

**РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВИБРАЦИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС****А.П. Носенко**

nosenkoartyom1989@gmail.com

SPIN-код: 5217-9764

В.Ю. Волков

Vasya-volkov@yandex.ru

SPIN-код: 9360-1379

АО ОКБ «Гидропресс», Подольск, Российская Федерация

Аннотация

Парогенератор представляет собой один из наиболее ответственных элементов атомной электростанции (АЭС), от его надежности зависит безаварийная работа станций. К наиболее важным составляющим парогенератора относится трубный пучок, поскольку теплообменная труба служит естественной границей между контурами ядерной энергетической установки. Выход из строя теплообменных труб является основной причиной течей теплоносителя. В статье рассмотрены основные методы исследования вибраций теплообменных труб парогенераторов АЭС. Показаны основные механизмы возбуждения колебаний теплообменных труб, отмечено влияние различных конструктивных и эксплуатационных факторов на параметры вибраций. Приведены примеры применения расчетных и экспериментальных методов исследования колебаний теплообменных труб парогенераторов АЭС.

Ключевые слова

Вибрации, атомная электростанция, тепловая электростанция, теплообменный аппарат, ядерный реактор, парогенератор, трубный пучок, дистанционирующая решетка, собственные колебания, гидродинамическая сила, вынужденные колебания

Поступила в редакцию 28.02.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Одними из наиболее широко используемых элементов оборудования атомных и тепловых электростанций (АЭС и ТЭС) являются теплообменные аппараты, в частности парогенераторы (ПГ), работа которых существенно влияет на надежность АЭС или ТЭС. Одной из основных причин отказов ПГ АЭС и различного теплообменного оборудования является износ теплообменных труб (ТОТ) в узлах контакта с дистанционирующими решетками (ДР), вызванный повышенными вибрациями ТОТ. Износ ТОТ приводит к межконтурным течам теплоносителя, что в итоге способствует увеличению дозовых нагрузок на персонал, а также служит причиной остановок станций на длительный ремонт с глушением негерметичных теплообменных труб. Длительные простои АЭС снижают ее экономические показатели, такие как коэффициент использования установленной мощности. Глушение негерметичных теплообменных труб может также привести к снижению мощности станции или досрочной замене такого генератора. Для АЭС типа PWR замена ПГ сопряжена с затратами порядка 100...200 млн долларов на каждый блок (в ценах 1995 г.), без учета затрат на невыработку электроэнергии [1].

Существует достаточно причин отказов теплообменной поверхности ПГ АЭС. Для разных конструкций ПГ в зависимости от применяемых в них конструкционных материалах и типах теплоносителя характерно преобладание одной из причин отказов.

Для парогенераторов, имеющих большие скорости теплоносителя в межтрубном пространстве, одной из главных причин выхода из строя теплообменной поверхности является повышенная вибрация труб. Чрезмерная вибрация может служить причиной износа теплообменных труб в узлах дистанционирования, а также вызывать усталостное разрушение труб [2].

Большой объем данных об отказах теплообменной поверхности для парогенераторов накоплен за рубежом. Виброизнос является одной из основных причин глушения теплообменных труб для вертикальных парогенераторов АЭС PWR [3, 4]. При обследованиях более 50 % АЭС [2] сообщалось о выявлении фреттинг-коррозии и износа труб в зонах дистанционирования (в большинстве случаев на участкахгиба труб).

Для улучшения экономических показателей АЭС в части капитальных затрат (снижения металлоемкости, уменьшения объемов и габаритов зданий) проектируемые парогенераторы АЭС зачастую проектируют на бóльшую единичную мощность, чем их предшественники. Для реакторов на быстрых нейтронах это приводит к изменению конструктивной схемы ПГ — переходу от секционной к интегральной схеме. Для интегральной схемы характерны ряд преимуществ: меньшие капитальные затраты металла и бетона на единицу мощности, уменьшение количества арматуры и приборов. К недостаткам такой схемы относятся: усложнение процесса изготовления, а также необходимость отключения всего ПГ при возникновении течи.

Для сравнения на рис. 1 показаны конструкции ПГ АЭС с реактором-прототипом на быстрых нейтронах PFBR, который вводится в эксплуатацию в Индии, и ПГ АЭС CFBR, который сейчас находится на стадии проектирования. Проектируемый ПГ для АЭС CFBR при сохранении основных конструктивных решений предшественника имеет бóльшую единичную мощность и большой ресурс работы [5].

