

УДК 621.01

РАЗРУШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЕ*

Баширов И.В.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет
e-mail: ildus_bashirov@mail.ru*

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы влияния флуктуаций при нагружении трубопроводных систем при одновременном воздействии циклических и вибрационных нагрузок. Получены зависимости влияния вынужденных колебаний на резонансной частоте на снижение долговечности материала исследуемого объекта.*

***Ключевые слова:** высокочастотные колебания, накопление повреждений, усталостная трещина, бифуркация, вибрационные нагрузки, собственная частота, двухчастотное нагружение*

Известно, что трубопроводы, связанные с насосно-компрессорным оборудованием, подвержены высокочастотным колебаниям [1 - 3]. Небольшая амплитуда изгибных деформаций в сочетании с частотой колебания ротора машины могут вызвать накопление повреждений в материале трубы в гигаусталостной области нагружения.

В работе [4] при виброобследовании газотурбинной установки с авиационным двигателем в качестве привода в технологических трубопроводах, отводящих сжатый газ в коллектор, был зафиксирован повышенный уровень вибрации на частотах в диапазонах до 200 Гц и от 5 до 8 кГц.

Разрушения в области гигаусталости привлекают в последнее время пристальное внимание [5, 6], поскольку в ряде случаев хорошо объясняют разрушения в высоконагруженных элементах объектов воздушного и железнодорожного транспорта.

В работе [7] рассмотрены вопросы влияния флуктуаций уровня напряжений. Зарождению усталостной трещины может способствовать изменение уровня циклического напряжения в течение срока эксплуатации конструкций. Например, авиационные конструкции обычно претерпевают две фазы нагружения: с большой амплитудой в процессе взлёта и посадки и с малой амплитудой в процессе полёта на высоте. Циклирование с малой амплитудой может не оказывать влияние на предел усталости до тех пор, пока нагружение с большой амплитудой не вызовет появление трещины, способной преодолеть микроструктурный барьер и разви-

* Исследования выполнялись при поддержке лаборатории «Механика деформирования и разрушения конструкционных материалов» Межвузовского Центра коллективного пользования «Недра» Уфимского государственного нефтяного технического университета

ваться в дальнейшем при длительном низкоамплитудном нагружении. Такие же фазы нагружения характерны и для энергетических установок. Подобная ситуация возникает при механических вибрациях или акустической усталости. Отрицательно сказывается на долговечности элементов конструкций высокоцикловое низкоамплитудное нагружение с относительно высокими средними напряжениями цикла, способствующими раскрытию малых усталостных трещин.

Проявление нового процесса эволюции изменяет закон распределения долговечности, отражающий флуктуации в поведении системы, и он становится асимметричным и свидетельствует о бимодальном распределении усталостной долговечности, когда локализация микротрещины случайным образом может быть как на поверхности, так и в подповерхностном слое [5].

Существует последовательность изменений закона распределения долговечности по мере снижения уровня напряжения на разных масштабных уровнях [5]:

- вдали от точки бифуркации – нормальный закон распределения долговечности;
- при приближении к точке бифуркации – асимметричный закон распределения долговечности;
- в точке бифуркации – реализуется одновременно два закона с равновероятным распределением долговечности;
- после прохождения точки бифуркации остается один нормальный закон распределения для следующего механизма разрушения, к которому перешел материал при снижающемся уровне напряжения.

Собственная частота колебаний элементов трубопроводной обвязки также может влиять на механизм и характер разрушения. Эксперименты, приведенные в работе [8], показывают, что приложение вынужденных колебаний на резонансной частоте трубопроводных систем снижает усталостную долговечность материала в 1,6 раза.

Характер разрушения зависит не только от материала, но и от скорости и частоты приложенных нагрузок, а также от вида напряженного состояния. На практике при эксплуатации оборудования на него воздействуют несколько внешних нагрузок. В частности это относится и к вынужденным нагрузкам. Так, например, при воздействии на трубопроводные системы вибрационных нагрузок от вибрации насосно-компрессорного оборудования, на них также воздействуют и вибрации от потока жидкости.

