

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ОБОРУДОВАНИЕ ВТОРОГО КОНТУРА АЭС ПРИ УДАРНЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**Д.В. Кузнецов, В.М. Кормилицын, К.Н. Проскуряков**

*ГОУВПО Московский энергетический институт (технический университет)*



Представлены результаты расчета параметров акустических колебаний в системе регенеративного подогрева низкого давления АЭС с реактором ВВЭР-1000. Показано, что спектральный состав акустических колебаний зависит от компоновки оборудования второго контура, его геометрических размеров и режима эксплуатации. Приведены расчетные оценки частот собственных колебаний давления рабочего тела в оборудовании второго контура. Разработанные методы и алгоритмы расчетов предназначены для выявления и предотвращения условий возникновения резонансов вибраций в элементах оборудования второго контура с акустическими колебаниями в рабочем теле как в условиях эксплуатации, так и на стадии проектирования второго контура АЭС с ВВЭР-1000. Для решения поставленной задачи проведено исследование зависимости полосы пропускания от режима эксплуатации.

**Ключевые слова:** скорость звука, добротность, полоса пропускания, коэффициент затухания, видеокадр, парогенератор, паропровод, частота, колебания, резонанс, рабочее тело, стопорные клапаны, алгоритм динамические нагрузки, удар.  
**Key words:** sound velocity, quality factor, pass-band, attenuation factor, video shot, steam generator, steam line, frequency, fluctuations, resonance, working body, lock valves, soft ware, dynamic loading, shock.

Повышение уровня безопасности и продление сроков эксплуатации действующих энергоблоков АЭС являются актуальными задачами. Уменьшение пульсаций давления и скорости рабочего тела – одно из необходимых условий предотвращения или снижения вибраций оборудования. В настоящее время измерению и анализу акустических колебаний теплоносителя в водоохлаждаемых ядерных реакторах посвящено много работ, поскольку эти колебания оказывают динамическое воздействие на основное оборудование, от которого в первую очередь зависит безопасность АЭС. Одной из главных задач в рамках решения этой проблемы является выявление и предотвращение условий эксплуатации, приводящих к резонансному взаимодействию акустических колебаний теплоносителя и вибраций

---

© Д.В. Кузнецов, В.М. Кормилицын, К.Н. Проскуряков, 2010

оборудования [1]. Однако в настоящее время процессы взаимодействия между вибрациями оборудования и колебаниями теплоносителя на АЭС исследованы недостаточно.

Существенно меньшее внимание уделено взаимодействию акустических колебаний с оборудованием второго контура АЭС.

В работе представлены результаты моделирования акустических колебаний в системе регенеративного подогрева низкого давления. Показано, что спектральный состав акустических колебаний зависит от компоновки оборудования второго контура, его геометрических размеров и режима эксплуатации. Приведены расчетные оценки частот собственных колебаний давления рабочего тела (СЧКДРТ) в оборудовании второго контура. Достоверность полученных результатов определяется использованием известных методов моделирования акустических колебаний. Эти методы расчета подтверждены результатами измерений пульсаций давления в оборудовании первого контура АЭС с ВВЭР и PWR. Разработанные методы и алгоритмы расчетов предназначены для выявления и предотвращения условий возникновения резонансов колебаний элементов оборудования второго контура с СЧКДРТ как в условиях эксплуатации, так и на стадии проектирования второго контура АЭС с ВВЭР-1000. Для решения поставленной задачи проведено исследование зависимости ПП от режима эксплуатации. Результаты расчетов позволяют определить область резонансного взаимодействия СЧКДРТ с вибрациями оборудования и его элементов.

Разработанные методы и алгоритмы расчетов могут использоваться для количественных оценок СЧКДРТ, добротности  $Q$  и полосы пропускания (ПП) для существующих и проектируемых установок.

Оценки  $Q$  и ПП акустических колебаний в потоках рабочего тела ранее не проводились.

Для расчета СЧКДРТ во втором контуре АЭС использованы упрощенные акустические модели всего контура и отдельных его частей [1].

