
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039:621.18

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ШИРМ ВЕРТИКАЛЬНОГО
ПАРОГЕНЕРАТОРА К РЕАКТОРУ ВВЭР**

© 2017 А.М. Беседин, В.М. Коваленко, С.Ю. Чеснакова, А.Ю. Смолин

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

В работе приведены расчетные и экспериментальные исследования по определению параметров вибрации эвольвентных ширм на полномасштабной (по высоте трубчатки) воздухо-водяной модели вертикального парогенератора. Определен ресурс эвольвентных ширм.

Цель работы – определение вибрационных характеристик и ресурса парогенерирующих труб.

Ключевые слова: виброустойчивость, эвольвентные ширмы, трубный пучок, турбулентность, срыв вихрей, гидроупругое взаимодействие, собственная частота, спектр частот, напряжения.

Поступила в редакцию: 30.11.2017

ВВЕДЕНИЕ

Эвольвентные ширмы – перспективный тип теплообменной поверхности, применение которой в вертикальных парогенераторах обеспечивает снижение металлоемкости аппарата, позволяет создавать плотноупакованные трубные пучки, характеризующиеся равномерным заполнением поперечного сечения, постоянным зазором между ширмами, что дает возможность уменьшить неравномерность теплогидравлических характеристик по сечению [1]. В сравнении с радиальными ширмами диаметр трубчатки уменьшается в 1,3 раза, масса одного погонного метра корпуса аппарата – в 1,7 раза. Проходное сечение по второму контуру – в 2,3 раза, что увеличивает коэффициент теплоотдачи на экономайзерном участке в 1,6 раза.

Как показывает опыт эксплуатации АЭС [2], при работе теплообменного оборудования возникают гидродинамические возбуждаемые вибрации различных его элементов. Наименее устойчивые в вибрационном соотношении являются трубные пучки парогенераторов. Этот факт обуславливает необходимость всестороннего исследования вибрации перспективных типов теплообменных поверхностей, которые еще не использовались на практике, в том числе эвольвентных ширм.

В данной работе были проведены расчетно-экспериментальные исследования виброндежности эвольвентных ширм различных конфигураций. Оценка виброндежности выполнялась, прежде всего, из условия исключения резонансных колебаний ширм. Задача решена расчетно-экспериментальным методом, предусматривающим опытное определение параметров вибрации: виброускорения, частоты амплитуды смещения и расчет максимального знакопеременного изгибного напряжения трубок.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования выполнены на пятимегаватной модели трубчатки вертикального парогенератора электрической мощностью 250 МВт для реактора ВВЭР-1000.

Модель конструктивно выполнена из трех эвольвентных ширм, расположенных в сегментном канале из двух эвольвентных боковых стенок и двух крайних стенок с радиусом равным соответственно радиусу обечайки опускного участка и радиусу коллектора теплоносителя. В качестве пароводяной смеси, движущейся в межтрубном пространстве, использовалась смесь воздуха и воды. Она была смонтирована на стенде экспериментальной базы ВНИИАМ (г. Москва).

В качестве датчиков использовались двухкомпонентные пьезоакселерометры типа 2ПА-15 с усилителями зарядов УЗ5-2, изготовленные и откалиброванные в отделе ОНМИМ НПО ЦНИИТМАШ. Они вырабатывают электрический сигнал (напряжение), пропорциональный по амплитуде ускорению. Максимально допустимая температура для датчика равна 350 °С. В датчике расположены два пьезоэлемента, повернутые относительно друг друга на 90°С, что обеспечивает измерение вибрации в двух взаимно перпендикулярных направлениях [3, 4]. Схема расположения датчиков на трубчатке и их ориентация в пространстве приведены на рисунке 1.

На модели, состоящей из трех полномасштабных ширм, были установлены пять датчиков: три – на трубчатке (средней ширме) и два – на раздающем и сорбирующем коллекторах.

