

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-459-469

УДК 534.14:532.542

Исследование гидравлических ударов при заполнении системы компенсации давления в водоводяных энергетических реакторах

А. В. Королев¹⁾, А. П. Ищенко²⁾, О. П. Ищенко²⁾

¹⁾Одесский национальный политехнический университет (Одесса, Украина),

²⁾ОП «Южно-Украинская АЭС» (Южноукраинск, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Представленное в статье исследование согласуется с тяжелой аварией, произошедшей на АЭС Три-Майл-Айленд в США. Исследование направлено на повышение надежности работы компенсатора давления – важного оборудования первого контура. Для моделирования подобной ситуации был разработан стенд, имитирующий конструкцию компенсатора давления реактора ВВЭР-440, в частности формой верхней эллиптической крышки, которая имеет патрубок отвода пара в самом верш конструкции, что создает условия для появления подобных гидравлических ударов. Для проведения экспериментов создана установка, позволяющая измерять и регистрировать гидроудары, возникающие при заполнении емкостей. Измерение амплитуды гидроударов осуществлялось специально разработанным пьезодатчиком, а регистрация – на светолучевом осциллографе. Описана методика проведения эксперимента и представлены результаты экспериментального исследования гидроударов, возникающих при полном заполнении сосудов. Получены количественные данные по амплитудам гидроударов в зависимости от скорости заполнения емкости и диаметра выходного отверстия, максимальные давления гидроудара составили 7–9 атм. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных, допустимое расхождение объясняется расчетной величиной коэффициента жесткости системы, который не учитывал наличие сварных швов в баке, придающих системе дополнительную жесткость. Получены расчетные соотношения, позволяющие оценить амплитуды гидроударов через ускорение уровня воды перед выходным отверстием из сосуда с эллиптическим днищем. Экспериментально и теоретически показана возможность возникновения гидравлического удара в компенсаторе давления. На основании данных эксперимента может быть расширен перечень исходных событий тяжелых аварий на АЭС с водоводяным энергетическим реактором.

Ключевые слова: гидроудар, емкость, система компенсации давления, тяжелая авария, водоводяной энергетический реактор

Для цитирования: Королев, А. В. Исследование гидравлических ударов при заполнении системы компенсации давления в водоводяных энергетических реакторах / А. В. Королев, А. П. Ищенко, О. П. Ищенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 5. С. 459–469. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-459-469

Адрес для переписки

Королев Александр Викторович
Одесский национальный политехнический университет
просп. Шевченко, 1,
65044, г. Одесса, Украина
Тел.: +38 048 734-86-04
npp.pei.opu@ukr.net

Address for correspondence

Korolyev Alexander V.
Odessa National Polytechnic University
1 Shevchenko Ave.,
65044, Odessa, Ukraine
Tel.: +38 048 734-86-04
npp.pei.opu@ukr.net

Study of Water Hammers in the Filling of the System of Pressure Compensation in the Water-Cooled and Water-Moderated Power Reactors

A. V. Korolyev¹, A. P. Ishchenko², O. P. Ishchenko²

¹Odessa National Polytechnic University (Odessa, Ukraine),

²SD "South-Ukraine Nuclear Power Plant (NPP)" (Yuzhnoukrainsk, Ukraine)

