

УДК 621.384.039.57 (075.8)

## Исследование акустических колебаний в реакторных установках и перспективы их использования для обоснования остаточного ресурса

К. Н. Проскуряков, М. В. Запорожец

### Сведения об авторах

**Проскуряков Константин Николаевич** — доктор технических наук, профессор кафедры Атомных электрических станций МЭИ, e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru

**Запорожец Максим Владимирович** — аспирант кафедры Атомных электрических станций МЭИ

Приведены результаты исследований, представляющих собой научную основу моделирования и расчета акустических колебаний теплоносителя в реакторных установках АЭС как в эксплуатационных, так и в аварийных режимах.

Показано, что наиболее важные результаты были опубликованы значительно раньше, чем за рубежом, и могли бы быть использованы для предотвращения аварий на Чернобыльской и «Три-Майл Айленд-2» АЭС.

Компенсатор объема на АЭС с ВВЭР и PWR представляет собой резонатор Гельмгольца, который может многократно усилить воздействующие на него извне периодические колебания, как и корпусной кипящий реактор типа BWR на АЭС «Фукусима Дайичи-1» в Японии. Сделан вывод, что разработанные методы могут быть применены для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при сейсмических и ударных воздействиях.

Для предотвращения виброакустических резонансов на АЭС, а также с целью повышения надежности и срока службы оборудования предложены гасители акустических колебаний типа резонатора Гельмгольца, характеристики которого определяются с использованием современных компьютерных технологий.

Ключевые слова: автоколебания, вибрации, резонанс, акустические параметры, кризис теплообмена, конечно-элементное моделирование, резонатор Гельмгольца.

---

## A study of acoustic oscillations in reactor plants and prospects of their use for substantiating the plant's residual life

K. N. Proskuryakov, M. V. Zaporozhets

### Information about authors

**Proskuryakov Konstantin N.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Nuclear Power Plants Dept., MPEI, e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru

**Zaporozhets Maksim V.** — Ph.D.-student of Nuclear Power Plants Dept., MPEI

The article presents the results of investigations serving as a scientific basis for modeling and calculation of acoustic vibrations of the coolant in the NPP reactor plants in both normal and emergency modes of their operation.

It is shown that the most important results had been published in our country much earlier than those appeared abroad of Russia and could be used to prevent the catastrophic accidents at the Chernobyl and Three Mile Island-2 NPPs.

The pressurizer used at VVER- and PWR-based NPPs behaves as the Helmholtz resonator, a physical device able to greatly amplify periodic oscillations applied to it from outside. (It should be noted that so is the vessel-type boiling water reactor (BWR) at the Fukushima Daiichi-1 NPP in Japan). A conclusion is drawn that the developed methods can be used to predict and prevent the occurrence of vibration-acoustic resonances in the NPP equipment in normal and emergency modes of its operation, as well as under the conditions of seismic and shock impacts.

To prevent the occurrence of vibration-acoustic resonances at NPPs and in order to achieve better reliability and longer service life of their equipment, it is proposed to use Helmholtz resonator-type acoustic vibration absorbers, the characteristics of which are determined using modern computer technologies.

Key words: self-oscillation, vibration, resonance, acoustic parameters, burnout, finite element modeling, Helmholtz resonator.

В МЭИ с середины 1960-х гг. исследуется теплогидравлическое возбуждение акустических колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ и методы его идентификации. В [1] обоснована возможность возникновения теплогидравлической неустойчивости (автоколебаний) в одиночном парогенерирующем канале и ее влияние на уменьшение величины критического теплового потока при увеличении длины испарительного участка. Содержание работы [1] нашло отражение в [2], где были систематизированы публикации, содержащие новые знания в вопросах изучения кризисов кипения и критических тепловых потоков.

В [1] обоснована физическая природа возникновения автоколебаний скорости потока в одиночном парогенерирующем канале, частотой которых является собственная частота колебаний содержащейся в нем текучей среды. Показано, что значительное уменьшение величины критического теплового потока происходит при большом паросодержании и обусловлено увеличением длины испарительного участка.

