

УДК 620.17

С.Ю. Трутаев¹, e-mail: stas@himmash.irk.ru

¹ АО «ИркутскНИИХиммаш» (Иркутск, Россия).

Подходы к оценке технического состояния динамически нагруженного оборудования опасных производственных объектов

Рассмотрены современные подходы к вопросам оценки технического состояния динамически нагруженного оборудования опасных производственных объектов (ОПО). Представлена технология оценки технического состояния и обеспечения промышленной безопасности промышленного оборудования таких отраслей, как нефтепереработка, химия и нефтехимия, нефте- и газодобыча. Технология основана на результатах расчетно-экспериментальных оценок состояния оборудования ОПО I и II классов опасности по результатам периодического/постоянного мониторинга контрольных параметров. С учетом результатов предварительного освидетельствования оборудования предприятия предложено разделять динамически нагруженное оборудование на две группы по уровню критичности, для каждой из которых предлагается использовать различные стратегии контроля состояния оборудования в ходе эксплуатации, а также объем внедрения средств повышения динамической стойкости. Для оборудования I группы предложено использовать стратегию постоянного мониторинга состояния оборудования с параллельным внедрением пассивных или полупассивных средств управления динамическим состоянием оборудования, для оборудования II группы – стратегию периодического мониторинга. Применение предложенной технологии позволяет выявить неизвестные на этапе проектирования параметры динамических воздействий подконтрольного оборудования, корректно оценить фактическую нагруженность таких объектов, а при необходимости разработать и принять превентивные меры по повышению их динамической стойкости для обеспечения промышленной безопасности на ОПО и снижения рисков возникновения аварий. Представлены результаты использования предлагаемых подходов в отношении оборудования I группы критичности на примере установки ЭЛОУ+АВТ-6 АО «АНХК».

Ключевые слова: опасный производственный объект, оценка технического состояния, расчетно-экспериментальные методы исследования, виброисследования, техническая диагностика, мониторинг технического состояния.

.....

S.Yu. Trutaev¹, e-mail: stas@himmash.irk.ru

¹ IrkutskNIHimmash OJSC (Irkutsk, Russia).

Approaches to the technical state assessment of dynamically loaded equipment of hazardous production facilities

Modern approaches to the problem of technical state assessment of dynamically loaded equipment of hazardous production facilities are considered in the article. It presents the technology of technical state assessment and industrial safety ensuring of industrial equipment in such industries as refinery, chemistry and petrochemistry, petroleum and gas mining. The technology is based on the results of computational and experimental assessment of the technical state of hazardous production facilities equipment that belongs to the hazard class I or II in accordance with the results of noncontinuous/continuous monitoring of control parameters. Taking into consideration the results of the preliminary examination of the plant equipment it is offered to divide the dynamically loaded equipment into two groups of criticality. For each group it is suggested to use different strategies for equipment state examination during the operation and different amount of implemented tools that improve the dynamic ability. It is suggested to use the strategy of continuous equipment state monitoring with simultaneous implementation of passive and semiactive tools for managing the dynamic state of the equipment of the group I. The strategy of noncontinuous monitoring is suggested for the equipment of the group II. This technology allows to detect the parameters of dynamic impact for the examined equipment that were unknown during the design stage. It also allows to assess actual loading for these facilities correctly and develop and implement the preventive measures for improving the dynamic ability to ensure industrial safety on hazardous production facilities and to mitigate the risks of emergencies. The article shows the results of the use of the suggested approaches in respect to the equipment of the criticality group I with the help of example of the crude vacuum unit-6 (ELOU+AVT-6) used by Angarsk Petrochemical Company JSC.

Keywords: hazardous production facility, technical state assessment, computational and experimental methods of investigation, vibration-based diagnostics, technical diagnostics, technical state monitoring.

Промышленные предприятия Российской Федерации таких отраслей, как нефтепереработка, химия и нефтехимия, нефте- и газодобыча, относятся к опасным производственным объектам (ОПО), связанным с получением, переработкой и хранением взрывопожароопасных, токсичных веществ, а также с использованием технологического оборудования, работающего при высоких температурах и давлениях. Возникновение аварийных ситуаций на таких ОПО, особенно на объектах I и II классов опасности, может сопровождаться неконтролируемыми взрывами, масштабными возгораниями, выбросами токсичных веществ в атмосферу, разрушениями инфраструктуры и человеческими жертвами [1].

