

## Список литературы

1. Ильин, Р.А. Оценка тепловых потерь в тепловых сетях при применении жидкокристаллической теплоизоляции / Р.А. Ильин // Теплоэнергетика. – 2015. – №7.
2. Байбаков, С.А., Филатов, К.Ф. Оптимизация толщин тепловой изоляции при проектировании теплопроводов тепловых сетей / С.А. Байбаков, К.Ф. Филатов // Новости теплоснабжения. – 2013. – №2.

## ПОВЫШЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРО-БЕЖНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ С МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ РОТОРОВ

*Кузнецова Ю.А., Машечкин Н.В., Кистойчев А.В.*

Уральский федеральный университет г. Екатеринбург, Россия

[juliyayo@mail.ru](mailto:juliyayo@mail.ru), [kolyamashechkin@yandex.ru](mailto:kolyamashechkin@yandex.ru), [kistoychev@gmail.com](mailto:kistoychev@gmail.com)

**Аннотация.** Представлены результаты работ, выполняемых на кафедре «Турбины и двигатели», направленных на повышение качества проектирования, обслуживания и ремонта центробежных нагнетателей природного газа, оснащенных магнитным подвесом роторов.

**Ключевые слова:** магнитный подвес, устойчивость ротора, циркуляционные силы, динамика роторной системы, гибкий ротор, вибрационная надежность.

## INCREASE OF VIBRATION RELIABILITY OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR WITH MAGNETIC BEARING OF ROTORS

*Kuznetsova J., N. Mashechkin, Kistoichev A.*

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The results of the work carried out at the Department "Turbines and engines" aimed at improving the quality of design, maintenance and repair of centrifugal natural gas superchargers equipped with magnetic suspension of rotors are presented.

**Key words:** magnetic bearing, rotor stability, circulation forces, dynamics of the rotor system, flexible rotor, vibration reliability.

Одним из направлений реализации «Концепции энергосбережения и повышения энергоэффективности на 2011–2020 гг» ОАО «Газпром» является обновление существующего парка газотранспортного оборудования на менее энергозатратное и более технологичного оборудования. Этому условию в полной мере удовлетворяют газоперекачивающие агрегаты, оснащенные активными магнитными подшипниками (АМП).

Однако, наряду с неоспоримыми преимуществами магнитного подвеса такими как исключение системы смазки и высокая автоматизация агрегата, существуют и определенные достаточно острые проблемы, выявленные в ходе эксплуатации, к числу которых можно отнести:

- Низкую вибрационную надежность;
- Отсутствие достоверных (отработанных) методов диагностики технического состояния.

Обозначенные проблемы приводят к тому, что сужается диапазон рабочих режимов агрегатов, увеличивается время пуско-наладочных работ агрегата при выводе из монтажа, увеличивается время ввода агрегатов в эксплуатацию после проведенного ремонта.

Обзор технической литературы и собственный опыт УрФУ показывает, что одной из актуальнейших проблем агрегатов на магнитном подвесе является потеря ими устойчивости на режимах малой нагрузки, что не позволяет им развить требуемые степени сжатия и, соответственно, выполнить требуемые задания по диспетчерскому графику.

Проведенные при участии УрФУ эксплуатационные испытания ряда подобных агрегатов показали, что причиной потери агрегатами устойчивости являются циркуляционные силы, возникающие в лабиринтных уплотнениях центробежных нагнетателей. Проведенный анализ полученных в ходе испытаний данных, а также численное моделирование газодинамических процессов, протекающих в лабиринтных уплотнениях, позволили определить причину потери агрегатами устойчивости – высокая степень закрученности потока газ на входе в уплотнение. Были сформулированы предложения по доработке конструкции уплотнений с выполнением раскручивающего входного устройства, которое устраняет закрутку потока на входе в уплотнение. Решение было реализовано на нескольких агрегатах различных газотранспортных систем и показало свою высокую эффективность – диапазон рабочих режимов агрегатов

расширился до паспортных значений. ПАО НПО «Искра» приняло данное решение в качестве обязательного для всех производимых агрегатов.

В УрФУ продолжают работы в направлении изучения причин и условий потери агрегатами на АМП устойчивости. Задача на данном этапе состоит в том, чтобы на основании совместного решения газодинамической задачи определения значений газодинамических сил в уплотнениях (в программе ANSYS CFX) и анализа динамики ротора (в программе Dynamics of Rotor Bearing Systems) создать методику оценки устойчивости ротора на этапе проектирования. Такой методики в настоящий момент не существует, но к ней проявляют интерес как производители центробежных нагнетателей, так и разработчики магнитных подшипников. Это существенно повысит качество проектирования вновь проектируемых агрегатов и позволило снизить продолжительность пуско-наладочных работ.

Поставленная выше задача не может быть решена в отрыве от другой задачи, а именно необходимости повышения качества моделирования динамики роторов на магнитном подвесе.

Особенность решения данной задачи в том, что она не подчиняется законам классической динамики. В систему необходимо ввести силы, с которыми магнитный подвес воздействует на ротор.

К сожалению, в коммерческих программных пакетах отсутствуют подобные надстройки или функции.

Для возможности полноценного рассмотрения вопросов вибрационной надежности мы начали развивать направление собственного программного обеспечения, которое бы позволяло анализировать поведение гибкого ротора с учетом свойств магнитного подвеса.

Была создана модель простейшего гибкого ротора – ротора Джеффкота, который представляет из себя невесомую ось, в центре которой посажен массивный диск.

Созданная модель ротора Джеффкота с имитацией магнитного подшипника в плоскости диска позволила изучить принципы формирования подобных систем, создана и верифицирована модель ПИД-регулятора, проведены расчеты, которые позволили изучить некоторые особенности поведения ротора на магнитном подвесе при различных настройках ПИД-регулятора.

Следующий шаг – это создание полноценной модели ротора на магнитных подшипниках.

Важность решения данной задачи сложно переоценить. При успешном создании такого программного обеспечения это позволит не только проводить оценку устойчивости роторных систем на магнитном подвесе в ходе проектирования, но также позволит решить огромное количество других прикладных задач:

- балансировка роторов на магнитном подвесе;
- снижение времени настройки системы управления АМП;
- Сформулировать диагностические признаки и правила определения технического состояния агрегатов на магнитном подвесе.

Каждая из обозначенных задач представляет огромный практический интерес. Их успешное решение станет огромным вкладом в дело совершенствования стратегии обслуживания газоперекачивающих агрегатов.

#### Список литературы

1. Лапицкий А. Е. Особенности испытаний центробежных газовых компрессоров ГПА в заводских и эксплуатационных условиях / А. Е. Лапицкий, Л.И. Козаченко, А.А. Королев, Е.А. Терентьев, А.В. Здоров// Компрессорная техника и пневматика – 2015. №6. С.10-17.

2. Алиев Т.Т. Опыт внедрения ГПА нового поколения на КС Северо-Европейского газопровода / Т.Т. Алиев, В.А. Середёнок, А.Б. Колибабчук // Газовая промышленность. № 10. 2012.

3. Кистойчев А.В. Устранение причин срыва в низкочастотную вибрацию центробежного нагнетателя на магнитном подвесе / А.В. Кистойчев, А.В. Лун-Фу, Е.В. Урьев // Газовая промышленность. 2016. №1. С.102-108

4. Леонтьев М.К. Динамика роторных систем, опирающихся на магнитные подшипники. III Международная Научно-Техническая конференция «Авиадвигатели XXI века», посвященная 80-летию ЦИАМ. 2010г.

5. Introduction to Dynamics of Rotor-Bearing Systems / Wen Jeng Chen, Edgar .J. Gunter