Именно этот эффект, как установлено в [3], привел к разрушению реактора на Чернобыльской АЭС. Продолжающееся снижение расхода воды через ТК реактора в условиях роста мощности привело к интенсивному парообразованию, а затем к кризису теплоотдачи, разогреву топлива, его разрушению, бурному вскипанию теплоносителя, в который попали частицы топлива, резкому повышению давления в ТК, их распаду и тепловому взрыву, разрушившему реактор и часть конструкций здания и приведшему к выбросу активных продуктов деления во внешнюю среду.

В [4, 5] впервые показано, что если при увеличении скорости двухфазного потока сила трения уменьшается, то это приводит к самовозбуждающимся колебаниям давления. Такие условия возникают при работе парогенерирующего канала в диапазоне массовых расходов, соответствующих падающему участку гидродинамической характеристики. Этот феномен следует учитывать в качестве главного фактора, вызывающего многократное увеличение динамических нагрузок на оборудование при протекании максимальной проектной аварии (МПА) на АЭС с ВВЭР.

В более поздних публикациях [6 — 8] отмечается влияние этого эффекта на колебания трубопроводов и надежность парогенераторов.

В МЭИ с середины 1970-х гг. изучаются теплогидравлические источники возмущений и методы их идентификации. В частности, в [9] впервые показано, что частота пульсаций давления теплоносителя в аварийном режиме при наличии кипения в активной зоне реактора в несколько раз меньше частоты, соответствующей режиму нормальной эксплуатации. Это изменение в спектре пульсаций давления является диагностическим признаком кипения в активной зоне реакторов типа ВВЭР и PWR. Авария на ТМІ произошла

после появления данной информации. Американские исследователи отмечали, что если бы в первом контуре был установлен датчик пульсаций давления теплоносителя, позволявший фиксировать изменение спектра пульсаций давления, то персонал АЭС ТМІ своевременно заметил бы начало кипения в активной зоне и принял бы правильные решения для предотвращения одной из самых тяжелых аварий на АЭС. В этой же работе предложена акустическая модель компенсатора давления, используемого на АЭС с ВВЭР (и их зарубежных аналогах — PWR). Она используется для расчета частоты акустических стоячих волн, генерируемых компенсатором давления [10 — 12].

В конце 1970-х гг. переоборудование промышленного котла № 3 ТЭЦ МЭИ под двухконтурную паропроизводящую установку, адекватно воспроизводящую теплогидравлические процессы в одной петле двухконтурной АЭС с реактором ВВЭР-440, предоставило уникальную возможность исследования виброакустических процессов, протекающих в контурах теплоносителя и рабочего тела. В рамках межвузовского сотрудничества между МЭИ и Высшей инженерной школой ЦИТТАУ в 1983 — 1984 гг. объединенная научная группа кафедры под руководством К.Н. Проскуракова и профессора Высшей инженерной школы ЦИТТАУ А. Штурма впервые провела крупномасштабные виброакустические измерения и проанализировала полученные результаты. Это позволило завершить создание на кафедре научной базы виброакустической диагностики АЭС [13] и экспериментально подтвердить правомерность применения разработанных методов моделирования колебаний теплоносителя [14] в контурах АЭС с ВВЭР.

Важным этапом в развитии методов анализа акустических систем теплоносителя в АЭС стало обоснование правомерности электроакустических аналогий для одномерного пульсирующего потока двухфазной среды, как с однозначной, так и многозначной гидродинамическими характеристиками [15]. С учетом принятого допущения, что звуковое давление  $\Delta p$  во всех точках по длине канала является только функцией времени, уравнения неразрывности и сохранения количества движения одномерного пульсирующего потока двухфазной среды могут быть представлены в виде системы линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial x} + C_a \frac{\partial \Delta p}{\partial t} + G_a \Delta p = 0; \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial x} + m \frac{\partial W}{\partial t} + R_a W = 0. \end{cases}$$