К наименее изученным повреждающим факторам, оказывающим негативное влияние на техническое состояние технологического оборудования ОПО, относится фактор динамического нагружения. Как правило, оборудование ОПО проектируется и вводится в эксплуатацию без учета динамических воздействий, а при расчете ресурса во внимание принимаются лишь малоцикловые нагрузки, связанные прежде всего с технологическими пусками и остановками, изменениями режимов работы и т. д. Между тем значимый вклад в длительность срока службы оборудования могут вносить факторы, не предусмотренные на этапе проектирования. Так, например, известно, что неотъемлемой частью эксплуатации насосно-компрессорного оборудования являются проблемы, связанные с высоким уровнем вибрации трубопроводных обвязок, межступенчатых аппаратов, компрессорных агрегатов [2] и т. д. Это характерно в первую очередь для установок, оснащенных поршневыми компрессорами, а также для технологического оборудования, работающего совместно с центробежными нагнетателями, перекачивающими высоковязкие или высокотемпературные среды. При проектировании подобных объектов ос-

новное внимание уделяется технологическим аспектам, а вопросы размещения и закрепления оборудования решаются без расчета спектра частот свободных колебаний и проверки системы на резонанс. В результате в ходе эксплуатации в условиях реальных производств оборудование подвергается действию не предусмотренных проектом динамических нагрузок, длительное действие которых в сочетании с другими факторами становится причиной усталостного разрушения отдельных его элементов и в результате приводит к аварийным ситуациям на ОПО, человеческим и материальным потерям, загрязнению окружающей среды.

Помимо вибрационных воздействий для технологического оборудования многих ОПО Российской Федерации ситуация осложняется необходимостью учета дополнительных динамических нагрузок [3], обусловленных, например, сейсмическими явлениями (для технологических площадок, размещаемых в сейсмически активных районах), ветровыми нагрузками (для высотных колонных аппаратов, емкостей, дымовых труб) и т. д. С учетом того, что масс-инерционные и жесткостные характеристики действующего оборудования могут существенно отличаться от проектных (например, вследствие ошибок монтажа, изменения технологии, свойств грунтов оснований и т. п.), фактическая нагруженность таких объектов при воздействии динамических нагрузок может изменяться в широком диапазоне.

С учетом изложенного особую актуальность приобретают вопросы, связанные с разработкой и внедрением на ОПО единых методических подходов к оценке текущего и прогнозного технического состояния динамически нагруженного промышленного оборудования, позволяющих выявить неизвестные на этапе проектирования параметры динамических воздействий, корректно оценить фактическую нагруженность таких объектов, а при необходимости разработать и принять превентивные меры по

повышению их динамической стойкости для обеспечения промышленной безопасности на ОПО и снижения рисков возникновения аварий.

Опыт работы АО «ИркутскНИИХиммаш» в сфере технической диагностики объектов повышенной опасности, а также опыт проведения научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ позволил разработать и представить новую технологию оценки технического состояния и обеспечения промышленной безопасности оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств, эксплуатируемого в условиях динамических воздействий. Предлагаемая технология основывается на результатах расчетно-экспериментальных оценок состояния оборудования ОПО I и II классов опасности по результатам периодического/постоянного мониторинга контрольных параметров. Структурная схема реализации данной технологии на практике представлена на рис. 1.

Представленная методология нормативно закреплена в отраслевом стандарте СТО-00220227-044 [4], а также в национальном стандарте ГОСТ Р 555431 [5]. На первом этапе применения технологии промышленное оборудование предприятия подвергается первичному (предварительному) обследованию, по результатам которого определяется вклад, вносимый фактором динамического нагружения в общее техническое и напряженно-деформируемое состояние (ТС и НДС) исследуемого объекта. Это дает основание разделить оборудование на две группы по уровню критичности, для каждой из которых предлагается использовать различные стратегии контроля состояния оборудования во время эксплуатации, а также объем внедрения средств повышения динамической стойкости.

