

Управление динамическим состоянием промышленного оборудования на основе разработки и внедрения эффективных средств виброзащиты

С.Ю. Трутаев

АО «ИркутскНИИхиммаш», ул. Академика Курчатова 3, Иркутск, Россия
stas@himmash.irk.ru

Статья поступила 25.07.2016, принята 23.08.2016

Показаны возможности АО «ИркутскНИИхиммаш» в вопросах разработки, исследования и внедрения эффективных систем виброзащиты промышленного оборудования. Отмечена необходимость учета фактора динамического нагружения для проектируемых и уже введенных в эксплуатацию опасных производственных объектов, что в частном случае может быть обеспечено на основе применения специализированных методов обследования вибрационного состояния оборудования и разработки мероприятий по снижению динамических воздействий. Установлена возможность обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов, эксплуатируемых в условиях динамических воздействий, на основе применения специальных демпфирующих устройств, таких, например, как демпферы вязкого или сухого трения, что позволяет в ряде случаев снизить вибрационные перемещения защищаемых объектов в 2–2,5 раза. Продемонстрированы разработки АО «ИркутскНИИхиммаш» в области создания демпфирующих устройств вязкого трения для обеспечения промышленной безопасности оборудования, эксплуатируемого в условиях интенсивных вибрационных воздействий. Рассмотрены подходы к проектированию демпфирующих устройств вязкого трения мембранного типа, предусматривающие расчетно-экспериментальное исследование их характеристик, а также оптимизацию геометрии, в том числе с использованием современных численных методов, таких как метод конечных элементов. При этом отмечена возможность применения специализированного прикладного программного обеспечения, позволяющего выполнять расчеты различного промышленного оборудования (трубопроводные системы, сосуды, аппараты и т. п.) с учетом действия эксплуатационных и динамических (вибрационных, сейсмических) нагрузок с использованием линейно-спектральной теории, а также с применением методов прямого интегрирования уравнений движения системы, в том числе с учетом непропорционального демпфирования, учитывающего наличие дискретных демпферов.

Ключевые слова: опасный производственный объект; динамическое воздействие; вибрация; сейсмика; демпфирование; демпфер вязкого трения; метод конечных элементов; непропорциональное демпфирование.

Dynamic state control of industrial equipment based on development and implementation of effective vibration protection means

S.Yu. Trutaev

IrkutskNIHimmash JSC; 3, Akademik Kurchatov St., Irkutsk, Russia
stas@himmash.irk.ru

Received 25.07.2016, accepted 23.08.2016

The article shows the opportunities for IrkutskNIHimmash JSC in the sphere of development, research and implementation of effective systems for industrial vibration protection equipment. It notes the necessity of taking into consideration the factor of dynamic loading for hazardous industrial facilities that are in the process of designing or are already placed into service. In a special case, it can be provided by applying some specific methods of equipment vibration state examination and developing the activities for reducing dynamic impact. It is determined that it is possible to provide the industrial safety of hazardous industrial facilities operated under the dynamic impact conditions by using special damping devices. For example, viscous or dry friction dampers which in a number of situations allow to decrease vibratory displacements of protected facilities in 2-2.5 times. The article demonstrates the developments of IrkutskNIHimmash JSC in the field of viscous friction damping devices creating for providing industrial safety of equipment that is operated under the intense vibration impact conditions. The article considers the approaches for viscous friction damping devices of membrane type designing, that anticipate calculating and experimental research of their features and geometry optimization including the appliance of modern numerical methods such as finite-element method. At that, it is noted that there is a possibility of using specific applied software that allows to perform calculations of different industrial equipment (pipeline systems, vessels, apparatuses etc.) taking into consideration operational and dynamic (vibrational, seismic) loadings with the help of linear and spectral theory, as well as applying the method of direct integration of system motion equations with account for non-proportional damping that considers the presence of discrete dampers.

Key words: hazardous industrial facility; dynamic impact; vibration; seismicity; damping; viscous friction damper; finite-element method; non-proportional damping..

