

## АННОТАЦИЯ

диссертационной работы докторанта PhD  
специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление»  
Батаева Нурлана Айбулатовича  
на тему «Моделирование и исследование режимов работы  
газоперекачивающего агрегата»

**Актуальность работы.** За последние несколько веков ископаемое топливо как первичный источник энергии является необходимым для глобального экономического роста. В течение Промышленной революции в Европе в XIX веке, уголь сыграл ключевую роль в поддержке технического прогресса в сельском хозяйстве, производстве и в сфере транспорта. В XX веке нефть заменила уголь во многих отраслях энергетики и является важным фактором поддержания экономики.

Однако, в настоящее время, постоянный и неизбежный рост цен на нефть, в сочетании со значительным сокращением запасов и необходимостью перехода многих стран на более экологически чистые источники энергии привели к росту спроса на природный газ, являющийся более чистым и экономически привлекательным видом топлива. Таким образом, природный газ является стратегическим товаром, который увеличивает текущие мировые поставки энергии и, в некоторой степени, смягчает некоторые из возможных последствий использования нефтепродуктов и их производных.

Разработка газовых месторождений и транспортирование природного газа является одним из приоритетных направлений развития промышленности Республики Казахстан. Стремительный рост экспорта углеводородов в последние годы связан в первую очередь с подъемом промышленности в странах Западной Европы и Китая. За более чем четверть века с момента обретения Казахстаном независимости, страна добилась значительного прогресса в топливно-энергетическом комплексе. По запасам природного газа Республика Казахстан входит в первую тридцатку стран мира. Газовая промышленность Казахстана получила бурное развитие с 70-х годов прошлого века. По состоянию на 2015 год, по оценке Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых, разведанные запасы природного газа в Казахстане оцениваются в 4.0 трлн.м<sup>3</sup>, где на долю растворенного в нефти газа приходится 2.3 трлн.м<sup>3</sup>, и доля свободного газа составляет 1.8 трлн.м<sup>3</sup>. Львиная доля запасов газа страны расположена в Западных регионах Казахстана. Природный газ добывается на трех основных месторождениях: Карачаганак, Кашаган и Тенгиз. Годовая добыча газа в Казахстане составляет около 23 млрд.м<sup>3</sup>.

В связи с добычей огромных объёмов газа встаёт вопрос дальнейшей транспортировки природного газа до мест конечного потребления. В этой связи

актуальна роль систем моделирования газоперекачивающих агрегатов природного газа.

Одной из основных причин снижения производительности газоперекачивающего агрегата является загрязнение осевого компрессора газотурбинного двигателя из-за загрязнителей воздуха. Учитывая тот факт, что загрязнение приводит к высокому расходу топлива, снижению давления нагнетаемого воздуха осевого компрессора и повышению температуры выхлопных газов, разработка методики обнаружения деградации компрессора позволит предотвратить такие проблемы.

**Цель работы.** Основная цель данной работы - описать методику, предложенные алгоритмы расчетов и разработанное программное обеспечение, целью которого является моделирование режимов работы газового компрессора и сопутствующего оборудования. Разработать методику по выявлению степени ухудшения эффективности газоперекачивающего агрегата.

**Основная идея работы.** Разработка приложения для реализации предложенных алгоритмов для моделирования системы компримирования природного газа путем индивидуального моделирования каждого компонента системы, такого как газовый компрессор, клапан, охладитель, газожидкостный сепаратор, и т.д. Основываясь на теории центробежного газового компрессора и практических навыков, применить к модели стратегию антипомпажного регулирования для своевременного реагирования и предотвращения случаев помпажа. Провести исследование основных режимов работы ГПА и предложить методику для обнаружения падения эффективности ГПА.

