

ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ ПО ДАВЛЕНИЮ ВО ВТОРОМ КОНТУРЕ АЭС С ВВЭР-1000

Р.О. Катереев, К.Н. Проскуряков

*ГОУВПО Московский энергетический институт (технический университет),
г. Москва*



Разработана методика расчета колебаний рабочего тела при импульсных возмущениях по давлению и частоты собственных колебаний давления рабочего тела. Приведены результаты расчета частоты собственных колебаний рабочего тела в оборудовании второго контура АЭС с ВВЭР-1000, добротностей колебательных контуров, коэффициентов затухания колебаний в этих контурах, а также динамических нагрузок на пароприемный лист, возникающих в результате срабатывания стопорного клапана турбины. Полученные данные определяют характер и количественные зависимости динамических непроектных нагрузок на элементы конструкции оборудования. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 и предназначены для уточнения оценок остаточного ресурса, а также для увеличения проектного ресурса оборудования.

Ключевые слова: акустические колебания, парогенератор, гидравлический удар, затухание, нагрузки, клапан.

Key words: acoustical oscillation, steam generator, hydraulic shock, attenuation, loading, valve.

Гидравлический контур парогенераторной установки представляет собой многоэлементную совокупность участков трубопроводов и технологических аппаратов. Передаваемая от рабочего тела к конструктивным элементам энергия частично переходит в механическую энергию, вызывающую появление динамических усилий, которые имеют такой же периодический характер, как и создающий их пульсирующий поток. В результате такого взаимодействия возникают вибрации конструктивных элементов (трубопроводов и технологического оборудования), которые могут привести к разрушениям. В ряде случаев вибрации могут явиться причиной аварий. Не случайно снятие вибрационных, а в последнее время и виброакустических характеристик оборудования предусматривается программами пусконаладочных работ на атомных электростанциях.

Как любой конструктивный элемент, обладающий массой и упругостью, рабочее тело имеет собственные частоты колебаний, которые могут резонировать с источниками возмущений. При совпадении частот амплитуды колебаний достигают наибольших значений.

© Р.О. Катереев, К.Н. Проскуряков, 2010

Теоретический анализ динамических процессов удобнее проводить на языке электрических цепей, пользуясь эквивалентными схемами замещения [1–3].

Ряд соответствий между гидродинамическими и электрическими величинами представлен в табл. 1.

Определение основных характеристик акустических колебаний в гидравлическом контуре проведено по разработанной методике [4]. Ниже приведены резуль-

Таблица 1

Электроакустические аналоги

Акустическая система		Электрическая система	
Параметр	Обозначение	Параметр	Обозначение
Перепад давления, Н/м ²	Δp	Напряжение, В	u
Объемный расход, м ³ /с	W	Ток, А	i
Акустическая податливость, м ³ с ² /кг	C_a	Емкость, Ф	C
Акустическая масса, кг/м ⁴	m_a	Индуктивность, Генри	L
Активное сопротивление, кг/с м ⁴	R_a	Активное сопротивление, Ом	R
Дифференциальное сопротивление, кг/с м ⁴	R_d	Дифференциальное сопротивление, Ом	R_d

таты расчета акустических характеристик (Q – добротности колебательного контура, d – коэффициента затухания колебаний, амплитуды ударной волны на расстоянии x от стопорного клапана турбины (СКТ) гидравлического контура, расположенного от питательного насоса до стопорного клапана турбины. По определению добротность – отношение активной и реактивной мощностей (или сопротивлений):

$$Q = \frac{|N_x|}{N} = \frac{|x|}{r}, \quad (1)$$

здесь N_x – реактивная мощность; N – активная мощность; x – реактивное сопротивление; r – активное сопротивление.

В нашем случае

$$r = \frac{\Delta P}{W}, \quad x = \sqrt{\frac{m_a}{C_a}}, \quad (2)$$

где ΔP – перепад давления в контуре, W – объемный расход рабочего тела. Расчет добротности колебательного контура теплоносителя Q производится по следующей формуле [6]:

$$Q = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{\frac{m_a}{C_a}} = \frac{\rho \cdot a \cdot W}{S \cdot \Delta P}, \quad (3)$$

где ρ – плотность теплоносителя; a – скорость звука в потоке теплоносителя; W – объемная скорость теплоносителя; S – площадь поперечного сечения участка.