Для оборудования I группы критичности предлагается применять стратегию постоянного мониторинга состояния оборудования с параллельным внедрением пассивных или полупассивных

Ссылка для цитирования (for citation):

Трутаев С.Ю. Подходы к оценке технического состояния динамически нагруженного оборудования опасных производственных объектов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 9. С. 40–45.

Trutaev S.Yu. Approaches to the technical state assessment of dynamically loaded equipment of hazardous production facilities (In Russ.). Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory, 2017, No. 9, P. 40–45.

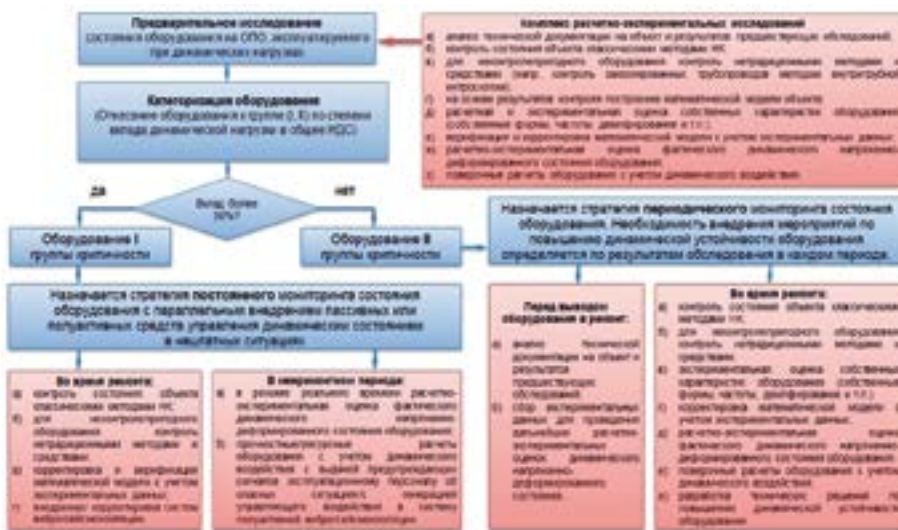


Рис. 1. Технология оценки технического состояния динамически нагруженного оборудования ОПО
 Fig. 1. Technology of technical state assessment of dynamically loaded equipment of hazardous production facilities

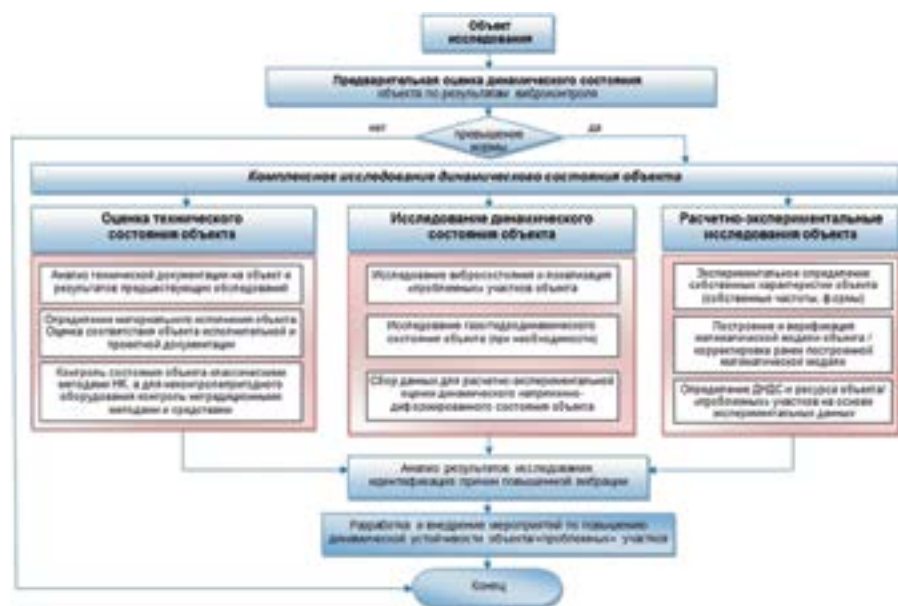


Рис. 2. Типовой алгоритм обследования вибрационного состояния промышленного оборудования ОПО на этапах первичного освидетельствования и периодического мониторинга
 Fig. 2. The typical algorithm of the survey of vibratory state of industrial HIF (hazardous industrial facility) equipment on the stages of the initial examination and periodical monitoring