В связи с этим актуальной задачей является выявление основных закономерностей влияния одновременно нескольких вибрационных нагрузок на резонансной частоте и сопротивление усталостному нагружению, а также установление и количественное описание взаимосвязи этих процессов.

С целью установления влияния вибрационных нагрузок на резонансной частоте на долговечность трубопроводных систем на нагнетательной линии

насосно-компрессорного оборудования, было разработано и изготовлено трехпозиционное устройство, позволяющее проводить испытания на циклическую усталость в упруго-пластической зоне по схеме трехточечного изгиба с одновременным приложением вынужденных колебаний (рис. 1). Условия, при которых происходит разрушение образца в данной схеме нагружения, аналогичны условиям трубопроводных систем на нагнетательной линии компрессоров и насосов; малоцикловое нагружение имитирует периодическое изменение давления в нагнетательной линии, а вынужденные колебания имитируют вибрационное воздействие компрессоров и насосов [9].

Эксперименты проводились на разрывной машине ИР5113-100, соответствующей ГОСТ 28840-90.

Трехпозиционное устройство устанавливалось в захваты разрывной машины (7,8). Крепление устройства (6) осуществлялось в нижний захват (8) разрывной машины, шток (1) крепится к верхнему захвату (7). Шток подвижен относительно корпуса (5). Контроль усилия и деформации производится при помощи технических средств используемой разрывной машины.

Материалом исследования была выбрана сталь 20, так как она широко используется в трубопроводных системах, обвязывающие насосно-компрессорное оборудование. В качестве образцов использовали плоские пластины размером 120x9,5x4 мм.

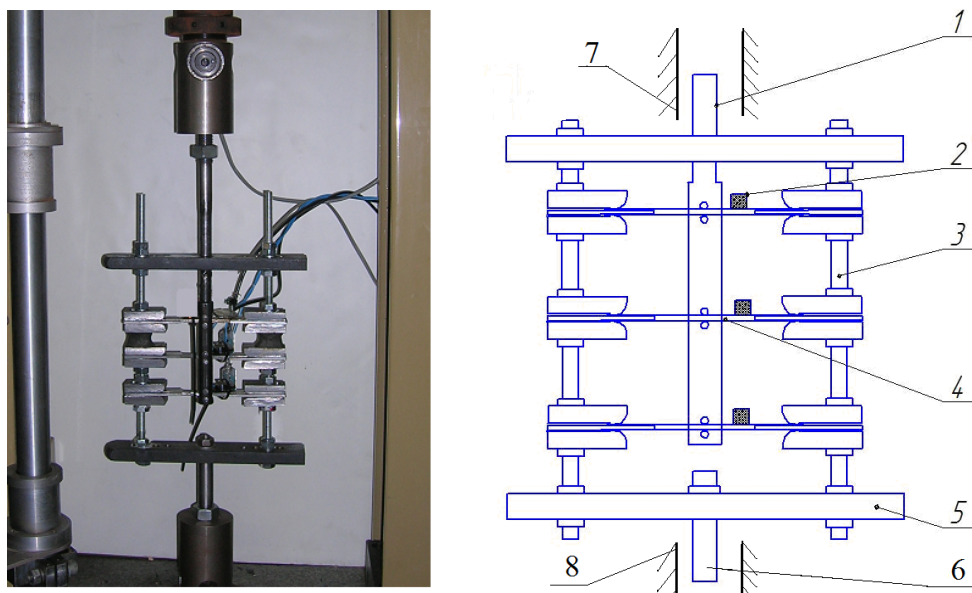


Рис. 1. Трехпозиционное устройство для проведения усталостных испытаний по схеме трехточечного изгиба с приложением вынужденных колебаний:

- 1 – шток; 2 – источник вынужденных колебаний;
- 3 – опоры; 4 – испытываемый образец;
- 5 – корпус устройства; 6 – крепление устройства;
- 7,8 – верхний и нижний захваты разрывной машины

Усталостные испытания проводились в малоцикловой области при жестком нагружении с приложением вынужденных колебаний на резонансной частоте испытываемого образца и относительной деформацией равной 0,22; 0,25; 0,32%. Для того чтобы приложить резонирующие вынужденные колебания необходимо определить собственную частоту образца. Частота собственных колебаний определялась при помощи единичного механического удара.