Электрический сигнал от датчика усиливался с помощью усилителя заряда УЗ 5-2, подключенного к двухполярному стабилизированному источнику питания (± 6 В). Датчики соединялись с клеммными коробками кабелем КТМС, а они, в свою очередь, с усилителями – antivибрационными проводами. Коэффициент преобразования ускорения движения датчика в выходное напряжение усилителя зарядов для всех десяти каналов измерения равен 2 мВ/м·с².

Виброускорение связано с выходным напряжением усилителя и коэффициентом преобразования K зависимостью:

$$a = \frac{U_{\text{вых}}}{K}.$$

Сигналы с усилителей регистрировались тремя способами.

При определении параметров вибрации сводных колебаний – с помощью шлейфового осциллографа НП5 с предварительно включенным десятиканальным устройством ВВМ-131, предназначенным для оценки уровня сигналов, поступающих с усилителя и выбора масштаба измерения, т.е. регулирования тока шлейфа гальванометра (выбора поля записи). Скорость движения ленты фотобумаги выбиралась такой, чтобы соседние пики гармоник не накладывались друг на друга. В опытах эта скорость была равна 5 м/с.

Сигналы свободных колебаний, а также вынужденных, регистрировались и с помощью измерительно-регистрающего комплекса, электрическая структурная схема которого показана на рисунке 2.

Коммутатор аналоговых сигналов предназначен для выбора одного из 16-ти измерительных каналов и передачи аналогового сигнала на вход аналогово-цифрового преобразователя.

Аналогово-цифровой преобразователь АЦП-Ф4222 предназначен для выдачи десятиразрядного цифрового кода в буферную оперативную память.

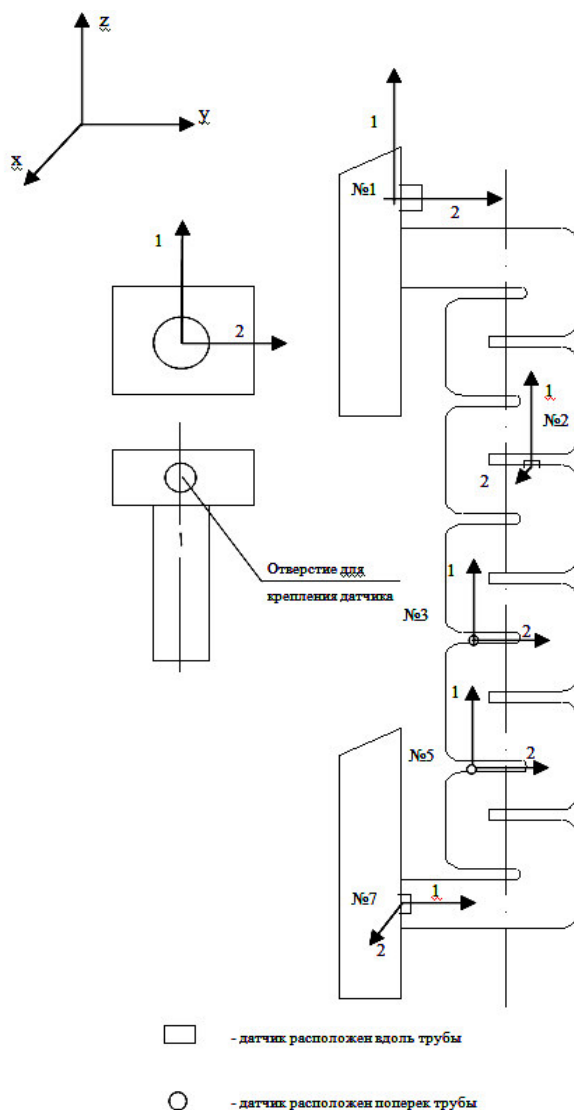


Рис. 1. – Схема расположения датчиков [Sensor configuration]

Буферная оперативная память предназначена для временного хранения 16К десятиразрядных слов.

Узел управления синхронизации организует работу всей системы в зависимости от выбранного режима.

Генератор сигналов Г5-54 предназначен для задания временных интервалов съема аналоговых данных.

Узел сопряжения предназначен для подключения буферной памяти или аналого-цифровой клавиатуры к устройству подготовки данных.