Режимы резонанса в акустических контурах возникают когда колебания объемного расхода совпадают по фазе с колебанием пульсации давления рабочего тела [2]. Такой режим возможен, если акустическая податливость и акустическая масса рабочего тела включены в акустическом контуре последовательно.

Для расчета акустической податливости  $C_a$  и акустической массы  $m$  используются формулы

$$C = \frac{s \cdot l}{\rho \cdot a^2}; \quad (1)$$

$$m = \frac{\rho \cdot l}{s}, \quad (2)$$

где  $s$  – площадь сечения;  $l$  – длина участка;  $\rho$  – плотность;  $a$  – скорость звука.

Расчет добротности колебательного контура рабочего тела  $Q$  производится по следующей формуле:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{m}{C}}}{\frac{\Delta P}{W_{об}}} = \frac{\rho \cdot a \cdot W_{об}}{S \cdot \Delta P}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность рабочего тела, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  – скорость звука в потоке рабочего тела, м/с;  $W_{об}$  – объемная скорость рабочего тела, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – площадь поперечного сечения участка, м<sup>2</sup>;  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление, Па.

По определению ПП представляет собой диапазон частот между нижней границей частоты акустических колебаний  $f_1$  и верхней  $f_2$ . При колебаниях с частотой, равной  $f_1$  и  $f_2$ , отношение амплитуды колебания объемного расхода рабочего тела к максимальной амплитуде равно 0,707 [1]. Расчет ПП производится по формуле

$$\frac{1}{Q} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – круговая частота.

Добротность  $Q$  равна отношению характеристического акустического сопротивления  $Z$  к акустическому сопротивлению  $R$  для резонансной частоты:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{m}{c}}}{R} = \frac{Z}{R} = Q. \quad (5)$$

Под характеристическим акустическим сопротивлением понимают сопротивление акустической податливости или акустической массы при резонансе:

$$Z = m \cdot \omega_0 = \frac{1}{c \cdot \omega_0} = \sqrt{\frac{m}{c}} = R_d, \quad (6)$$

где круговая частота  $\omega_0$  рассчитывается по формуле

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m \cdot c}}. \quad (7)$$

Коэффициент затухания рассчитывается по формуле [2]

$$\delta = R / (2 \cdot Z), \quad (8)$$

где  $R$  – акустическое сопротивление

$$R = \Delta P / W_v, \quad (9)$$

здесь  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление в контуре.

Объемный расход находим по формуле

$$W_v = W_m / \rho. \quad (10)$$

Для вычисления коэффициента поглощения упругих волн а удобно использовать соотношение [2]

$$Q = \frac{\omega}{2 \cdot a \cdot \alpha}. \quad (11)$$

Коэффициент поглощения упругих волн  $\alpha$  позволяет получить закон убывания амплитуды давления в виде [2]

$$\Delta P = \Delta P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (12)$$

и оценить затухание импульсных возмущений в точке, расположенной на расстоянии  $x$  от источника возмущения до точки измерения;  $\alpha$  – коэффициент поглощения упругих волн.

Известны следующие потенциальные механизмы старения металла оборудования АЭС:

- термическое старение;
- радиационное охрупчивание;
- циклическая усталость;
- коррозия.

Циклическая усталость является основным доминирующим механизмом старения для большинства узлов и элементов оборудования. В частности это касается парогенераторов (ПГ) и главных паропроводов. Поэтому при оценке ресурса

оборудования основными являются расчеты на циклическую прочность.

Эксплуатационные вибрации главных паропроводов – обычное явление на АЭС с ВВЭР-1000 серии В-320, которое наблюдается с самого начала строительства данных энергоблоков [3]. После пуска головного энергоблока ВВЭР-1000 с серийной реакторной установкой (РУ) В-320 было принято решение о реконструкции паропроводов в помещении А-280 из-за повышенного шума и вибрации. Уровень эксплуатационных вибраций и, особенно, шум после проведенной реконструкции снизились, однако существенный уровень эксплуатационных вибраций в помещении А-820 сохранился.

