

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ ГЛАВНЫХ ПАРОПРОВОДОВ СВЕЖЕГО ПАРА ПЕРВОГО ЭНЕРГБЛОКА ВОЛГОДОНСКОЙ АЭС

**И.Н. Веселова, М.В. Окулова**

*Волгодонский институт (филиал) Южно-Российский государственный  
технический университет (Новочеркасский политехнический институт)*



Авторами рассматривается проблема эксплуатационных вибраций главных паропроводов энергоблоков АЭС унифицированной серии с ВВЭР-1000. Впервые она возникла в процессе пусконаладочных работ на этапах освоения мощности энергоблока № 1 Запорожской АЭС и оставалась актуальной для всех последующих блоков данной серии, в том числе и для энергоблока № 1 Волгодонской АЭС.

Зафиксированные повышенные вибрации системы паропроводов свежего пара приводили к различным повреждениям (появлению свищей, обрыву вспомогательных трубопроводов обвязки арматуры, разрегулировке конечных выключателей, сползанию контрольных грузов на импульсных предохранительных клапанах и т.п.), а также обуславливали многократное снижение циклической прочности главных паропроводов и повышение вероятности их усталостного разрушения.

Измерениями доказано, что источником эксплуатационных вибраций являются пульсации давления в паропроводах, которые имеются в каждом паропроводе. Данные, полученные экспериментальным путем на Волгодонской АЭС, хорошо коррелируют с данными, полученными расчетными методами на основе обследований трубопроводов АЭС «Тимелин».

Предложенные мероприятия реализованы на ВоАЭС во время проведения ППР2008. Реконструкция кольцевых отводов привела к значительному снижению уровня вибраций на приводах и арматуре БРУ-А и предохранительных клапанах, что, несомненно, повышает безопасность эксплуатации АЭС и увеличивает ресурс работы оборудования.

**Ключевые слова:** вибрации, паропровод, арматура, пульсация, трубопровод, реконструкция, АЭС.

**Key words:** vibrations, vapor conductor, fittings, beat, conduit pipe, rebuilding operation, nuclear power plant.

В статье рассматривается проблема повышенного уровня эксплуатационных вибраций главных паропроводов энергоблоков АЭС унифицированной серии с ВВЭР-1000. Впервые она возникла в процессе пусконаладочных работ на этапах освоения мощности 70–100%  $N_{ном}$  энергоблока № 1 Запорожской АЭС и оставалась актуальной для всех последующих блоков данной серии (Хмельницкая АЭС,

Балаковская АЭС, АЭС «Тимелин»), в том числе и для энергоблока № 1 Волгодонской АЭС.

Зафиксированные повышенные вибрации системы паропроводов свежего пара приводили к различным повреждениям (появлению свищей, обрыву вспомогательных трубопроводов обвязки арматуры и т.п.), а также обуславливали многократное снижение циклической прочности главных паропроводов и повышение вероятности их усталостного разрушения [1].

Измерениями доказано [2], что источником эксплуатационных вибраций являются пульсации давления, которые имеются в каждом паропроводе. Доминирующей измеренной частотой вибрации является величина 46 Гц.

### ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ВИБРАЦИЙ

Причинами возникновения пульсации давления теплоносителя являются вторичные течения. Примером вторичного течения является обтекание острого угла [3]. След поверхности раздела при обтекании острого угла показан штриховой линией  $AK$  на рис. 1. Вследствие инерции струйки не могут сразу обогнуть угол  $A$ , поэтому за ним образуется застойная область, а основное движение происходит выше линии  $AK$ .



Рис. 1. Обтекание острого угла

Частицы среды в застойной области в результате действия вязкости и турбулентного перемешивания втягиваются в зону основного потока в направлении движения. Благодаря расширению основного потока за углом  $A$  и соответственно уменьшению скоростей на участке  $AK$  давление незначительно повышается, что способствует возникновению обратного течения вблизи стенки. Так образуется вращательное движение, охватывающее значительную область ( $S$ ), направление циркуляции которого показано стрелками. Наблюдения показывают, что отдельные вихри, образующиеся на поверхности раздела, непрерывно перемещаются, и одни массы жидкости заменяются другими в рассматриваемой области. Такое течение в области  $S$  называют *отрывным*. Кинетическая энергия отрывного течения черпается из энергии основного потока. Несмотря на сравнительно незначительные осредненные скорости, эта энергия существенна благодаря большим пульсациям скорости.