Клавиатура служит для ввода аналого-цифровой информации.

Устройство подготовки данных предназначено для непосредственной записи на магнитную ленту информации, введенной посредством клавиатуры или из буферной памяти.

Максимальная частота опроса, задаваемая генератором импульсов, $50 \cdot 10^3$ Гц. Объем памяти устройства равен 16000 измерений. Продолжительность записи одного сигнала равна $0,2 \cdot 10^{-4}$ сек. Длительность полного заполнения оперативной памяти равна 0,32 сек. Для считывания данных с магнитной ленты и ввода их в оперативную память ЭВМ была разработана специальная программа.



Рис. 2. – Электрическая структурная схема измерительно-регистрирующего комплекса [Electrical structural scheme of the measuring and recording complex]

В режиме вынужденных колебаний ширм одновременно с записью сигналов в измерительном комплексе выполнялись замеры частоты и выходного напряжения с помощью анализатора спектра С4-48.

При определении собственных частот колебания возбуждались в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Параметры вибрации определялись в режимах:

- свободных колебаний;
- генерации пара с нагрузками 50, 80 и 100%;
- течения среды только по первому контуру с нагрузками 50 и 100%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Экспериментальные данные для первых гармоник свободных колебаний, полученные с помощью осциллографа, приведены в таблице 1.

Характерны очень высокие, в сравнении с радиальными ширмами, частоты колебаний: от 1100 до 3720 Гц. Для радиальных ширм частоты первых гармоник находятся в диапазоне 10-200 Гц. Такое отличие объясняется большей жесткостью эвольвентных ширм, что обеспечивается конструкцией их крепления, а также конструкцией модели ширмы. Конструктивно она выполнена полномасштабной по высоте и примерно в 5 раз меньше по ширине и соединена с кожухом, что увеличивает ее жесткость.

Таблица 1. – Свободные гармоники при вертикальном расположении ширм [Free harmonics at vertical screen configuration]

Номер датчика	Номер канала	Направление канала	Направление удара	Декремент затухания	Частота, Гц
1	2	y	y	54,3	2500
2	1	z	x	14,4	3730
2	1	z	z	10,2	2240
2	2	x	x	19,1	1720
5	1	z	z	39,9	2420
5	2	y	y	58,6	3170
7	1	y	z	11,9	1100

Во ВНИИАМ была выполнена реконструкция модели, вследствие чего жесткость ширм уменьшилась. Параметры свободных колебаний были определены с помощью измерительного комплекса. При обработке данных сигнал снимался с датчиков и записывался в форме:

$$U_{\text{вых}}(t) = \sum_{K=1}^{\infty} [C_K \cos(ft) + C_C \sin(ft)] + f_0,$$

где C_K и C_C – коэффициенты Фурье; f – частота.

Из данных, представленных на рисунке 3, следует, что частота первых гармоник уменьшилась до 200 Гц.

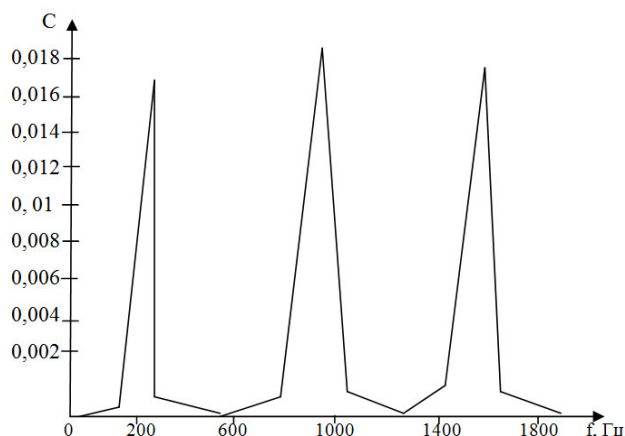


Рис. 3. – Зависимость коэффициентов Фурье от частоты [Fourier Coefficient Dependence on the Frequency]

В таблице 2 приведены параметры вибрации по первым гармоникам для режима циркуляции среды только по первому контуру.