Основные механизмы возбуждения колебаний теплообменных труб парогенератора. Для оценки вибропрочности трубного пучка на стадии проектирования ПГ необходимо определить параметры колебаний теплообменных труб. Наибольшие амплитуды колебаний труб достигаются на участках трубного пучка, где скорость теплоносителя в межтрубном пространстве имеет поперечную составляющую. Как раз такие участки будут лимитировать вибропрочность трубного пучка в целом.

Различают несколько видов возбуждений колебаний ТОТ в поперечном потоке теплоносителя: турбулентный механизм (баффтинг), вихревой механизм, обусловленный периодическим отрывом вихрей от труб; гидроупругая неустойчивость, возникающая при выходе трубы из равновесного положения [6–8]. Амплитудно-скоростная характеристика вибрации ТОТ показана на рис. 2.

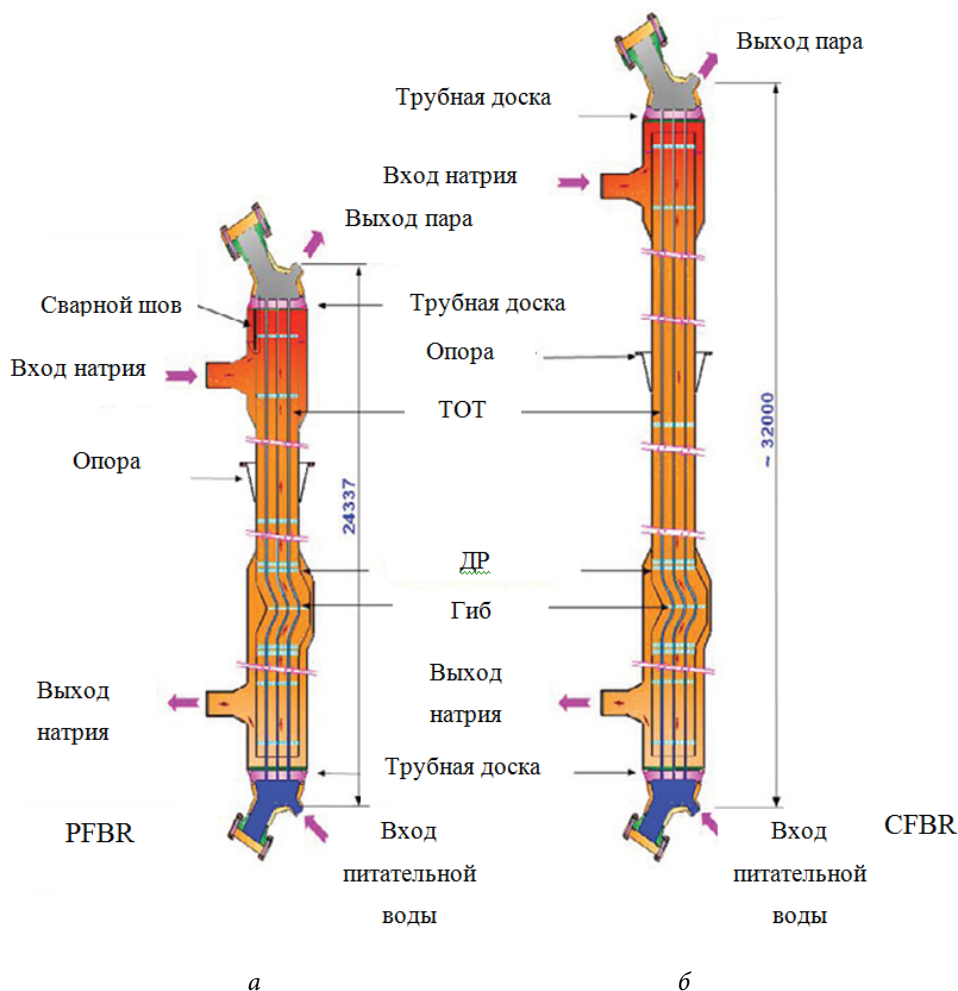


Рис. 1. Конструкция ПГ для АЭС PFBR (а) и ее модернизированный вариант ПГ для АЭС CFBR (б)

Турбулентный механизм является определяющим при малых скоростях набегающего потока. Вынужденные колебания теплообменных труб происходят под воздействием турбулентных пульсаций скорости потока с широкополосным спектром [7].