средств управления динамическим состоянием оборудования. В качестве основы для определения текущего технического состояния контролируемого объекта применяется специальный расчетно-экспериментальный метод, позволяющий выполнять достоверную оценку возникающих в оборудовании в ходе эксплуатации напряжений и деформаций по ограниченному числу измеряемых контрольных параметров [5].

Для оборудования II группы критичности, для которого вклад фактора динамической нагрузки в общее техническое состояние не превышает 50 %, применение средств постоянного мониторинга является избыточным. Поэтому в этом случае целесообразным является использование стратегии периодического мониторинга, когда обследование динамического состояния оборудования осуществляется с

заданной периодичностью, например с периодом, соответствующим межремонтному интервалу технологической установки. Состав такого обследования определяется конструктивным исполнением оборудования, параметрами его работы, а также результатами предыдущих освидетельствований. Так, на рис. 2 приводится типовой алгоритм периодического мониторинга состояния оборудования на примере промышленного оборудования, подверженного вибрационным нагрузкам.

Согласно представленному алгоритму на первом этапе обследования выполняются предварительные измерения вибрации объекта, по результатам которых определяются необходимость и целесообразность дальнейшего исследования. Критерием принятия решения о продолжении работ служит информация о соответствии или несоответствии уровня вибрации в контрольных точках допускаемому уровню вибрации, принимаемому, например, согласно [6–8].

Если в принятых для контроля точках объекта уровень вибрации превышает допустимый, то выполняется переход к следующему этапу – комплексному исследованию вибрационного состояния. На этом этапе осуществляются детальный сбор и анализ данных о вибрационном и газодинамическом состоянии объекта, определяются проблемные, с точки зрения повышенной вибрации, участки, элементы, детали, проводится комплекс расчетно-экспериментальных исследований, по результатам которых устанавливается фактическое НДС «проблемных» участков, а в случае необходимости – ресурс безопасной эксплуатации. По результатам комплексного обследования выявляются причины повышенной вибрации объекта и принимается решение о способах ее снижения до требуемого уровня. При этом при разработке и внедрении мероприятий по управлению динамическим состоянием исследуемого объекта предпочтение отдается применению дополнительных демфирующих связей вязкого или сухого трения, что позволяет существенно повысить динамическую стойкость системы при минимальном объеме требуемой реконструкции, что

чрезвычайно важно в условиях действующих производств.

Следуя принятой идеологии, АО «ИркутскНИИхиммаш» совместно с АО «Ангарская нефтехимическая компания» в последние годы активно разрабатывает и внедряет системы комплексного диагностического мониторинга (СКДМ) как нового, так и уже эксплуатируемого оборудования, подверженного воздействию динамических нагрузок. В большинстве случаев СКДМ проектируются и реализуются в индивидуальном исполнении с привязкой к условиям и технологическим особенностям контролируемого объекта. В каждом конкретном случае перечень контролируемых СКДМ-параметров, а также применяемых методов контроля определяется исходя из требуемой функциональности системы, а также идентификации факторов, влияющих на повреждаемость объекта. В общем случае типовая структура подобной системы мониторинга включает три подсистемы [4]:

- 1) подсистему датчиков;
- 2) подсистему сбора и обработки данных;

3) экспертную систему оценки и прогнозирования технического состояния объекта.

Подсистема 1 представляет собой совокупность различных датчиков, каждый из которых обеспечивает измерение одного или группы параметров состояния объекта (перемещений, ускорений, наклонов, прогибов, деформаций, температуры и т. д.), а также передачу их в подсистему сбора и обработки данных. Количество датчиков, необходимых и достаточных для наиболее полного контроля состояния объекта, а также точки установки этих датчиков на конструкциях определяются при разработке проекта привязки системы мониторинга к конкретному объекту с учетом его структурных и функциональных особенностей.