Регистрация сигналов проводилась при помощи электрретного микрофона NADY CM 100 Measurement MIC, с диапазоном частот 20 - 20000 Гц и чувствительностью -40 дБ, подключенного к персональному компьютеру, на который проводилась запись с частотой дискретизации 44100 Гц, глубиной цифро-аналогового преобразования 16 бит. Обработка полученной информации проводилась с использованием программного комплекса Sony Sound Forge или аналогичного. Из сигнала при помощи быстрого Фурье преобразования [10, 11] получали спектр, в котором преобладающей гармоникой являлась частота собственных колебаний исследуемого объекта. Максимальный размер быстрого Фурье преобразования в выбранном программном комплексе составляет 4096 точки.

Экспериментально были получены следующие значения частот собственных колебаний образца: 3972 Гц, 7920 Гц, 11923 Гц, 15912 Гц, 19820 Гц.

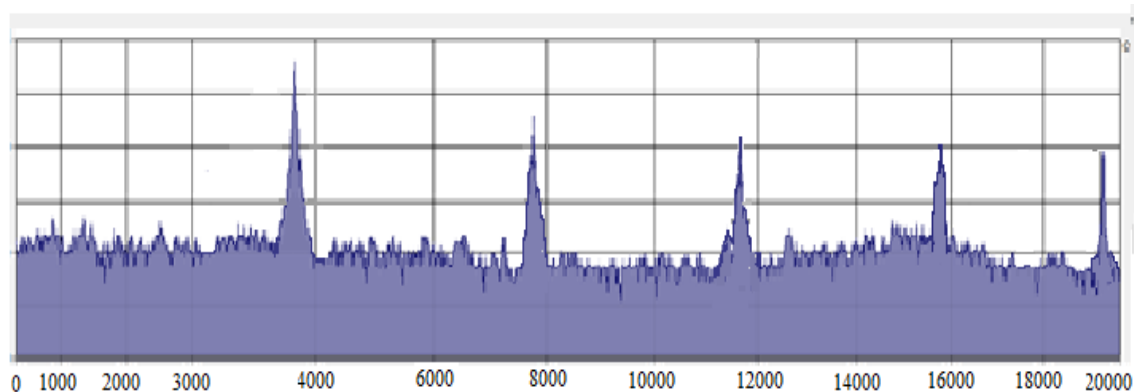


Рис. 2. Спектр сигнала в диапазоне частот 0 - 20 000 Гц

В этих частотных диапазонах вынужденных колебаний проводились усталостные испытания в малоцикловой области.

По результатам экспериментов построена зависимость количества циклов до разрушения N_p от частоты приложенных вынужденных колебаний при разных значениях относительной деформации (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что частота вынужденных колебаний и увеличение деформации влияет на долговечность образцов. Наибольшее влияние имеет 3 и 4 гармоники вынужденных колебаний.