Здесь  $\Delta p$  — звуковое давление (давление, дополнительно возникающее при прохождении звуковой волны в жидкости, в паре или в пароводяной среде). Распространяясь в текучей среде, звуковая волна образует сгущения и разрежения, которые создают добавочные изменения давления по отношению к среднему стати-

ческому давлению  $P$ .  $W$  — объемный расход теплоносителя в трубе;  $L$ ,  $S$  — длина и поперечное сечение трубы;  $C = (L.S)/(k.p) \approx (L.S)/(\rho a^2)$  — акустическая податливость среды;  $R_a = \zeta \rho WL/d$  — активное сопротивление потока среды;  $G_a = (1/k)(W.L)/p$  — волновая проводимость среды;  $m = \rho L/S$  — акустическая масса;  $\rho$  — плотность двухфазной среды;  $\xi$  — суммарный коэффициент потерь энергии.

Данные уравнения известны в литературе под названием телеграфных уравнений [16]. Решение системы дает функциональные зависимости звукового давления и объемного расхода сжимаемой среды в трубопроводе с распределенными постоянными акустической податливостью среды, акустической массы, волновой проводимостью среды, активным сопротивлением потока среды от переменных  $x$  (расстояние по оси трубопровода) и  $t$  (время).

Для расчета собственной частоты колебаний давления теплоносителя в парогенерирующем канале в [15] получено следующее соотношение:

$$f = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_{\text{дф}}}{\rho_{\text{в}}}} (L_{\text{в}} L_{\text{дф}})^{-0,5},$$

где  $\rho_{\text{дф}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  — плотности теплоносителя в двухфазной и однофазной областях;  $L_{\text{в}}$ ,  $L_{\text{дф}}$  — длины участка с однофазным и двухфазным теплоносителями;  $a$  — скорость звука;  $f$  — СЧКДТ.

Разработанные в [15] методы расчета акустических параметров теплоносителя в парообразующих каналах активной зоны ядерного реактора и в акустических системах АЭС с однофазной и двухфазной средами позволяют учитывать влияние на скорость звука, а, следовательно, и на частоту: АСВ, давления, температуры, паросодержания и скоростей движения фаз в потоке двухфазной среды. Эти методы достаточно просты и эффективны при определении акустических свойств сложных систем с несколькими степенями свободы, дают результаты с точностью, достаточной для решения практических задач [16]: определения частот АСВ, добротности акустических контуров теплоносителя, полосы пропускания, волнового сопротивления и пр. Они могут быть применены для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при сейсмических и ударных воздействиях.

В [16] показано, что расчетные значения частот АСВ, полученные при использовании метода электроакустических аналогий, разработанного для анализа акустических систем с двухфазной текучей средой [15], совпадают с результатами измерений колебаний давления теплоносителя в парообразующих каналах активной зоны ядерного реактора. Экспериментальное доказательство, приведенное в [16], правомерности использования метода электроакустических аналогий, для расчета частот АСВ в кипящих реакторах в на-

стоящее время приобретает особое значение для повышения конкурентоспособности и безопасности российских АЭС. Прогнозирование частот АСВ и управление ими на различных временных этапах аварии с кипением теплоносителя в активной зоне позволит оптимизировать системы аварийного охлаждения реактора и снизить капитальные затраты на сооружение АЭС.

Разработанные методы и алгоритмы расчета АСВ имеют ясный физический смысл, позволяют идентифицировать источники генерации АСВ по результатам измерений вибраций оборудования и пульсаций давления теплоносителя на АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах.

Следует отметить, что повышенные вибрации и соударения ТВС и стенок канала наблюдались в процессе эксплуатации реакторов ЧАЭС. Персоналом станции был зафиксирован шум от соударения металлических элементов активной зоны в ряде эксплуатационных режимов. В связи с необходимостью диагностирования условий возникновения такого рода соударений и их предотвращения на основе результатов, полученных в работах [1, 4, 5, 15], по инициативе ЧАЭС в 1985 г. был заключен хоздоговор между МЭИ и ВНИИАЭС «Исследования влияния потока теплоносителя на виброакустические характеристики технологических каналов реактора РБМК для разработки систем диагностики методами неразрушающего контроля основного и вспомогательного оборудования АЭС». Научными руководителями данной работы от кафедры АЭС был К.Н. Проскуряков, а от кафедры АСУТП — В.С. Мухин. Работы по измерению вибраций, пульсаций и всего относящегося к проблеме были намечены на май 1986 г.