Подсистема 2 представляет собой аппаратно-программный комплекс, позволяющий обеспечить регистрацию данных, поступающих из подсистемы датчиков с требуемой частотой дискретизации (от 1 до 500 Гц), представление этих данных в виде, понятном для работы экспертной системы оценки и прогно-

зирования технического состояния, а также первичную обработку, архивирование и сохранение данных в соответствии с заданными алгоритмами.

Экспертная система оценки и прогнозирования технического состояния объекта представляет собой программный комплекс, обеспечивающий расчет и визуализацию в реальном режиме времени НДС объекта по ограниченному числу измеряемых параметров, оценку состояния отдельных элементов и объекта в целом по предустановленным критериям, прогнозирование развития возникших ситуаций для обеспечения возможности планирования и реализации превентивных мер по предупреждению аварийных ситуаций на ОПО.

Рассмотрим пример реализации СКДМ технического состояния трансферных трубопроводов вакуумной колонны К-11 установки ЭЛОУ+АВТ-6, расположенной на нефтеперерабатывающем заводе АО «Ангарская нефтехимическая компания» НК «Роснефть» [9].

Трансферные трубопроводы представляют собой совокупность стальных труб переменного диаметра 530/720/920 мм



NDT Russia

17-я Международная
выставка оборудования
для неразрушающего
контроля и технической
диагностики

24–26 октября 2017
Москва, Крокус Экспо

Получите электронный билет
ndt-russia.ru

Организаторы



+7 (812) 380 6002/00
ndt@primexpo.ru





Рис. 3. Вакуумная колонна уст. ЭЛОУ+АВТ-6. Место установки и пространственная ориентация датчиков абсолютных перемещений

Fig. 3. Vacuum column aggregation ELOU+AVT-6. The location point and spatial orientation of absolute displacement sensors

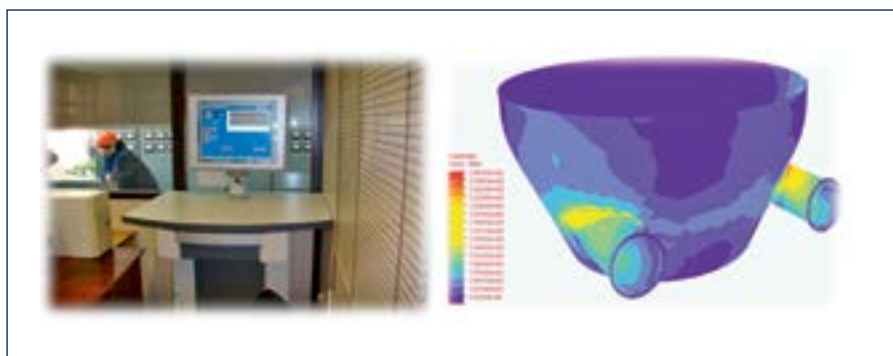


Рис. 4. Пример визуализации результатов мониторинга подконтрольного объекта

Fig. 4. A visualization example of monitoring results of the controlled object

суммарной длиной 150 м, предназначенных для подачи сырья от печи ПЗ/2 с температурой 400 °С к вакуумной колонне К-11 установки ЭЛОУ+АВТ-6. В ходе предварительного обследования было установлено, что основным повреждающим фактором для данного объекта являются значительные напряжения, возникающие в зоне примыкания трубопроводов к колонне, обусловленные высокой температурой транспортируемого сырья и значительными пространственными перемещениями трубопроводов (до 250 мм) вибрационного характера на переходных режимах. С учетом этого при проектировании СКДМ данного объекта в качестве основного метода контроля был выбран контроль НДС, а в качестве измеряемых параметров состояния были приняты данные о температурах трубопроводов, а также их пространственных пе-

ремещениях. Для контроля последних в нескольких точках по длине трубопроводов размещались датчики перемещений резистивного типа. При этом для обеспечения возможности контроля пространственных смещений трубопроводов в каждой точке монтировалось по три датчика во взаимно-перпендикулярных направлениях (рис. 3). Для обработки данных, регистрируемых во время работы СКДМ, специалистами института была создана экспертная система MStruct [10], основанная на методе конечных элементов [11–13]. Ее основой является математическая модель объекта, позволяющая по совокупности данных о перемещениях, температурах и деформациях определить фактическое НДС объекта, а также рассчитать ресурс его безотказной работы и возможность дальнейшей эксплуатации.

