

Пермский национально исследовательский политехнический университет

На правах рукописи

Ромашкин Макар Андреевич

**Математическо-информационные модели и
комплексы программ
интегрированной логистической поддержки
поршневых компрессорных агрегатов
нефтехимических предприятий**

- 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
05.17.08 — Процессы и аппараты химических технологий

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
канд.техн.н., доцент Мошев Е.Р.

Пермь – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	15
1.1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА.....	15
1.2 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	17
1.3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОВРЕМЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРОГРАММ ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	29
1.4 ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	36
1.5 ВЫВОДЫ	39
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ФРЕЙМОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА	43
2.1 ОБЩАЯ ФРЕЙМОВАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	43
2.2 ФРЕЙМОВАЯ МОДЕЛЬ ДЕКЛАРАТИВНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ О ПОРШНЕВОМ КОМПРЕССОРЕ	53
2.4 ВЫВОДЫ	70
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКО-ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ	71
3.1 ЛОГИКО-ИНФОРМАЦИОННАЯ МЕТАМОДЕЛЬ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ.....	71
3.1.1 ЛОГИЧЕСКО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ЧАСТОТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНЕЙ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА	74

3.1.2 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА ОДНОВРЕМЕННО СОВЕРШАЕМЫХ ПОДАЧ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ.....	93
3.1.3 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЧИСЛА ПОДАЧ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ЗА ОДИН ПОВОРОТ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА.....	94
3.1.4 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ.....	96
3.1.5 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ОТНОШЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВСАСЫВАНИЯ И НАГНЕТАНИЯ КО ВРЕМЕНИ ОДНОГО ОБОРОТА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА.....	97
3.1.6 ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ОБЪЕМА БУФЕРНОЙ ЁМКОСТИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕГО НОРМАТИВНО-ДОПУСТИМОЙ СТЕПЕНИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДАВЛЕНИЯ.....	104
3.2 ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДИАМЕТРА РАСТОЧКИ СГЛАЖИВАЮЩЕЙ ДИАФРАГМЫ.....	109
3.3 ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА.....	112
3.4 ЭВРИСТИКО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА.....	116
3.5 ВЫВОДЫ.....	126
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМНЕНИЕ КОМПЛЕКА ПРОГРАММ «ЭЛПАДО» ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	127
4.1 АРХИТЕКТУРА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ «ЭЛПАДО» РАБОТЫ С ДАННЫМИ ПО ДИНАМИЧЕСКОМУ ОБОРУДОВАНИЮ.....	127
4.2 ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ «ЭЛПАДО».....	128
4.2.1 БЛОК «БАЗА ДАННЫХ».....	128
4.3 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ «ЭЛПАДО».....	133
4.3.1 БЛОКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ – «ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОРМУЛЯР», «ОТЧЕТЫ».....	133

4.3.2 Блоки «Буферная емкость», «Диафрагма» расчета конструктивных характеристик аппаратного оформления поршневого компрессорного агрегата.....	135
4.3.3 Блоки «Прогноз», «Частотный анализ» прогнозирования состояния и обработки экспериментально-вычислительных данных поршневого компрессора.....	136
4.4 Выводы	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
ГЛОССАРИЙ.....	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СРЕДНЕЙ ОШИБКИ АППРОКСИМАЦИИ ВЫРАЖЕНИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТНОШЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВСАСЫВАНИЯ И НАГНЕТЕНИЯ КО ВРЕМЕНИ ОДНОГО ОБОРОТА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА	155
П.1.3. Шаг №3 (всасывающий трубопровод)	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ, ЕГО ЗНАЧИМОСТИ ДЛЯ ВЫРАЖЕНИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТНОШЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВСАСЫВАНИЯ И НАГНЕТЕНИЯ КО ВРЕМЕНИ ОДНОГО ОБОРОТА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СРЕДНЕЙ ОШИБКИ АППРОКСИМАЦИИ ВЫРАЖЕНИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ОБЪЕМА БУФЕРНОЙ ЕМКОСТИ К ОБЪЕМУ ГАЗА, ВСАСЫВАЕМЫМ (НАГНЕТАЕМЫМ) СТУПЕНЬЮ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНОЙ МНОЖЕСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ, ЕГО ЗНАЧИМОСТИ ДЛЯ ВЫРАЖЕНИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ОБЪЕМА БУФЕРНОЙ ЕМКОСТИ К ОБЪЕМУ ГАЗА, ВСАСЫВАЕМЫМ (НАГНЕТАЕМЫМ) СТУПЕНЬЮ	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. СВИДЕТЕЛЬСТВО ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ «ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПАСПОРТИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ» (ЭЛПАДО)..	185

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА ЗАО «СИБУР-ХИМПРОМ».....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В ООО «УРАЛПРОМБЕЗОПАСНОСТЬ».....	187

ВВЕДЕНИЕ

Успех устойчивого социально-экономического развития России определяется не только применением новых производственных мощностей, энерго- и ресурсоэффективных технологий и технических устройств, но и новых методов логистики ресурсосбережения в сфере организации и управления производством. Одним из востребованных направлений логистики ресурсосбережения является разработка методов обеспечения надёжности или работоспособности действующего оборудования производств и предприятий нефтегазохимического комплекса (НГХК), как сложной технико-экономической системы. Настоящая работа посвящена применению методов интегрированной логистической поддержки (ИЛП) одного из этапов жизненного цикла (ЖЦ) – этапа технического обслуживания и ремонта (ТОиР) поршневых компрессорных агрегатов (ПКА) НГХК. ПКА – это сложная техническая система, предназначенная для сжатия и транспортирования газообразной рабочей среды через сложные трубопроводные системы производств НХК. ПКА состоит из поршневого компрессора (ПК), трубопроводов обвязки и технологического оборудования – буферных ёмкостей, сепараторов, теплообменников и дроссельных диафрагм. Основным элементом ПКА являются поршневые компрессоры, они принадлежат классу динамического оборудования и относятся к наиболее сложным и энергоёмким видам технических устройств, надёжное функционирование которых в значительной степени определяет эффективность и безопасность эксплуатации предприятий различного профиля, включая нефтехимический.

Эксплуатационная надёжность ПК обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [1]. Качество ТОиР существенно зависит от уровня его информационной логистической поддержки (ИЛП), под которой обычно понимают сложный многостадийный инженерно-технологический и организационно-управленческий процесс, включающий:

- формирование и ведение паспортно-технической документации;
- проверку характеристик технологического оборудования и устройств на соответствие требованиям нормативно-технической документации;
- планирование ремонтов;
- формирование ремонтной документации;
- оформление актов технического обследования;
- прогнозирование остаточного ресурса;

- анализ результатов технической диагностики.

ИЛП – это совокупность видов инженерной деятельности, реализуемых посредством управленческих, инженерных и информационных технологий, обеспечивающих высокий уровень готовности изделий при одновременном снижении затрат, связанных с их эксплуатацией и обслуживанием. Полагается, что принципы ИЛП должны реализовываться на всех этапах жизненного цикла изделий [2]. Понятие ИЛП является базовым инвариантным понятием концепции CALS: Continuous Acquisition and Life Cycle Support (Информационная Поддержка жизненного цикла Изделий) [3], [4], [5], [6].

Решение указанных выше задач процесса информационной поддержки связано с обработкой значительных объёмов данных, выполняемой преимущественно вручную или с использованием разрозненных комплексов программ (КП). Применение традиционных способов подобного рода приводит к таким недостаткам как:

- низкая производительность обработки результатов технического обследования;
- сложность контроля результатов работ со стороны руководства предприятия;
- необходимость привлечения большого количества специалистов для выполнения работ ТО;
- многократное дублирование процедур технологических, технических и организационных операций с огромными массивами данных на всех этапах ЖЦ;
- высокая вероятность появления, накопления ошибок ввода;
- появление противоречивости и избыточности информации;
- сложность прогнозирования технического состояния и низкая точность планирования ремонтов.

Таким образом, результатом разрозненной компьютеризации ИП является снижение качества ТОиР, наличие частых простоев ПКА, значительных затрат на ремонт и, как следствие, уменьшение эффективности и безопасности эксплуатации всего предприятия. Анализ научно-технической литературы и условий эксплуатации ПКА показал, что для повышения качества ТОиР следует применять современные компьютеризированные инструменты. Реализация компьютеризированной ИЛП ТОиР поршневых компрессорных агрегатов является сложной задачей, т.к. требует знаний не только в сфере математического моделирования, системного анализа и информационных технологий, технологических процессов и организационно-управленческих бизнес-процессов, различных технических наук.

Анализ функциональных возможностей, применяемых на производстве разрозненных комплексов программ отечественного и зарубежного производства («ТЕХНО», «АСТОР», «TRIM-Planned Maintenance System», «Global», «Лоцман:PLM», «iMaint»; «SAP R3»; «AutoCAD», «AutoPlant Equipment V8i»; «Компас-График»; «SVM-RM», «ВИБРОБИТ», «АРМИД», «Топаз-115», «КОМПАКС», «RecipCOM» HOERBIGER), показал, что они позволяют решать только ограниченный круг задач ИЛП технического обслуживания и ремонта ПКА. Они не реализуют важных функций инженерно-технологического определения характеристик аппаратного оформления ПКА, предназначенного для гашения энергии пульсаций давления рабочей среды; прогнозирования остаточного ресурса по результатам вибродиагностики.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что научная задача разработки математическо-информационных моделей, алгоритмов и комплексов программ интегрированной логистической поддержки поршневых компрессорных агрегатов нефтехимических предприятий имеет актуальное значение для повышения эффективности и безопасности производств и предприятий НХК

Основные разделы диссертационной работы соответствуют следующим документам:

– пунктам Плана фундаментальных научных исследований РАН на 2008-2012 годы: «28. Системный анализ, искусственный интеллект, системы распознавания образов, принятие решений при многих критериях», «29. Системы автоматизации, GALS-технологии, математические модели и методы исследования сложных управляющих систем и процессов», «38. Научные основы экологически безопасных и ресурсосберегающих химико-технологических процессов»;

– пункту Перечня приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ: «Энергосберегающие технологии»;

– пунктам Перечня критических технологий РФ «Информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CALS-, CAD-CAM-, CAE-технологии)», «Компьютерное моделирование» и «Поиск, добыча, переработка и трубопроводный транспорт нефти и газа», определённых «Основами политики РФ в области развития науки и технологии на период до 2010 г. и на дальнейшую перспективу».

Цель работы – разработка математическо-информационных моделей, алгоритмов и комплекса программ ИЛП технического обслуживания и ремонта ПКА, применение которых позволяет повысить эффективность, надежность и безопасность предприятий НХК.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка фреймовой модели представления знаний о технологических, паспортно-технических и конструкционных характеристиках ПК нефтехимических предприятий.

2. Разработка обобщённой модели интегрированной логистической поддержки эксплуатируемых ПКА, включающей определение объёма буферных ёмкостей и диаметра отверстия дроссельных диафрагм с учётом требований НТД и условий эксплуатации.

3. Разработка математических моделей и алгоритмов расчёта частотно-технологических характеристик ступеней ПКА; показателя адиабаты рабочей газовой смеси; объёма буферной ёмкости, обеспечивающий нормативно-допустимую степень неравномерности давления в трубопроводах обвязки ПК; диаметра отверстия дроссельной диафрагмы для сглаживания энергии пульсаций давления рабочей среды.

4. Разработка алгоритма сравнения экспериментально-измерительных данных вибродиагностики ПКА с расчётными частотно-технологическими характеристиками ступеней ПКА.