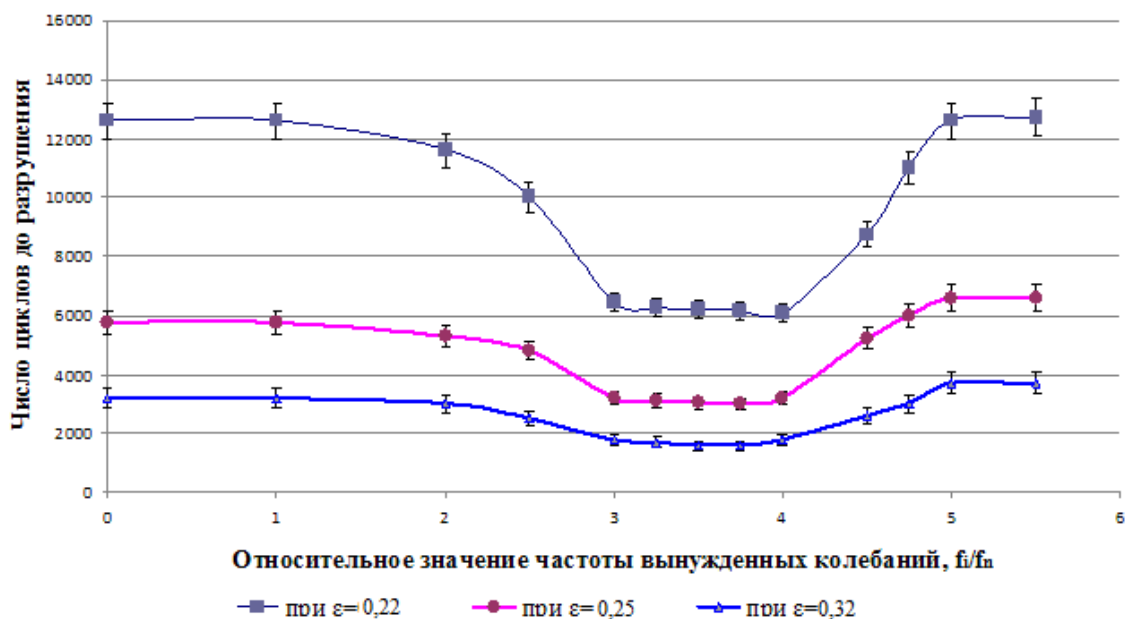


Рис. 3. Зависимость количества циклов до разрушения от частоты приложенных вынужденных колебаний на резонансной частоте образца из стали 20

Также, согласно методике, используемой при двухчастотном нагружении [12] и деформационного критерия малоциклового разрушения [13] был произведен расчет амплитуды высокочастотных колебаний образца на резонансных частотах. Построена зависимость количества циклов до разрушения от амплитуды высокочастотных колебаний при двухчастотном нагружении образцов из стали 20 при относительной деформации $\epsilon=0,22\%$.

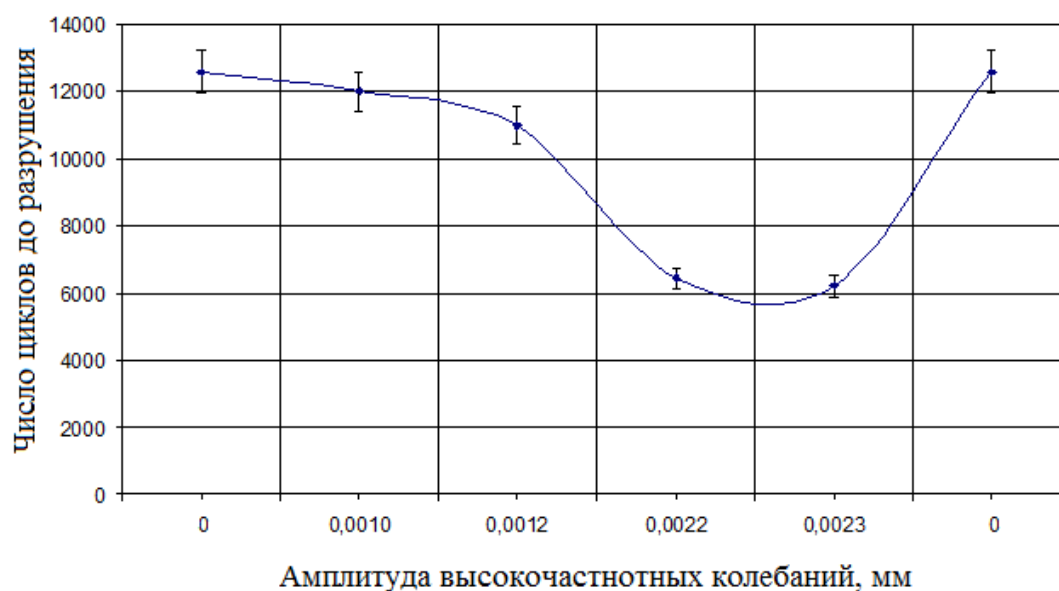


Рис. 4. Зависимость количества циклов до разрушения от амплитуды высокочастотных колебаний при двухчастотном нагружении образцов из стали 20 при относительной деформации $\epsilon=0,22\%$

Экстремум на графике характерен для 3 и 4 гармоники вынужденных колебаний.