**Задачи исследования.** В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи, которые необходимо решить в настоящей работе:

- выполнить анализ и выявить технологические проблемы моделирования режимов работы ГПА;
- разработать математические модели различных узлов системы, используемых в технологическом процессе компримирования природного газа, таких как, газовый компрессор, газо-жидкостный сепаратор, охладитель, клапан, узлы сбора/разделения потоков;
- разработать алгоритм работы системы моделирования и внедрить стратегию антипомпажного регулирования для газового компрессора;
- вычисление основных параметров газа в каждой точке схемы и решение задачи распределения потока газа;
- разработать библиотечные элементы модели в виде отдельных модульных блоков;
- внедрить разработанные модели в единый программный пакет и разработать приложение для моделирования режимов работы газоперекачивающего агрегата;
- внедрить логику автоматического и ручного управления работой газового компрессора;

- проверить адекватность работы алгоритмов;
- исследовать режимы работы ГПА и разработать методику для обнаружения степени деградации компрессора.

**Объект исследования.** Объектом исследования является технологический процесс компримирования природного газа на компрессорной станции, где основным оборудованием является газоперекачивающий агрегат.

**Методы исследования.** Поставленные задачи решались путём проведения теоретических и практических исследований. В ходе исследования поставленных задач использовались теория автоматического управления, методы обработки данных, физические формулы по расчёту параметров газа, а также методы машинного обучения при определении эффективности газоперекачивающего агрегата.

В качестве инструментов моделирования и разработки ПО применялись современные пакеты прикладных программ: LabView, Microsoft Visual Studio, Jupyter Notebook.

**Научная новизна работы.** На основании выполненных исследований получены следующие результаты:

- выполнен анализ работы газоперекачивающего агрегата и разработаны структура и алгоритмы среды моделирования системы управления основным оборудованием ГПА на основе аналитических зависимостей между входами и выходами устройств и выполнения массового и объемного балансов газового потока на основе уравнения состояния Редлиха-Квонга;

- разработана методика расчёта выходных параметров центробежного нагнетателя на основе аналитических зависимостей входных и выходных параметров нагнетателя и использования заданных кривых производительности и эффективности. При определении объемного расхода на входе в систему компримирования газа использована методика поиска минимальной пропускной способности элементов схемы, выраженной массовым расходом;

- выполнен анализ падения эффективности газоперекачивающего агрегата из-за засорения лопаток осевого компрессора газотурбинного двигателя и предложен метод для прогнозирования степени деградации и определения времени промывки осевого компрессора ГТД;

- на основе использования разработанного пакета моделирования, предложена методика нахождения карты производительности центробежного нагнетателя со степенью деградации, показаны основные риски, связанные с деградацией.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

- методика формирования и нахождения объемного расхода газа на входе построенной схемы компримирования газа на основе поиска пропускных способностей узлов схемы, их поэлементного сравнения и определения текущего значения объемного расхода газа;

- алгоритм расчета выходных значений давления, температуры и расхода газа центробежного нагнетателя, учитывающий компонентный состав газа, кривые производительности нагнетателя, а также процессы сжатия реального газа с использованием уравнения состояния Редлиха-Квонга;

- разработанный программный пакет для моделирования режимов работы газоперекачивающего агрегата, учитывающий специфику работы антипомпажного регулятора, использование которого возможно в качестве тренажёра и модуля в общей системе управления, для оценки предпомпажных режимов и определения состояния центробежного нагнетателя;

- методика оценки показателей эффективности ГПА, путём определения степени деградации осевого компрессора газотурбинного двигателя на основе учёта взаимосвязи мощности центробежного нагнетателя и удельного расхода топливного газа ГТД;

- методика оценки показателей эффективности ГПА на основе нахождения карты производительности центробежного нагнетателя со степенью деградации и анализа связанных с деградацией рисков.

**Практическая значимость результатов проведенных исследований.** Практическое применение разработанного программного пакета для моделирования режимов работы ГПА заключается в его возможной реализации в качестве модуля в общей системе управления ГПА для оперативного выявления отклонений между текущими и эталонными параметрами ГПА. Также данный программный пакет может быть использован в качестве тренажёра для моделирования различных режимов работы ГПА.