При стопроцентной нагрузке основные частоты находятся в диапазоне от 370 до 470 Гц, а при нагрузке 50 % - от 370 до 660 Гц. Амплитуды смещения уменьшаются примерно в 2 раза при переходе от стопроцентной к пятипроцентной нагрузке.

В режиме генерации пара количество гармоник становится больше, частота высших достигает 2000 Гц. В режиме прокачки первого контура частота высших гармоник равна 1000-1400 Гц.

Частота основной гармоники в режиме генерации пара равна 290 ± 20 Гц, т.е. уменьшается на 80-190 Гц, а амплитуда возрастает с 0,054 до 0,07 мм.

В опытах с генерацией пара не обнаружено влияния нагрузки на параметры вибрации.

Таблица 2. – Опытные и расчетные данные по вибрации модели при прокачке среды только по первому контуру [Experimental and calculated data on model vibration when pumping the field along the first contour only]

Нагрузка %	Номер датчика	Номер канала	Частота, Гц	Виброускорение, M/c^2	a/g	Амплитуда A , мм
100	7	1	480	11,0	1,1	0,048
	7	2	480	15,0	1,5	0,065
	5	1	470	12,0	1,2	0,054
	5	2	470	9,6	0,98	0,043
	1	1	370	12,0	1,2	0,055
50	1	2	660	13,5	1,4	0,031
	3	2	370	12,75	1,3	0,093
	7	1	660	12,0	1,2	0,028
	7	2	660	10,5	1,1	0,024

ОЦЕНКА ВИБРОПРОЧНОСТИ ТРУБЧАТКИ

Прочность трубчатки определена по максимальному значению виброскорости и напряжения [5, 6]:

$$\sigma_{max} = v_{max} \sqrt{C \cdot \frac{E \cdot \rho}{g}},$$

где σ_{max} – максимальное значение знакопеременного напряжения, МПа;
 v_{max} – максимальное значение виброскорости, м/с;
 C – коэффициент, учитывающий способ заделки и крепления трубок;
 E – модуль упругости материала трубок, МПа;
 ρ – плотность материала трубок, кг/м³.
 Максимальная виброскорость равна $v_{max}=1050$ мм/с.

В первом приближении коэффициент C был принят равным 3 [7]. Рассчитанное для стали 12X18Н10Т значение $\sigma_{max} = 2,5$ МПа.

Максимальный предел выносливости для нее равен 100 МПа. В соответствии с работами [8, 9] знакопеременные напряжения с амплитудой, равной менее половины минимального предела выносливости стали (50 МПа) не приводят к повреждению конструкции.

Вибропрочность трубчатки была оценена по методике, приведенной в работе [10]. Допускаемая амплитуда вибронапряжений в металле трубок равна:

$$[\sigma_a] = \frac{\sigma_{-1}^t \cdot k}{n_\sigma \left(1 + \frac{\sigma_{-1}^t}{\sigma_b^t} \cdot \frac{1+r}{1-r}\right)} = \frac{30,4 \cdot 1,2}{10 \cdot \left(1 + \frac{30,4}{392} \cdot \frac{1+0,6}{1-0,6}\right)} = 2,9 \text{ МПа.}$$

Предел выносливости при симметричном цикле рассчитывается по формуле Мэнсона:

$$\sigma_{-1}^t = 1,75 \left(\sigma_b^t / N_{0,12} \right) = 1,75 \left[392 / (18,9 \cdot 10^{10})^{0,12} \right] = 30,4 \text{ МПа.}$$

Число циклов нагружения для ресурса трубчатки равно 30 лет:

$$N = 0,946 \cdot 10^9 \cdot f = 0,946 \cdot 10^9 \cdot 200 = 18,9 \cdot 10^9,$$

где f – частота вибрации ширм, Гц.

Коэффициент асимметрии ширм цикла:

$$r = \frac{(\sigma_{max} - 2\sigma_a)}{\sigma_{max}} = \frac{(147,9 - 2 \cdot 30,4)}{147,9} = 0,6.$$

Максимальное напряжение цикла:

$$\sigma_{max} = \sigma_{cp} + \sigma_a = 117,5 + 30,4 = 147,9 \text{ МПа},$$

где принято: $\sigma_a = \sigma_{-1}^t$, $\sigma_{cp} = [\sigma_H]$.