По графикам (рис. 3), построена зависимость относительной деформации, ε , от относительного значения количества циклов до разрушения, $\Delta N = N_{0 Гц} - N_{15912 Гц}$, в двоичных логарифмических координатах (рис. 5), а также зависимость относительной деформации ε от числа циклов до разрушения Np при разных значениях приложенных вынужденных колебаний в двоичных логарифмических координатах (рис. 6).

По графику на рис. 5 можно судить о степени снижения долговечности материала в зависимости от влияния вынужденных колебаний на резонансной частоте и описывается следующим уравнением:

$$\lg \varepsilon = -0,3 \lg \Delta N + 3,6 .$$



Рис. 5. Зависимость относительной деформации, ε , от относительного значения количества циклов до разрушения, $\Delta N = N_{0 Гц} - N_{15912 Гц}$ для стали 20

Если представить уравнения кривых в виде $y = kx + b$, где $x = \lg(Np)$, а $y = \lg(\varepsilon)$ получаем следующие равенства:

- при частоте вынужденных колебаний $f_i = 0$ Гц, $f_i = 3972$ Гц и частоте $f_i = 19820$ Гц уравнение имеет следующий вид $y = -0,307 x + 4,5854$;
- при частоте вынужденных колебаний $f_i = 7920$ Гц $y = -0,31 x + 4,606$;
- при частоте вынужденных колебаний $f_i = 11923$ Гц $y = -0,33 x + 4,7$;
- при частоте вынужденных колебаний $f_i = 15912$ Гц $y = -0,35 x + 5$;

Полученные графики характеризуют изменение количества циклов до разрушения от относительной деформации при одновременном приложении вынужденных колебаний. По графику видно, что вынужденные колебания сокращают продолжительность сопротивления образца усталостным воздействиям. А уравнения характеризуют изменение угла наклона зависимости количества циклов до разрушения от значения относительной деформации и от наложения вынужден-

ных колебаний, что позволяет оценить закономерности разрушения трубопроводных систем.