Методика определения степени ухудшения эффективности ГПА, связанной с деградацией осевого компрессора ГТД, может быть использована при синтезе подсистемы диагностики газоперекачивающего агрегата как составной части в общей структуре системы управления технологическим процессом компримирования природного газа.

Предложенная методика определения карт производительности для нагнетателя с определённой степенью деградации может быть использована при эксплуатации ГПА с многолетним ресурсом наработки для оценки состояния ГПА и имеющихся рисков работы.

**Конкретное личное участие автора** в получении научных результатов заключается в:

- постановке задач исследований и методов их реализации;
- разработке и построении математических моделей основного оборудования компрессорной станции;
- разработке алгоритмов формирования объемного расхода газа и расчета массового и объемного балансов газа;
- практической реализации предложенных алгоритмов в разработанном приложении для моделирования режимов работы газоперекачивающего агрегата;

- исследовании параметров эффективности ГПА и разработке методики для выявления падения эффективности ГПА.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на Международных конференциях: «The 16th International Conference Information Technologies and Management» проходившем в 2018г. в Латвии (Рига); «The 6th International Virtual Conference on Advanced Scientific Results», в 2018г. в Словакии; «Global Science and Innovations», в 2018г. в г.Астана, Казахстан; «International Conference on Electronics Computer and Computation», в 2018г. в г.Алматы, Казахстан; «Integration of the Scientific Community to the Global Challenges of Our Time. The IV International Scientific-Practical Conference», в 2019г. в г.Саппоро, Япония.

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 12 печатных работ. Из них – 6 тезисов докладов на международных конференциях, 4 работы в журналах перечня ВАК, 2 статьи опубликованы в зарубежных изданиях, входящих в международную базу цитируемости Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов основного содержания, заключения и приложений, библиографического списка из 96 наименования и содержит 131 страницу, 80 рисунков и 24 таблицы.

**В первом разделе** приведено описание технологического процесса компримирования природного газа на современных компрессорных станциях. Описываются основные типы газопроводных систем и основные отличия между ними. Описано состояние газотранспортных сетей в Республике Казахстан. Приведено описание принципа работы систем компримирования природного газа. Приведен обзор методов и средств систем моделирования.

**Во втором разделе** описана последовательность разработки математической модели. Приводится подробное описание создания моделей газового компрессора, клапана, охладителя, газо-жидкостного сепаратора, трубы, двигателя. Описаны алгоритм формирования объемного расхода природного газа для выбранной последовательности элементов схемы компримирования газа, алгоритм расчета массового баланса схемы, алгоритм расчета выходных параметров компрессора.

**В третьем разделе** дано описание такому явлению как помпаж, являющимся одной из основных угроз для газового компрессора. Описан принцип действия и необходимости использования антипомпажного регулятора. Раскрыты принципы закона регулирования, подробно описан принцип использования и назначение антипомпажного регулятора. На основе практических навыков работы разработана модель антипомпажного регулятора.

**В четвертом разделе** приведено описание того, как производилось тестирование разработанного приложения. Описан процесс моделирования системы компримирования природного газа на примере одноступенчатого газового компрессора. Произведена проверка адекватности модели в

стационарном и динамических режимах работы ГПА. Описана последовательность тестирования антипомпажного регулятора.

**В пятом разделе** предложена методика обнаружения деградации осевого компрессора газотурбинной установки для случая газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем. Выполнен расчет параметров мощности и КПД вала центробежного газового компрессора. Показан подход к оценке производительности ГПА на основе модели прогнозирования машинного обучения. Предложена методика построения карт производительности для нагнетателя с деградацией. Адекватность модели проверена на эксплуатационных параметрах.

**В заключении** диссертации по результатам представленных исследований сформулированы основные выводы работы.

**В приложении** приведены сведения об опытных испытаниях и использовании результатов работы для практических целей.