5. Разработка алгоритма прогнозирования даты достижения ПКА недопустимого уровня вибрации.

6. Разработка архитектуры и режимов функционирования комплекса программ ИЛП эксплуатируемых поршневых компрессорных агрегатов, реализующих предложенные автором математические модели и алгоритмы.

Объектом исследования является процесс интегрированной логистической поддержки технического обслуживания и ремонта ПКА нефтехимических предприятий

Предметом исследования являются математические модели и алгоритмы реализации процесса интегрированной логистической поддержки технического обслуживания и ремонта поршневых компрессорных агрегатов.

Методы исследования основаны на научных положениях и выводах, сформулированных в работах отечественных и зарубежных ученых в области ИЛП жизненного цикла различного технологического оборудования. При выполнении работы использовались методы системного анализа; концепция интегрированной

информационной среды (ИИС); методы статистического анализа, функционального и математического моделирования, теории искусственного интеллекта. При разработке комплекса программ, структуры и режимов функционирования программного средства использовались принципы модульного и объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Фреймовая модель представления декларативных знаний о технологических, паспортно-технических и конструкционных характеристиках ПК нефтехимических предприятий.

2. Обобщённая логико-информационная модель интегрированной логистической поддержки эксплуатируемых ПКА, включающая расчет объема буферных ёмкостей и оптимального диаметра отверстия дроссельных диафрагм.

3. Логико-вычислительные модели конструкции системы цилиндропоршневых групп ПК.

4. Информационно-вычислительный алгоритм расчёта оптимального объема буферной ёмкости, предназначенной для эффективного гашения пульсаций давления технологического потока.

5. Итерационный алгоритм расчёта диаметра отверстия диафрагм, рассеивающих энергию пульсаций давления рабочей среды.

6. Итерационный алгоритм сравнения экспериментально-измерительных данных вибродиагностики ПКА с расчётными частотно-технологическими характеристиками его ступеней.

7. Эвристическо-вычислительный алгоритм прогнозирования по результатам вибромониторинга даты достижения ПКА недопустимого уровня вибрации.

8. Архитектура и режимы функционирования комплекса программ интегрированной логистической поддержки эксплуатируемых поршневых компрессорных агрегатов.

Обоснованность полученных в диссертационной работе научных результатов базируется на использовании апробированных научных положений и методов исследования; корректном применении методов системного анализа, математического моделирования и теории искусственного интеллекта; метода оценки адекватности расчётных и экспериментальных результатов.

Достоверность полученных результатов и выводов, адекватность разработанных математических моделей и работоспособность созданных алгоритмов, подтверждается

многочисленными проведёнными вычислительными и физическими экспериментами, использованием достоверных исходных данных по результатам вибродиагностики поршневых компрессоров.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы состоит в разработке математическо-информационных моделей и алгоритмов интегрированной логистической поддержки технического обслуживания и ремонта эксплуатируемых поршневых компрессорных агрегатов нефтехимических предприятий. В работе получены следующие основные результаты, имеющие характер научной новизны:

1. Разработана фреймовая модель декларативного представления знаний о ПК, отличающаяся отображением технологических, паспортно-технических и конструкционных характеристик, результатов технического диагностирования и проведённых ремонтов, что позволяет автоматизировать ИЛП действующих ПКА нефтехимических предприятий, а также исследовать свойства и режимы функционирования поршневых компрессоров.

2. Разработана обобщённая модель интегрированной логистической поддержки эксплуатируемого ПКА, включающая алгоритмы расчёта частотно-технологических характеристик ступеней ПК и оптимальных конструкционных характеристик устройств гашения энергии пульсаций давления рабочей среды, которые обеспечивают повышение надёжности и безопасности ПКА, отличающаяся учётом концепции ИИС, требований нормативно-технической документации, системных взаимосвязей между процедурами вычисления промежуточных и выходных переменных ИЛП, что позволяет с помощью единого программного комплекса автоматизировать расчёт частот пульсаций давления рабочей среды в ступенях ПК, а также соответствующих требованиям НТД значений объёма буферной ёмкости и оптимального внутреннего диаметра дроссельных диафрагм.

3. Разработана логическо-вычислительная модель системы цилиндропоршневых групп (ЦПГ) поршневого компрессора, отличающаяся учётом числа оборотов коленчатого вала, количества цилиндров в ступени, количества рабочих ходов поршней, величины угла между осями текущего и базового цилиндров и величины угла между осями кривошипов смежных с текущим и базовым цилиндрами, что позволяет автоматизировать расчёт моментов подачи рабочей среды в ступень для любого исполнения и типа цилиндров ПК.

4. Разработан информационно-вычислительный алгоритм расчёта оптимального размера буферной ёмкости, отличающийся использованием семейства

аппроксимационных моделей номограмм, описывающих взаимосвязь между объёмом буферной ёмкости, показателем адиабаты, числом, одновременно совершаемым подач рабочей среды в ступень ПКА, числом подач рабочей среды за один оборот коленчатого вала, отношением времени всаса (нагнетания) ко времени одного оборота коленчатого вала, объёмом цилиндра и степенью неравномерности давления, что позволяет автоматизировать и повысить точность определения вместимости буфера V_b , обеспечивающей нормативно-допустимую величину степени неравномерности давления δ в трубопроводных системах ПКА.

5. Разработан итерационный алгоритм расчёта дроссельных диафрагм, отличающийся учетом значений температуры, давления, молекулярной массы, скорости звука, расхода и показателя адиабаты рабочей среды, универсальной газовой постоянной и процента допустимых гидравлических потерь, что позволяет автоматизировать расчёт оптимального диаметра отверстия рассеивающей энергию потока диафрагмы.

6. Разработан итерационный алгоритм расчёта резонансных частот колебаний трубопроводных систем ПКА, отличающийся использованием экспериментально-измеренных параметров вибрации и расчётных частотно-технологических характеристик ПКА, что позволяет выявлять частоты пульсаций давления рабочей среды, возбуждающие повышенную вибрацию трубопроводных систем для последующего принятия монтажно-технических решений по их отстройке.

7. Разработан эвристическо-вычислительный алгоритм определения характеристик надежности поршневого компрессорного агрегата, отличающийся учётом результатов дискретного вибромониторинга, а также использованием комплекта стандартных аппроксимационных зависимостей, что позволяет автоматизировать решение задачи прогнозирования даты достижения элементами ПКА недопустимого нормативно-технической документацией уровня вибрации.

8. Разработаны архитектура, программно-информационное обеспечение, вычислительно-сетевая структура и режимы функционирования комплекса программ «ЭЛПАДО», программно реализующего предложенные информационно-эвристическо-вычислительные модели и алгоритмы, применение которых позволяет существенно повысить качество, снизить стоимость и трудоёмкость ИЛП технического обслуживания и ремонта поршневых компрессорных агрегатов.

Научная значимость результатов исследования. Разработанные в диссертационной работе фреймовые и логическо-вычислительные модели, а также информационно-вычислительные и итерационные алгоритмы вносят определенный вклад в развитие теории интегрированной логистической поддержки поршневых компрессорных агрегатов как составной части динамического оборудования предприятий нефтехимического комплекса.

Практическая значимость результатов исследования.

1. Предложенная общая фреймовая модель ДО и её частный случай – фреймовая модель декларативного представления знаний о ПК практически использованы при разработке комплекса программ «ЭЛПАДО», реализованного на языке С++ при использовании средств объектно-ориентированного программирования и являющегося составной частью комплекса программ «СИБУР-Трубопровод».

2. Разработанные модели и алгоритмы могут быть практически использованы в процессе работы экспертных организаций для расчёта конструкционных характеристик буферных ёмкостей и сглаживающих диафрагм, удовлетворяющих требованиям нормативно-технической и методической документации, при определении причин повышенной вибрации трубопроводов обвязки ПКА.

3. Разработанные алгоритмы обработки экспериментально-измерительных данных вибродиагностики и прогнозирования технического состояния ПКА могут быть практически использованы при решении задач экспертизы промышленной безопасности ПКА.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы реализованы в процессе разработки комплекса программ «ЭЛПАДО», предназначенного для работы с данными по динамическому оборудованию и входящему в состав комплекса программ «СИБУР-Трубопровод». Комплекс программ «ЭЛПАДО» может быть использован в проектных, экспертных и эксплуатирующих организациях, работающих в нефтехимической отрасли промышленности.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на III международной Интернет-конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (INNOTECH 2011)» (Пермь, 2011); Международной заочной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные проблемы науки и образования в 21 веке» (Тамбов, 2012); Международной заочной научно-практической конференции «Актуальные

вопросы в научной работе и образовательной деятельности» (Тамбов, 2013); XV региональной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Химия. Экология. Биотехнология-2013» (Пермь, 2013); I региональной отраслевой научно-практической конференции «Перспективы развития техники и технологий в целлюлозно-бумажной промышленности» (Соликамск, 2013), 10-й всероссийской научно-практической конференции «Информация, инновации, инвестиции-2012» (Пермь, 2012); I Региональной научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Проблемы химии, химической технологии и биотехнологии-2013» (Пермь, 2013); II всероссийской отраслевой научно-практической конференции «Перспективы развития техники и технологий в целлюлозно-бумажной промышленности» (Пермь, 2014); Международной заочной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке» (Москва, 2014).

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 21 работах, в том числе в 5-ти публикациях в журналах, рекомендованных ВАК. По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный модуль для электронной паспортизации динамического оборудования».

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Системный анализ процесса технического обслуживания и ремонта поршневого компрессорного агрегата

Динамическое оборудование, в том числе и поршневые компрессоры, являются одним из наиболее технически сложных видов механизмов и машин на нефтехимическом производственном предприятии. Компрессоры используются для сжатия газа и непрерывной его подачи к месту потребления через сложную трубопроводную систему [7]. В процессе эксплуатации в силу воздействия динамических нагрузок переменного характера и направления происходит процесс старения и износа деталей ПК. Персонал предприятия НХК, на котором производится эксплуатация ПК, должен отражать в соответствующем журнале фактические значения параметров, характеризующие состояние ПК, выявленные неполадки в работе узлов и деталей (например, нарушение герметичности, повышение вибрационной нагрузки, появление посторонних стуков, перегревов). Также в журнале фиксируются принятые меры для ликвидации выявленных неполадок. В целом, надежная и бесперебойная работа ПК обеспечивается системой ТОиР, при этом ТО является одним из важнейших мероприятий в системе ремонтного обслуживания предприятия [8]. Система ТОиР является совокупностью взаимосвязанных специальных технических средств, документации технического обслуживания и ремонта, а также исполнителей, осуществляющих поддержание и восстановление качества изделий, входящих в эту систему [1]. На сегодняшний момент ТО ПК осуществляется по схеме планово-периодических предупредительных ремонтов (ППР). В связи с этим, для ПКА производятся два вида ремонтов: капитальный и текущий (малый текущий, текущий увеличенного объема). Нарботка компрессора в машино-часах между двумя плановыми капитальными ремонтами имеет название ремонтного цикла, который зависит от норм, установленных для каждой марки компрессора. Ниже приведено краткое описание объемов и содержания работ указанных видов ремонтов.