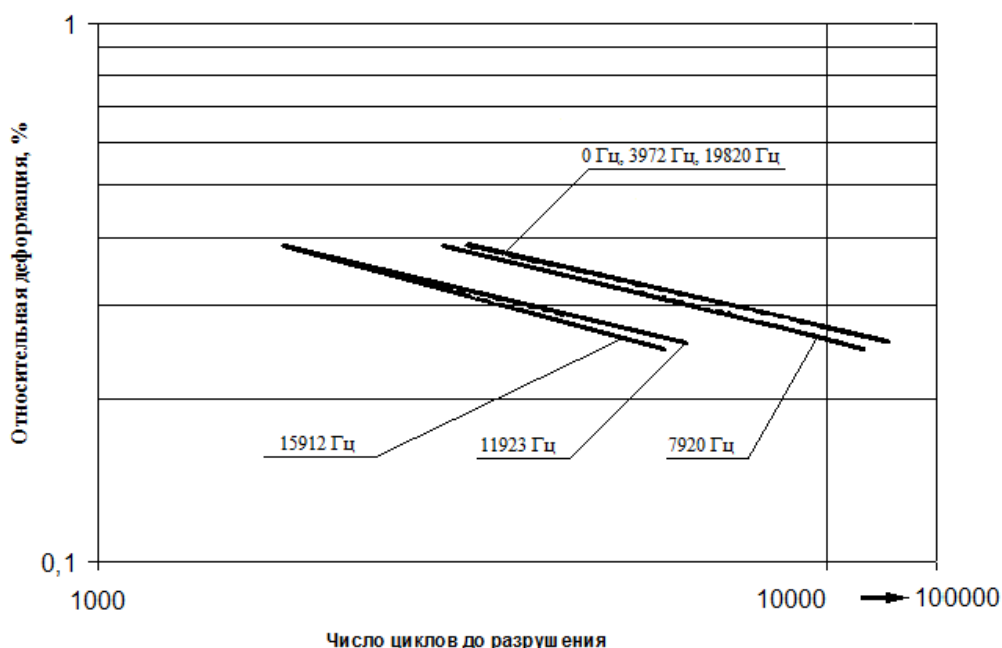


Рис. 6. Зависимость относительной деформации ϵ от числа циклов до разрушения N_r при разных значениях приложенных вынужденных колебаний в двоичных логарифмических координатах для стали 20

С позиции бимодального распределения усталостной долговечности вынужденные колебания являются причиной изменения диссипации энергии при зарождении усталостной трещины, в результате происходит бифуркационный переход от одного способа поглощения энергии металлом к другому при зарождении усталостной трещины.

Результаты исследований показывают, что одновременное воздействие усталостных и вибрационных нагрузок способно значительно сократить период сопротивления усталостному воздействию, и, привести к разрушению трубопроводных систем, сопряженных с насосно-компрессорным оборудованием. Однако, критическими являются 3 и 4 гармоники собственных колебаний образца, при которых наблюдается максимальное снижение долговечности. Это связано с экстремумом амплитуды высокочастотной усталостной составляющей, которая является дополнительной составляющей усталостного повреждения. Данный факт необходимо учитывать при оценке текущего состояния трубопроводов с целью повышения его эксплуатационной безопасности.

Литература

1. РТМ 24.038.08-72. Расчет трубопроводов энергетических установок на прочность. Изменение №1 к РТМ 24.038.08-72. М.: Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения, 1973. 38 с.
2. РТМ 38.001-94. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. М. ВНИПИНефть, 1994. 76 с.
3. Самарин А.А. Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения. М.: Энергия, 1979. 288 с.
4. Фик А.С. Диагностика волновых процессов течения газа, вызывающих низкочастотные колебания в трубопроводных сетях компрессорных станций: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар: изд-во КГТУ, 2008. 28 с.
5. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
6. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: ООО «Монография», 2007. 500 с.
7. Левин Д.М., Широкий И.Ф., Муравлева Л.В. Гигацикловая усталость // Известия ТулГУ. Серия «Физика». 2006. Вып. 6. С. 192 - 201.
8. Панкратьев С.А. Оценка ресурса прочности трубопроводных систем, подверженных вынужденным колебаниям на резонансной частоте: дисс... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2009. 107 с.
9. Наумкин Е.А., Кузеев И.Р., Панкратьев С.А., Рахимкулов С.А. Разрушение трубопроводных систем на нагнетательной линии компрессоров и насосов // Мировое сообщество: проблемы и пути решения: сб. науч. ст. / УГНТУ. Уфа, 2007. № 22. С. 77-81.
10. Бугров Я.С., Никольский С.М. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного: учебник для вузов. 4-е изд. Ростов-на-Дону: Феникс, 1998. 512 с.
11. Залмазон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука, 1989. 496 с.
12. Гаденин М.М. Влияние формы цикла нагружения на сопротивление циклическому деформированию и разрушению конструкционных материалов // Вестник научно-технического развития: интернет-журнал. 2010. №9(37). URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=452>
13. Серенсен С.В. Избранные труды: в 3 томах. Том 3. Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций. Киев: Наукова думка, 1985. 232 с.