Введение

Предприятия Российской Федерации таких промышленных 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 использованием технологического оборудования, работающего при высоких температурах и давлениях. Возникновение аварийных ситуаций на таких ОПО, особенно на объектах I и II классов опасности, могут сопровождаться неконтролируемыми взрывами, масштабными возгораниями, выбросами токсичных веществ в атмосферу, а также разрушениями инфраструктуры и человеческими жертвами.

К наименее изученным на сегодня повреждающим факторам, оказывающим негативное влияние на техническое состояние технологического оборудования промышленных предприятий, 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 остановами, изменениями режима работы и т. д. Между тем, значительное влияние на величину срока службы оборудования могут оказывать 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 и т. д. Это особенно характерно для установок, оснащенных поршневыми компрессорами, а также технологического оборудования, работающего совместно с центробежными нагнетателями, перекачивающими высоковязкие или высокотемпературные среды. При проектировании подобных объектов основное внимание уделяется технологическим вопросам, а вопросы размещения и закрепления оборудования решаются без расчета спектра частот свободных колебаний и проверки системы на резонанс. В результате при эксплуатации в условиях реальных производств оборудование подвергается действию непредусмотренных проектом динамических нагрузок, длительное действие которых в сочетании с другими факторами становится причиной усталостного разрушения отдельных его элементов и, как следствие, приводит к появлению аварийных ситуаций на ОПО, человеческим и материальным потерям, загрязнению окружающей среды.

Постановка задачи. За последнее десятилетие Иркутским научно-исследовательским и конструкторским институтом химического и нефтяного машиностроения (АО «ИркутскНИИХиммаш») проведен ряд работ, связанных с обследованием вибрационного состояния насосно-компрессорного оборудования взрывоопасных и пожароопасных производств, с разработкой и внедрением по результатам обследования рекомендаций по повышению динамической устойчивости оборудования. В развитие указанных работ разработан и согласован с Ростехнадзором методический документ [1], регламентирующий процедуру обследования вибрацион-

ного состояния оборудования и процедуру разработки мероприятий по снижению динамических воздействий на оборудование. Внедрение результатов указанных научно-исследовательских работ позволило в значительной степени повысить надежность эксплуатации оборудования промышленных предприятий и снизить риски техногенных катастроф, обусловленных негативным влиянием динамических воздействий.

Анализ проведенных работ и реализованных на производстве технических решений показал, что одним из наиболее эффективных в плане снижения динамических нагрузок на промышленное оборудование является метод, основанный на применении специальных демпфирующих устройств, таких, например, как демпферы вязкого или сухого трения. Подобная технология компенсации нежелательных динамических воздействий широко применяется на объектах транспорта и атомной энергетики, в аэрокосмической технике и других высокотехнологичных областях [2; 3].

В ряде опубликованных работ [4–5], посвященных исследованию влияния демпфирования на вынужденные колебания промышленного оборудования и, в частности, на динамику трубопроводных систем, показано, что введение в исходную систему оптимально подобранных демпфирующих устройств позволяет в несколько раз снизить динамические нагрузки на оборудование и в значительной степени продлить ресурс его безопасной эксплуатации. Так, например, при сопряжении расположенных рядом вертикально стоящих промышленных холодильников поршневых компрессоров в верхнем уровне посредством системы вязких демпферов удается снизить их вибрационные перемещения в 2–2,5 раза.

К сожалению, в России подобные технологии защиты промышленного оборудования применяются достаточно редко, что связано с отсутствием необходимой нормативно-правовой базы, отработанных универсальных и технологичных конструктивных решений, а также высокой стоимостью импортных демпфирующих устройств.