Вихревой механизм преобладает тогда, когда собственная частота колебаний трубы совпадает с частотой отрыва вихрей [8]. Частота отрыва вихрей определяется числом Струхала:

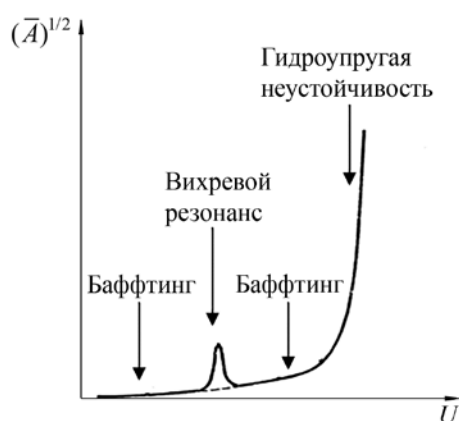


Рис 2. Амплитудно-скоростная характеристика вибрации ТОГ

$$\text{Sh} = \frac{f_s d}{u},$$

где f_s — характерная частота отрыва вихрей; u — скорость потока теплоносителя.

Число Струхала зависит от геометрии трубного пучка (компоновки и относительных шагов).

Гидроупругое возбуждение (гидроупругая неустойчивость) начинает проявляться при скоростях потока некоторого значения, называемого критическим. Критическая скорость является функцией параметра затухания колебаний [7]. Колебания происходят с большой амплитудой на частоте, близкой к собственной [9].

Для надежной работы трубного пучка и недопущения резонансных колебаний необходима отстройка частот возмущающего воздействия (частоты отрыва вихрей, лопаточная и обратная частота насоса) от собственных частот. Работа трубного пучка при действии гидроупругого возбуждения должна быть полностью исключена. Помимо всего для ПГ большой мощности возможна существенная неравномерность поля скорости на входе в трубный пучок, которая будет приводить к увеличению амплитуды колебаний ТОТ в зоне повышенной скорости. Поэтому снижение данной неравномерности будет положительно сказываться на вибропрочности трубного пучка.

Экспериментальные методы исследования колебаний теплообменных труб парогенераторов. В большинстве случаев точное решение системы уравнений, совместно описывающих колебания и гидродинамику трубных пучков, невозможно [7]. Это приводит к широкому применению экспериментальных и расчетно-экспериментальных методов исследования вынужденных колебаний ТОТ.

Достоинствами экспериментального метода являются возможность исследования динамического отклика системы при изменении технологических параметров в широких пределах. В таких исследованиях можно оценить запасы по уровням вибрации до критического уровня, а также определить критические значения ряда эксплуатационных параметров, например, критическую скорость теплоносителя, при которой возникают гидроупругие колебания. Зачастую экспериментальными методами определяют коэффициенты демпфирования и присоединенной массы теплоносителя [9].

К задачам эксперимента также относится измерение гидродинамических нагрузок, действующих на трубный пучок со стороны потока. Такие модели, как правило, являются уменьшенными и содержат только несколько рядов труб. Нестационарные силы, действующие на трубу, определяют при одновременном измерении мгновенных значений давления по периметру трубы и дальнейшем интегрировании этих давлений. Вычисленные гидродинамические нагрузки могут быть использованы в том числе для определения динамического отклика ТОТ [10].

На стадии проектирования ПГ в большинстве случаев проводят исследования гидродинамически возбуждаемых вибраций ТОТ на крупномасштабных или полномасштабных моделях [11]. Такой способ моделирования позволяет

наиболее полно воспроизвести действующие на трубный пучок нагрузки, а также условия закрепления ТОТ в ДР. Для уменьшения поперечного размера часто применяют секторные модели (угол сектора 30...120°) [12–14]. Недостатком подобных моделей можно считать невозможность смоделировать неравномерное распределение скорости теплоносителя на входе в трубный пучок, а также уменьшенное значение скорости вблизи границ сектора.

Расчетные методы исследования колебаний теплообменных труб парогенераторов. Упрощенно вынужденные колебания ТОТ можно описать с помощью дифференциального уравнения, в котором используются приведенные параметры:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = F,$$

где m — расчетная масса трубы на единицу длины; c — коэффициент демпфирования; k — коэффициент жесткости; y — поперечное смещение трубы; $F(t)$ — гидродинамическая сила возбуждения.

В общем виде гидродинамическую силу можно определить, решив систему уравнений Навье — Стокса, которая состоит из уравнения неразрывности и уравнения движения [15]:

$$\begin{aligned} \nabla \vec{U} &= 0; \\ \rho_f \left[\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \nabla \vec{U} \right] - \mu \nabla^2 \vec{U} + \nabla p &= F, \end{aligned}$$

где ρ_f — плотность жидкости; \vec{U} — вектор скорости; μ — коэффициент динамической вязкости; p — давление.

Уравнение неразрывности записано для случая несжимаемой жидкости. Система уравнений Навье — Стокса является незамкнутой, поэтому получение точного решения системы уравнений затруднено. При этом гидродинамическая сила имеет разную природу для каждого механизма колебаний. В упрощенной постановке для описания различных механизмов колебаний применяют различные математические модели.

Для описания динамического отклика трубы под действием турбулентных пульсаций используют модель, описывающую бафтинг как вынужденные колебания упругой трубки под действием случайной силы. В литературе наибольшее распространение получили модели Блевинса [8] и Петтигрю — Гормана [16].

Поведение ТОТ под действием вихревого механизма возбуждения можно описать, используя в качестве внешней силы силу, изменяющуюся по синусоидальному закону. Большинство полуэмпирических корреляций для данного механизма возбуждения основаны на модели, приведенной в [17].

Гидроупругая неустойчивость, как правило, возникает при достижении скоростью потока некоторого определенного значения, поэтому в большинстве

математических моделей предусмотрено определение зависимости критической скорости от параметров колебательной системы [18].

В последние годы появилось множество публикаций, посвященных сопряженному моделированию гидродинамической вибрации в пучках стержней с применением CFD-кодов [19, 20]. Решение такой задачи состоит из нескольких этапов: моделирование течения жидкости в межтрубном пространстве с определением стационарных и динамических нагрузок на каждый стержень и численного исследования динамического отклика колебательной системы под действием внешней нагрузки. При подобном подходе к расчету нестационарных гидродинамических нагрузок, действующих на трубный пучок, используют метод моделирования крупных вихрей (LES) [21]. На данный момент этот метод применяют в основном для простых геометрических областей, поскольку он требует больших вычислительных ресурсов.

Выводы. Повышенные вибрации труб ПГ АЭС являются одной из основных причин выхода из строя теплообменной поверхности. Требование к улучшению экономических показателей строящихся АЭС приводит к изменению в конструкциях ПГ, увеличению их единичной мощности.

С точки зрения возникновения максимальной вибрации ТОТ наиболее опасны участки, где в межтрубном пространстве доминирует поперечное течение жидкости. Основными механизмами возбуждения колебаний труб в поперечном потоке являются турбулентный, вихревой, гидроупругая неустойчивость.

Для большинства существующих парогенераторов АЭС были проведены экспериментальные исследования на крупномасштабных и полномасштабных моделях. Расчетные исследования в большинстве случаев ограничивались применением полуэмпирических зависимостей, а также созданием математических моделей для описания определенных режимов возбуждения.

Литература

- [1] Douglas J. Solutions for steam generators. *EPRI Journal*, 1995, no. 3, pp. 28–35.
- [2] MacDonald P.E., Shah V.N., Ward L.W., Ellison P.G. Steam generator tube failures. Idaho National Engineering Laboratory, 1996, 307 p.
- [3] Alley C.T. Oconee nuclear station unit #1 steam generator discussion with NRC. Washington, 2005, 21 p.
- [4] Schneider M. Nuclear France abroad. History, status and prospects of French nuclear activities in foreign countries. Paris, 2009, 49 p.
- [5] Chetal S.C., Chellapandi P., Puthiyavinayagam P., Raghupathy S., Balasubramanian V., Selvaraj P., Mohanakrishnan P., Raj B. Current status of fast reactors and future plans in India. *Energy Procedia*, 2011, no. 7, pp. 64–73.
- [6] Махутов Н.А., Каплунов С.М., Прусс Л.В. *Вибрация и долговечность судового энергетического оборудования*. Ленинград, Судостроение, 1985, 300 с.
- [7] Жукаускас А., Улинскас Р., Катинас В. *Гидродинамика и вибрации обтекаемых пучков труб*. Вильнюс, Мокслас, 1984, с. 219–220.
- [8] Blevins R.D. *Flow induced vibration*. Krieger Publ., 2001, 488 p.