THE PIPING DESTRUCTION PROCESS BY SIMULTANEOUS CYCLIC AND VIBRATION LOADS AT RESONANCE

I.V. Bashirov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

e-mail: ildus_bashirov@mail.ru

Abstract. *The paper deals with the influence of fluctuations in loading piping systems under the simultaneous effect of cyclic and vibration loads. The paper shows the dependencies between the forced oscillations at the resonant frequency and reducing durability of the material of the object.*

Keywords: *high-frequency oscillations, damage accumulation, fatigue crack, bifurcation, vibration load, natural frequency, dual-frequency loading*

References

1. RTM 24.038.08-72. Raschet truboprovodov energeticheskikh ustanovok na prochnost' (Strength calculation of pipelines used in power installations). Izv. №1. Moscow, MTETM, 1973. 38 p.
2. RTM 38.001-94. Ukazaniya po raschetu na prochnost' i vibratsiyu tekhnologicheskikh stal'nykh truboprovodov (Guidelines for strength and vibration analysis of process steel piping). Moscow, VNIPINeft', 1994. 76 p.
3. Samarina A.A. Vibratsii truboprovodov energeticheskikh ustanovok i metody ikh ustraneniya (Power plants piping vibrations and methods of their elimination). Moscow, Energiya, 1979. 288 p.
4. Fik A.S. Diagnostika volnovykh protsessov techeniya gaza, vyzyvayushchikh nizkochastotnye kolebaniya v truboprovodnykh setyakh kompressornykh stantsii (Diagnosis of the gas flow of wave processes that cause low-frequency vibrations in pipeline networks of compressor stations). PhD Abstract. Krasnodar, KGTU, 2008. 28 p.
5. Botvina L.R. Razrushenie: kinetika, mekhanizmy, obshchie zakonomernosti (Destruction: kinetics, mechanisms, and general regularities). Moscow, Nauka, 2008. 334 p.
6. Shanyavskii A.A. Modelirovanie ustalostnykh razrushenii metallov. Sinergika v aviatsii (Simulation of fatigue damage in metals. Synergetics in aviation). Ufa, Monografiya, 2007. 500 p.
7. Levin D.M., Shirokii I.F., Muravleva L.V. Gigatsiklovaya ustalost' (Giga cycle fatigue), *Izvestiya TulGU. Fizika*, 2006, Issue 6, pp. 192 - 201.
8. Pankrat'ev S.A. Otsenka resursa prochnosti truboprovodnykh sistem, podverzhennykh vyzhdeniyam kolebaniyam na rezonansnoi chastote (Evaluation strength resource of pipeline systems which exposed to forced vibrations at the resonant frequency) PhD thesis. Ufa, UGNTU, 2009. 107 p.

9. Naumkin E.A., Kuzeev I.R., Pankrat'ev S.A., Rakhimkulov S.A. Razrushenie truboprovodnykh sistem na nagnetatel'noi linii kompressorov i nasosov (Destruction of pipeline systems in injection line of compressors and pumps), in *Mirovye soobshchestvo: problemy i puti resheniya (World community: problems & ways to solve them)*. Ufa, UGNTU, 2007. Issue 22. PP. 77-81.

10. Bugrov Ya.S., Nikol'skii S.M. Vysshaya matematika. Differentsial'nye uravneniya. Kratnye integraly. Ryady. Funktsii kompleksnogo peremennogo: uchebnik dlya vuzov (Higher Mathematics. Differential equations. Multiple integrals. Series. Complex variable theory. Textbook). 4 ed. Rostov-na-Donu, Feniks, 1998. 512 p.

11. Zalmazov L.A. Preobrazovanie Fur'e, Uolsha, Khaara i ikh primeneniye v upravlenii, svyazi i drugikh oblastiakh (Fourier, Walsh and Haar transforms and their application in control, communication and other fields). Moscow, Nauka, 1989. 496 p.

12. Gadenin M.M. Vliyaniye formy tsikla nagruzheniya na soprotivleniye tsiklicheskomu deformirovaniyu i razrusheniyu konstruktsionnykh materialov (Influence of the loading cycle shape at cyclic deformation resistance and fracture of materials), *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2010, Issue 9 (37).

URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=452>

13. Serensen S.V. Izbrannye trudy: v 3 tomakh. Tom 3. Kvazistaticheskoe i ustalostnoye razrusheniye materialov i elementov konstruktsii (Selected works: in 3 volumes. Volume 3. Quasi-static and fatigue fracture of materials and structural elements). Kiev, Naukova dumka, 1985. 232 p.