Проблемы с эксплуатационными вибрациями паропроводов при длительной эксплуатации на некоторых АЭС привели к повторной модернизации паропроводов. Работы по реконструкции выполнялись по двум направлениям:

- установка амортизаторов (Балаковская АЭС и АЭС «Темелин»);
- изменение геометрии подводящих трубопроводов к предохранительным арматурам (Хмельницкая АЭС и АЭС «Темелин»).

В результате анализа проведенных работ применение амортизаторов для снижения уровня вибраций было признано неэффективным.

Натурными измерениями было показано, что источником эксплуатационных вибраций являются пульсации давления в паропроводах.

СЧКДРТ могут резонировать с собственной частотой колебаний оборудования (вибраций) или находиться в области их резонансного взаимодействия, т.е. в полосе пропускания (ПП). Это приводит к значительному увеличению амплитуд колебаний давления рабочего тела, росту уровня вибраций оборудования и воз-

никновению в нем высокоцикловых нагрузок, вызывающих усталость металла.

Уменьшение амплитуд пульсаций давления и скорости рабочего тела является одним из необходимых условий предотвращения или уменьшения вибраций. Ниже приведены результаты расчетов основных характеристик собственных колебаний давления рабочего тела, воздействующих на трубчатки ПГ и ПНД. На рисунке 1 показаны ПГ и присоединенный к нему паропровод.

Расчет акустических характеристик рабочего тела для ПГ и трубопроводов свежего пара произведен при нескольких давлениях (от 5.9 до 6.6 МПа).

При эффективной работе сепарационных устройств и номинальном уровне влажности за парогенератором не должна превышать 0,2% (степень сухости  $x = 0,998$ ). При движении пара по паропроводу его влажность увеличивается. Это происходит из-за неизбежных тепловых потерь и, как следствие, уменьшения температуры пара. При проведенных ОКБ «Гидропресс» на ЗАЭС испытаниях установлено увеличение



Рис. 1. Парогенератор и паропровод

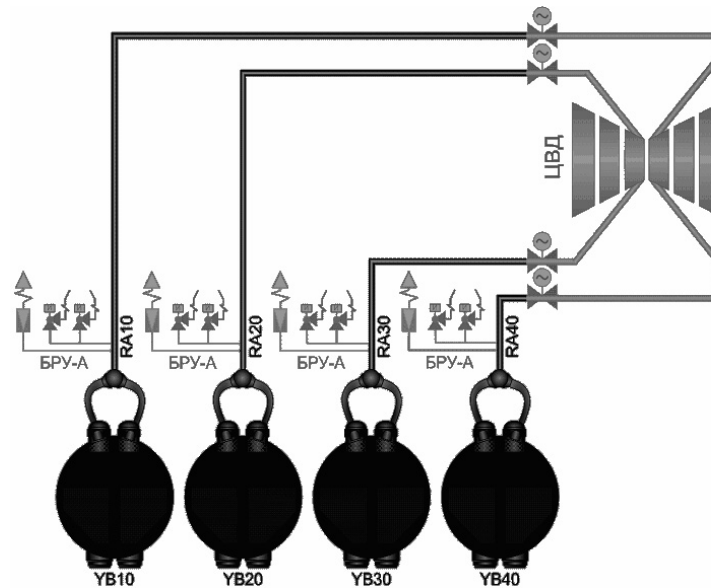


Рис. 2. Схема расчетного участка парогенераторы-стопорные клапаны турбины

влажности на 0,15–0,2% по длине паропровода [4]. Степень сухости в паропроводах при расчете принята равной  $x = 0,997$ .

При расчете акустических характеристик весь объем ПГ разбивается на три участка (рис. 1): 1 – жидкая фаза; 2 – пароводяная смесь; 3 – насыщенный пар.

Для расчета СЧКДРТ в оборудовании, добротности  $Q$  и полосы пропускания ( $\omega_2 - \omega_1$ ) использованы акустические модели контура рабочего тела [1]. Для расчета акустической податливости  $C$  акустической массы  $m$  применительно к части второго контура, включающей в себя объем парогенератора, паропроводы, до стопорных клапанов турбины, используются формулы (1) и (2).

Система паропроводов свежего пара АЭС с ВВЭР-1000 (рис. 2) состоит из четырех ниток  $\varnothing 630 \times 25$ , выполненных из стали 20; предназначена для транспортировки насыщенного пара от четырех парогенераторов к ЦВД турбины. На каждом из четырех трубопроводов выполнены отводы  $\varnothing 426 \times 24$  для установки предохранительных клапанов и БРУ-А. После БРУ-А на каждом трубопроводе установлены БЗОК. Все устройства, расположенные в пределах обстройки РО (предохранительные клапаны, БРУ-А, отсечные и обратные клапаны), являются элементами системы безопасности и не несут активных функций в нормальных режимах, поэтому в расчете не учитываются.

Расчет добротности акустической схемы (рис. 2) проведен с использованием соотношений (3)–(5).

Акустические характеристики системы регенерации низкого давления и рассчитанные значения акустических характеристик системы парогенератор-паропроводы для каждой из четырех петель (ПГ+РА10, ПГ+РА20, ПГ+РА30, ПГ+РА40) приведены в табл.1

Система регенеративного подогрева низкого давления представлена на рис.3.

Расчетная схема содержит четыре последовательно включенных ПНД и соединительные трубопроводы.

Система ПНД рассматривается как подсистема, состоящая из двух трубных досок и поверхности теплообмена (трубной системы). Для ПНД и соединительных трубопроводов проведен расчет скорости звука  $a$  в рабочем теле и СЧКДРТ. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Акустические характеристики системы  
парогенератор-паропроводы до стопорных клапанов**

Участок схемы	Давление $P$ , МПа	Скорость звука $a$ , м/с	СЧКДРТ $f$ , Гц	Добротность $Q$	Полоса пропускания ( $f_2-f_1$ ), Гц	Коэффициент поглощения $\alpha$
YB10+RA10	6.60	454	0.20	0.46	0.44	3.05E-03
	6.50	454	0.20	0.45	0.45	3.10E-03
	6.40	455	0.20	0.45	0.46	3.15E-03
	6.30	455	0.20	0.44	0.46	3.20E-03
	6.20	456	0.20	0.43	0.47	3.25E-03
	6.10	457	0.21	0.43	0.48	3.31E-03
	6.00	457	0.21	0.42	0.49	3.36E-03
	5.90	458	0.21	0.41	0.50	3.42E-03
YB20+RA20	6.60	454	0.25	0.41	0.62	4.28E-03
	6.50	454	0.25	0.40	0.63	4.35E-03
	6.40	455	0.25	0.39	0.64	4.42E-03
	6.30	455	0.25	0.39	0.65	4.49E-03
	6.20	456	0.25	0.38	0.66	4.56E-03
	6.10	457	0.25	0.38	0.67	4.64E-03
	6.00	457	0.25	0.37	0.69	4.72E-03
	5.90	458	0.25	0.36	0.70	4.80E-03
YB30+RA30	6.60	454	0.26	0.40	0.64	4.44E-03
	6.50	454	0.26	0.39	0.65	4.51E-03
	6.40	455	0.26	0.39	0.66	4.58E-03
	6.30	455	0.26	0.38	0.68	4.66E-03
	6.20	456	0.26	0.38	0.69	4.73E-03
	6.10	457	0.26	0.37	0.70	4.81E-03
	6.00	457	0.26	0.36	0.71	4.89E-03
	5.90	458	0.26	0.36	0.73	4.98E-03
YB40+RA40	6.60	454	0.24	0.42	0.58	4.03E-03
	6.50	454	0.24	0.41	0.59	4.09E-03
	6.40	455	0.24	0.40	0.60	4.16E-03
	6.30	455	0.24	0.40	0.61	4.22E-03
	6.20	456	0.24	0.39	0.62	4.29E-03
	6.10	457	0.24	0.38	0.63	4.36E-03
	6.00	457	0.24	0.38	0.65	4.43E-03
	5.90	458	0.24	0.37	0.66	4.51E-03