Рассматривая геометрию системы трубопроводов острого пара помещения А-820, можно выделить несколько зон, являющихся источниками пульсаций давления.

### ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА

Изменение направления потока связано с искривлением отдельных его струек. Это обуславливает возникновение центробежных сил, которые создают разность давлений потока по живым сечениям. Такая разность давлений и создает условия для возникновения вторичных течений или явления поперечной циркуляции (рис. 2).

Центробежные силы, действующие от центра к периферии, оттесняют поток от выпуклой стенки трубы к вогнутой. В пристеночном слое, где скорости малы, центробежные силы практически отсутствуют. Таким образом, возникают условия для

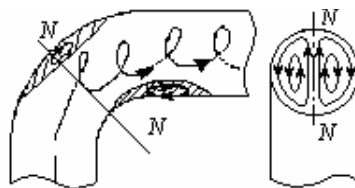


Рис. 2. Явления поперечной циркуляции

движения по поверхностям живых сечений в направлениях, показанных стрелками на рис. 2 справа. Эта поперечная циркуляция, складываясь с основным потоком, образует винтовое движение, которое вследствие вязкости затухает на некотором расстоянии от поворота. Кроме этого, на участке закруглений формируется область отрывных течений. Описанные винтовые движения возникают не только на повороте трубы (канала), но и в других случаях изменения направления течения (при делении потока в тройниках, вентилях и т. п.).

### ДЕЛЕНИЕ ПОТОКА В ТРОЙНИКАХ

На рисунке 3а показан случай, когда расход в ответвлении  $Q_0$  меньше расхода на проходе  $Q_n$  ( $Q_0 < Q_n$ ).

В ответвлении образуется отрывное течение значительно большей интенсивности, чем при повороте под углом. Этому способствует диффузорный эффект вследствие резкого увеличения площади сечения.

Положительный градиент давления содействует также образованию области отрывного течения возле противоположной стенки прямого прохода. Вместе эти отрывные течения способствуют местному поджатию потока с последующим его расширением как в ответвлении, так и на проходе. На рисунке 3б показан предельный случай, когда расход в ответвлении  $Q_0 = 0$ . Вихревая зона, образующаяся в ответвлении, является местным сопротивлением и источником пульсаций давления для прохода.

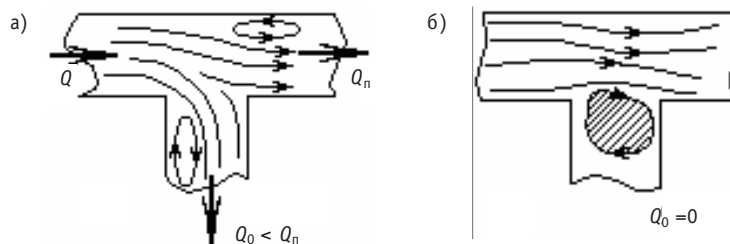


Рис. 3. Деление потока в тройниках

Таким образом, в подводящих трубопроводах создаются волны давления, которые распространяются со скоростью звука в паре от одного края предохранительного вентиля к другому (рис. 4).

В момент прохождения верхнего Т-участка (тройника) импульс способствует повышению давления в участке между верхним и нижним тройниками («нога»), который потом воздействует на главный паропровод. Усиление пульсаций давления в «ноге» способствует усилению силы пульсации, которая воздействует на главный паропровод. Пульсирующие силы возникают в каждом подводящем паропроводе, поэтому при эксплуатации на главный паропровод воздействуют три пульсирующие силы с частотой 46 Гц с определенным фазовым сдвигом в соответствии с удаленностью ответвлений и длин подводящих трубопроводов к арматурам.