Решение задачи. С учетом изложенного выше в последние годы АО «ИркутскНИИХиммаш» реализует ряд проектов, связанных с разработкой новых технологичных и эффективных систем виброзащиты промышленного оборудования. В распоряжении института имеются значительные производственные мощности, а также обширная экспериментальная база, позволяющие не только изготавливать, но и проводить ресурсные, прочностные и вибрационные испытания изготавливаемой продукции. На сегодняшний день институт уже имеет положительный опыт внедрения в промышленную эксплуатацию некоторых образцов систем пассивной и полуактивной виброизоляции и планирует запуск в мелкосерийное производство наиболее эффективных из них. Ведутся разработки систем виброзащиты с использованием управляемых демпферов [6]. Так, разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию серия демпфирующих устройств вязкого трения мембранного типа. Основным достоинством данных демпферов является эффективное гашение вынужденных колебаний в широком спектре частот внешнего воздей-

ствия. Отличительной чертой указанных устройств является высокая чувствительность к вибрациям малых амплитуд (до 500 мкм), а также возможность варьирования демпфирующими свойствами в широком диапазоне.

Конструктивно демпфер вязкого трения серии представляет собой двухкамерный цилиндр, заполненный вязкой жидкостью.

Гашение колебаний защищаемого объекта достигается за счет вытеснения лишнего объема жидкости сквозь малые отверстия, размещаемые в теле разделяющей камеры перегородки. Объем вытесняемой жидкости определяется степенью деформации мембраны, герметично соединенной со штоком, который с одной стороны прикрепляется к защищаемому объекту, а с другой — к компенсационной мембране. На рис. 1 показана одна из модификаций демпфирующего устройства с регулируемым уровнем демпфирования, достигаемым посредством изменения проходного сечения перепускного канала с помощью перепускного вентиля высокого давления.



Рис. 1. Демпфер вязкого трения мембранного типа серии МДР

На стадии разработки конструкции демпфирующих устройств были проведены расчетные и экспериментальные стендовые исследования, подтвердившие эффективность их работы, а также позволившие получить характеристики серии устройств, необходимые при проведении прочностных расчетов промышленного оборудования с учетом демпфирования.

Расчетные исследования выполнялись с применением метода конечных элементов [7] в объемной постановке на основе решения связанной упруго-гидродинамической задачи о взаимодействии корпуса и подвижных частей демпфирующего устройства с рабочей вязкой жидкостью. На рис. 2 показан пример расчетного распределения скоростей рабочей жидкости при вытеснении ее через перепускной канал вследствие упругого деформирования мембраны.

На основе проведенных расчетов запроектирована серия демпфирующих устройств на различные нагрузки с постоянным (МД) и регулируемым (МДР) уровнем демпфирования. Разработаны технические условия для ряда типоразмеров и рекомендации по использованию демпферов.

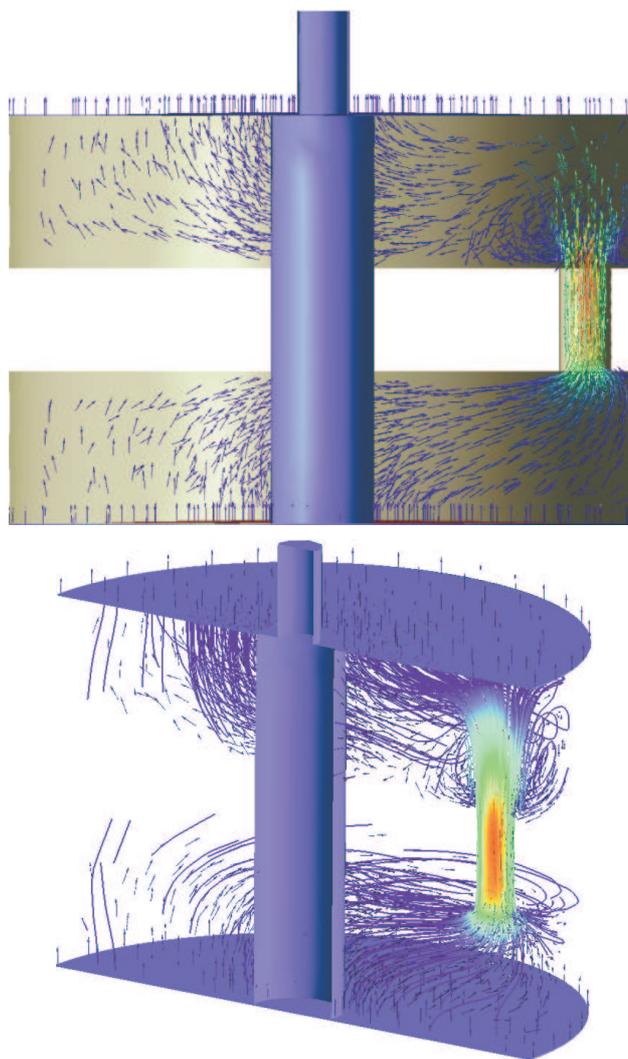


Рис. 2. Распределение скоростей движения рабочей вязкой жидкости при работе демпфера