Они послужили основанием того, что старший автор настоящей статьи в мае 1986 г. был привлечен в качестве эксперта к работе Правительственной комиссии по расследованию причин чернобыльской аварии. В представленном им экспертном заключении были указаны следующие вероятные причины аварии: недопустимый рост паросодержания в технологических каналах привел к развитию автоколебаний теплоносителя, кризису теплообмена [1] и, весьма вероятно, возникновению виброакустического резонанса с колебаниями ТВС. В заключении было указано так же на недопустимое отставание в области технической диагностики АЭС от Венгрии и ГДР. В качестве неотложных мер было предложено сформировать службы технической диагностики на всех АЭС, а в МЭИ создать новую специализацию «Техническая диагностика АЭС» для подготовки кадров и материальные условия для форсирования исследований в области шумовой диагностики оборудования и технологических процессов АЭС.

Согласно поручению Совета министров СССР, ПП-8768 от 18.05.86 первым лицам министерств и ведомств, работающих по атомной тематике, эти предложения были рассмотрены. Особенно большое значение имел ответ министра среднего машиностроения СССР Е.П. Славского, в котором было сказано, что сценарий

аварии, который предполагает К.Н. Проскуряков, вполне вероятен, и следует одобрить в целом сделанные предложения, оказать необходимую поддержку МЭИ для подготовки кадров и форсирования исследований в области шумовой диагностики оборудования и технологических процессов АЭС.

Госатомнадзором СССР, с учетом консультаций со специалистами ИАЭ им. И.В. Курчатова и НИИ энерготехники, в Совет Министров было доложено:

Предложение т. Проскурякова К.Н. к Межведомственному техническому совету по АЭС по уточнению существующей концепции о максимальной проектной аварии (МПА) является правильным. Предполагаемое автором исходное событие и путь развития аварии потенциально возможны и должны быть проанализированы Научным руководителем, Главным конструктором и Генеральным проектировщиком АЭС.

Справедливо указание на необходимость ускорения внедрения системы непрерывной диагностики эксплуатируемого оборудования с использованием, в частности, контроля состояния теплоносителя.

Следует форсировать работы по выполнению предложений к Минприбору и Минэнерго по оснащению АЭС средствами виброакустической диагностики.

Госатомнадзор поддерживает рекомендации т. Проскурякова К.Н. Минвузу СССР о необходимости создания специализации «Диагностика технического состояния АЭС и обслуживание систем надежности и безопасности».

К сожалению, осуществлению этих рекомендаций помешала происшедшая в стране перестройка. Финансирование научной группы кафедры АЭС, которая работала в новом научном направлении по созданию методов диагностики, прогнозирования и предотвращения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС было прекращено.

Фундаментальные исследования, проведенные в МЭИ, показывают, что в оборудовании АЭС присутствуют скрытые закономерности и динамические процессы, которые проявляются в виде автоколебаний, параметрических резонансов, резонансных взаимодействий колебаний теплоносителя с колебаниями оборудования. Во многих случаях благодаря существованию этих физических явлений и процессов происходят внезапные отказы оборудования и аварии. Анализ показывает, что опередившие в свое время текущие потребности ядерной энергетики исследования, проведенные в МЭИ, в настоящее время имеют актуальное значение. Отметим, что рекомендации по раннему обнаружению вскипания теплоносителя в активной зоне реакторов типа WWER и PWR были опубликованы до аварии на АЭС «Три-Майл Айленд-2» (США) [9]. Знание и использование этих рекомендаций могло бы предотвратить ошибочные действия оперативного персонала, последствия которых привели к одной из тяжелейших в мировой практике эксплуатации АЭС аварий.