- [9] Каплунов С.М., Смирнов Л.В., ред. *Динамика конструкций гидроаэроупругих систем*. Москва, Наука, 2002, 397 с.
- [10] Столотнюк Я.Д. *Разработка модели гидроупругих колебаний трубных пучков парогенераторов реакторных установок в поперечном потоке*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 199 с.
- [11] Hayden O. Design and construction of past and present steam generators for the UK fast reactors. *J. Br. Nucl. Energy Soc.*, 1976, vol. 15, no. 2, pp. 129.
- [12] Shin Y.S., Wambsganss M.W. Flow-induced vibration in LMFBR steam generators: a state-of-the-art review. *Nuclear Engineering and Design*, 1977, vol. 40, no. 2, pp. 235–284.
- [13] Prakash V., Thirumalai M., Prabhakar R., Vaidyanathan G. Assessment of flow induced vibration in a sodium-sodium heat exchanger. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, vol. 239, no. 1, pp. 169–179.
- [14] Thirumalai M. Experimental investigation of flow-induced vibration in PFBR steam generator sector model. *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology*, 2007, vol. 3, no. 1, pp. 88–108.
- [15] Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. Москва, Наука, 1974, 712 с.
- [16] Pettigrew M.J., Gorman D.J. Vibration of heat exchanger tube bundles in liquid and two-phase cross-flow. *Proc. ASME Pressure Vessel and Piping Conference*, 1981, vol. 52, pp. 89–110.
- [17] Hartlen R.T., Currie I.G. Lift-oscillator model of vortex-induced vibration. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1970, no. 5, pp. 577–591.
- [18] Lever J.H., Weaver D.S. A theoretical model for the fluidelastic instability in heat exchanger tube bundles. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1982, vol. 104, no. 3, pp. 147–158.
- [19] Simoneau J.P., Sageaux T., Moussallam T., Bernard O. Fluid structure interaction between rods and a cross flow – numerical approach. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, no. 11, pp. 4515–4522.
- [20] Mark A. Christona, Roger Lu, Jozsef Bakosic. Large-eddy simulation, fuel rod vibration and grid-to-rod fretting in pressurized water reactors. *Journal of Computational Physics*, 2016, vol. 322, pp. 142–161.
- [21] Грабарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. *Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2012, 88 с.

Носенко Артем Петрович — инженер-конструктор 2-й категории, АО ОКБ «Гидропресс», Подольск, Российская Федерация.

Волков Василий Юрьевич — инженер-конструктор 1-й категории, АО ОКБ «Гидропресс», кандидат технических наук, Подольск, Российская Федерация.

Научный руководитель — Макаров Виктор Васильевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории, АО ОКБ «Гидропресс», Подольск, Российская Федерация.

Научный руководитель — Афанасьев Андрей Вячеславович, кандидат технических наук, ведущий конструктор, АО ОКБ «Гидропресс», Подольск, Российская Федерация.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL METHODS OF INVESTIGATING THE VIBRATION OF HEAT-EXCHANGING STEAM GENERATOR TUBES AT THE NUCLEAR POWER STATION

A.P. Nosenko

nosenkoartyom1989@gmail.com

V.Yu. Volkov

SPIN-code: 5217-9764

Vasya-volkov@yandex.ru

SPIN-code: 9360-1379

OKB "Gidropress", Podolsk, Russian Federation

Abstract

Steam-generating unit is one of the most critical components of the nuclear power station; trouble-free operation of the stations depends on its reliability. One of the most essential components of the steam-generating unit is a tube bundle, since the heat-exchanging tube serves as a natural boundary between the contours of the nuclear power plant. The heat-exchanging tubes breakdown is the main reason for coolant leaks. The article considers the basic methods for investigating the vibration of the heat-exchanging steam generator tubes at the nuclear power station. We show the main mechanisms of the heat-exchanging steam generator tubes vibration generation and highlight the impact of various design and operational factors on the vibration parameters. We provide examples of using the computational and experimental methods of researching the vibration of the heat-exchanging steam generator tubes at the nuclear power station.

Keywords

Vibrations, nuclear power station, thermal power station, heat-exchange apparatus, nuclear reactor, steam-generating unit, tube bundle, spacer grid, characteristic vibrations, hydrodynamic force, constrained vibrations