Коэффициент запаса по напряжению принят равным 10.

Коэффициент напряжений $k=1,2$.

Из сравнения полученных данных следует, что максимальное значение знакопеременного напряжения практически не превышает допускаемую амплитуду вибронпряжений в металле трубок $[\sigma_a]$, которая рассчитана для ресурса трубок равного 30 лет и десятикратного запаса по напряжению [11].

ВЫВОДЫ

1. Согласно результатам расчетного исследования, частота свободных колебаний L – образных эвольвентных ширм слабо зависит от длины ее консольной части. Так, при увеличении длины с 0,5 до 2 м частота изменяется на 25-30 %. Длина ширмы в значительной мере влияет на собственную частоту. При увеличении длины ширмы с 4 до 10 м, т.е. в 2,5 раза собственная частота снижается более чем в 6 раз как в случае свободной ширмы, так и с закреплением. Собственная частота ширмы линейно зависит от числа трубок. Амплитуда вынужденных колебаний значительно возрастает с уменьшением числа трубок в ширме. Так при длине ширмы, равной 6 м, и отношении частоты возбуждающей силы к собственной частоте, равной 0,9, уменьшение числа трубок с 75 до 5 приводит к увеличению амплитуды в 5 раз для случая закрепленной ширмы и в 1000 раз – для свободной ширмы.

2. Оценка вибропрочности L – образных эвольвентных ширм выявила отсутствие резонансных колебаний ширм на экономайзерном и испарительном участках парогенератора.

3. Собственная частота эвольвентных традиционных ширм, определенная экспериментально на пятимегаватной модели парогенератора, равна 200 Гц. Расчетные частоты гидродинамического возбуждения не превышает нескольких десятков Гц, что свидетельствует о достаточной отстройке ширм модели от резонанса.

4. Проведенные исследования показали, что при рабочих условиях модели знакопеременные напряжения в трубках значительно меньше допустимых, что свидетельствует о достаточной вибропрочности конструкции в течение периода эксплуатации.

5. Эвольвентные ширмы в сравнении с радиальными обладают большей жесткостью, что повышает их вибропрочность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов, Б. С. и др. Теплообмен в ядерных энергетических установках [Текст] / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. М.: Изд.-во МЭИ, 2003. - 548 с.
2. Зорин, В.А. Атомные электростанции [Текст] / В.А. Зорин. - М.: Издательский дом МЭИ, 2012. - 672 с.

3. Дайчак, М.Л. и др. Методы и средства натурной тензометрии [Текст] / М.Л. Дайчак, М.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. - М.: Машиностроение, 1989. - 240 с.
4. Вибрация в технике. Справочник под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение. – 1980.
5. РТМ 108.302.03-86. Парогенераторы АЭС. Расчет вибрации теплообменных труб [Текст]. / Л.: НПО ЦКТИ, 1987. – 74 с.
6. Корецкий, С.А. Оптимальный выбор конструкционных параметров прямотрубных теплообменных аппаратов повышенной вибропрочности [Текст] / Корецкий С.А.: дисс... канд. техн. наук. – М., 2012.
7. Аксельрод, А.Ф. и др. Экспериментальная обработка и расчет вибрационной устойчивости труб вертикального парогенератора [Текст] / А.Ф. Аксельрод, Б.С. Фокин // Энергомашиностроение. – 1984. – №12. – С. 25–28.
8. Фокин, Б.С. и др. Вибрации теплообменных труб в завихренном однофазном потоке [Текст] / Б.С. Фокин, Е.Н. Гольдберг, А.Ф. Аксельрод // Энергомашиностроение. – 1984. – №12. – С. 21–24.
9. Каплунов, С.М. и др. Вибрация трубных пучков под действием поперечного потока жидкости [Текст] / С.М. Каплунов, Т.Н. Фесенко, С.А. Корецкий // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – №6. – С. 29–36.
10. РТМ 108.031.05-84. Оборудование теплообменное АЭС. Расчет тепловой и гидродинамический [Текст]. / Л.: НПО ЦКТИ, 1985. – 87 с.
11. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст]. / М. Энергоатомиздат. – 1989.