Abstract. The research presented in the article conforms to the severe accident that took place at the Three Mile Island nuclear power plant in the USA. The research is focused on improving the reliability of the pressure compensator that is an important equipment of the primary circuit. In order to simulate such a situation, the stand has been developed to simulate the design of the pressurizer of the PWR-440 reactor, in particular an elliptical shape of the upper lid which has a steam outlet pipe at the top of the construction that creates conditions for occurrence of such water hammers. For the experiments, an installation has been created that makes it possible to measure and record the water hammering that occur when the tanks are filled. Measurement of the amplitude of the water hammering was carried out by a specially developed piezoelectric sensor, and the registration – by a light-beam oscilloscope. The technique of carrying out the experiment is described and the results of an experimental study of the water hammers arising when the vessels are completely filled are presented. Quantitative data were obtained on the amplitudes of the hydraulic impacts depending on the rate of filling of the vessel and the diameter of the outlet, the maximum pressure of the hydraulic shock was 7–9 atm. Comparison of calculated and experimental data has been performed. The allowable discrepancy is explained by the calculated value of the system stiffness coefficient, which did not take into account the presence of welded seams in the tank that imparts the system with additional rigidity. The calculated relationships are obtained, that make it possible to estimate the amplitudes of the water hammers through the acceleration of the water level in front of the outlet from a vessel with an elliptical bottom. The possibility of a water hammer in the pressure compensator is demonstrated by experiment and by theoretical calculations. Based on the experimental data, a list of initial events of severe accidents at NPPs with a water-cooled and water-moderated power reactor can be expanded.

Keywords: water hammer, tanks, pressurizer system, severe accident, water-cooled and water-moderated power reactor

For citation: Korolyev A. V., Ishchenko A. P., Ishchenko O. P. (2017) Study of Water Hammers in the Filling of the System of Pressure Compensation in the Water-Cooled and Water-Moderated Power Reactors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 459–469. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-459-469 (in Russian)

Введение

К исследованию данного вопроса подтолкнули события далекого 1978 г. на АЭС Три-Майл-Айленд (США) [1]. Тогда главным действующим оборудованием оказался компенсатор давления (КД), на котором отказал предохранительный клапан, что было вызвано попаданием воды в его систему управления [2], которое могло быть вызвано гидроударом. Учитывая тот факт, что атомные электрические станции с водоводяными энергетическими реакторами (ВВЭР), сейчас находящимися в эксплуатации, проектировались и строились по нормативным документам СССР 1970-х гг. [3], необходима корректировка перечня исходных событий, приводящих к тяжелым авариям, так как вследствие крайне тяжелых радиационных и социально-экономических последствий тяжелые аварии могут вносить замет-

ный вклад в общую величину риска от эксплуатации АЭС [4]. В связи с введением возможности аварийного охлаждения первого контура АЭС с ВВЭР через режим «сброса–питания» предусматривается полное заполнение объема компенсатора давления теплоносителем. В этом случае возрастает вероятность появления гидравлического удара, что доказано примером экспериментальных исследований, представленных в [5], где авторы исследовали явление гидроудара при заполнении трубопровода криогенной жидкостью с образованием паровой полости перед запорным органом (рис. 1).

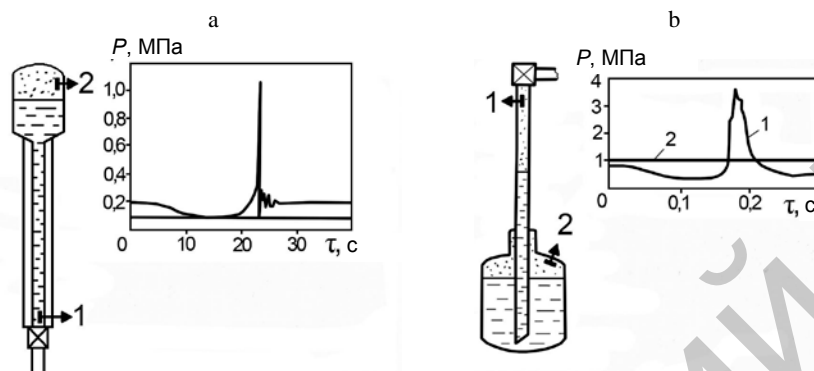


Рис. 1. Принципиальные схемы заполнения сосудов и появления гидравлического удара в них [5]

Fig. 1. The key diagrams of filling vessels and the appearance of a water hammer in them [5]

При открытии запорного устройства пар, который находится перед ним, быстро эвакуируется, давление перед клапаном резко падает, жидкость ускоряется, а при подходе к клапану резко тормозится и возникает гидравлический удар.