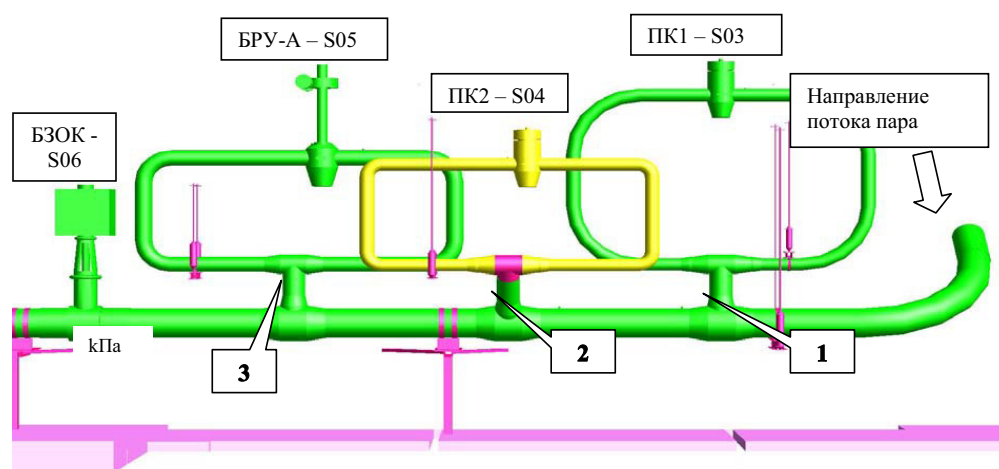


Рис. 4. Места измерения пульсаций давления на TX50 (АЭС «Темелин»)

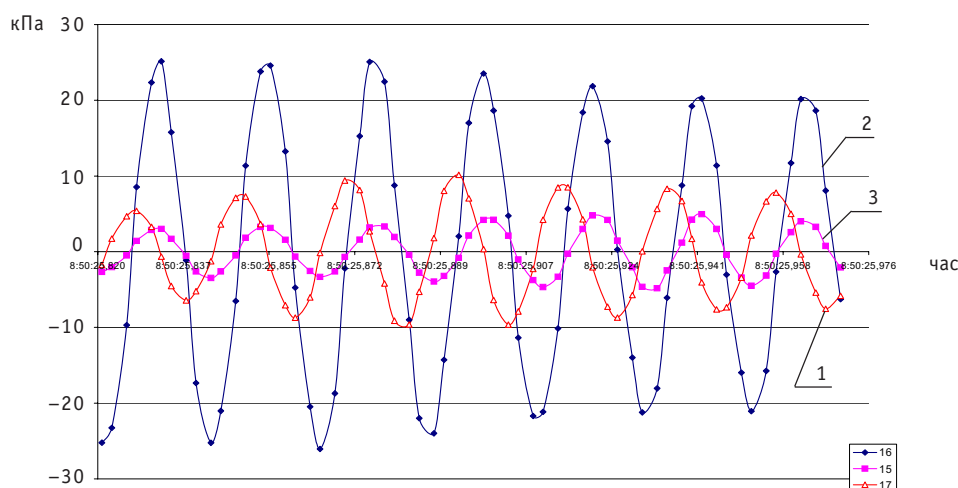


Рис. 5. Результаты измерений давления внутри паропровода в «ногах» во времени. Давление измерялось в середине между верхним и нижним тройниками

Это предположение было подтверждено прямым измерением пульсаций давления в отдельных «ногах» на TX80 АЭС «Темелин»[4]. Результаты измеренных пульсаций в «ногах» на паропроводе TX80 указаны на рис. 5.

На ВоАЭС специалистами отдела наладки и реакторного цеха с участием студентов были разработаны схемы измерения, заполнены формуляры измерений (рис. 6, табл. 1).

Анализ данных по вибросостоянию всех четырех паропроводов острого пара помещения А-820 (TX 50, 60, 70, 80) позволил сделать вывод о том, что наибольшим уровнем вибрации характеризуются вертикальные участки трубопроводов, подходящие к предохранительным клапанам ПГ. Данные, полученные экспериментальным путем на Волгодонской АЭС, хорошо коррелируют с данными, полученными расчетными методами на основе обследований трубопроводов АЭС «Темелин» (рис. 7).