Результатом работы системы мониторинга СКДМ на рассматриваемом объекте являлась достоверная картина об НДС подконтрольного оборудования, в том числе в зоне примыкания трубопроводов к вакуумной колонне К-11. Результаты мониторинга в виде графических и звуковых сообщений выводились на центральную консоль оператора системы мониторинга (рис. 4).

Верификация результатов контроля по математической модели и оценка корректности вычисления параметров НДС осуществлялись с использованием дополнительного контроля параметров состояния в наиболее проблемных зонах объекта. Для этого в патрубковой зоне колонны были дополнительно размещены высокотемпературные капсулированные полумостовые тензорезисторы (по три на каждый патрубок). Сравнительный анализ вычисляемых параметров НДС по математической модели объекта и результатов контроля деформаций в патрубковых зонах колонны К-11 показал работоспособность принятой схемы контроля и модели объекта. При этом расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 5 %.

На сегодняшний день система мониторинга СКДМ находится в эксплуатации уже более восьми лет и является важным звеном системы управления промышленной безопасностью на данном ОПО. Внедрение системы СКДМ на установке ЭЛОУ+АВТ-6 НПЗ АО «АНХК» позволило эксплуатационному персоналу не только в режиме реального времени отслеживать состояние подконтрольного оборудования, но и в значительной степени стабилизировать переходные режимы работы объекта во время пусков/остановов за счет жесткого контроля параметров его работы.

ВЫВОДЫ

На основе опыта АО «ИркутскНИИхиммаш» в сфере технической диагностики объектов повышенной опасности, а также опыта проведения научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ для нужд промышленных предприятий РФ предложена единая технология оценки технического состояния оборудования ОПО, эксплуа-

тируемого при динамических воздействиях техногенной и естественной природы. Технология ориентирована на применение в отношении технологического оборудования ОПО I и II классов опасности и предполагает использование различных стратегий контроля состояния оборудования во

время эксплуатации, а также объемов внедрения средств повышения динамической стойкости, в зависимости от группы критичности оборудования по фактору динамического нагружения. Представленная технология прошла апробацию применительно к технологическому оборудованию таких про-

мышленных отраслей, как нефтепереработка, химия и нефтехимия, нефте- и газодобыча, и легла в основу разработанных АО «ИркутскНИИхиммаш» отраслевых нормативно-методических документов РД 0154-13, СТО-00220227-044, а также национального стандарта ГОСТ Р 555431.

Литература:

1. Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
2. Трутаев С.Ю. и др. Применение многоканальной вибродиагностической аппаратуры для технической диагностики компрессорного оборудования на основе синхронной регистрации параметров вибрационных и газодинамических процессов // Контроль. Диагностика. 2005. № 11. С. 24–27.
3. Трутаев С.Ю. и др. Повышение сейсмической безопасности реконструируемых зданий за счет применения и оптимального подбора демпфирующих устройств // Сб. науч. трудов VI Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию. Сочи, 2005. С. 44–50.
4. СТО-00220227-044-2016. Оборудование опасных производственных объектов. Расчетно-экспериментальные методы исследования (утв. и введен в действие 01.09.2016). Иркутск: ИркутскНИИхиммаш, 2016. 52 с.
5. ГОСТ Р 55431-2013. Системы трубопроводные. Расчетно-экспериментальный метод оценки динамического напряженно-деформированного состояния (утв. Приказом Росстандарта от 14 мая 2013 г. № 104-ст). Москва, 2013. 15 с.
6. РД 0154-13-2003. Методика виброисследований для снижения уровня вибрации трубопроводных обвязок насосно-компрессорного оборудования. Иркутск: ОАО «ИркутскНИИхиммаш», 2004. 124 с.
7. СА 03-003-07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов (утв. 11.10.2006). 2007. 72 с.
8. СА 03-001-05. Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации. М.: Ассоциация «Ростехэкспертиза», 2005. 14 с.
9. Трутаев С.Ю. и др. Создание и внедрение на предприятиях систем комплексного диагностического мониторинга. Опыт «ИркутскНИИхиммаш» // Химическая техника. 2010. № 11. С. 24–26.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014619601 РФ. Программа структурного мониторинга технологического оборудования, зданий и сооружений (MStruct) / С.Ю. Трутаев, В.В. Трутаева; заявитель и патентообладатель – ОАО «ИркутскНИИхиммаш». № 2014617158; заявл. 22.07.2014; рег. в реестре программ для ЭВМ 18.09.2014.
11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.
12. Трутаева В.В., Трутаев С.Ю. Разработка иерархии конечных элементов с переменным числом узлов на ребрах для исследования напряженно-деформированного состояния объектов машиностроения // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 90–94.
13. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: ЛКИ, 2008. 256 с.