По определению $d=1/Q$:

$$d = r \cdot \sqrt{\frac{c_a}{m_a}}. \quad (4)$$

Закон убывания амплитуды давления упругих волн описывается следующим уравнением [1]:

$$\Delta P(x) = \Delta P_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (5)$$

где α – коэффициент затухания упругих волн.

Коэффициент α можно найти из соотношения [1]

$$Q = \frac{\omega}{2a\alpha}, \quad (6)$$

где a – скорость звука; ω – круговая частота колебаний; X – расстояние от стопорного клапана до рассматриваемого сечения трубопровода.

:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{m_a c_a}}. \quad (7)$$

Акустическая модель рабочего тела для оборудования второго контура представлена на рис. 1. В рассматриваемой схеме можно выделить следующие характерные акустические объекты: 1 – участок от главного насоса до парогенератора (ПГ), 2 – водяное пространство в объеме ПГ, 3 – пароводяное пространство в объеме ПГ, 4 – паровое пространство в объеме ПГ, 5 – паропровод.

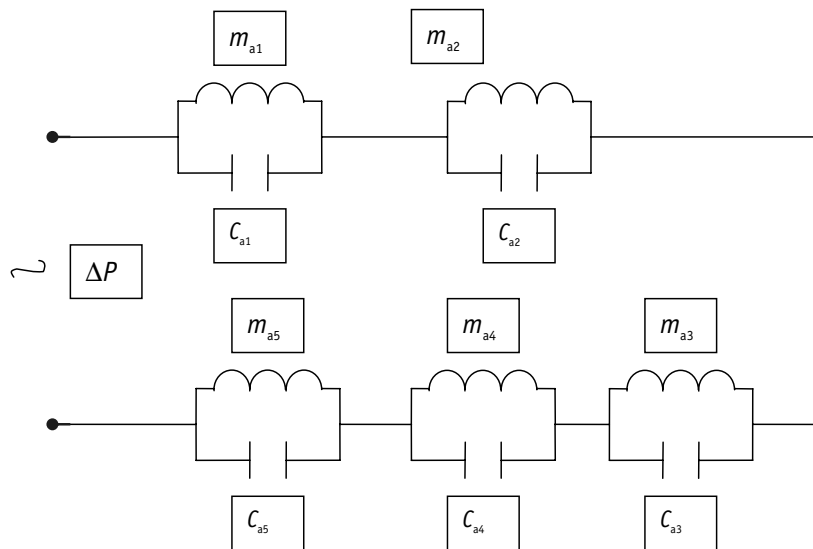


Рис. 1. Акустическая схема контура от питательного насоса до СКТ

Расчет акустической массы и акустической податливости проведен по методике [3]:

- для однофазной среды

$$c_{a_i} = \frac{f_i \cdot l_i}{\rho_i a_i^2}, \quad (8)$$

$$f_i = \frac{\pi d_i^2}{4}, \quad (9)$$

$$m_{a_i} = \frac{\rho_i l_i}{f_i}; \quad (10)$$

- для двухфазной среды

$$m_{a_i} = \frac{\rho_i'' l_i}{\left[x_i + (1-x_i) \cdot \frac{\rho_i''}{\rho_i'} \right] \cdot f_i}. \quad (11)$$

здесь f_i – площадь проходного сечения i -го участка; ρ' – плотность воды на линии насыщения на i -ом участке; ρ'' – плотность пара на линии насыщения на i -ом участке; l_i – длина i -го участка; x – массовое паросодержание. C_a для двухфазной среды рассчитывается по формуле (8).

Как любой механический элемент, обладающий массой и упругостью и соответствующей им частотой собственных колебаний, рабочее тело в рассматриваемых объектах также имеет акустическую массу, акустическую податливость и частоту собственных (резонансных) колебаний:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m_a C_a}}. \quad (12)$$

Круговой частоте ω_0 соответствует линейная:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{m_a C_a}}. \quad (13)$$

В настоящее время планируется увеличение срока эксплуатации парогенераторов с 30-ти до 60-ти лет и работа АЭС в маневренных режимах. Понятно, что в условиях увеличения суммарной продолжительности работы оборудования в переходных режимах необходимо учитывать возникновение дополнительных динамических нагрузок.