Полученные экспериментальные данные были положены в основу расчетов, выполненных специалистами НИЦЭ «Центрэнерго» и Института прикладной механики г. Брно, в рамках выполнения работ по снижению уровня эксплуатационных

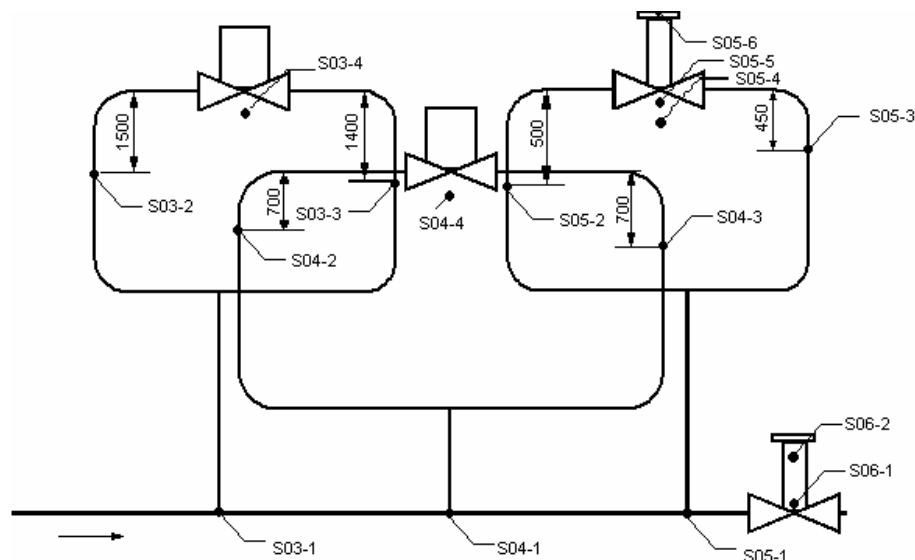


Рис. 6. Схема расположения мест замеров на паропроводах TX50

Таблица 1

**Значения СКЗ виброскоростей (мм/с)  
на паропроводах TX-50**

Точка замера	Паропровод TX-50		
	Направление*)		
	Z	Y	X
S03-1	4,2	2,7	1,9
S03-2	2,7	5,8	2,6
S03-3	<b>22,6</b>	<b>7,6</b>	3,9
S03-4	1,9	2,1	1,4
S04-1	7,6	3,2	2,0
S04-2	<b>32,0</b>	<b>14,2</b>	3,2
S04-3	23,0	8,2	3,4
S04-4	<b>11,3</b>	1,6	1,9
S05-1	<b>14,5</b>	1,8	3,2
S05-2	<b>27,5</b>	5,9	1,5
S05-3	<b>27,6</b>	4,7	1,7
S05-4	8,0	2,2	1,1
S05-5	8,2	2,0	0,8
S05-6	6,8	6,6	4,3
S06-1	3,2	1,9	3,4
S06-2	2,3	2,7	4,0

\*) Ось Z – направление по вертикали; ось Y – направление к реакторному отделению;  
ось X – направление от ряда Б к ряду В

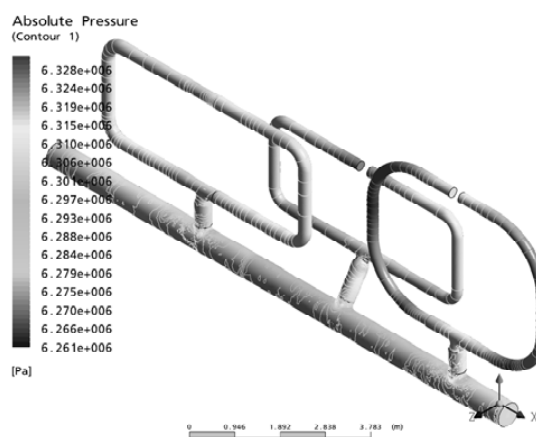


Рис. 7. Интенсивность вибронагрузки

вибраций паропроводов. При этом предложено изменить частоту собственных колебаний петель трубопроводов. Для реконструкции трубопроводной обвязки ТХ50-80 принят критерий: значения частоты собственных колебаний паропроводов не должны совпадать с возбуждающей частотой 46 Гц более, чем на 10% [5]. Этот критерий был применен для подводящих трубопроводов к S04 и S05, где были измерены самые большие пульсации давления и влияние эксплуатационных вибраций самое значительное.