REFERENCES

- [1] Petuxov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A., Solovjev S.L. Teploobmen v yadernyh energeticheskikh ustanovkakh [Heat transfer in nuclear power plants]. M. Pub. Izdatelstvo MEI [MPEI Publishing house], 2003, ISBN 5-7046-0843-4, 548 p. (in Russian)
- [2] Zorin V.A. Atomnye elektrostancii [Nuclear power plants]. M. Pub. Izdatelskij dom MEI [MPEI Publishing house], 2012, ISBN 978-5-383-00604-7, 672 p. (in Russian)
- [3] Dajchak M.L. Prigorovskij M.I., Hurshudov G.X. Metody i sredstva naturnoj tenzometrii [Methods and means of full strainometry]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1989, 240 p. (in Russian)
- [4] Vibratsiia v tekhnike. Spravochnik pod red. V.V. Bolotina. M.: Mashinostroenie. – 1980.
- [5] RTM 108.302.03-86. Parogeneratory AES. Raschet vibracii teploobmennyykh trub [RTM 108.302.0386. Steam generators of nuclear power plants. Calculation of vibration of heat exchange tubes]. Leningrad. Pub. NPO CKTI [NPO CKTI], 1987, 74 p. (in Russian)
- [6] Koretskii S.A. Optimalnyi vybor konstruktsionnykh parametrov priamotrubnykh teploobmennyykh apparatov povyshennoi vibroprochnosti [Optimal choice of design parameters for direct heat pipe heat exchangers of increased vibration resistance]. M. 2012. (in Russian)
- [7] Akselrod A.F., Fokin B.S. Eksperimentalnaia obrabotka i raschet vibratsionnoi ustoichivosti trub vertikalnogo parogeneratora [Experimental processing and calculation of vibration stability of vertical steam generator tubes]. Ehnergomashinostroenie [Power Engineering], 1984, №12, pp. 25–28. (in Russian)
- [8] Phokin B.S., Goldberg E.N., Akselrod, A.F. Vibracii teploobmennyykh trub v zavikhrennom odnofaznom potoke [Vibrations of Heat-Exchange Tubes in Swirling Single-Phase Flow]. Ehnergomashinostroenie [Power Engineering], 1984, №12, pp. 21–24. (in Russian)
- [9] Kaplunov, S.M., Fesenko, T.N., Koreckij, S.A. Vibratsiya trubnykh puchkov pod dejstviem poperechnogo potoka zhidkosti [Vibration of Tube Bundle under the Transverse Fluid Flow Action]. Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin [Problems of Machine Building and Machine Reliability], 2008, №6, pp. 29–36. (in Russian)
- [10] RTM 108.302.03-86. Parogeneratory AEhS. Raschet vibracii teploobmennyykh trub [NPP Steam Generators. Calculation of Heat Exchange Tube Vibration]. Leningrad, 1987, 74 p. (in Russian)
- [11] PNAE G-7-002-86 Normy rascheta na prochnost oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [Norms for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1989, 350 p. (in Russian)

Experimental Determination of Vibration Characteristics of Vertical Steam Generator Involute Screens for WWER Reactor

A.M. Besedin, V.M. Kovalenko, S.Yu. Chesnakova, A.Yu. Smolin

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "Mephi",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360
e-mail: VITkafAE@mephi.ru*

Abstract – The work shows out calculations and experimental studies on the determination of the vibration parameters. The project of a full-scale air-water model of a vertical steam generator has been completed. The resource of involute screens is determined.

The objective of the work is to determine the vibration characteristics and service life of steam generating pipes, issue recommendations on improving the vibration resistance of the tube bundle.

Keywords: Vibration resistance, involute screens, tube bundle, turbulence, vortex shedding, hydroelastic interaction, natural frequency, frequency spectrum, stresses.