Об актуальности в настоящее время этого направления в решении практических задач свидетельствует то, что в базу данных «WorldWideScience.org», разработанную департаментом США и Управлением по энергетической информации, к 2015 г. включено более 10 публикаций кафедры АЭС.

И, наконец, последняя тяжелая авария на «Фукусиме Дайичи-1». По официальным данным, авария произошла из-за того, что дизель-генераторы, обеспечивающие аварийное охлаждение активной зоны, пострадали в результате цунами. Однако, в ряде публикаций и бесед с персоналом станции, попавших в Интернет, содержится информация о том, что наблюдались течи теплоносителя, которые возникли в результате землетрясения еще до прихода цунами. Скорее всего, резонансное усиление сейсмических воздействий произошло при совпадении частот сейсмических волн с частотой акустических колебаний в кипящем реакторе, который, как и компенсатор давления [9, 11], является резонатором Гельмгольца.

В настоящее время прогнозирование возникновения виброакустических резонансов при тяжелых авариях на АЭС является неразрешимой задачей, поскольку планировать и осуществлять на энергоблоке аварийную ситуацию для измерения вибрации оборудования неприемлемо. В этих условиях использование разработанных и апробированных на АЭС моделей и алгоритмов расчета частот АСВ для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов при авариях с течами теплоносителя и при ударных воздействиях и землетрясениях может быть своевременным и полезным.

Актуальной задачей является вычисление частот АСВ теплоносителя в стационарных и переходных режимах. Известно, что экспериментальные методы исследований, проводимых в условиях лабораторий и АЭС, не во всех случаях в полной мере воспроизводят особенности взаимодействия АЭС с сейсмическими нагрузками, ввиду чего прогнозируемые результаты могут существенно отличаться от действительных. Одна из главных причин такого несоответствия — отсутствие результатов экспериментальных исследований на натурном объекте, которые позволили бы обосновать сейсмостойкость АЭС с учетом их особенностей, главными из которых являются нейтронно-физические и теплогидравлические процессы в условиях наложения на них внешних динамических сил, одновременно воздействующих на все строительные и технологические системы.

Определяющее значение для обеспечения сейсмостойкости объектов ядерной энергетики имеет многолетний российский опыт расчетно-экспериментального обоснования сейсмостойкости АЭС [17].

В одной из последних работ [18] приведено обоснование сейсмической безопасности АЭС с использованием метода динамических испытаний, разработанного в ОАО ВНИИАМ, запатентованного и одобренного МАГАТЭ.

Однако до настоящего времени проведение обоснования сейсмической безопасности с использованием динамических испытаний не принимается как обязательное для всех российских АЭС и данные работы проводятся лишь в инициативном порядке при наличии поддержки со стороны руководства АЭС.

В [19] описана комплексная программа по всестороннему изучению и анализу вибронпряженного состояния оборудования, его внутрикорпусных устройств и трубопроводов АЭС. Программа включает в себя измерения вибронпряженного состояния оборудования и трубопроводов, определение запаса прочности в стационарном состоянии и переходных режимах.

Следует подчеркнуть, что в материалах [17 — 19] не рассматривается возможность усиления вибраций оборудования системы охлаждения реактора при возникновении виброакустических резонансов, в результате чего при обосновании сейсмостойкости АЭС не учитывается возможность превышения проектного уровня вибраций оборудования систем теплоотвода от реактора при воздействии внешних периодических нагрузок, вызванных землетрясением.

Игнорирование возможности возникновения виброакустических резонансов с сейсмическими волнами в оборудовании АЭС объясняется отсутствием в российской и зарубежной нормативной документации требований проведения количественного определения собственных частот колебаний давления теплоносителя в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах и, следовательно, отсутствием требования предотвращения резонансного взаимодействия вибраций оборудования АЭС с упругими волнами в теплоносителе.

На кафедре АЭС МЭИ для прогнозирования условий возникновения виброакустических резонансов в оборудовании и их предотвращения применяется междисциплинарный подход с использованием аналитических и полуэмпирических методик, а также современных методов исследования и расчетов с использованием компьютерных технологий [20].