В новых проектах парогенераторов ПГВ-1000М (ПГВ-1000М (В), ПГВ-1000МК)

Замена жалюзийного сепаратора
пароприемным листом

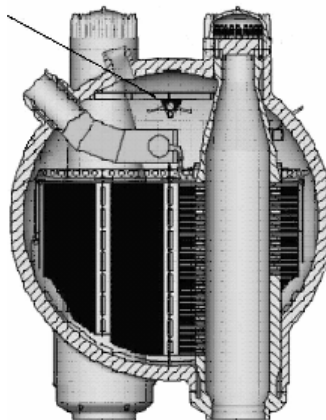


Рис. 2. Парогенератор ПГВ-1000

используется сепарационная схема, в которой для выравнивания паровой нагрузки зеркала испарения используется погруженный дырчатый лист (ПДЛ), а вместо жалюзийного сепаратора устанавливается пароприемный лист (ППЛ). Расположение ППЛ в ПГВ-1000М показано на рис. 2.

Таблица 2

Геометрические параметры расчетных участков

№ участка	1	2	3	4	5
Длина, м	50	0.1	2.03	1.72	125
Площадь сечения, м ²	0.19	58.12	39.83	58.12	0.264

Таблица 3

Результаты расчета m_a , C_a и f_0 для расчетных участков

№ участка	Средняя температура, t°С	Среднее давление p, МПа	Скорость звука a, м/с	Массовое паросодержание x	Плотность ρ , кг/м ³	Акустическая масса m_a , кг/м ⁴	Акустическая податливость C_a , м ⁴ с ² /кг	Частота колебаний f_0 , Гц
1	194	9.7	1379	–	877	$2.23 \cdot 10^5$	$5.8 \cdot 10^{-9}$	4.4
2	279	6.4	1016	–	751	1.2	$7.5 \cdot 10^{-9}$	$1.6 \cdot 10^3$
3	279	6.4	1001	0.028	731	23.7	$1.1 \cdot 10^{-7}$	98.4
4	278	6.3	492	0.998	34	0.9	$1.2 \cdot 10^{-5}$	46.6
5	277	6.1	493	0.998	32	$1.49 \cdot 10^4$	$4.1 \cdot 10^{-6}$	0.6

Необходимо отметить отсутствие в научно-технической литературе сведений об ударных нагрузках на ППЛ при закрытии стопорных клапанов турбины (СКТ). Такой режим в эксплуатации повторяется неоднократно. Для оценки ударных нагрузок на ППЛ при срабатывании СКТ разработана методика расчета.

В таблице 2 приведены геометрические параметры расчетных участков, в табл. 3 – рассчитанные значения f_0 соответствующих участков контура.

Таблица 4

Результаты расчета m_a , C_a и f_0 для комбинированных контуров

Участки, образующие контур	m_a , кг/м ⁴	C_a , м ⁴ с ² /кг	f_0 , Гц
1+2+3+4+5	$2.38 \cdot 10^5$	$1.64 \cdot 10^{-5}$	0.08
1+2+3+4	$2.23 \cdot 10^5$	$1.23 \cdot 10^{-5}$	0.09
2+3+4	25.93	$1.23 \cdot 10^{-5}$	8.92
2+3+4+5	$1.50 \cdot 10^4$	$1.64 \cdot 10^{-5}$	0.32
4+5	$1.50 \cdot 10^4$	$1.63 \cdot 10^{-5}$	0.32

Таблица 5

Добротность и коэффициент затухания в контурах

Контур	Q	d
1	1.93	0.52
2+3+4	0.09	10.50
5	2.70	0.37

Таблица 6

Сила ударов по ППЛ

№ удара	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время удара с момента закрытия клапана, с	0.25	0.76	1.27	1.77	2.28	2.79	3.29	3.80	4.31	4.82
Сила удара, кПа	616.6	442.4	289.4	198.3	135.3	93	63.7	43.7	29.9	20.5

Также сделаны расчетные оценки m_a , C_a и f_0 для комбинированных контуров, результаты которых приведены в таблице 4.