Конструкция компенсатора давления, подобная используемой на блоках с ВВЭР-440, имеет патрубок отвода пара в самом верху конструкции, что создает условия для появления подобных гидравлических ударов. Здесь следует заметить, что в КД имеется более пяти уровнемеров, каждый из которых является потенциально слабым звеном при возникновении гидравлического удара.

Для моделирования подобной ситуации был разработан стенд, имитирующий конструкцию компенсатора давления ВВЭР-440, в частности формой верхней эллиптической крышки. Принципиальная схема и эскиз стенда представлены на рис. 2, 3.

Бак 1 являет собой обечайку, в которой выполнены штуцеры для подведения воды и подключения датчика давления 2 (рис. 2), а также для подсоединения канала слива воды. В верхней эллиптической крышке находится штуцер 3, в котором с помощью шайбы 4 закрепляется пластина 5 с фиксированным отверстием (рис. 3). В ходе эксперимента использовались семь пластин с диаметрами отверстий 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 и 4,5 мм.

Сигнал от датчика поступает на осциллограф и регистрируется с помощью фотоаппарата Panasonic DMC-FS10 (на схеме не представлен).

Для фотографирования был выбран режим с 15-секундной выдержкой, а для получения качественных снимков фотоаппарат и осциллограф помещались в светонепроницаемый короб.

Подача воды в установку регулируется вентилем 8, а слив – вентилем 7.

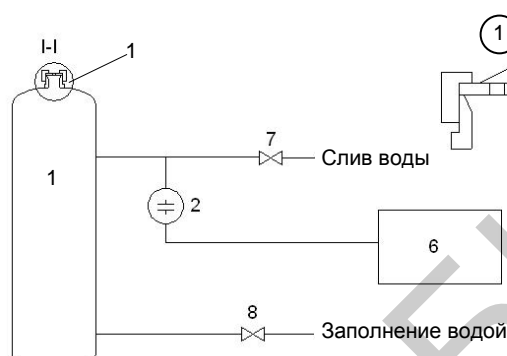


Рис. 2. Принципиальная схема стенда: 1 – емкость; 2 – датчик давления; 3 – штуцер; 4 – накидная гайка; 5 – шайба с отверстием; 6 – осциллограф С1-69; 7, 8 – регулирующие вентили

Fig. 2. The schematic diagram of the stand: 1 – tank; 2 – pressure sensor; 3 – valve seat; 4 – coupling ring; 5 – washer with a hole; 6 – C1-69 oscilloscope; 7, 8 – regulating valves

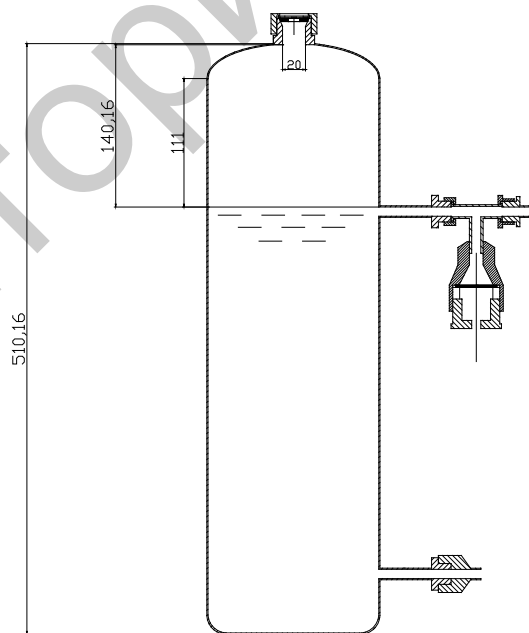


Рис. 3. Эскиз рабочей ячейки стенда

Fig. 3. A sketch of the working cell bench

Для измерения гидравлических ударов из пластинки пьезокерамики ЦТС-19 размером $\varnothing 33 \times 2$ мм был изготовлен пьезоэлектрический датчик, подобный используемому в [6]. Сигнал с датчика поступал на вход

осциллографа С1-69, где усиливался и отображался на экране осциллографа. Перед экспериментами выполнялась калибровка датчика прецизионным прессом МПС-150.

Далее емкость 1 предварительно полностью заполнялась водой, а в месте шайбы с отверстием, регулирующей расход, устанавливалась шайба без отверстия. Таким образом, в нем установилось давление, равное давлению в системе водоснабжения. Затем резко открывался клапан, отвечающий за слив воды. Из-за несжимаемости воды давление в установке скачкообразно снижалось до атмосферного, таким образом, напрямую устанавливалось соответствие перепада давления показаниям осциллографа.

Эксперимент выполнялся по следующей методике. Закрывался вентиль на линии, подающей воду, и снималась шайба без отверстия (заглушка). Затем открытием сбросного вентиля сливался заданный объем воды из установки. На выходной штуцер устанавливалась шайба с отверстием заданного диаметра, а на эллиптическое днище – защитный колпак, предотвращающий попадание воды в помещение и на приборы.

Затем открывался клапан на линии, подводящей воду, и одновременно включались секундомер и фотоаппарат. Секундомер фиксировал время заполнения верхней половинки емкости и соответственно скорость заполнения бака, а фотоаппарат регистрировал характер и величину гидравлического удара (рис. 4). Затем эксперимент повторяли, причем после проведения экспериментов на одном диаметре шайбы переходили к другому диаметру.

Для устранения погрешности, связанной с возможным наличием пузырьков газа в емкости, выбрали средние максимальные значения гидроудара для каждого отверстия (табл. 1.).



Рис. 4. Характер осциллограмм при гидравлическом ударе

Fig. 4. The nature of the waveforms in the water hammering

Зависимость силы гидравлического удара от диаметра отверстия в пластине представлена на рис. 5, от массового расхода воды – на рис. 6, зависимость массового расхода воды от диаметра отверстия в шайбе – на рис. 7.

Таблица 1

**Осредненные максимальные значения гидроудара
при различных диаметрах отверстия в шайбе**
**The averaged maximum values of the water hammering
at different diameters of hole in the washer**

Диаметр отверстия d , мм	ΔP , дел	ΔP , бар	t , с	m , кг	G , кг/с
1,2	20	6,5	10,95	2,31	0,21
1,6	20	6,5	10,63	2,29	0,22
2,0	19	6,2	10,52	2,30	0,22
2,5	17	5,6	10,39	2,31	0,22
3,0	16	5,2	10,20	2,31	0,23
3,5	14	4,6	9,89	2,30	0,23
4,5	9	2,9	9,60	2,31	0,24

Примечание: ΔP – величина гидравлического удара; t – время заполнения установки; m – масса воды, слитой перед экспериментом (равна свободному объему емкости); $G = m/t$ – массовый расход воды.

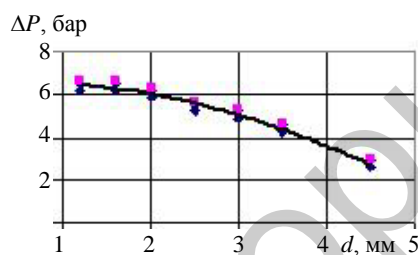


Рис. 5. Зависимость силы гидравлического удара от диаметра отверстия в пластине:

- ◆ – среднестатистические значения;
- – максимальные значения

Fig. 5. The dependence of the intensity of the water hammering on the diameter of the hole in the plate:

- ◆ – average values;
- – maximum values

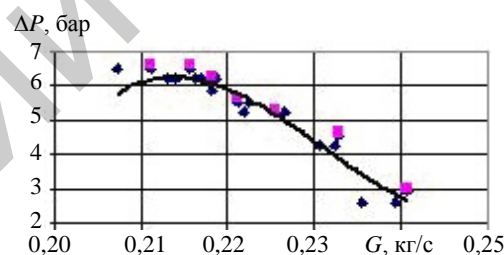


Рис. 6. Зависимость силы гидравлического удара от массового расхода воды, поступающей в емкость:

- ◆ – среднестатистические значения;
- – максимальные значения

Fig. 6. The dependence of the intensity of the water hammering on the mass flow rate of water: ◆ – average values;

- – maximum values

Графики на рис. 5, 7 показали ожидаемые результаты. Так, сила гидроудара растет с уменьшением диаметра отверстия (с увеличением перекрытия сечения потока), тогда как скорость подъема воды в баке, наоборот, падает с уменьшением диаметра выходного сечения. Интересными явились результаты графика на рис. 6, где замечен максимум величины гидроудара от скорости подъема уровня. Следует отметить, что подобные ситуации могут иметь место на реальных КД в случаях неполного подъема предохранительного клапана.

Для получения расчетного значения величины гидравлического удара воспользуемся соотношениями, полученными Н. Е. Жуковским [7]. Увеличение давления при гидравлическом ударе определяется в соответствии с его теорией по формуле

$$D_p = \rho(v_0 - v_1)c,$$

где D_p – величина гидроудара, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; v_0, v_1 – средняя скорость в трубопроводе до и после закрытия запорного клапана, м/с; c – скорость распространения ударной волны вдоль трубопровода, м/с.

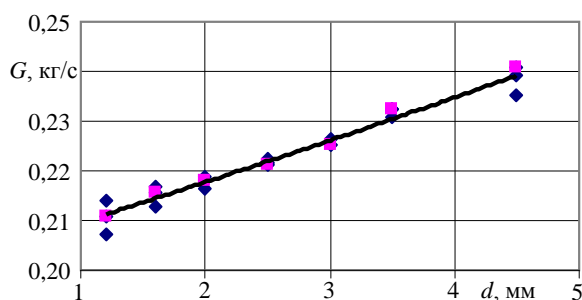


Рис. 7. Зависимость массового расхода воды от диаметра отверстия в шайбе:

◆ – среднестатистические значения; ■ – максимальные значения

Fig. 7. The dependence of the mass flow rate of water on the hole diameter in the washer:

◆ – average statistical values; ■ – maximum values

Н. Е. Жуковским было показано, что скорость распространения ударной волны c находится в прямо пропорциональной зависимости от сжимаемости жидкости, величины деформации стенок трубопровода, определяемой модулем упругости материала E , из которого он выполнен, а также от диаметра трубопровода. Также гидравлический удар имеет очень малые значения или может вообще не возникнуть в трубопроводе, содержащем пузырьки газа [8].

Для определения скорости ударной волны в экспериментальном баке воспользуемся следующим соотношением Н. Е. Жуковского для тонкостенных трубопроводов [7]:

$$C_u = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E D}{E_{tr} h} k}},$$

где C_u – скорость распространения ударной волны в трубопроводе, определяется по формуле; E – модуль объемной упругости жидкости; ρ – плотность жидкости;

$\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость распространения звука в чистой жидкости;

E_{tr} – модуль упругости материала стенок трубы; D – диаметр трубы; h – толщина стенок трубы.

Для воды отношение $\frac{E}{E_{tr}}$ зависит от материала труб и может быть принято для стальных труб 0,01 [7].

Коэффициент k для тонкостенных трубопроводов (стальных, чугунных, полиэтиленовых) принимается равным 1.

Скорость звука в среде также зависит от температуры и давления в трубопроводе. По условиям эксперимента (давление $P_0 = 1,664 \text{ кгс/см}^2$ и температура воды $t = 9 \text{ }^\circ\text{C}$) получим скорость звука в чистой воде [9]

$$\sqrt{\frac{E}{\rho}} = f(P_0, T) = 1442,9 \text{ м/с.}$$

Тогда скорость распространения гидравлического удара в экспериментальной емкости

$$C_u = 1442,9 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 0,01 \frac{0,149}{0,001}}} = \frac{1442,9}{\sqrt{2,49}} = 914,4 \text{ м/с.}$$

Скорость выхода жидкости из отверстия в пластине может быть рассчитана по закону истечения жидкости из сосуда под давлением. Это необходимо для определения скорости

$$v_1 = 0,6\sqrt{2P/\rho}.$$

В зависимости от диаметра отверстия в установленной пластине будет изменяться скорость v_1 согласно уравнению неразрывности

$$S_1 v_1 = S_{отв} v_{отв}.$$

Тогда скорость движения жидкости перед шайбой

$$v_1 = \frac{S_{отв} v_{отв}}{S_1}.$$

Учитывая, что верхняя часть КД – половина эллипсоида, рассчитаем ее объем [10]

$$V_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi b^2 a,$$

где a, b – полуоси эллипсоида.

Объем цилиндрической части емкости

$$V_{ц} = V_{общ} - V_3.$$

Тогда время заполнения цилиндрической части

$$t_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{ц}} \rho}{G}$$

Через площадь сечения цилиндрической части емкости найдем скорость движения воды в ней

$$v_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{ц}}}{t_{\text{ц}} S_{\text{ц}}}$$

Скорость движения воды на выходе эллиптической части оценим по уравнению неразрывности потока

$$S_0 v_0 = S_{\text{ц}} v_{\text{ц}}$$

Откуда

$$v_0 = \frac{S_{\text{ц}} v_{\text{ц}}}{S_0}$$

По полученным соотношениям построим график (рис. 8), который иллюстрирует хорошее качественное согласие в поведении зависимости величины гидроудара от диаметра шайбы.

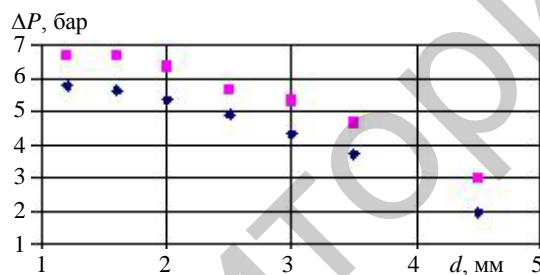


Рис. 8. Сравнение экспериментальных и расчетных значений:

◆ – расчет; ■ – эксперимент

Fig. 8. Comparison of experimental and calculated values:

◆ – calculation; ■ – experiment

Экспериментальный график проходит немного выше, чем расчетный. Вероятнее всего, причиной послужил неправильный подбор коэффициента жесткости системы, в частности при выборе $E_{\text{ш}}$. Кроме того, бак имеет сварные швы, которые также повышают жесткость системы.

Для того чтобы показать характер ускорения потока воды при подъеме в эллиптическом днище, составим следующую модель.

Из уравнения для эллипса построим зависимость диаметра от высоты уровня [10]

$$x = a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}},$$

где x – радиус сужения; y – высота уровня; a, b – малая и большая полуоси эллиптического днища.

Для оценки скорости в сужении возьмем случай из эксперимента, в котором скорость воды в цилиндрической части составила $v_1 = 0,011886$ м/с.

Из уравнения неразрывности потока получим

$$v_h = v_1 \frac{b^2}{a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}}.$$

Следует заметить, что это уравнение справедливо лишь для случая сужения эллиптической формы ($a = 0,031$ м). График разгона потока в таком случае будет иметь вид, как на рис. 9.

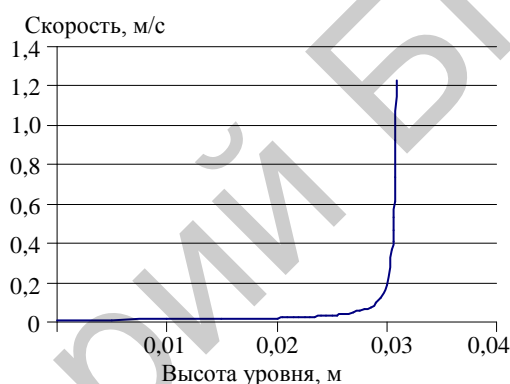


Рис. 9. Скорость воды в зависимости от высоты уровня в эллиптическом днище

Fig. 9. The velocity of the water depending on the height of level in an elliptic bottom

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально и теоретически показана возможность возникновения гидравлического удара при сужении выходного сечения бака, заполняемого водой, особенно в случае, когда перед жидкостью через это сужение протекал газ или пар.

2. Показано, что при полном заполнении объема компенсатора давления теплоносителем появляется возможность возникновения гидравлического удара. Для устранения этого явления необходимо оставлять в компенсаторе давления минимальный объем паровой подушки, например ставить штуцер для предохранительного клапана не на вершине емкости, а ближе к краю, или заглублять этот штуцер ниже уровня эллиптической части бака.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тяжелые аварии на атомных станциях с корпусными ядерными реакторами. Основы моделирования и анализ / В. И. Скалозубов [и др.]. Одесса, 2015. 319 с.
2. Авария на АЭС Три-Майл-Айленд [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Авария_на_АЭС_Три-Майл-Айленд.

3. Емельянов, И. Я. Конструирование ядерных реакторов / И. Я. Емельянов, В. И. Михан, В. И. Солонин. М.: Энергоиздат, 1982. 390 с.
4. Сидоренко, В. А. Безопасность и надежность атомных электростанций / В. А. Сидоренко. М.: МЭИ, 1979. 312 с.
5. Филин, Н. В. Жидкостные криогенные системы / Н. В. Филин, А. Б. Буланов. Л.: Машиностроение, 1985. 247 с.
6. Королев, А. В. Акустическая диагностика двухфазных потоков / А. В. Королев // Труды Одесского национального политехнического университета. 2001. Вып. 3, № 15. С. 40–42.
7. Жуковский, Н. Е. О гидродинамическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит.-ры, 1949. 106 с.
8. Королев, А. В. Анализ и моделирование теплоэнергетического оборудования, работающего с двухфазными течениями / А. В. Королев. Одесса: Астропринт, 2010. 456 с.
9. Ривкин, С. Л. Термодинамические производные для воды и водяного пара / С. Л. Ривкин, А. А. Александров, Е. А. Кремлевская. М.: Энергия, 1977. 264 с.
10. Математический энциклопедический словарь / под ред. Ю. В. Прохорова. М.: Сов. энцикл., 1988. 847 с.

Поступила 01.03.2017 Подписана в печать 10.05.2017 Опубликовано онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Skalozubov V. I. [et al.] (2015) *Severe Accidents in Nuclear Power Plants Equipped with Freestanding Nuclear Reactors. The Fundamentals of Modelling and Analysis*. Odessa. 319 (in Russian).
2. Three Mile Island Accident. *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island_accident.
3. Emel'yanov I. Ya., Mikhan V. I., Solonin V. I. (1982) *Design of Nuclear Reactors*. Moscow, Energoizdat Publ. 390 (in Russian).
4. Sidorenko V. A. (1979) *The Safety and Reliability of Nuclear Power Plants*. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publishing House. 312 (in Russian).
5. Filin N. V., Bulanov A. B. (1985) *Liquid Cryogenic Systems*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 247 (in Russian).
6. Korolev A. V. (2001) Acoustic Diagnostics of Two-Phase Flows. *Trudy Odesskogo Natsional'nogo Politekhnicheskogo Universiteta* [Proceedings of the Odessa National Polytechnic University], Is. 3 (15), 40–42 (in Russian).
7. Zhukovskii N. E. (1949) *On Hydrodynamic Shock in Water Pipes*. Leningrad, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature. 106 (in Russian).
8. Korolev A. V. (2010) *Analysis and Modeling of Thermal-Power Equipment Operating with Two-Phase Flows*. Odessa, Astroprint Publ. 456 (in Russian).
9. Rivkin S. L., Aleksandrov A. A., Kremlevskaya E. A. (1977) *Thermodynamic Derivatives for Water and Steam*. Moscow, Energiya Publ. 264 (in Russian).
10. Prokhorov Yu. V. (ed.). (1988) *Mathematical Encyclopedic Dictionary*. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ. 847 (in Russian).

Received: 1 March 2017

Accepted: 10 May 2017

Published online: 29 September 2017