References:

1. Federal Law of July 21, 1997, No. 116-FZ (rev. on July 13, 2015). On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities. (In Russian)
2. Trutaev S.Yu., et al. Application of Multiplex Equipment for Vibration-Based Monitoring of Compressor Equipment on the Basis of Synchronous Registration of the Parameters of Vibration and Gas-Dynamic Processes. Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics, 2005, No. 11. P. 24–27. (In Russian)
3. Trutaev S.Yu., et al. Improving the Seismic Safety of Reconstructed Buildings Due to the Implementation and Optimal Selection of Damping Devices. In: Proceedings of VI Russian National Conference on Earthquake Engineering and Seismic Zonation. Sochi, 2005, P. 44–50. (In Russian)
4. Company Standard STO-00220227-044-2016. Equipment of Hazardous Production Facilities. Computational and Experimental Methods of Investigation (Approved and enacted of September 01, 2016). Irkutsk, IrkutskNIHimmash, 2016, 52 pp. (In Russian)
5. National Standard GOST R 55431-2013. Pipelines. Design-Experimental Method for Dynamic Stress-Strain State Assessment (Approved by the Order of Rosstandard No. 104-st of May 14, 2013). Moscow, 2013, 15 pp. (In Russian)
6. Working Paper RD 0154-13-2003. Vibration Analysis to Reduce Vibration of Piping and Compression Equipment. Irkutsk, IrkutskNIHimmash OJSC, 2004, 124 pp. (In Russian)
7. Standard of the Association SA 03-003-07. Strength and Vibration Calculations for Steel Process Pipelines (Approved of October 11, 2006). 2007, 72 pp. (In Russian)
8. Standard of the Association SA 03-001-05. Centrifugal Pump and Compressor Units of Hazardous Production. Operating Vibration Specifications. Moscow, Association «Rostekhexpertiza», 2005, 14 pp. (In Russian)
9. Trutaev S.Yu., et al. Creating and Implementing of Integrated Diagnostic Monitoring Systems. Experience of the IrkutskNIHimmash JSC. Khimicheskaya tekhnika = Chemical engineering, 2010, No. 11, P. 24–26. (In Russian)
10. Certificate on Official Registration of the Computer Software No. 2014619601 Russian Federation. Program for Structural Monitoring of Process Equipment, Buildings and Facilities (MStruct). Authors: S.Yu. Trutaev, V.V. Trutaeva. Applicant and patent holder is the IrkutskNIHimmash JSC. No. 2014617158; applied on July 22, 2014; included into the register of computer software on September 18, 2014. (In Russian)
11. Zenkevich O. Finite-Element Method in Engineering. Moscow, Mir, 1975, 542 pp. (In Russian)
12. Trutaeva V.V., Trutaev S.Yu. The Development of a Hierarchy of Finite Elements with a Variable Numbers of Nodes on the Edges for Investigation of the Stress-Strain State of Engineering Equipment. Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies, 2014, No. 3 (23), P. 90–94. (In Russian)
13. Morozov E.M., Nikishkov G.P. Finite-Elements Method in Fracture Mechanics. Moscow, LKI, 2008, 256 pp. (In Russian)