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Douglas J. Solutions for steam generators. *EPRI Journal*, 1995, no. 3, pp. 28–35.
- [2] MacDonald P.E., Shah V.N., Ward L.W., Ellison P.G. Steam generator tube failures. Idaho National Engineering Laboratory, 1996, 307 p.
- [3] Alley C.T. Oconee nuclear station unit #1 steam generator discussion with NRC. Washington, 2005, 21 p.
- [4] Schneider M. Nuclear France abroad. History, status and prospects of French nuclear activities in foreign countries. Paris, 2009, 49 p.
- [5] Chetal S.C., Chellapandi P., Puthiyavinayagam P., Raghupathy S., Balasubramanian V., Selvaraj P., Mohanakrishnan P., Raj B. Current status of fast reactors and future plans in India. *Energy Procedia*, 2011, no. 7, pp. 64–73.
- [6] Makhutov N.A., Kaplunov S.M., Pruss L.V. Vibratsiya i dolgovechnost' sudovogo energeticheskogo oborudovaniya [Vibration and life duration of marine power engineering equipment]. Leningrad, Sudostroenie publ., 1985, 300 p.
- [7] Zhukauskas A., Ulinskas R., Katinas V. Hidrodinamika i vibratsii obtkaemykh puchkov trub [Hydrodynamics and vibration of stream-lined pipe bundle]. Vil'nyus, Mokslas publ., 1984, pp. 219–220.

- [8] Blevins R.D. Flow induced vibration. Krieger Publ., 2001, 488 p.
- [9] Kaplunov S.M., Smirnov L.V., eds. Dinamika konstruktivnykh gidroaerouprugikh sistem [Construction dynamics of aerofluidelastic system]. Moscow, Nauka publ., 2002, 397 p.
- [10] Stolotnyuk Ya.D. Razrabotka modeli gidrouprugikh kolebaniy trubnykh puchkov parogeneratorov reaktornykh ustanovok v poperechnom potoke. Diss. kand. tekhn. nauk [Model development of pipe bundles fluid-elastic vibrations of reactor facility steam generator in cross-flow. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman Press, 2004, 199 p.
- [11] Hayden O. Design and construction of past and present steam generators for the UK fast reactors. *J. Br. Nucl. Energy Soc.*, 1976, vol. 15, no. 2, pp. 129.
- [12] Shin Y.S., Wambsganss M.W. Flow-induced vibration in LMFBR steam generators: a state-of-the-art review. *Nuclear Engineering and Design*, 1977, vol. 40, no. 2, pp. 235–284.
- [13] Prakash V., Thirumalai M., Prabhakar R., Vaidyanathan G. Assessment of flow induced vibration in a sodium-sodium heat exchanger. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, vol. 239, no. 1, pp. 169–179.
- [14] Thirumalai M. Experimental investigation of flow-induced vibration in PFBR steam generator sector model. *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology*, 2007, vol. 3, no. 1, pp. 88–108.
- [15] Schlichting H. Grenzschicht-Theorie. Karlsruhe, G. Braun publ., 1951, 483 p. (Russ. ed.: Teoriya pogramichnogo sloya. Moscow, Nauka publ., 1974, 712 p.)
- [16] Pettigrew M.J., Gorman D.J. Vibration of heat exchanger tube bundles in liquid and two-phase cross-flow. *Proc. ASME Pressure Vessel and Piping Conference*, 1981, vol. 52, pp. 89–110.
- [17] Hartlen R.T., Currie I.G. Lift-oscillator model of vortex-induced vibration. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1970, no. 5, pp. 577–591.
- [18] Lever J.H., Weaver D.S. A theoretical model for the fluidelastic instability in heat exchanger tube bundles. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1982, vol. 104, no. 3, pp. 147–158.
- [19] Simoneau J.P., Sageaux T., Moussallam T., Bernard O. Fluid structure interaction between rods and a cross flow – numerical approach. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, no. 11, pp. 4515–4522.
- [20] Mark A. Christona, Roger Lu, Jozsef Bakosic. Large-eddy simulation, fuel rod vibration and grid-to-rod fretting in pressurized water reactors. *Journal of Computational Physics*, 2016, vol. 322, pp. 142–161.
- [21] Grabaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L. Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy [Turbulence simulation in calculations of complex flows]. Sankt-Petersburg, Izd-vo Politekhicheskogo Universiteta publ., 2012, 88 p.

Nosenko A.P. — Design Engineer of the 2nd category, OKB “Gidropress”, Podolsk, Russian Federation.

Volkov V.Yu. — Design Engineer of the 1st category, Cand. Sc. (Eng.), OKB “Gidropress”, Podolsk, Russian Federation.

Scientific advisor — A.V. Afanasev, Cand. Sc. (Eng.), Project Engineer, OKB “Gidropress”, Podolsk, Russian Federation.

Scientific advisor — V.V. Makarov, Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, OKB “Gidropress”, Podolsk, Russian Federation.