На основе проведенных расчетов предложено изменить геометрию двух подводящих трубопроводов к предохранительным вентилям ПГ ТХ50S03 и ТХ50S04 (рис. 8) следующим образом [6]:

- удлинить плечо трубопровода к Х50S03 против потока на 1 м;
- удлинить плечо трубопровода к ТХ50S04 по потоку на 1,2 м;
- укоротить плечо трубопровода к ТХ50S04 против потока на 1 м.

Предложенные мероприятия реализованы на ВоАЭС во время проведения ППР 2008. Результаты измерения вибрации после реконструкции приведены в табл. 2.

При повышении уровня тепловой мощности реакторной установки до 102 и 104% номинальной наблюдается снижение уровня эксплуатационных вибраций. Реконструкция кольцевых отводов привела к значительному снижению уровня вибраций на приводах и арматуре БРУ-А и предохранительных клапанах, что, несомненно, повышает безопасность эксплуатации АЭС и увеличивает ресурс работы оборудования.

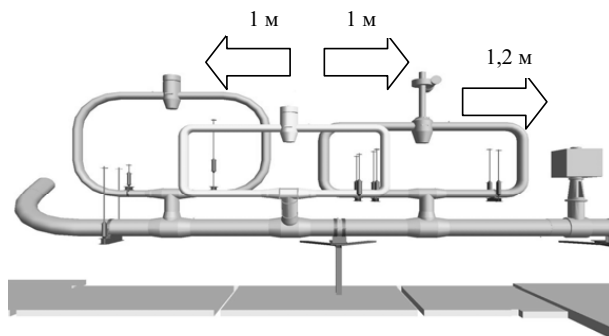


Рис. 8. Планируемое изменение геометрии трубопроводов ТХ50Z01

Таблица 2

**Значения СКЗ виброскорости (мм/с)  
на паропроводах ТХ-50**

Точка замера	Паропровод ТХ-50 после реконструкции			Паропровод ТХ-50		
	Направление*)			Направление*)		
	Z	Y	X	Z	Y	X
S03-1	3	3	2	4,2	2,7	1,9
S03-2	3	4	2	2,7	5,8	2,6
S03-3	3	7	2	<b>22,6</b>	7,6	3,9
S03-4	2	1	2	1,9	2,1	1,4
S04-1	3	3	2	7,6	3,2	2,0
S04-2	8	6	5	<b>32,0</b>	<b>14,2</b>	3,2
S04-3	8	7	2	<b>23,0</b>	8,2	3,4
S04-4	2	1	4	11,3	1,6	1,9
S05-1	2	3	2	14,5	1,8	3,2
S05-2	6	5	3	<b>27,5</b>	5,9	1,5
S05-3	7	4	3	<b>27,6</b>	4,7	1,7
S05-4	4	1	1	8,0	2,2	1,1
S05-5	4	1	1	8,2	2,0	0,8
S05-6	3	4	4	6,8	6,6	4,3
S06-1	2	2	2	3,2	1,9	3,4
S06-2	3	2	2	2,3	2,7	4,0

**Литература**

1. Вибродиагностика: Моногр. /Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др./Под ред. Г.Ш. Розенберга. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 284 с.
2. Юнек Л., Валента М. Измерение пульсаций давления и эксплуатационных вибраций на 1 блоке: Отчет/ЎАМ Брно, октябрь 2006 (на чешском языке). – 51 с.
3. Альтшуль А.Д. и др. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 418 с.
4. Новотны Ю. Анализ эксплуатационных вибраций в помещениях А-820 и их причин: Отчет/ЎАМ Брно. – 3619/04. – Брно, сентябрь 2004 (на чешском языке). – 33 с.
5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989 г (Правила и нормы в атомной энергетике).
6. Кутдюсов Ю.Ф., Будько И.О., Макарецев А.Н. и др. Анализ полученных результатов и выдача рекомендаций по снижению вибраций паропроводов ТХ50, ТХ80: Отчет НИЦЭ «Центрэнерго». ТХ.0Т.01.2007.ЦЭ. – М.: 2007. – 37 с.