Рассчитанные значения добротности, полосы пропускания, коэффициента затухания для системы регенерации низкого давления приведены в табл. 3. Эти величины позволяют оценить затухание импульсных возмущений по мере удаления

Компоновка поверхности теплообмена в ПНД

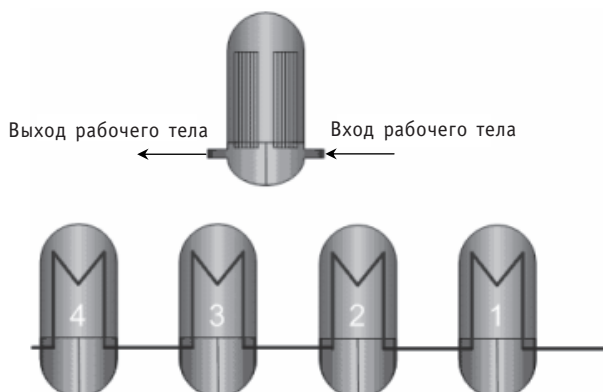


Рис. 3. Расчетные участки 1–4 ПНД системы регенерации низкого давления

Таблица 2

**Скорость звука  $a$  и СЧКДРТ в системе регенерации низкого давления**

Участок схемы	Скорость звука $a$ , м/с	СЧКДРТ $f$ , Гц
Трубопровод до ПНД-1	1515	77.0
ПНД-1	1542	58.2
Трубопровод до ПНД-2	1558	131.8
ПНД-2	1561	57.3
Трубопровод до ПНД-3	1557	129.3
ПНД-3	1544	56.1
Трубопровод до ПНД-4	1525	126.4
ПНД-4	1499	54.7

Таблица 3

**Значения добротности, полосы пропускания, коэффициента затухания для системы регенерации низкого давления (ПНД1 - ПНД4)**

СЧКДРТ $f$ , Гц	Добротность $Q$	Полоса пропускания ( $f_z - f_l$ ), Гц	Коэффициент затухания $\delta$
9.1	11.42	5.0	0.044

от источника возмущений (насосы, запорно-регулирующая и предохранительная арматура).

Для проведения расчетов акустических параметров рабочего тела во втором контуре АЭС в различных режимах эксплуатации необходимо располагать исходными данными по его теплофизическому состоянию в отдельных элементах системы регенерации.

Для определения акустических параметров в режимах работы, отличных от номинального, удобно использовать оболочку системы представления параметров безопасности (СППБ).

В ОАО «ВНИИАЭС» при участии авторов данной работы В.М. Кормилицына и Д.В. Кузнецова разработан обобщенный видеокадр (рис.4) пробной системы СППБ, отрабатываемой в настоящее время с помощью полномасштабного тренажера для первого блока Волгодонской АЭС.