В процессе **текущего ремонта** производятся работы ревизии, восстановления, замены или ремонта быстроизнашивающихся узлов и деталей, а также работы по

обеспечению работоспособности оборудования до следующего капитального ремонта. При **малом текущем ремонте** устраняются дефекты, отраженные в записях сменного журнала, осуществляется контроль качества затяжки коренных подшипников, шатунных болтов, крепления пальца кресткопфа, визуальная проверка видимой части рамы, зазоров между ротором и статором приводного электродвигателя, ревизия маслососа и лубрикатора и т.д. В дополнение к работам малого текущего ремонта при **текущем ремонте увеличенного объема** дополнительно производится контроль качества поверхности скольжения направляющих кресткопфа, величины зазоров в направляющих, проверка состояния кресткопфных подшипников, ревизия коленчатого вала и величины расхождения щек (раскеп), проверка состояния баббитовой подливки коренных и шатунных подшипников, контроль остаточного удлинения шатунных болтов, контроль состояния и величины выработки зеркала цилиндров ступеней, контроль величины зазора между поршнем и зеркалом цилиндра всех ступеней, контроль величины износа и величины теплового зазора поршневых колец, проверка методом неразрушающего контроля шатунных болтов, резьбовых частей штоков поршней, резьбовое соединение между штоком и кресткопфом и т.д. В **капитальный ремонт** производится полная ревизия, ремонт или замена необходимых деталей и узлов (основных, базовых и т.д.), проверка и регулировка всех элементов, испытания и проверка на соответствие требованиям нормативно-технической документации. Выполняется набор работ малого текущего ремонта и работы текущего ремонта увеличенного объема, контроль основания и положения фундаментной рамы, контроль величины деформации рамы при затяжке анкерных болтов, проверка (при необходимости и восстановление) взаимного положения осей коленчатого вала и вала привода, проверка положения коленчатого вала, величины биения коренных и шатунных шеек, контроль состояния резьбовых соединений цилиндров, проверка состояния и ремонт двигателя, проверка состояния и ремонт элементов системы смазки (маслобаки, маслоотстойники и т.д.), комплексная проверка, регулировка и испытания компрессора. Также производится контроль неразрушающим методом шатунных болтов, резьбовой части штоков поршней, деталей соединения между штоком и кресткопфом и промежуточных ползунов, пальцев кресткопфа, шейки и щеки коленчатого вала, шатуны, поршни и цилиндры. При необходимости могут производиться работы специального плана, например расточка. В этот же период может производиться модернизация. [8].

Результирующим показателем работоспособности ПК, на поддержание которой направлен комплекс работ ТОиР, является уровень вибрации элементов конструкции, как самого ПК, так и элементов трубопроводной обвязки, образующей вместе с ним единую систему конструкционно-технологического типа – поршневой компрессорный агрегат (ПКА). Сама вибрация является важным критерием надежности работы компрессорной машины. Определение уровня вибрации осуществляется с помощью вибродиагностики – регламентированной процедуры, проводимой в рамках системы ТОиР ПК. В большинстве случаев повышенная вибрация является следствием низкого качества работ по монтажу ПК и его обвязки; механического износа конструктивных элементов компрессора или следствием наличия пульсаций потока рабочей среды. Первые две причины выявляются по результатам вибродиагностики, визуально-измерительного контроля и после осуществления микрометрических измерений элементов конструкции ПК и могут быть устранены в период ближайшего ремонта. Сложнее выявить и устранить повышенную вибрацию, если её причиной является пульсация рабочей среды. Пульсационное воздействие рабочей среды наибольшую опасность представляет для трубопроводов обвязки ПК, так является причиной выхода из строя опор трубопроводов, а также разрушения его сварных швов и элементов конструкции.

1.2 Результаты анализа и краткий обзор исследований по интегрированной логистической поддержке динамических технических систем

Тематика использования комплексов программ для интегрированной логистической поддержки технических систем распространена во многих областях научно-практической деятельности. Вопросам теории и актуальности осуществления интегрированной логистической поддержки технических объектов и систем посвящены работы отечественных учёных: член-корр. РАН, проф. Мешалкина В.П., профессоров Бром А.Е., Колобова А.А., Омельченко И.Н., к.т.н. Александрова А. А., д.т.н. Левина А. И., к.т.н. Терентьевой З. С., к.т.н. Судова Е. В., к.т.н. Селезневой Е. В., к.т.н. Гацака М. П. [9], [10], [11], [12], [13], [14]. При этом отмечается, в частности авторами Бром А.Е. и Колобовым А.А., что на данный момент в России системы ИЛП находятся в стадии разработки, и законченных решений в этой области нет. Объяснение сложившейся ситуации можно найти в работе [12], где указывается, что в странах запада, а именно в США и некоторых странах Европы, научные разработки в этом направлении начались в 1980-х г.г.,

а в России – в конце 1990-х гг. Трудности в процессах создания и внедрения глобальных логистических систем можно объяснить сложностью синтеза отдельных логистических процессов, выполняемых различными участниками жизненного цикла технических объектов [9], [10].

Применение подобного рода технологий на промышленных предприятиях на территории России сопряжено с необходимостью преодоления многочисленных препятствий (отсутствие персонала глубокого понимания существа и значимости проблемы; отсутствие единой точки зрения на процесс ИП ЖЦ у всех его участников (разработчиков, изготовителей, эксплуатирующих организаций)) [12]. Эффективности работы логистических систем, которые объединяют участников ЖЦ изделия, влияют на надежность сложной техники, организацию процесса эксплуатации и ремонта [15], а от эффективности интегрированной логистической поддержки зависит конкурентоспособность наукоемкой продукции промышленных предприятий на российском и международном рынках [14].

Условия процесса ТО оказывают значительное влияние на уровни надежности технических систем [16]. Несмотря на то, что указанные авторы относят это высказывание к железнодорожному транспорту, при проведении аналогии с поршневыми компрессорными агрегатами, имеющими также достаточно высокую сложность конструкции, можно утверждать, что данное высказывание также вполне справедливо и по отношению к поршневым компрессорным агрегатам. В целом, отечественные и зарубежные ученые уделяют большое внимание разработкам, направленным на повышение отказоустойчивости и живучести структурно-сложных технических систем, к которым в полной мере относятся и поршневые компрессорные агрегаты [17].

Находясь в современных динамично изменяющихся условиях рынка, промышленным предприятиям необходимо решать вопросы управления и принятия решений на качественно новом уровне. Внедрение компьютерных систем в сфере логистики для современных тенденций в различных отраслях промышленности является жизненно важным для получения таких системных характеристик как производительность, надежность и ремонтпригодность более высокого уровня качества [18]. В процесс ИЛП, обычно, включены такие этапы ЖЦ, как проектирование, производство, эксплуатация, демонтаж и утилизация и основой для разработки модели процесса ИЛП должно служить условие системного подхода ко всем этапам ЖЦ [19]. Однако, именно этап эксплуатации

является самым продолжительным по времени, самым дорогостоящим и ресурсоемким, поэтому вопросы, связанные с ним, должны рассматриваться на ранних стадиях планирования затрат, которые необходимы для осуществления ИЛП [M. Elena Nenni A Cost model for integrated logistic support activities // *Advances in operations research*. Vol. 2013. pp. 1-6], [20]. На нефтехимических предприятиях необходимость обеспечения ИЛП процесса ТОиР оборудования обусловлена непосредственно самим процессом эксплуатации, а именно наличием большого количества агрессивных сред; значительной энергоемкостью производств; разветвленной сетью насосного и компрессорного оборудования и т.д. При переходе от плановой экономики с системой ППР к рыночной экономике промышленные предприятия не могли больше нести расходы на ТОиР в прежнем объеме, что привело к некоторой потере надежности оборудования [21].

Кроме положительного влияния, которое оказывает применение средств информатизации ТОиР, разработку комплекса программ ИЛП поршневых компрессорных агрегатов делает актуальным и то, что степень износа как основных фондов, так и непосредственного производственного оборудования в РФ достаточна велика. К настоящему времени значительная часть поршневого оборудования и буферных емкостей выработало проектный срок эксплуатации. Средняя степень износа машин и оборудования в структуре основных фондов предприятий составляет 50,3 %, а в некоторых отраслях экономики, таких как авиастроение – до 70%, из которых 64% оборудования не соответствует современным требованиям (данные федеральной службы государственной статистики). При этом для отраслей химического производства, производства кокса и нефтепродуктов этот показатель достигает, соответственно, 53,1% и 49,9%. [22], [23], [24].

Однако, как отмечается в работе [25]: «...попытки организовать сбор, хранение и обработку данных в бумажном виде или с помощью первичных средств автоматизации не дают целостной картины». На сегодняшний день наиболее прогрессивным подходом к данной проблеме является создание единой информационной системы управления ТОиР в масштабе всего предприятия. Реализацию автоматизации процессов управления и осуществления ИЛП для повышения эффективности организации работ ТОиР следует производить средствами использования информационных технологий и применения программных комплексов, автоматизированных систем [26].

На этапе эксплуатации применяются специализированные компьютерные системы, связанные с решением вопросов ремонта, контроля и диагностики эксплуатируемых систем [27]. Дудукалов Ю. В., Тернюк Н. Э. отмечают, что в компьютерно-интегрированных технологических системах ТОиР особое место занимают новые информационные возможности, появляющиеся при создании электронных моделей конкретных объектов [28]. Однако, имеющиеся комплексы программ (отечественные и зарубежные), в основном, предназначены для автоматизации всего производства [21]. Применение готовых комплексов программ часто является оптимальным решением, но данный подход имеет и ряд недостатков, среди которых можно отметить то, что готовые программные продукты не всегда учитывают специфику и особенности той или иной конкретной области их применения, а информация о методах и способах решения поставленных задач обычно остается закрытой. В итоге на практике для решения прикладных задач ИЛП и автоматизации процесса управления ТО участники ЖЦ прибегают к услугам сторонних организаций или разрабатывают программные системы и комплексы программ для определенного оборудования самостоятельно. Примером использования данного подхода может служить применение на корейских судостроительных верфях (SHI – Samsung Heavy Industrie), ННИ – Hyundai Heavy Industries и т.д.) корпоративных информационных систем, которые разработаны собственными ИТ-подразделениями и полностью соответствуют выдвигаемым им требованиям со стороны производства [29], [30]. Пример использования комплекса программ собственной разработки можно найти и в других отраслях, например, в лесной промышленности, где для решения проблем организации работ ТОиР и распределения ресурсов в области технологических машин лесного комплекса применяется автоматизированная система собственной разработки на основе технологии Microsoft.NET.Framework [31]. На сегодняшний момент наиболее перспективным методом для улучшения организации системы ТОиР является использование компьютерных информационных технологий сетевого плана [32].

В научных работах [33], [34], [35], [36] рассматриваются такие вопросы ИЛП как: автоматизация процессов мониторинга поставок комплектующих, автоматизация складской логистики и планирование цепи поставок, методы управления материально-техническими ресурсами и нормирования их расхода, автоматизация оперативного управления материальными потоками.

В работе [37] рассматриваются вопросы оптимизации расходов и материальных ресурсов в различных областях промышленности. Целью данной работы является повышение эффективности работы предприятия за счет автоматизации процесса планирования поступлений и отгрузок материальных ресурсов с использованием сетевой информационной системы управления территориально распределенным предприятием. В данной работе разработаны алгоритмы планирования новых поступлений и отгрузок материальных ресурсов предприятия; алгоритмы автоматизации процесса управления существующими поступлениями и отгрузками материальных ресурсов предприятия; архитектура корпоративной информационной системы (использующую вычислительную сеть территориально распределенного предприятия); серверную программную компоненту корпоративной информационной системы, реализующую функции управления поступлениями и отгрузками материальных ресурсов.

Автором Сатышевым С.Н. решается вопрос повышения эффективности системы управления материально-техническим снабжением за счет автоматизации процесса мониторинга и использования робастных методов прогнозирования и управления материальными потоками [36]. При этом разработан программный комплекс для реализации методов и алгоритмов управления материальными потоками; сформирована методика сбора, передачи и обработки данных в системе мониторинга материальных потоков; разработан программный комплекс поддержки принятия решений по управлению материально-техническим снабжением промышленных объединений; разработаны методы и модели оценки критериев экономической эффективности деятельности управления материально-техническим снабжением промышленных объединений.