Для проведения расчетного анализа систем, оснащенных демпфирующими устройствами серий МД и МДР, разработан специализированный расчетный модуль, включенный в состав программной системы Compass [8], предназначенной для оптимального проектирования деталей машин, промышленного оборудования и строительных конструкций методом конечных элементов. Разработанный модуль позволяет выполнять расчет различного промышленного оборудования (трубопроводные системы, сосуды, аппараты и т. п.) с учетом действия эксплуатационных и динамических (вибрационных, сейсмических) нагрузок с использованием линейно-спектральной теории, а также с применением методов прямого интегрирования уравнений движения системы, в том числе с учетом непропорционального демпфирования, учитывающего наличие дискретных демпферов [3].

Характеристики демпфирующих устройств различных типоразмеров, используемые в расчетах с применением разработанного программного обеспечения, получены в результате экспериментальных стендовых исследований. Указанные исследования проводились на вибрационном электродинамическом стенде АО

«ИркутскНИИХиммаш», позволяющем воспроизводить вибрации с частотой от 5 Гц и амплитудой до 20 мм. В результате проведенных испытаний для каждого демпфирующего устройства серии получены диаграммы «сила – перемещение», «сила – скорость» на характерных частотах вынужденных колебаний. На рис. 3 показаны результаты испытаний одного из демпфирующих устройств серии МДР.

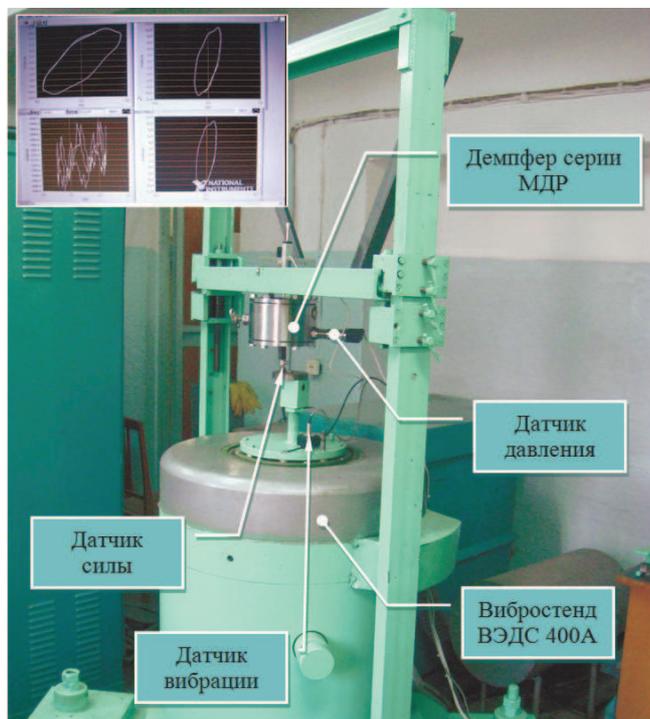


Рис. 3. Испытание на вибрационную нагрузку демпфирующего устройства серии МДР на электродинамическом стенде АО «ИркутскНИИХиммаш»

Выводы

В рамках обеспечения промышленной безопасности оборудования ОПО, эксплуатируемого в условиях вибрационных воздействий, в АО «ИркутскНИИХиммаш» разработаны способы и средства управления динамическими свойствами механических систем на основе введения в систему дополнительных демпфирующих связей и оптимизации степени демпфирования. Проведенные исследования позволили предложить универсальный обобщенный алгоритм оптимизации характеристик демпфирующих устройств с целью минимизации амплитуд вынужденных колебаний исследуемого объекта. Это позволило на ряде промышленных предприятий Российской Федерации предложить эффективные мероприятия по повышению динамической стойкости технологического оборудования, в том числе с применением разработанных демпфирующих устройств вязкого трения мембранного типа серий МД и МДР.