Поступила в редакцию 5.10.2009



The results of statistic analysis of the radiation monitoring data of river system pollution were produced in this work. There was short description of analyzable data and under consideration territory in it. The distribution-free statistic methods, used for comparative analysis, were described. Reasons of their selection and application peculiarities were given. Also the comparative analysis of data by traditional method of normal statistics was given in this work. Reliable decrease of  $^{90}\text{Sr}$  specific activity from object to object was determined in studied river system. This is evidence of this radionuclide transportation in the river system Tcha-Iset-Tobol-Irtysh.

#### УДК 621.039.534

*Features of Hydrodynamics and Mass Exchange of the Heat-Carrier in Alternative Fuel Assembly of VVER \ A.S. Balyberdin, S.S. Borodin, S.M. Dmitriev, A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov, A.V. Lvov, O.Y. Novikova, D.N. Solncev, V.D. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 10 illustrations. – References, 3 titles.*

The results and analysis of experimental data on investigation of the local mass-transfer and hydrodynamics of heat-transfer flow in alternative fuel assembly of reactor VVER at use of system of mixing grids «flowing along the rod lines» type are submitted.

#### УДК 621.039.56

*Research of vibrations of the main vapor conductors of the first power unit of the Volgodonsk Nuclear Power Plant \ I. Veselova, M. Okulova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References, 6 titles.*

Authors consider a problem of operational vibrations of the main vapor conductors of power units of the Nuclear Power Plant of the unified series with PWR-1000 (Pressurized water reactor). For the first time it has arisen in the course of starting-up and adjustment works at stages development of capacity of the power unit № 1 Zaporozhye Nuclear Power Plant also it has remained actual for all subsequent blocks of this series, including for power units № 1 of Volgodonsks Nuclear Power Plant.

The fixed raised vibrations of system of vapor conductors of fresh steam led to various damages (to occurrence of fistulas, breakage of auxiliary pipelines brace of armatures, to maladjustment of trailer switches, slipping of control cargoes on pulse safety valves, etc.), and also caused repeated decrease in cyclic durability of the main steam lines and increase of probability of their fatigue failure.

By measurements it is proved, that a source of operational vibrations are pressure pulsations in steam lines which are available in each steam line. The data received by experimental on the Volgodonsks NPP, well correlate with the data received by settlement methods on the basis of inspections of pipelines of Nuclear Power Plant “Timelin”. The received experimental data have been taken as a principle the calculations executed by experts NICE «Centre Energy» and Institute of the applied mechanics of BRNO, within the limits of performance of works on decrease in level of operational vibrations of steam lines. Thus it is offered to change frequency of own fluctuations of loops of pipelines.

On the basis of the spent calculations it is offered to change geometry of two bringing pipelines to safety gates PG TX50S03 and TX50S04 as follows: to extend a pipeline shoulder to X50S03 against a stream on +1 m; to extend a pipeline shoulder to TX50S04 on a stream on +1,2m; to truncate a pipeline shoulder to TX50S04 against a stream on -1 m. The offered actions are realized on VNPP during time carrying out Starting Safety Works 2008.

Reconstruction of ring taps has led to considerable decrease in level of vibrations on drives and armature BRU-A and safety valves, that, undoubtedly, raises safety of operation of the nuclear power plant and increases a resource of work of the equipment.

#### УДК 621.311.25: 621.039

*Use Combined-Cycle Technologies on the Nuclear Power Station \ A.V. Kryajev. A.M. Antonova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher*