. Русов В. Д., В. А. Тарасов, С. А. Чернеженко. Режимы с обострением в уран-плутониевой делящейся среде технических ядерных реакторов и геореактора // Вопросы атомной науки техники. – 2011. – № 2(97). – С. 112 – 121. – (Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»).

В. И. Скалозубов¹, С. И. Клевцов³, С. И. Косенко³, В. Ю. Кочнева¹

¹Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна

²НТУУ «Київський політехнічний інститут», просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

³Одеський національний політехнічний університет, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

МЕТОД АДАПТАЦІЇ УМОВ ВИНИКНЕННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ В АКТИВНІЙ ЗОНІ «ХВИЛЬОВОГО» РЕАКТОРА

Запропоновано метод адаптації умов виникнення термоакустичної нестійкості теплоносія в реакторах із квазістаціонарним та хвильовим енерговиділенням. Критерієм адаптації є аналіз співвідношення потужності квазістаціонарних та хвильових енерговиділень при ідентичних конструкційно-технічних характеристиках і зовнішніх теплогідродинамічних умовах. У випадку виконання умов адаптації немає необхідності додаткового аналізу можливості виникнення та впливу на цілісність оболонок твєлів термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні «хвильового» реактора.

Ключові слова: адаптація, аварія, «хвильовий» реактор, термоакустична нестійкість.

V. I. Skalozubov¹, S. I. Klevtsov², S. I. Kosenko³, V. Yu. Kochnyeva¹

¹Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine

²NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”, Peremohy prosp., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

³Odessa National Polytechnic University, Shevchenko boulevard, 1, Odessa, 65044, Ukraine

METHOD FOR ADAPTATION OF INITIAL CONDITIONS OF THERMOACOUSTIC COOLANT INSTABILITY IN «WAVE» REACTOR CORE

The paper proposes a method for adaptation of start conditions of thermoacoustic coolant instability in reactors with quasi-stationary and wave energy release. The adaptation criterion is an analysis of ratio of quasi-stationary and wave energy release power in case of identical practical design and technical characteristics and external thermal hydrodynamic conditions. When adaptation conditions are met, it is not needed to analyse the possibility of initiating of thermoacoustic coolant instability and its effect on fuel cladding integrity in «wave» reactor core.

Keywords: adaptation, accident, «wave» reactor, thermoacoustic instability.

REFERENCES

1. *Scientific and Technical Basics of Arrangements to Improve A Safety of NPPs with WWER* : monograph / V. I. Skalozubov, A. A. Kliuchnykov, Yu. A. Komarov, A. V. Shavlakov. – Chernobyl: Institut problem bezpeky AES NAN Ukraine (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants), 2010. – 200 p. (Rus)
2. *Feoktistov L. P. Safety: the Key to Revitalization of Nuclear Power* // Uspekhi Fizicheskikh Nauk (Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)). – 1993. – Т. 163, № 8. – P. 89 – 102. (Rus)
3. *Rusov V. D. Sharpening Modes in Uranium-Plutonium Fissile Medium of Engineering Nuclear Reactors and Georeactor* / V. D. Rusov, V. A. Tarasov, S. A. Chernenchenko // Voprosy Atomnoy Nauki i Tehniki (Problems of Atomic Science and Technology). – 2011. – № 2(97). – P. 112 – 121. – (Series «Radiation Damages Physics and Radiative Study of Materials»). (Rus)

Надійшла 23.12.2014

Received 23.12.2014