Литература

1. РД 0154-13-2003. Методика виброисследований для снижения уровня вибрации трубопроводных обвязок насосно-компрессорного оборудования, утв. управлением Иркут-

ского округа Госгортехнадзора России 18.03.04 г. Иркутск: ОАО «ИркутскНИИХиммаш», 2004.

2. Barutzki F. Extending the Service Life of Piping Systems Through the Application of Viscous Fluid Dampers // GERB Vibrations Control Systems. Inc., 2002.

3. Kostarev V.V., Pavlov D.J. Application of CKTI Damper for Protecting Piping Systems, Equipment and Structures Against Dynamic and Seismic Response // SMIRT 11 Transactions, Vol. K. Tokyo. (Japan), 1991. P. 505-510.

4. Трутаев С.Ю. Исследование вынужденных колебаний трубопроводных систем с дискретными демпферами // Вестн. ИрГТУ. 2004. № 4. С. 178.

5. Безделев В.В., Трутаев С.Ю. Оптимизация демпфирующих свойств опорных конструкций при разработке мероприятий по снижению вибрации трубопроводов насосно-компрессорного оборудования // Материалы V Международного симпозиума по трибофатике ISTF-2005: сб. докл. Иркутск: изд-во ИрГУПС, 2005. Т. 3. С. 65-70.

6. Трутаев С.Ю., Трутаева В.В. Разработка и внедрение эффективных систем вибро- и сейсмозащиты промышленного оборудования // Материалы IX научно-технической конференции «Исследования, проектирование, изготовление, стандартизация и техническая диагностика оборудования и трубопроводов, работающих под давлением» (21-23 сент. 2011 г.). Иркутск, 2011. С. 124-126.

7. Bathe K.J. (1996). Finite element procedures. Prentice-Hall, Upper Saddle River. New Jersey, 1996.

8. Безделев В.В., Буклемишев А.В. Программная система COMPASS. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. техн. ун-та, 2000. С. 120.

References

1. RD 0154-13-2003. Methods of vibration research for reducing the vibration level of pipe manifolds of pump and compressor equipment, approved by the management of Gosgortekhnadzor of Russia in Irkutsk district 18.03.04. Irkutsk: ОАО «ИркутскНИИХиммаш», 2004.

2. Barutzki F. Extending the Service Life of Piping Systems Through the Application of Viscous Fluid Dampers // GERB Vibrations Control Systems. Inc., 2002.

3. Kostarev V.V., Pavlov D.J. Application of CKTI Damper for Protecting Piping Systems, Equipment and Structures Against Dynamic and Seismic Response // SMIRT 11 Transactions, Vol. K. Tokyo. (Japan), 1991. P. 505-510.

4. Trutaev S.Ju. Research of the forced vibration of pipeline systems with discrete dampers // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2004. № 4. P. 178.

5. Bezdelev V.V., Trutaev S.Ju. Optimization of damping properties of supporting structures while planning the activities for reducing the vibration of pump and compressor equipment's pipelines // Materialy V Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatiqe ISTF-2005: sb. dokl. Irkutsk: izd-vo IrGUPS, 2005. T. 3. P. 65-70.

6. Trutaev S.Ju., Trutaeva V.V. Development and implementation of effective systems for vibration and earthquake protection of industrial equipment // Materialy IX nauchno-tehnicheskoy konferencii «Issledovanie, proektirovanie, izgotovlenie, standartizacija i tehniceskaja diagnostika oborudovanija i truboprovodov, rabotajushih pod davleniem» (21-23 sent. 2011 g.). Irkutsk, 2011. P. 124-126.

7. Bathe K.J. Finite element procedures. Prentice-Hall, Upper Saddle River. New Jersey, 1996.

8. Bezdelev V.V., Buklemishev A.V. Software system COMPASS. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. tehn. un-t, 2000. P. 120.