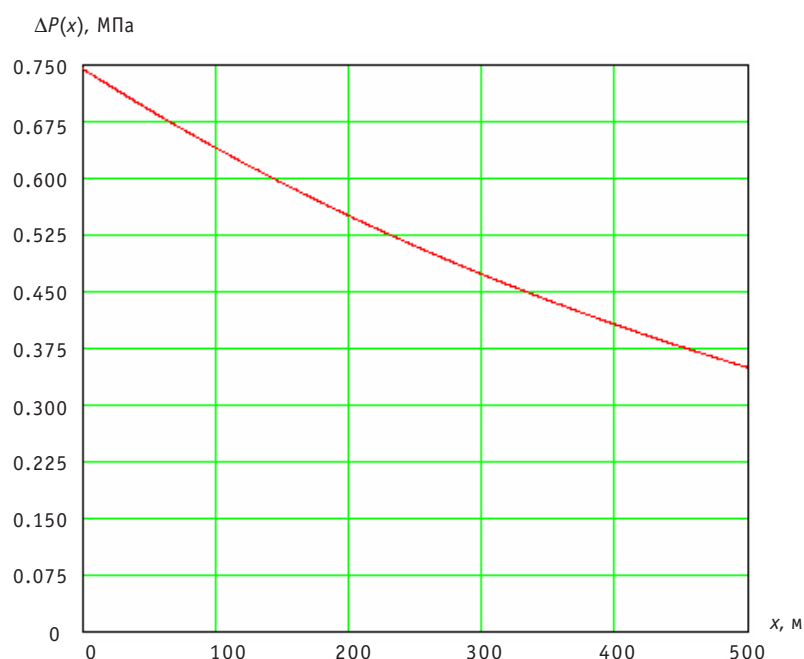


Рис. 3. Затухание колебаний по давлению в паропроводе

Результаты расчета добротности и коэффициента затухания в рассматриваемых контурах приведены в табл. 5, в табл. 6 – расчетные оценки силы гидравлических ударов на ППЛ.

На рисунке 3 показана зависимость величины амплитуды ударной волны от расстояния x до СКТ в случае его мгновенного закрытия.

Гидравлический удар по стопорному клапану рассчитан по формуле Жуковского [5]

$$\Delta P = \rho(v_0 - v_1) \cdot a, \quad (14)$$

где v_0 – скорость пара до закрытия клапана; v_1 – скорость пара после закрытия СКТ. При $v_0 \approx 45.7$ м/с и v_1 равной нулю $\Delta P = 745$ кПа. Рассмотрим колебательный процесс в контуре стопорный клапан-пароприемный лист парогенератора в предположении упругого отражения ударной волны от ППЛ. Неоднократно отражаясь последовательно от СКТ и ППЛ, волна будет затухать во времени. Оценочные расчеты десяти ударов по пароприемному листу сведены в табл. 6.

При срабатывании стопорного клапана турбины полное открытие клапана БРУ-А происходит за время порядка от 2 до 20 с. Таким образом, за первые две секунды влияние срабатывания БРУ-А не сказывается. В случае запаздывания срабаты-

вания БРУ-А на четыре секунды ППЛ испытает 8 затухающих во времени ударов.

Полученные данные определяют характер и количественные зависимости динамических непроектных нагрузок на элементы конструкции оборудования.

В отсутствие ППЛ эти нагрузки были бы восприняты непосредственно теплообменными трубами. В рассмотренном случае ударное воздействие снижается ввиду неполного прохождения ударной волны в направлении теплообменных труб. Поправка на наличие ослабленного ударного воздействия должна быть учтена при оценке остаточного ресурса теплообменных труб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование нового метода определения добротности и коэффициента затухания позволяет определить характер динамических нагрузок на ППЛ ПГ, вызванных полным закрытием СКТ. Указанные динамические эффекты происходят в системах, состоящих из оборудования, проектируемого различными организациями (т.е. на стыке проектных решений, разрабатываемых различными организациями), и в силу этого не находят отражения в проектно-конструкторской документации второго контура АЭС. По этой причине выявленные динамические нагрузки являются непроектными и выявляются только при исследовании системных эффектов, как это показано выше.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 и предназначены для уточнения оценок остаточного ресурса, а также для увеличения проектного ресурса оборудования.