В работе [38] отмечается, что проблемы взаимодействия человека и машины стали в настоящее время общими для атомной энергетики, нефтяной и газовой промышленности, химического производства, авиации, транспорта и других отраслей народного хозяйства. По отношению к отрасли нефтехимического производства в качестве проблемы взаимодействия человека и машины существует проблема взаимодействия человека и химической аппаратуры (сосудов и аппаратов, трубопроводов, динамического оборудования) в общем или взаимодействия человека и поршневого компрессорного оборудования в частности. В данной работе также говорится о том, что анализ ряда аварий в этой отрасли показал, что одной из причин являются ошибки диспетчерского персонала, непринятие или принятие неправильных управляющих решений. Целью своей работы

автор Новицкий, К.А. ставит повышение эффективности управления непрерывными технологическими процессами магистрального транспорта газа за счет разработки методов и моделей поддержки принятия диспетчерских решений по перераспределению газовых потоков. Вопрос взаимодействия человека и машины в приложении к диспетчеру и управлению газодобывающего и газотранспортного предприятия рассматривается в работе [39], в которой отмечается, что в условиях действующего производства цена диспетчерского решения достаточно высока. Данный факт оказывает негативное влияние психологического характера на диспетчера, кроме того сложность принятия решения возрастает при отсутствии или недостоверности части параметров. В работе проведен анализ моделей представления знаний в системах поддержки принятия решений по добыче и транспортировке газа, разработаны методы и модели системы поддержки принятия решений управления газодобывающим предприятием, разработаны методы анализа и прогнозирования добычи и давления в скважинах, разработана имитационная модель управления газокompрессорной станцией, разработан программно-моделирующий комплекс системы управления добычей и транспортировкой газа.

Разработка комплекса программ ИЛП поршневого компрессорного агрегата с целью решения соответствующих задач, возникающих на этапах ЖЦ, не представляется возможным без разработки необходимых математических моделей. Различные методы математического моделирования при исследованиях и расчетах процессов работы компрессоров объемного принципа сжатия используются около пятидесяти лет [40]. В качестве теоретического метода для осуществления процессов исследования и расчета рабочих процессов в объемных машинах математическое моделирование нашло обширное применение в компрессоростроении [41]. Значительный вклад в вопросе совершенствования поршневых машин при помощи методов математического моделирования в России внесли: Штейнгарт Л.А., Фотин Б.С., Пластинин П.И., Твалчрелидзе А.К., Прилуцкий И.К., Пирумов И.Б., Хрусталеv Б.С. и др. в области компрессоров; Герман В.П., Холзунов А.Г., Боровков А.А., Зиневич В.Д. и др. в области пневмодвигателей; Архаров А.М., Новотельнов В.Н., Бумагин Г.И. и др. в области детандеров [42].

Математическое моделирование ПК интенсивными темпами развивалось в Советском Союзе в Ленинградском Политехническом Институте Б.С. Фотиным, И.К. Прилуцким и их сотрудниками, в Московском Высшем Техническом Училище им.Н.Э.

Баумана П.И. Пластининым, в ЛенНИИ-химмаше Т.Ф. Кондратьевой, В.П. Исаковым, В.Г. Мясниковым и др.. После 1940 года и осуществления первой математической модели протекающего в ПК реального процесса Доллежалем Н. А. была произведена публикация большого количества научных работ [43], [44]. Аналогичная ситуация с наличием двух ведущих школ моделирования поршневых компрессоров сохранилась и на начало 90-х гг. XX века. В работе [45] высказывается мнение о том, что теория математического моделирования процессов, происходящих в машинах объемного действия, отстаёт в своём развитии от возросших возможностей современных электронных вычислительных машин и численных методов решения систем дифференциальных уравнений. Также утверждается, что существующие в настоящее время математические модели работы машин данного типа, их ступеней и узлов направлены на определение интегральных показателей работы. Они базируются на параметрах, полученных в результате проведения экспериментов, и зависимостях, верных только для исследованных машин.

Тематика математического моделирования поршневых машин актуальна и для современных научно-методических и прикладных исследований. В [46] приводятся результаты исследования вибрационного состояния на примере азотных вертикальных трехрядных двухступенчатых компрессоров. Расчет сил инерции, их моментов за один цикл работы механизма движения проводился с помощью кинетостатического метода. Авторами разработана математическая модель для исследования кинематических и динамических параметров различных типов поршневых компрессоров, работающая на основе уравнений Лагранжа 2-го рола с множителями. Отмечается существенное влияние соотношения зазоров узлов ПК на динамику всего механизма.

Математическая модель многоступенчатого ПК, разработанная Жуковым Р.В., описывает движение механизма компрессора с учетом зазоров и неравномерности вращения КВ. Также модель учитывает специфику крупных компрессоров, установленных на предприятиях химической промышленности [47]. Одним из итогов работы указанного автора является методика определения технического состояния механизма движения ПК по виброакустическим показателям, являющаяся универсальной для ПК химических производств. Разработанная методика технического диагностирования позволяет осуществить переход на ремонт по техническому состоянию (для поршневых колец, башмаков крейцкопфа, подшипников шатунов и крейцкопфов), определить периодичность их диагностирования.

Одним из результатов исследования автора Вартана Луай М. является математическая модель рабочих процессов в ступени ПК, учитывающая разнообразие конструктивного исполнения ступени, а также изменение параметров реального газа в проточной части одноступенчатого объемного компрессора с учетом динамики клапанов и нестационарного течения газа во всасывающей системе [48]. Целью данной работы является повышение эффективности и надежности холодильных компрессорных установок путем настройки параметров всасывающей системы, включая параметры всасывающего клапана, для уменьшения пульсаций давления и повышения производительности компрессора. Разработанная автором модель и программа используются для проектирования компрессоров и их элементов (всасывающей системы, клапанов) в учебной и научно-исследовательской работе кафедры «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» СПбГПУ.

В работе [49] решается проблема создание научной базы для повышения мобильности и автономности мобильных компрессорных установок путём совершенствования рабочих процессов ступеней поршневых, роторно-поршневых и роторных компрессоров. При этом разработаны математические модели рабочих процессов бесшмазочных компрессорных ступеней объёмного действия с «сухим» и газожидкостным рабочим телом. Автором выполнено математическое моделирование рабочих процессов бесшмазочных ступеней поршневых и роторных компрессоров, предназначенных для мобильных установок.

Уточнение математической модели рабочего процесса ступени бесшмазочной ПК для возможности расчета теплообмена при наличии оребрения на поверхностях его рабочей камеры является одной из задач, которая ставится автором Новиковым Д.Г. для достижения цели повышения технико-экономических показателей работы ПК путем интенсификации охлаждения газа в оребренной несмазываемой рабочей камере [50]. На основе математической модели разработана программа на языке Turbo Pascal в оболочке Delphi, позволяющая производить расчёты рабочего процесса ПК с учетом процесса теплоотдачи к стенкам рабочей камеры при наличии на них внутреннего оребрения.

С точки зрения энергоаудита моделирование поршневого компрессора производится в работе [40], где разработанная модель ПК с числом ступеней до четырех состоит из: модели состояния газа, модели кинематического состояния и модели механического состояния. Разработанная автором модель служит основой для работы диалоговой системы

и программы для энергетического обследования предприятий. При использовании данной программы имеется возможность определить механические, термодинамические показатели работы ПК. Имеется возможность анализа его работы на нерасчетных режимах при изменении параметров: число оборотов КВ, давление на выходе, давление на входе, температура на входе. Использование разработанной автором системы позволяет снизить стоимость и время проведения энергоаудита ПК.

В работе [51] предлагается подход к математическому моделированию термодинамических процессов сжатия газа или пара в цилиндре ПК с учетом параметров реальных газов, отличающийся тем, что позволяет отказаться от уравнений состояния, используемых в традиционных моделях. Уравнения заменяются значениями, полученными интерполяцией экспериментальных данных для отдельных веществ, из которых состоит рабочее тело. Авторами Е.Н.Туголуковым и Е. С. Егоровым предложена математическая модель для определения термодинамических параметров рабочего тела в цилиндре ПК с учетом теплообмена с конструкционными элементами.

В дополнение к моделированию рабочих процессов проводятся исследования в области моделирования отдельных узлов ПК, таких как уплотнения, запорные органы клапанов, пластинчатые полосовые клапаны [52], [53], [54].

Вопросы прогнозирования технического состояния и диагностики конструктивно сложных технических систем являются актуальными в приложении к различным отраслям промышленного производства. На сегодняшний момент парк поршневых машин, участвующих в производственных процессах на потенциально опасных производствах предприятий нефте- и газоперерабатывающего, химического комплексов, которые имеют непрерывный производственный цикл, достаточно велик. Безопасная и безаварийная эксплуатация данного вида оборудования без контроля его технического состояния невозможна, так как на узлы и детали конструкции ПК действуют значительные по своим величинам динамические нагрузки, высокие давления, а основными узлами, которые лимитируют надежность и долговечность работы ПК являются ЦПГ, подшипниковые узлы, клапаны и др. [55]. Последствия отказа поршневого компрессора могут выражаться в значительных экономических потерях, негативно экологическом влиянии на окружающую среду. При этом обеспечение безопасности и надежности работы поршневых машин возможно лишь при условии использования методов и технологий контроля технического состояния, диагностирования, мониторинга (дискретного или непрерывного) [56].

Актуальное техническое состояние поршневой машины при этом возможно установить и по информации из виброакустического сигнала. В последние годы техническая диагностика приобретает все большую важность, в особенности для отраслей, использующих энергомеханическое и технологическое оборудование, существенно различающиеся по наработке. В условиях интенсивного процесса старения систем трубопроводной обвязки, обуславливающего необходимость их реконструкции, практически единственным средством обеспечения высокой надежности и эффективной транспортировки газообразных сред становится переход от традиционного регламентного обслуживания к системе обслуживания "по состоянию". Однако, в настоящий момент применение данного вида обслуживания ограничено малым количеством относительно простых изделий, отсутствием теоретических предпосылок для исключения риска отказа технических устройств, отсутствием рекомендации по применению средств математического анализа и обработки результатов, отсутствием полной стратегией к предотвращению происшествий [20], [57].

Вопросам прогнозирования и анализа технического состояния оборудования, оценке сроков их службы, повышения надежности и обеспечения бесперебойной работы посвящены многие научные исследования.

В работе [58] получены практические результаты и разработана методика оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений. Разработка данной методики направлена на совершенствование надежности и функциональности их эксплуатации в условиях крупных мегаполисов. Разработанная автором на базе его научных исследований методика оценки и прогнозирования технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений и создание на ее основе аналитически-информационной системы позволяют: получить информацию о конкретном сооружении или об общем состоянии выбранной группы сооружений; спрогнозировать состояние сооружения и остаточный срок службы в зависимости от выбранной стратегии управления его эксплуатацией; спланировать мероприятия по содержанию и ремонту сооружений на основе оперативного определения объема требуемых работ; определить и оптимизировать финансовые затраты в результате оценки объемов работ по содержанию и ремонту.

Рассмотрение вопроса анализа технического состояния поршневых кривошипно-ползунных механизмов приводится в работе [59]. Отмечается что проблема анализа

технического состояния поршневых кривошипно-ползунных механизмов является достаточно актуальной темой, а совершенствование моделирования технического состояния машин и механизмов на многокритериальной основе является одним из актуальных направлений современного машиноведения. В рамках данной работы создана математическая модель изменения движения поршневого кривошипно-ползунного механизма, учитывающая взаимовлияние динамических характеристик механизма и формоизменения сопряженных деталей в кинематических парах при различных режимах эксплуатации; установлена взаимосвязь между параметрами виброакустического сигнала и процессом износа трибосопряжений, оценке на этой основе технического состояния поршневых компрессорных машин; создан программный комплекс, позволяющий производить виртуальный мониторинг технического состояния механизма при различных режимах эксплуатации и конструкции машины с учетом взаимовлияния различных факторов внешнего воздействия и состояния механической системы. В качестве практической ценности данной работы можно отметить совершенствование оценки технического состояния поршневых машин по вибродиагностическим показателям; возможность выявления потери работоспособности деталей и узлов механизма движения поршневых машин во время эксплуатации; возможность прогнозирования технического состояния механизма в будущем времени эксплуатации.

Тема повышения надежности и обеспечения бесперебойной работы оборудования освещена в работе [60]. Практическая ценность данной работы заключается в разработанных технических средствах для систем диагностики гидроприводов; методике прогнозирования состояния гидропривода в целом и его основных элементов в процессе эксплуатации. Результаты работы использовались при создании экспериментальных образцов средств технической диагностики для гидроприводов машин транспортного строительства.

В работе [61] отмечается, что техническое обслуживание и ремонт является сложным технологическим процессом, который требует использования ресурсов различного рода (люди, механизмы, финансы). Также он связан со смежными процессами (комплектация, управление персоналом, ведение архива технической документации и др.). При этом, чем больше число исполнителей задач технического обслуживания, тем выше значимость данного процесса управления. Целью работы ставится повышение уровня технического состояния основного технологического оборудования компрессорных станций газотранспортного предприятия за счет автоматизации процесса управления

ТОиР. На основании выполненных исследований получены и разработаны: методика организации автоматизированного управления ТОиР на базе смешанной стратегии обслуживания (по наработке и состоянию технологического оборудования); функциональная модель процесса управления ТОиР технологического оборудования компрессорных станций газотранспортного предприятия; метод оценки технического состояния основного технологического оборудования компрессорных станций; реализация разработанных моделей и методов в виде программного и информационного обеспечения и методик по его использованию.

Вопросам диагностирования и прогнозирования технического состояния ПК уделено внимание в работе [62], где рассмотрена обобщенная модель состояния агрегата во времени через векторы его технического состояния с указанием того, что использование скоростей роста совместно со значениями параметров вибрации позволяют обеспечить раннее предупреждение о тенденциях изменения состояния агрегата. При этом говорится о том, что использование скоростей роста параметров вибрации в качестве независимого диагностического признака является новым шагом в диагностике и прогнозировании.

Работа [63] посвящена методике диагностирования состояния поршневой компрессорной машины с помощью экспоненциальной модели развития трендов вибропараметров. Отмечается наличие теоретического и практического подтверждения того, что тренды вибропараметров развиваются по экспоненциальной модели на участках катастрофического износа. Предлагаемая методика расчета скорости вибропараметров и прогнозирования не требует для своей реализации значительных вычислительных ресурсов, так как не требует загрузки и хранения трендов параметров вибрации.

В связи с вышесказанным, можно сделать вывод, что вопрос прогнозирования технического состояния конструктивно сложного объекта в процессе его эксплуатации, является актуальным для всех сфер использования объектов подобного уровня сложности в целом и ПКА в частности. Также актуальным вопросом для научных исследований является и вопрос расчета параметров и ресурса элементов обвязки ПК. Примером может быть работа [23], где рассматриваются вопрос оценки несущей способности и ресурса буферной емкости поршневого газового компрессора при расчете параметров, определяющих статическую прочность и выявления наиболее опасного конструкционного узла. Данный вопрос решается авторами работы с помощью построения конечно-элементной модели в специальных программных комплексах. Для оценки несущей

способности от вибраций и пульсаций давления используются данные о частотах и амплитудах колебания в контрольных точках конструкции емкости. Разработанная последовательность применения расчетно-экспериментальных методов позволяет производить оценку несущей способности, срока и условий дальнейшей эксплуатации буферных емкостей поршневых газовых компрессоров, которые эксплуатируются под действием вибрации и пульсации давления.

Методика расчета объема буферных емкостей для гашения колебаний рабочей среды приведена в [64], [66], [67]. Однако, в данных источниках методика расчета приводится только для ограниченного круга схем действия цилиндров. Сам механизм образования пульсаций рабочей среды и то, какое влияние оказывается на работу поршневого компрессорного агрегата, рассматривается в [68]; [64]; [69]; [70].

1.3. Краткая характеристика современных комплексов программ для интегрированной логистической поддержки динамических технических систем

В настоящее время существует достаточно много комплексов программ и систем, систем управления предприятием, позволяющих автоматизировать различные задачи ИЛП технического обслуживания и ремонта динамических технических систем, промышленного оборудования и трубопроводов. Среди имеющихся программных средств в области автоматизации и обеспечения технического обслуживания и ремонта можно отметить интегрированную информационную систему инженерно-технологического обеспечения предприятия "ТЕХНО", разработанную ОАО КБ «Энергоавтоматика» (г. Москва) [71]. Данная система, характеризующаяся направленностью на энергетическое оборудование, имеет модульную архитектуру, что позволяет модулям работать как отдельно, так и в составе системы. В ее состав входят модули: электронный архив; паспортизация активов; техническое обслуживание и ремонт; трехмерное моделирование; прогнозирование замены узлов оборудования; контроль эксплуатации оборудования. Целевыми функциями системы «ТЕХНО» являются: создание системы контроля состояния технических активов промышленных предприятий; подготовка обоснованных вариантов реконструкции и модернизации процессов производства; снижение издержек на поддержание надежности оборудования; создание централизованных баз данных проектной, технологической и эксплуатационной информации. Рассматриваемая система имеет достаточно обширный набор объектов паспортизации, таких как оборудование (котлоагрегаты, турбоагрегаты,

генераторы, трансформаторы, насосы, деаэраторы и др.); трубопроводные системы высокого, среднего и низкого давления; здания и сооружения (дымовые трубы, градирни, насосные станции); наземные коммуникации; подземные коммуникации (мазутопроводы, трубопроводы, ливневые стоки, кабельные каналы, каналы телефонной связи) и т.п.

Компания ООО «АРМСофт» (г. Волгоград) при поддержке Волгоградского Технического Университета и ООО «Волгоградсервис» занимается разработкой и поддержкой программы для ТОиР «АСТОР» [72]. Назначением системы является повышение эффективности ремонтных служб. Производитель обозначает следующую задачу применения системы «АСТОР» — программно-информационная поддержка работы механических служб по проведению ремонта и ТО оборудования. Программа выполняет такие функции как: паспортизация оборудования в единой базе данных; фиксация и контроль проведенных работ по ТОиР; планирование ТОиР оборудования; формирование документации; ведение различных справочников; авторизация пользователей системы; настройка программной системы; механизмы расширения функциональности системы. Система «АСТОР» включает в себя "Систему автоматизации процессов поддержки технического обслуживания и ремонта" (САПП ТОиР) и "Систему учёта проведения работ по ТОиР" (СУПР ТОиР). Указанные компоненты внедрены на предприятие ООО «Волгоградсервис». Для "Системы автоматизации процессов поддержки технического обслуживания и ремонта" характерны функции: программно-информационная поддержка составления планов и контроль проведения работ по обслуживанию и ремонтам оборудования; генерация документа плана работ, работа со справочниками; хранение и обработка информации (обслуживаемое оборудование, запасные части, материалы, структура предприятия). САПП ТОиР имеет следующие подсистемы: составление плана работ; контроль проведения работ; генерация документов; справочные подсистемы (справочник материалов, справочник запасных частей, справочник типовых работ, справочник структуры предприятия). САПР ТОиР имеет подсистемы: Подсистема учета работ; Подсистема структуры предприятия; Подсистема формирования документов; Подсистема авторизации пользователей; Основные справочные подсистемы (справочник материалов, справочник запасных частей, справочник типовых работ). В качестве недостатков можно отметить то, что отсутствует первоначальная ориентация при разработке на динамическое оборудование и поршневые компрессоры.

Комплексной программой управления ТОиР является система «iMaint» от американской компании DPSI [73]. «iMaint» является на сегодняшний день одной из самых современных систем управления основными фондами (ЕАМ-система (Enterprise Asset Management)). Данная система решает задачи, связанные с ТОиР оборудования, закупками материалов и комплектующих, управлением складами запчастей, расчетом себестоимости ремонтных работ. В качестве основной цели системы управления фондами и активами предприятия производитель выдвигает продление ЖЦ оборудования, сокращение аварийных поломок, простоев оборудования и ненужных запасов. В задачи системы входит планирование ТОиР на предприятии, путем совмещения и перераспределения ремонтных процедур с целью устранения лишних ремонтов, учет состояния оборудования в целях недопущения аварий, а так же планирование ТО на нескольких объектах одновременно. Модули системы включают: паспортизацию оборудования; запчасти и компоненты; процедуры и задачи по ремонту; планирование ремонтов и ТО; заказ-наряды; заявки на работы; управление ремонтными бригадами; управление запасами (инвентаризация, складские операции); управление закупками (составление графика закупок); счета главной книги и центры затрат, бюджеты; стандартные отчеты с возможностью настройки и создания новых (около 200); модуль удаленного доступа к системе через сеть Интернет; возможность использования нескольких валют одновременно, управление и отчетность по нескольким объектам одновременно. В качестве положительных сторон системы «iMaint» следует отметить различные способы задания периодичности процедур процесса ТОиР: через временной интервал; через наработку; через состояние. Пользователями данной системы выступают представители различных областей промышленности и производства, товаров и услуг: энергетика, химия, фармацевтика, машиностроение, металлургия, пищевая промышленность, транспорт, логистика, жилищно-коммунальное хозяйство. Несмотря на высокую степень проработки вопроса управления процессом ТО, данная программа не является специальной разработкой для использования в отношении динамического оборудования и поршневых компрессоров, система не осуществляет функций расчета аппаратного оформления ПКА. Тот факт, что ее производителем является иностранная компания, может приводить к проблемам адаптации и «стыковки» программы с отечественными стандартами и методиками проведения ТОиР динамического оборудования.

Автоматизированной системой управления ТОиР на основе программного обеспечения TRIM (Targets Related Information Management) является программный продукт «TRIM-Planned Maintenance System» («TRIM-PMS») от компании НПП СпецТек (г. Санкт-Петербург) [74]. Программный комплекс TRIM предназначен для организации управления основными фондами и процессами, связанными с ними: ТОиР, материально-технического снабжения, ведения складского хозяйства. TRIM-PMS создан для управления типовыми процессами, имеющими место на предприятиях, которые имеет довольно компактные ремонтные службы с областью их ответственности, заключающейся в процессах ТОиР, которые можно назвать типовыми, так как они похожи на предприятиях данной группы. В основе TRIM-PMS лежит общая модель процессов ТОиР на предприятии. Это обуславливает достаточно жесткую и универсальную методику внедрения TRIM-PMS и регламент его использования. В составе TRIM-PMS имеются следующие модули: TRIM-M (модуль «Техобслуживание»); TRIM-W (модуль «Склад»); TRIM-C (модуль «Каталог»); TRIM-DOC (модуль «Документооборот»); TRIM-A (модуль «Администратор»). Модуль «Техобслуживание» выполняет функции: описание и ведение структуры основных производственных фондов (паспортизация); планирование работ по ТОиР; заказ запасных частей для запланированных работ; ведение журнала выполненных работ; учет наработки оборудования по счетчикам; регистрация текущих значений технических параметров; классификация и регистрация дефектов (отказов); ведение технической документации и инструкций; анализ работоспособности оборудования, эффективности планирования и затрат на ТОиР. Модуль «Каталог» имеет следующие функции: создание справочника запасных частей и материалов; формирование каталога узлов оборудования и запасных частей; запись в базу данных графических изображений узлов оборудования; создание заявки с использованием чертежей каталогов оборудования; ведение справочников производителей и поставщиков. Основным недостатком рассматриваемой системы будет являться ее направленность на предприятия с небольшим ремонтным отделом (к такому типу не относятся предприятия химической и нефтехимической отрасли). Отсутствие первоначальной ориентации динамическое оборудование также является следствием ее «типовой» направленности.