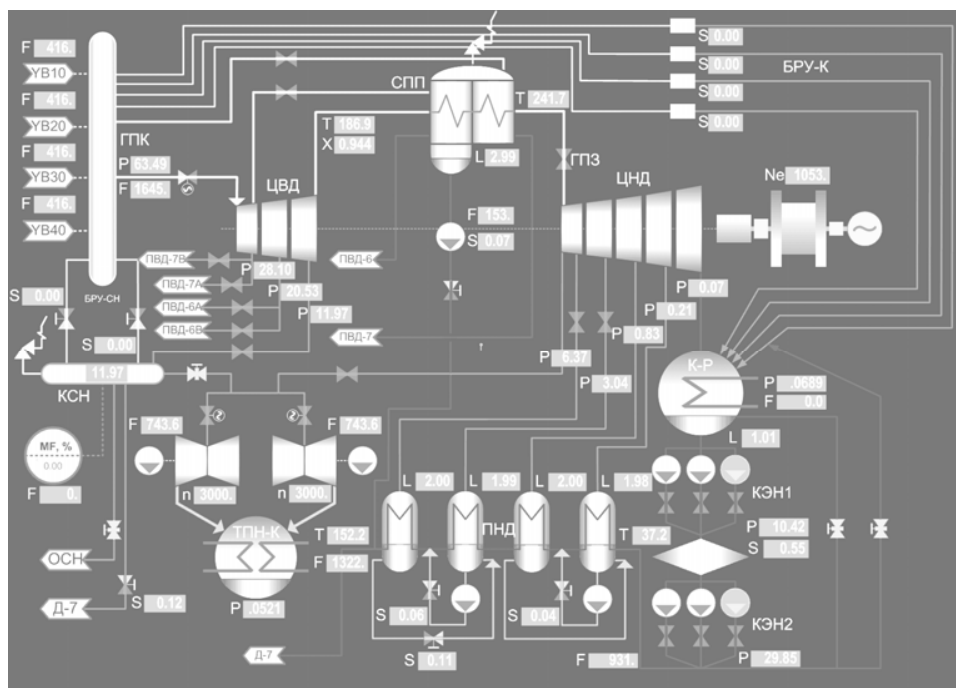


Рис. 4. Обобщенный видеокادر «турбина, ТПН и ПНД»

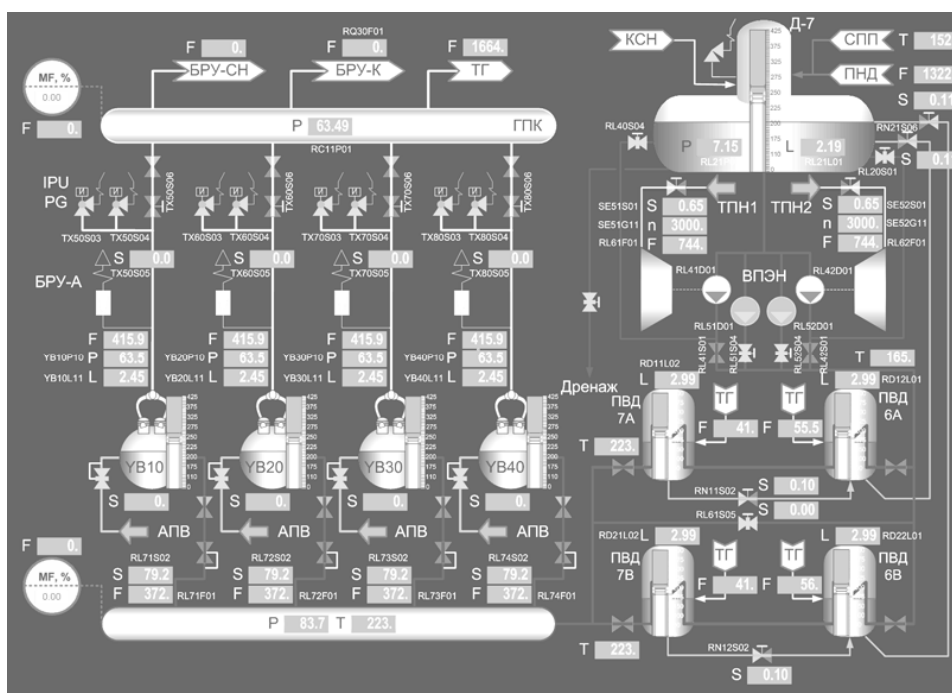


Рис. 5. Обобщенный видеокادر «деаэратор, ПГ, ТПН и ПВД»

Подобный же видеокادر разработан и для системы парогенератор ПГВ-1000-стопорные клапаны турбины (рис. 5). Изображения составлены с подробным описанием элементов схемы и выводимых параметров и полной идентификацией в



соответствии с внутренними шифрами для последующего создания связующих файлов, необходимых для осуществления связи между графической оболочкой и тренажером.

Основными характеристиками, получаемыми в ходе расчета, являются скорость звука, СЧКДРТ, добротность, ППЧ, коэффициент затухания, коэффициент поглощения.

Разработанная методика и алгоритмы расчетов применены впервые.

Разработанные методы и алгоритмы расчета акустических параметров рабочего тела позволяют прогнозировать режимы эксплуатации, в которых происходит рост вибраций в оборудовании, и производить оценку динамических нагрузок на оборудование второго контура АЭС при возникновении ударных и импульсных возмущений по давлению, например, при аварийном срабатывании стопорных клапанов турбины и предохранительной арматуры.