Изначально проводится сбор информации по исследуемой системе: конструкторской и проектной документации, результатов измерений пульсаций давления, виброскорости и виброперемещений в различных режимах работы оборудования, теплофизических параметров. На основании исходной информации определяются и идентифицируются характерные пики измеряемых сигналов, строятся расчетные модели (электроакустическая, гидравлическая в среде Matlab Simulink, механическая в среде Ansys Mechanical).

Благодаря электроакустической модели проводится расчет акустических характеристик теплоносителя и собственных частот пульсаций давления.

Гидравлическая модель в среде Matlab Simulink позволяет найти амплитуды пульсаций давления в различных участках контура при работе насоса. В качестве исходных данных задаются гидродинамические,

гидравлические, теплофизические параметры компонентов первого контура АЭС.

Механическая модель в среде Ansys Mechanical помогает провести модальный анализ системы с учетом ее геометрических характеристик, а также механических свойств материалов. В результате модального анализа определяются собственные частоты и формы колебаний с учетом опор и распределенных нагрузок.

На основании расчетов по созданным моделям выбираются участки контура, на которых необходимо производить отстройку собственных частот пульсаций давления теплоносителя и элементов конструкции.

Далее сопоставляются результаты расчета акустических характеристик теплоносителя, собственных частот пульсаций давления и элементов конструкции с экспериментальными данными. Совпадение расчетных и экспериментальных результатов позволяет идентифицировать причины повышенного уровня вибраций и пульсаций давления.

Один из способов подавления гидродинамического шума (ГДШ) — применение гасителей, которые представляют собой устройства, фильтрующие акустические колебания рабочей среды и рассеивающие их энергию. Согласно [21], наиболее эффективным гасителем является резонатор Гельмгольца, состоящий из сосуда, снабженного горлышком, узким отростком или отверстием, через которое сосуд сообщается с окружающей средой.

При перемещении среды, заполняющей горлышко, в одну и в другую сторону, среда в сосуде испытывает сжатия и разрежения и давление в ней меняется. На открытом же конце горлышка давление все время остается неизменным (атмосферным — для резонатора Гельмгольца в воздухе). Разность давлений на концах горлышка ускоряет массу среды в горлышке. Ввиду узости горлышка скорость движения среды в нем велика по сравнению со скоростью среды внутри сосуда, так что кинетическая энергия сосредоточена в горлышке, несмотря на то, что фактическая масса среды в горлышке много меньше массы среды в сосуде. Упругая же энергия окажется сосредоточенной в среде внутри сосуда.

Таким образом, кинетическая и потенциальная энергия локализуются в разных телах: в среде в горлышке и в среде в сосуде.

При проектировании резонатора важно учитывать воздействие вихревого течения в его тракте. Для чего целесообразно применение методик конечно-элементного моделирования, с использованием которых проводится расчетное обоснование схемы гасителя и оптимальных значений его акустических характеристик. Подобный метод применяет компания Aeva. В [19] отмечается, что при оценке и прогнозировании ресурса нужно учитывать гидродинамические и акустические параметры потока теплоносителя, а также текущее состояние контактов оборудования с его внутрикорпусными устройствами и со строительными

конструкциями. К недостаткам подхода можно отнести привязанность результатов к текущему состоянию, затрудняющему прогнозирование ресурса, а также сложность и затратность проведения оценочных расчетов.

В отличие от указанного подхода авторами предложен альтернативный вариант обеспечения несущей способности конструкции оборудования ядерной установки, предусматривающий предотвращение условий возникновения максимально возможных динамических нагрузок, вызванных виброакустическим резонансом. В качестве наиболее эффективного средства предотвращения виброакустических резонансов возможно использование акустического фильтра частот типа резонатора Гельмгольца. Данное устройство будет обеспечивать подавление акустических колебаний теплоносителя совпадающими с частотами вибраций оборудования вынужденными колебаниями давления, вызванными работой ГЦН или внешними ударными и сейсмическими воздействиями.