Литература

1. Лепендин Л. Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – С. 448.
2. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1978. – С. 592
3. Проскуряков К. Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ядерных энергетических установок. – М.: Изд. МЭИ, 1984. – С. 65.
4. Способ предотвращения резонансных вибраций твэлов и ТВС ВВЭР-1000/К. Н. Проскуряков, Ф. Н. Шакирзянов, В. В. Каратаев и др. // Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». Сер. «Обеспечение безопасности АЭС». – Вып. 23. – 2008. – С. 18-25.
5. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – М.: Гостехиздат, 1949. – С. 103.

Поступила в редакцию 22.12.2009

УДК 539.125.5.03:621.039.512

Interval Estimation of Reactivity \A.G. Yuferov, R.L. Ibragimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 illustrations. – References, 13 titles.

The algorithms of an estimation of an interval of uncertainty for a reactivity meter are described on the basis of an integral equation of a kinetics.

УДК 504.064

Management of Remediation Measures on Radioactively Contaminated Territories with the use of Multiobjective Optimization \S. Gritsyuk, B. Yatsalo, V. Didenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 35 titles.

Optimization of the countermeasure structure on remediation of radioactively contaminated territory is considered. Multiobjective optimization is based on implementation of modified genetic algorithms and treatment of uncertain/fuzzy criteria. Geographic information system (GIS) of contaminated territory is used within the case study analysis on countermeasure optimization. This study demonstrates effectiveness of integration of multiobjective methods, genetic algorithms and GIS within the problems on environmental protection and remediation of contaminated sites.

УДК 504.45: 546.027

Up-to-date Content of Long-Lived Artificial Radionuclides in the Area of the Tom and Ob Rivers Impacted by the Siberian Chemical Combine Discharges \A.I. Nikitin, I.I. Kryshev, N.I. Bashkurov, N.K. Valetova, G.E. Dunaev, A.I. Kabanov, I.Yu. Katrich, A.O. Krutovsky, V.A. Nikitin, G.I. Petrenko, A.M. Polukhina, G.N. Selivanova, V.B. Chumichev, V.N. Shkuro; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.

Data are presented and discussed on content of ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ and other artificial radionuclides in water, bottom sediments and flood-plain soils of the Tom and Ob rivers part from Tomsk to the region of their confluence (through which the radioactive effluents of the Siberian Chemical Combine are transported). Data received in 2008-2009 in frames of the ISTC Project No.3547 «Analysis of radionuclide transport and assessment of radiation risk for population and environmental objects in the Ob-Irtysh river basin».

УДК 621.039.51: 621.039.58

Numerical-Experimental Analysis of Emergency Shut Down Cooling of VVRC Reactor at Loss of ELECTRICAL Supplying of the Circulating Pumps \O.Yu. Kochnov, V.V. Sergeev, A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 13 pages, 8 tables, 12 illustrations. – References, 6 titles.

Based on the experiment performed on the pool type research reactor VVRC during operation at emergency condition of shut down cooling and the data obtained on reactor IS RY RBT-6, post-test calculations of dynamics at shut down cooling of facility are carried out at loss of power supply of circulating pumps. In the paper are presented the results of calculations at shut down cooling of reactor VVRC at natural circulation mode, starting from maximal acceptable power. Calculations were carried out with using the international thermal hydraulic code TRAC designed for the analysis of technical safety for water-cooled nuclear power plants.

УДК 621.039.5

Simulation of Transients in the Circuits of Nuclear Power Plants with BN-type Reactors Involving Variable-Speed Drives of Reactor Coolant Pumps \E.Yu. Anishev, V.S. Gorbunov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

Based on the simulation of thermal hydraulic transients, the paper analyzes the advantages of smooth variation of coolant flow in the primary circuits of nuclear power plants with fast neutron reactors.