Программный комплекс Seascope [75] предназначен для решения задач интегрированной логистической поддержки, таких как управления жизненным циклом сложной техники в части ИП базовых процессов эксплуатации, обеспечения

технической готовности, проведения сервисного обслуживания и ремонта. В состав данного комплекса входят следующие модули: «Эксплуатация технических средств» (реализует технологию ИП базовых процессов, связанных с обеспечением технической готовности и проведением сервисного обслуживания сложных технических средств. Модуль позволяет планировать ТОиР; вести учет запасных частей, расходных материалов, ГСМ; управлять закупкой материально-технического обеспечения; вести учет и контроль выполнения работ, организовывать электронный документооборот и др), «Подготовка и управление данными» (обеспечивает управление информацией с помощью взаимосвязи данных об изделии, производит ведение БД нормативно-справочной информации; формирует электронную структуру изделия в различных аспектах (эксплуатационная структура, структура по пространственному размещению, структурированное закрепление по ответственным); управляет данными, используемых для решения задач ИЛП; формирует параметрические модули данных о процедурах ТО оборудования и др.. Основная задача модуля – подготовка и управление данными информационной модели сложного изделия, используемой на различных этапах ЖЦ для решения широкого круга задач ИЛП). Недостатком данной системы является отсутствие ее первоначальной направленности на ПКА.

Программные системы, направленные на работу с данными на этапе эксплуатации («SAP R3», «Global» [76], «Лоцман:PLM» [77]), характеризуются табличным вводом данных. CAD-системы («AutoCAD» [78], «AutoPlant Equipment V8i» [79], «Компас-График» [80] имеют графический редактор, ориентированы на этап проектирования и не являются удобным средством для применения на этапе эксплуатации. Система «Lotsia PLM» рассчитана, в большей части, на документооборот [81].

Общим недостатком программных систем от зарубежных разработчиков является их удаленность от места внедрения, существенное различие в организации процессов технического обслуживания, высокая стоимость адаптации и низкая поддержка отечественных стандартов, недостаточное участие в разработке программных систем специалистов отечественных предприятий.

Контролировать техническое состояние поршневой компрессорной машины в полной мере не возможно без анализа ее параметров вибрации. На сегодняшний день на рынке представлены системы для вибромониторинга не только самих ПК, но и других механизмов, требующих контроля данных параметров в процессе своей работы.

Научно-производственная фирма «Эдмон» [82] предлагает системы контроля вибросостояния для электродвигателей, системы спектрального мониторинга роторных машин, систему управления надежностью турбогенераторов и асинхронных двигателей. Для электродвигателей первичными приборами могут выступать любые виброметры, электронная технология обеспечивается пакетом прикладных программ «TDM». Недостатком служит ручной ввод информации с журналов замеров контролируемых параметров вибрации. Спектральный мониторинг роторных машин обеспечивается совместным применением в качестве первичного прибора AU-014 (фирма «ДИАМЕХ») и пакета прикладных программ «SVM-RM», в которых реализован автоматический ввод данных. Неисправности выявляются при помощи спектрального, гармонического, экспертного анализов.

Автоматизированная система стационарного контроля вибрации и механических величин (АСКВМ) «ВИБРОБИТ» [83] предназначена для непрерывного стационарного измерения, контроля, мониторинга, параметров механического состояния паровых и газовых турбин, турбокомпрессоров, центробежных насосов и других машин, смонтированных на подшипниках, во время их эксплуатации. Автоматизированная система стационарного контроля вибрации и механических величин «ВИБРОБИТ» представляет собой конфигурируемую систему по программной и аппаратной части под тип контролируемого оборудования.

Автоматизированное рабочее место инженера-диагноста «АРМИД» является инструментом для управления данными в системах технического обслуживания оборудования и трубопроводов, имеющий открытый протокол обмена и способный поддерживать работу с аппаратурой разных фирм-производителей. Данный программный комплекс предназначен для системного хранения и анализа вибрационных, параметрических и других данных о техническом состоянии промышленного оборудования [84]. В состав "АРМИД" входят программы: "АРМИД-База данных" (хранение, анализ, обмен информацией в многоуровневой иерархической базе разнородных данных о состоянии оборудования (вибрационных, параметрических, прочностных, технических, описательных)); "АРМИД-ЭКСПЕРТ" (экспертная система для автоматизированной диагностики неисправностей конкретных типов оборудования по заложенным в ней методикам. [85]); "АРМИД-Редактор" (программа создания, редактирования методик диагностики); "Web-АРМИД" (распределенная система

дистанционной диагностики, сетевая версия "АРМИД" для глобальных компьютерных сетей предприятий); "АРМИД-Паспорт" – (универсальный паспорт технологического оборудования).

В качестве основных функций ПО «АРМИД» можно отметить создание многоуровневой структуры базы под задачи Пользователя: сравнение, редактирование, перезапись, удаление данных, добавление объектов на любой уровень базы; автоматическое считывание данных для проведения автоматизированной диагностики состояния оборудования на основе анализа спектров. [86]

Система вибротемпературного мониторинга Топаз-115 [87] предназначена для постоянного контроля, отображения, архивирования параметров вибрации и температуры узлов агрегатов. Также ее назначением является сигнализация и выдачи сигналов для автоматической защиты агрегатов при превышении заданных значений измеряемых параметров. Система обеспечивает индикацию при достижении предупредительных и аварийных уровней контролируемых параметров, выдает дискретные сигналы для отключения контролируемого объекта и включения сигнализации. Имеется возможность представления всех измеряемых параметров цифровом и графическом виде, индикации даты, времени, состояния контролируемого объекта и датчиков, архивирование данных и распечатку протоколов о параметрах за заданное время.

Система автоматической вибродиагностики и комплексного мониторинга состояния оборудования «КОМПАКС» [88]; [89] производства Научно-Производственный Центр "Динамика", г. Омск является комплексом программно-аппаратных средств для обеспечения технологии ресурсосберегающей эксплуатации и ремонта механического оборудования. Она обеспечивает мониторинг состояния динамического оборудования по параметрам вибрации. Система состоит из модулей: «Монитор» (отображение информации о состоянии оборудования.), «Тренд» (просмотр трендов измеренных параметров), «Анализ» (выявление причины отказов), «Журнал» (автоматизация документирования и планирования ремонтных работ, автоматического ведения и подсчета наработки агрегатов, расчета ресурсов узлов между ремонтами, формирования планов ТОиР оборудования), «Система» (мониторинг и диагностика состояния измерительной аппаратуры системы КОМПАКС), «Осциллограф» (автоматизация процедур метрологической поверки системы), «Экспертная Система». В результате работы встроенной экспертной системы выводится речевое и текстового сообщения при изменении параметров оборудования.

Система мониторинга, защиты и диагностики ПК RecipCOM компании HOERBIGER разработана специально для данного типа ДО. Как отмечается в [90], ранее многие владельцы применяли решения по мониторингу, разработанные изначально для ротационного оборудования. Однако эффективность таких систем для поршневых компрессоров недостаточна. Данная система производит анализ быстро изменяющихся данных работы поршневой машины (положение штока, вибрация и т.д.). Отслеживание параметров работы компонентов ПК производится с помощью анализа графика давления в цилиндре и сигнатуры вибрации. Также имеется возможность измерения параметров, не изменяющихся в течении оборота коленчатого вала, таких как температура клапанов, давление в трубопроводе.

1.4 Инженерно-технологическая постановка задач исследования

Наличие конструктивных особенностей у ПКА в виде возвратно-поступательного движения поршня приводит к возникновению в трубопроводе пульсирующего потока газа с основной частотой пульсации, определяемой скоростью вращения вала машины, типом и количеством цилиндров, которые работают на общий трубопровод [91]. При появлении отклонений в работе ПКА, выражающихся в возникновении повышенной вибрационной наиболее сложной задачей является снижение возбуждающего вибрационного воздействия пульсаций рабочей среды, которому подвергаются трубопроводы и оборудование обвязки компрессора. Воздействие пульсации давления рабочей среды и вибрации в течение длительного периода времени приводит к накоплению усталостных повреждений в металле буферных емкостей, увеличивает вероятность их внезапных отказов и разрушений по причине усталостного растрескивания [23]. При этом установка дополнительных опор с целью устранения вибрации трубопровода дает лишь кратковременный эффект по причине того, что пульсирующий поток газа в системе сохраняется [65]. Снижение вибрации в трубопроводе обвязки ПК производится путем уменьшения или снятия возмущающих воздействий. В первую очередь, необходимо устранить резонансные колебания пульсирующего потока и произвести отстройку от возможного совпадения резонансов потока и механической системы [96], так как колебания подобной природы могут приводить к изменению производительности, вызывать перепад мощности, увеличивать нагрузку на ЦПГ и кривошипно-шатунный механизм ПК [65]. Расчет собственных механических частот колебаний трубопроводов обвязки решается в специализированных программных продуктах, например «Астра-Нова» (РФ), Ansys (США) [92], [93]. На

практике применяются следующие способы отстройки системы «поршневой компрессор-обвязка» от резонансных колебаний рабочей среды:

1. *Изменение значений длин и диаметров различных участков системы трубопроводов.* Способ применим, если изменения геометрических параметров участков допускаются компоновкой трубопроводной системы;

2. *Установка диафрагм.* Диафрагмы рассеивают энергию колебаний рабочей среды и изменяют ее амплитудно-частотный спектр в трубопроводной системе;

3. *Установка буферных емкостей.* Способ позволяет уменьшить амплитуды пульсации давления рабочей среды, так как происходит рассеивание энергии, затрачиваемой на возбуждение массы газа в объеме буферной емкости. Максимально эффективное гашение колебаний рабочей среды достигается при установке буферной емкости у источника возбуждения колебаний (цилиндра ПК). На несколько цилиндров одной ступени ПК возможно установить одну общую емкость. К недостаткам данного метода относится то, что поток в трубопроводе сглаживается только за емкостью [94], а ее установка в компрессорах с большим числом ступеней может быть ограничена возможностью компоновки и наличием свободного пространства [95]

4. *Установка акустических фильтров.* Применяется, когда необходимо значительное снижение колебаний, а требующиеся для этого габаритные размеры буферной емкости не удовлетворяют условиям компоновки трубопроводной системы. Акустический фильтр характеризуется четким дискретным спектром полос пропускания и гашения частот колебаний газа.

5. *Изменение температуры и давления нагнетания компрессора.* Применяется при наличии возможности со стороны технологии работы компрессорной машины. Изменение данных параметров влияет на значения плотности продукта и скорости звука, которые изменяют частотный спектр системы.

6. *Интерференционный способ гашения пульсаций.* Способ эффективен в узкой полосе частот колебаний и предусматривает применение специальных ответвлений, петель, длина которых подбирается равной нечетному числу полуволн.