### **Литература**

1. Проскуряков К.Н., Шакирзянов Ф.Н., Каратаев В.В., Новиков К.С., Золотухин И.А. Способ предотвращения резонансных вибраций твэлов и ТВС ВВЭР-1000//Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». Сер. «Обеспечение безопасности АЭС». – 2008. – Вып. 23. – С. 18-25.
2. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978. - 448 с.
3. Кутдюсов Ю.Ф., Будько И.О., Макарецов А.Н., Уланов А.В., Сальников А.А., Жуков А.Г., Беклемышев Е.И., Юнек Л. Снижение вибраций главных паропроводов энергоблока №1 Волгодонской АЭС путем их реконструкции, Тяжелое машиностроение, – Ноябрь 2008.
4. Агеев А.Г., Корольков Б.М., Донц Н.Г. Исследование сепарационных и гидродинамических характеристик парогенераторов серийного блока АЭС с ВВЭР-1000//Электрические станции. – 1990. – № 1. – С. 29-33.

Поступила в редакцию 21.01.2010

*Schools. Nuclear Power Engineering*) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 5 titles.

The various aspects of use combined-cycle technologies on the nuclear power station are considered. The arguments of the combined cycles use necessity from the standpoint of a covering half-peak energy parts of the schedule of electric loading problem decision are resulted at nuclear power station work in fuel structure balance of power change conditions. The results of the combined-cycle nuclear power plant calculation with power unit K-500-60/1500, efficiency the combined-cycle nuclear power plant showing essential increase in comparison with independent work of each component are resulted.

#### **УДК 621.039.56**

*Working out of Methods and Algorithms of Calculation of Dynamic Loadings on the Equipment of the Second Contour of the Atomic Power Station at Shock and Pulse Influences* \ D.V. Kuznetsov, V.M. Kormilitsyn, K.N. Proskuryakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.

Results of calculation of parameters of acoustic fluctuations in system of regenerative heating of low pressure of the atomic power station with reactor WWER-1000 are presented. It is shown, that the spectral structure of acoustic fluctuations depends on configuration of the equipment of the second contour, its geometrical sizes and an operation mode. Settlement estimations of frequencies of own fluctuations of pressure of a working body in the equipment of the second contour are resulted. The developed methods and algorithms of calculations are intended for revealing and prevention of conditions of occurrence of resonances of vibrations in elements of the equipment of the second contour with acoustic fluctuations in a working body, as under operating conditions, and on a design stage of the second contour of the atomic power station with WWER-1000. For the task in view decision research of dependence of a pass-band from an operation mode is carried out.

#### **УДК 621.438.082: 621.311.23**

*Theoretical Predictions of the Performance of a Helium Turbine for Nuclear Power Plants* \ I.I. Loshchakov, G.A. Romakhova, I.A. Komolov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 11 titles.

The present paper analyzes the performance of a closed helium cycle for nuclear power plants based on high-temperature gas-cooled reactors. The basic thermodynamics are related to the cycle analysis of a helium gas turbine plant. Some detailed calculations of the helium cycles are presented.

The knowledge of fluid mechanics and thermodynamics essential to the designer of the air turbine is basically similar to that required by the helium turbine designer, and these fundamentals are discussed. Theoretical aspects of flow through helium cascade have been discussed. The steps in a preliminary design of helium gas turbine are outlined in this paper. The next step in the design process is the selection of passage shape, which has the potential of achieving maximum turbine efficiency.

#### **УДК 621.039.56**

*Dose Expenditure Minimization during the NPP Equipment and Systems Maintenance and Repair* \ A.A. Naumov, O.L. Tashlykov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 4 illustrations. – References, 10 titles.

It is estimated the dose expenditure change depending on the NPP operation term and the maintenance and repair contribution to the collective dose depending on the reactor type. The ways to decrease the staff irradiation during the NPP maintenance are analyzed. The optimization importance in the radioactive protection choice is shown.