**Таким образом,** описаны методы расчета акустических параметров теплоносителя в эксплуатационных и аварийных режимах АЭС, которые могут быть применены для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при сейсмических и ударных воздействиях.

Для исключения виброакустических резонансов на АЭС предложено использовать гасители акустических колебаний типа резонатора Гельмгольца, характеристики которого определяются с использованием современных компьютерных технологий.

## Литература

1. **Проскураков К.Н.** Автоколебания в одиночном парогенерирующем канале // Теплоэнергетика. 1965. № 12. С. 75 — 77.
2. **Tong L.S.** Boiling crisis and critical heat flux. Westinghouse Electric Corporation. Publ. Atomic Energy Commission office of information services, 1972.
3. **Информация** об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. 1986. Т. 61. Вып. 5. С. 301 — 320.
4. **Проскураков К.Н.** Электрическая модель парогенерирующего канала. М.: Труды МЭИ. 1972. Вып. 126.
5. **Проскураков К.Н.** Условие возникновения колебаний в парогенерирующем канале (на нем. яз.) // Кернаэнергия. 1975. Т. I. № 5.
6. **Van Blarcom P.P., Smitt R.D.** Flashing fluids at low pressures // Proc. ISA Conf. AndExhib. Chicago, 1979. P. 391 — 440.
7. **Овчинников В.Ф., Смирнов Л.В.** Колебания трубопроводов с нестационарным потоком жидкости // Вопросы атомной науки и техники. Физика и техника ядерных реакторов. 1981. Вып. 2. С. 3—11.
8. **Вереземский В.Г., Смирнов Л.В., Овчинников В.Ф., Яскеляин А.В.** Влияние режимов работы контуров циркуляции АЭС с ВВЭР-1000 на надежность парогенераторов ПГВ-1000 // Теплоэнергетика. 1998. № 5. С. 36 — 41.
9. **Проскураков К.Н. и др.** Теоретическое определение частот собственных колебаний теплоносителя в первом контуре АЭС // Труды МЭИ. 1979. Вып. 407. С. 87 — 92.
10. **Mullens L. A., Thie J. A.** Understanding Pressure Dynamic Phenomena in PWRs for Surveillance, Diagnostic Application // Proc. 5<sup>th</sup> Power Plant Dynamics, Controls, Testing Symp. University of Tennessee. Knoxville, 1983.
11. **Por G., Izsak E., Valka S.** Some Results of Noise Measurements in PWR NPP // Progress in Nuclear Energy. 1985. N 15. P. 387.
12. **Nagy I., Katona T.** Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs // Progress in Nuclear Energy. 1985. N 15. P. 651 — 659.
13. **Проскураков К.Н., Устинов А.К.** Создание научной базы акустической диагностики теплогидравлических процессов в оборудовании АЭС // Вестник МЭИ. 1996. № 3. С. 51 — 61.
14. **Proskuryakov K.N.** Early Boiling Detection Method OF Pre-or Post-Accident Situation on WWER and RBMK // Proc. SMORN VII. Avignon (France), 1995. V. 1. P. 426 — 424.
15. **Проскураков К.Н.** Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ. М.: МЭИ, 1984.
16. **Фомичев М.С.** Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1989.
17. **Казновский П.С. и др.** Анализ современных российских и зарубежных подходов к оценке сейсмостойкости оборудования АЭС в условиях эксплуатации // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Подольск, 2013.
18. **Рясный С.И.** Натурное экспериментальное обоснование и обеспечение эксплуатации АЭС // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. Подольск, 2011.
19. **ANP-10306NP.** Comprehensive vibration assessment program for U.S. EPR reactor internals. Tech. report, 2013.
20. **Гаспаров М.С., Иголкин А.А., Кох А.И., Сафин А.И.** Акустика пневмо- и гидромашин: электрон. учеб. пособие. Самара: Самарский гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2012.
21. **Lari Kela.** Attenuating amplitude of pulsating pressure in a low-pressure hydraulic system by an adaptive Helmholtz resonator. University of Oulu (Finland): Acta Univ. Oul., 2010. С. 354.

*Статья поступила в редакцию 01.07.2016*