7. *Сочетание в одной трубопроводной системе различных способов гашения пульсаций.* Примером может служить установка диафрагм на входе в емкость (или на выходе из емкости), что дает возможность уменьшения примерно на 30% габаритных размеров емкости по сравнению с емкостью, не сопровождавшейся установкой диафрагмы

[96]. При этом потери давления при установке диафрагмы меньше потерь при резонансных колебаниях.

В целом, проведение процесса отстройки от резонансных колебаний, снижения колебаний давления рабочей среды, представляет собой последовательность итеративных изменений, вносимых в конструкцию трубопроводной системы.

Наиболее распространёнными из указанных выше способов снижения вибрационного воздействия потока являются установка буферных ёмкостей и монтаж дроссельных диафрагм [97]. На практике расчёт ёмкостей и диафрагм производится преимущественно вручную по специальным методикам, является достаточно трудоёмким, требует высокой квалификации исполнителя. Анализ методик и рекомендаций расчёта буферных ёмкостей и диафрагм [98]; [СА 03-003–07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. М.: 2007]; [99]; [91]; [100] показал, что для решения актуальной задачи автоматизированного определения их конструктивных характеристик требуется предварительно рассчитать следующие параметры:

- число одновременно совершаемых подач рабочей среды в ступень ПКА;
- количество подач рабочей среды в ступень ПКА за один оборот коленчатого вала (КВ);
- частоты пульсаций рабочей среды;
- показатель адиабаты рабочей среды;
- отношение времени всасывания или нагнетания ко времени одного оборота КВ.

К дополнительным задачам можно отнести разработку:

- модели представления знаний о поршневом компрессорном агрегате и рабочей среды;
- аппроксимационной модели номограмм, с помощью которых осуществляется графическое определение характеристик буферных ёмкостей;
- алгоритма расчёта объёма буферных ёмкостей и диаметра отверстия дроссельных диафрагм.

Также актуальными задачами ИЛП ПКА являются:

- выявление в массивах частот вибрации резонансных пульсационных частот;

– определение временного периода работы поршневого компрессорного агрегата до достижения элементами его конструкции предельных величин вибрации или геометрических параметров.

Автоматизация расчёта объёма буферных ёмкостей и диаметра отверстия диафрагм, позволит снизить время их расчёта на этапе проектирования, и создаст возможность осуществлять их оперативную экспертную оценку на этапе эксплуатации. Все это совместно с автоматизацией прогнозирования уровня вибрации элементов ПКА по результатам вибродиагностики приведёт к повышению качества ТОиР, а следовательно – к повышению эффективности и безопасности работы всего предприятия. На практике расчёт указанных выше ёмкостей и диафрагм является достаточно трудоёмким процессом и требует высокой квалификации исполнителя. Как показывает опыт, не все проектные и экспертные организации обладают специалистами, способными оперативно выполнить эти расчёты. Моделей, алгоритмов и программ, позволяющих выполнять комплексный автоматизированный расчёт буферных ёмкостей и сглаживающих диафрагм, в процессе анализа научно-технической литературы и программных систем выявлено не было.

1.5 Выводы

Представлен системный анализ процесса технического обслуживания и ремонта поршневого компрессорного агрегата по схеме ППР. Установлено, что в процессе эксплуатации и проведения ТО требуется выполнение значительного объема операций разной степени сложности и объема; необходимо обрабатывать в параллельном режиме значительное количество технической документации. Показано, что результирующим показателем работоспособности ПКА является уровень вибрации элементов его конструкции и рассмотрены причины повышенной вибрации элементов ПКА.

Приведены результаты анализа и обзор исследований по интегрированной логистической поддержке динамических технических систем, который показал, что:

– Вопросам теории и актуальности ИЛП технических объектов и систем посвящены работы отечественных учёных: член-корр. РАН, проф., д.т.н. Мешалкина В.П.; д.т.н., профессоров Бром А.Е., Колобова А.А., Омельченко И.Н., Левина А.И., Камаева В.А., Сеницына И.Н., Шаламова А.С., Ковшова А.Н., а также зарубежных ученых Martin P., Kolesár J., Pretorius P.J., Elena Nenni M.;

– Среди исследований, посвящённых вопросам ТО и надёжности элементов ПКА и аналогичных конструкционно-технологических систем, можно выделить работы учёных: д.т.н., проф. Костюкова В.Н.; кандидатов наук Науменко А.П., Белого А.А., Королькова М.В., Гринчара Н.Г., Костюкова А.В. Вопросы ММ машин объёмного действия рассматриваются учеными: д.т.н., проф. Юша В.Л., Кабакова А.Н., Васильева В.К.; кандидатов наук Котлова А.А., Бусарова С.С.;

– Значительный вклад в совершенствование компрессорных поршневых машин с использованием методов математического моделирования в России внесли: Штейнгарт Л.А., Фотин Б.С., Пластинин П.И., Твалчрелидзе А.К., Прилуцкий И.К., Пирумов И.Б., Хрусталева Б.С..

Указанными учеными рассмотрены основы методологии и проблемы компьютеризации ИЛП различных технических и химико-технологических систем, систем топливно-энергетического комплекса, авиационной и морской техники, систем вооружения, а также вопросы организации ТОиР, повышения надёжности, логистики ресурсосбережения. Публикаций, посвящённых решению задач компьютеризации ИЛП поршневых компрессорных агрегатов, автором не обнаружено.

В процессе анализа научно-технической литературы, посвященной исследованиям в области ИЛП динамических технических систем, не выявлено математических моделей и алгоритмов, позволяющих комплексно решать следующие актуальные задачи ИЛП технического обслуживания и ремонта ПКА: расчёт объёма гасящих энергию пульсаций давления рабочей среды буферных ёмкостей; расчёт диаметра отверстия рассеивающих энергию потока дроссельных диафрагм; поиск измеренных частот колебаний элементов конструкции ПКА, совпадающих с частотой пульсаций рабочей среды; прогнозирование по результатам вибродиагностики даты достижения элементами ПКА недопустимого уровня вибрации.

Представлена краткая характеристика современных комплексов программ отечественного и зарубежного производства для интегрированной логистической поддержки динамических технических систем (интегрированная информационная система инженерно-технологического обеспечения предприятия; комплексные программы и автоматизированные системы для ТОиР и его управления; системы для работы с данными на этапе эксплуатации; САД-системы; пакеты программ для осуществления

вибромониторинга, защиты и диагностики). Анализ функциональных возможностей комплексов программ, показал, что:

1. имеющиеся комплексы программ позволяют решать только ограниченный круг задач интегрированной логистической поддержки процесса технического обслуживания и ремонта поршневых компрессорных агрегатов (не реализуют важных функций инженерно-технологических расчёта таких параметров как: частоты пульсаций рабочей среды; оптимальный объём буферных ёмкостей; оптимальный диаметр отверстий дроссельных диафрагм; прогнозирования остаточного ресурса по результатам вибродиагностики);

2. комплексы программ от организаций-разработчиков, расположенных за пределами Российской Федерации, характеризуются удалённостью разработчика от места использования; неполным учётом требований регламентов и стандартов РФ организации ТОиР и эксплуатации; высокой стоимостью адаптации; недостаточным учётом требований специалистов предприятий РФ на стадии их разработки;

3. большинство программных комплексов характеризуется отсутствием изначальной направленности, как по отношению к динамическому оборудованию, так и поршневым компрессорам;

4. внедряемые программные системы не имеют комплексной направленности на другие этапы жизненного цикла поршневого компрессорного оборудования, такие как проектирование и монтаж, они не позволяют производить операций по формированию необходимых отчетов и файлов, ведения паспортной документации;

5. имеется в наличии достаточное количество программных средств для контроля вибропараметров работы ротационного оборудования при одновременном наличии значительно меньшего количества аналогичных программ для поршневого ДО.

Представлена инженерно-технологическая постановка задач исследования, решение которых направлено на повышение виброустойчивости или устранение повышенной вибрации конструктивных элементов ПКА посредством разработки технических устройств гашения пульсаций рабочей среды. Показано, что автоматизация определения их конструктивных характеристик позволит снизить время их расчёта на этапе проектирования, и создаст возможность осуществлять их оперативную экспертную оценку на этапе эксплуатации. Все это совместно с автоматизацией прогнозирования остаточного ресурса по результатам вибродиагностики приведёт к повышению качества ТОиР ПКА,

эффективности и безопасности работы всего предприятия. В результате анализа научно-технической литературы и комплексов программ не были выявлены математические модели, алгоритмы и комплексы программ автоматизации или осуществления полной ИЛП технического обслуживания и ремонта поршневых компрессорных агрегатов. Публикаций, посвящённых решению задач компьютеризации ИЛП поршневых компрессорных агрегатов, автором не обнаружено.

На основании вышеизложенного научная задача разработки математическо-информационных моделей, алгоритмов и комплексов программ интегрированной логистической поддержки поршневых компрессорных агрегатов нефтехимических предприятий имеет актуальное значение для повышения эффективности и безопасности производств и предприятий НГХК.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ФРЕЙМОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

2.1 Общая фреймовая модель динамического оборудования

Моделирование является одним из наиболее распространенных способов изучения различных процессов явлений при построении модели интересующего объекта и изучения его свойств путем исследования модели. Этот процесс основан на использовании динамической аналогии, что означает наличие нетождественного подобия свойств и соотношений. В зависимости от способа реализации, модели можно разделить на два класса: физические и математические. [101], [102], [103]. Модели также можно разделить на следующие группы:

- мысленные (формируются в воображении человека в результате умозаключений),
- вербальные (мысленные модели, выраженные в разговорной форме),
- информационные (совокупность отобранной с некоторой целью информация об объекте, отражающую наиболее существенные с точки зрения исследования свойства объекта).

Любой модели ставятся общие условия, которые она должна соблюдать:

- адекватность (достаточно точное отображение свойств исходного объекта);
- полнота (предоставление необходимой информации об объекте);
- гибкость (воспроизведение различных ситуаций в некотором диапазоне изменения параметров объекта);

В большинстве случаев для проведения эффективных исследований необходимо строить новые модели, которые отвечают определенным требованиям [103]. В соответствии с задачами диссертационного исследования необходимо разработать модель поршневого компрессорного агрегата. На основе результатов изучения условий эксплуатации и технического обслуживания, проработки значительного количества паспортно-технической, нормативно-технической и эксплуатационной документации модели промышленных компрессорных агрегатов выдвигаются приведенные ниже требования по содержанию следующей информации:

- структуры нефтехимического предприятия;

- паспортно-технических данных и вспомогательного аппаратного оформления (электродвигатели, буферные ёмкости, трубопроводы обвязки и т.п.);
- данных по составу рабочей среды;
- данных по персоналу, ответственному за безопасную эксплуатацию и вспомогательного оборудования;
- результатов технических обследований, включая микрометрию и вибродиагностику;
- данных для выполнения расчётов по экспертизе промышленной безопасности (ЭПБ) и результаты этих расчётов;
- данных для формирования при эксплуатации и техническом обслуживании необходимых документов.

Модель поршневого компрессорного агрегата должна обладать следующими характеристиками:

- быть объектно-структурированной;
- иметь необходимые связи между элементами;
- отдавать приоритет функциям технического обслуживания на этапе эксплуатации;
- иметь достаточный для адекватной оценки технического состояния уровень детализации;
- вписываться в структуру модели используемого на нефтехимических предприятиях программного обеспечения для других типов оборудования, дополняя её и не дублируя существующие элементы;
- допускать развитие и добавление новых видов ДО по возможности без изменения существующей структуры.