Maintenance of optimal turbine steam parameters and “softer” transients help to increase power unit cost effectiveness and reduce thermal stresses and temperature gradients in reactor plant vessel structures.

УДК 621.039.5

Parameters of Fluctuations of the Working Body at Pulse Indignations on Pressure in the Second Contour of the Atomic Power Station with VVER-1000 \R.O. Katereev, K.N. Proskurjakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 6 tables, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The method of calculation procedure of fluctuations of a working substance due to impulsive disturbance at pressure is worked out. There are the results of calculation of frequency of own fluctuations of a working substance in the equipment of the second contour of the atomic power station with VVER-1000, quality factors of oscillatory contours, attenuation coefficient of fluctuations in these contours, and also dynamic loading on distribution plate, appearing as a result by closing the lock valve in front of the turbine. The received data define character and quantitative dependences of dynamic nonprojective loading on elements of construction of the equipment. Results of research can be used at designing and operation of the atomic power station with VVER-1000 and are intended for specification of estimations of a residual resource, and also for increase in a design service life.

УДК 621.039.73: 621.039.526

Oxidation of Liquid Metal Coolant and Steel Corrosion Wastes during Equipment Washing with Salt Melts \V.S. Naumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 22 titles.

Oscillations of NO_3^- and CO_3^{2-} groups with D_{3h} symmetry were detected based on the IR- and RS-spectrum analysis in the solution melts of eutectic mixtures of alkaline metal chlorides containing calcium nitrate and carbonate additives in the absence of sodium. Characteristic frequencies of NO_3^- – group or oscillations of CO_3^{2-} group were not identified on incorporation of metallic sodium into the melts of oxygen-containing salts. This observation proves complete oxidation of the alkaline metal and nitrate group reduction to nitrogen dioxide or carbon dioxide in the carbonate salts.

The data on specific corrosion and corrosion rates were obtained for a series of construction steels contained in the salt mixture melts and corresponding solidified flux intended for manufacturing the equipment of fast reactors. Maximum corrosion rate of the tested steels did not exceed $6 \text{ g/m}^2\text{h}$. All the steels tested in the course of the conducted research can be referred to the group of resistant materials.

УДК 621.039.58

Optimization of Conditions Thermomechanical Loading Steam Generators of the PWR for Management for their Services \M.A. Trofimov, D.A. Usanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 5 titles.

Results of researches thermal loading elements of steam generators of the atomic power station with PWR are resulted. The technique of monitoring of thermodynamic conditions of steam generators is developed. Actions for decrease thermomechanical loading critical elements of steam generators are offered.

УДК: 546.791:544.174.2

The Formation and Behaviour of Uranium (V) Species in Chloride Melts \D.E. Aleksandrov, V.A. Volkovich, B.D. Vasin, D.S. Maltsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 15 titles.

Uranyl-containing melts can be employed for producing fresh and reprocessing spent nuclear fuel using pyrochemical methods. U(V) species are the intermediates formed during the reduction of UO_2^{2+} ions. Possible reactions resulting in the formation of uranium (V) ions in alkali chloride melts are considered. The results of the experimental studies of the reaction of molybdenum with uranyl-containing melts based on LiCl, NaCl-KCl, 3LiCl-2KCl and NaCl-2CsCl at 550–850°C are presented. The reaction leads to the formation of $\text{UO}_2\text{Cl}_4^{3-}$ ions and solid uranium dioxide, the ratio of these products is determined by temperature and cationic composition of the melt.

УДК 621.039.54: 519.6

Peculiarities of the Thermal Mode of Underground Isolation Facility for Heat Generating Materials (Container Option) \P.V. Amosov, A.V. Podshivalova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 12 titles.

The research results obtained by the numerical modelling of thermal mode for underground long-term storage facility of spent nuclear fuel (container option) have been presented. The analysis of temperature maximum values in model areas with variation of heat conductivity coefficient in the area of source and air flow in the mine workings has been carried out. The peculiarities of temperature spatial distribution in the model areas have been specified; the compliance with the requirements of thermal safety of facility operating has been shown for laminar mode of airing.