Последняя характеристика модели обусловлена тем, что на предприятиях НХК ДО присутствует не только в виде ПК, поэтому при разработке модели учитывается возможность ее развития для использования по отношению к другим видам ДО, таким как насосы, вентиляторы и т.п.. При этом заложен потенциал для расширения области применения и решаемых задач.

В результате анализа научно-технической литературы и паспортно-технической документации установлено, что ДО в целом и ПКА в частности являются системами конструкционно-технологического типа, а описание его технологических и

конструкционных характеристик может быть представлено фреймами (ФР). ФР относятся к моделям структурно-лингвистического типа, представляют минимальное смысловое описание в словесной структурно-классификационной форме иерархических знаний о каком-либо стереотипном понятии (объект, субъект, операция, явление, состояние или событие) и используются для моделирования и переработки разнообразных знаний различных производственных объектов [104]. Применяемые при описании ФР обозначения вида $Q = \langle q_1, \dots, q_i, \dots, q_n \rangle$ являются их атрибутами, а обозначения $A = \langle a_{i,1}, \dots, a_{i,j}, \dots, a_{i,m} \rangle$ – их характеристиками, где $i = \overline{1, n}$ – номер атрибута, n – количество атрибутов фрейма, $j = \overline{1, m}$ – номер характеристики i -го атрибута, m – количество характеристик i -го атрибута). Характеристиками атрибутов фрейма могут быть определённые значения, методы и ссылки на другие фреймы. Лицо, принимающее решение имеет возможность дополнять или расширять знания об объекте при помощи внесения дополнительной информации в слот (незаполненное поле). Параметры фреймов наследуются по направлению «сверху вниз». Разработка общей ФР модели динамического оборудования производилась на основе источников [98], [96], [99], [105], [67], [106], [8], [107], [108], [109], [110], форм Технического паспорта центробежного насоса, Формуляра ремонта центробежного компрессора, Формуляр ремонта поршневого компрессора, Паспорта вентиляционной установки в соответствии с методикой, предложенной в работах чл.-корр. РАН, проф. Мешалкина В.П. и его учеников.

Общая фреймовая модель ДО создавалась в качестве расширения базовой модели оборудования и трубопроводов нефтехимического предприятия, использовавшейся при разработке автоматизированных систем «СИБУР-Трубопровод», «АСОД-Трубопровод» [108], [109], которые более пяти лет успешно эксплуатируются на ряде предприятий Западного Урала. Место ДО в структуре производственного нефтехимического предприятия отражено на рисунке 2.1.1, линия меньшей толщины обозначает элементы базовой модели автоматизированной системы, пунктирная линия – ссылочные связи. Линия большей толщины обозначает общую модель единицы динамического оборудования предприятия НХК.

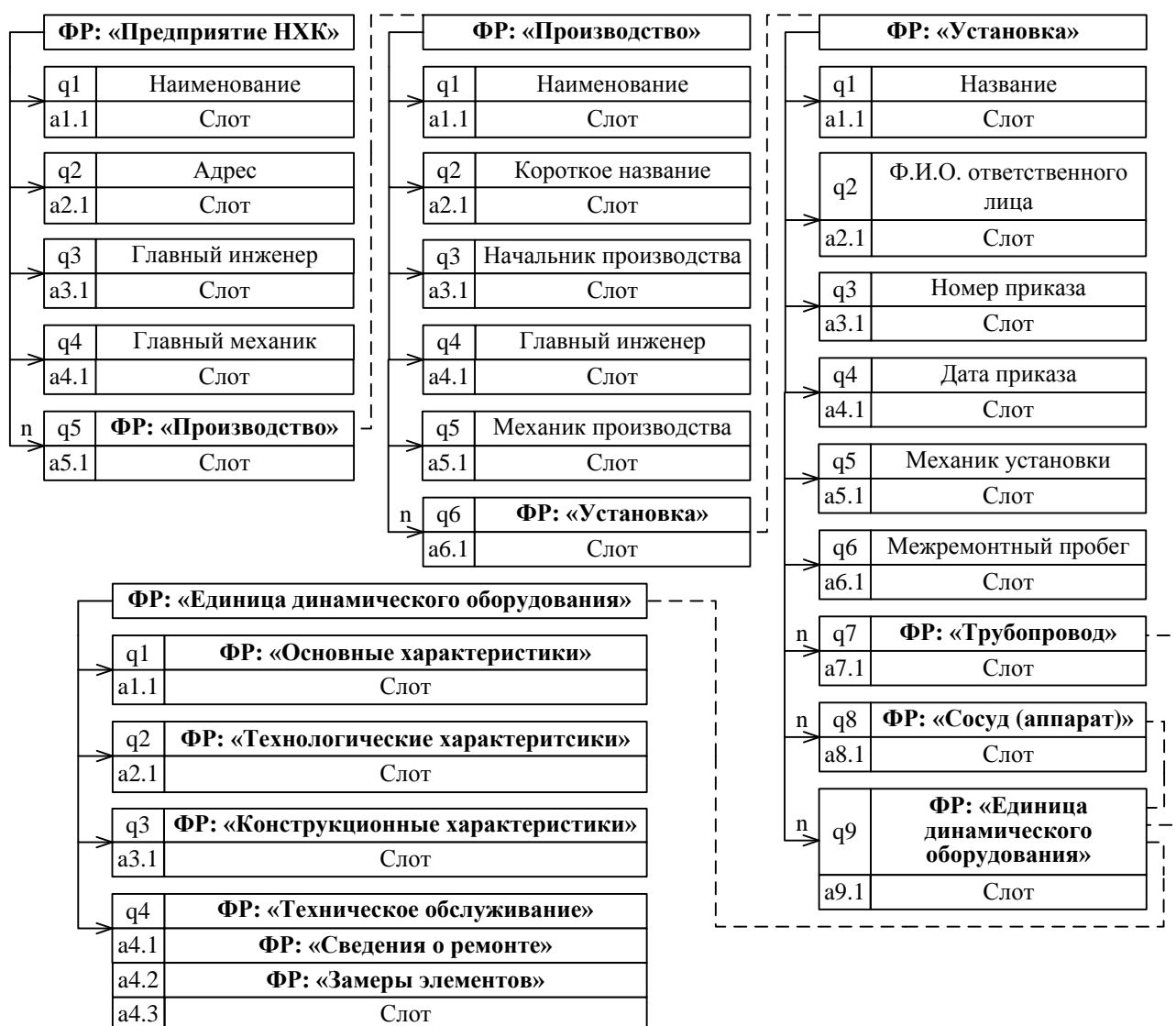


Рисунок 2.1.1 – Модель ДО в составе общей модели оборудования и трубопроводов предприятия НХК

Между динамическим оборудованием, трубопроводами и сосудах предусмотрены ассоциативные связи, благодаря которым обеспечивается логическая взаимосвязь оборудования, входящего в один компрессорный агрегат. Полный набор параметров ДО сведен в взаимосвязанную совокупность четырех информационных структур ФР, представленных на рисунке 2.1.1: «Основные характеристики», «Технологические характеристики», «Конструктивные характеристики», «Техническое обслуживание».

1. «Основные характеристики» – является общей для всех видов ДО и включает две группы характеристик «Изготовление и монтаж», «Габаритные размеры». Дальнейшее наполнение записи зависит от конструкции и назначения ДО;

2. «Технологические характеристики» – содержит четыре уровня иерархии («Поток», «Ступень», «Технологический режим», «Компонент среды»), необходимые для корректного описания встречающихся на практике условий работы ДО одновременно с несколькими средами при различных режимах (рисунок 2.2.2).

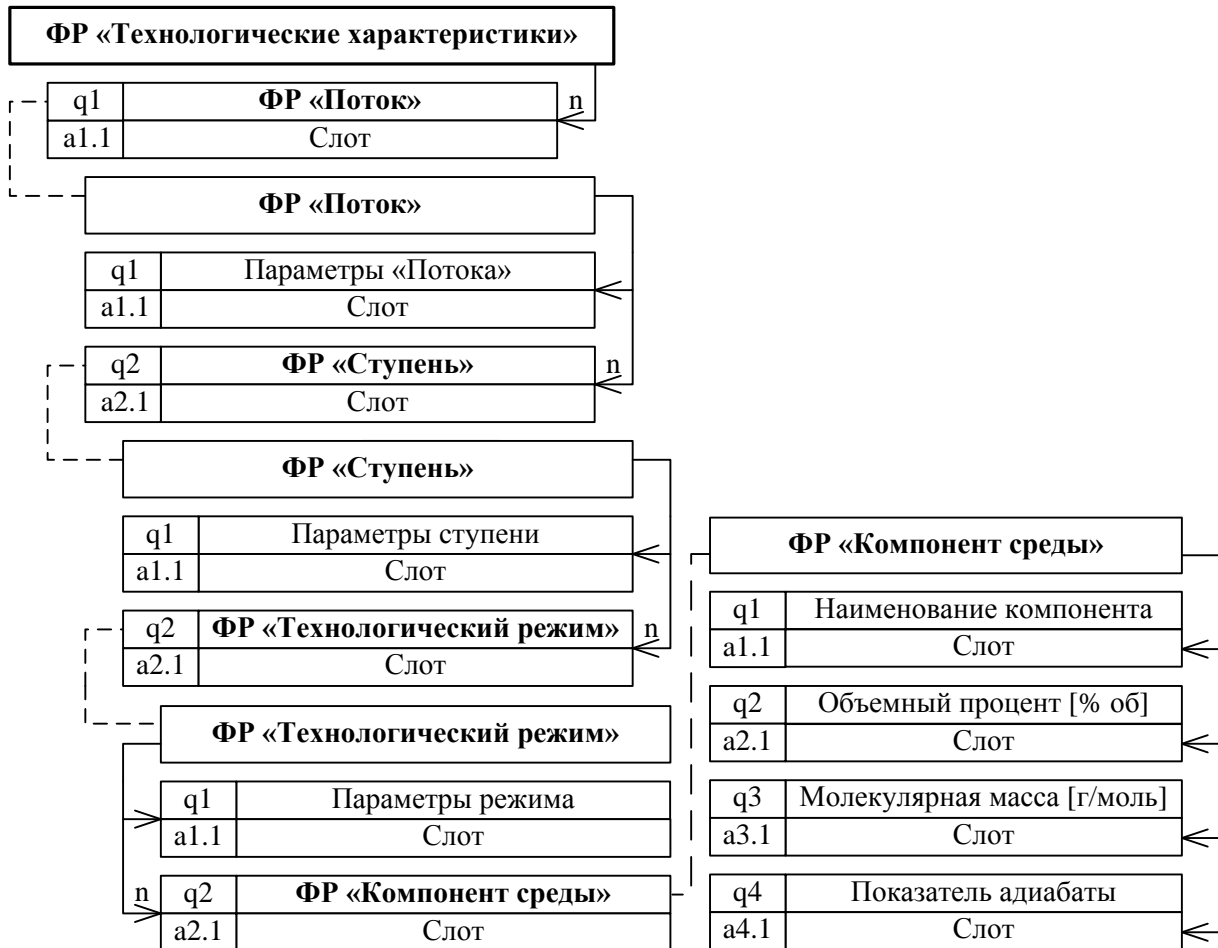


Рисунок 2.1.2 – ФР «Технологические характеристики»

Область ДО, функционирующая с одной рабочей средой, получила название «Поток». «Поток» предусматривает наличие от одной до нескольких рабочих ступеней (связь «Поток» – «Ступень» типа «1-n»). Каждая из ступеней может функционировать при нескольких различных технологических режимах работы динамического оборудования (связь «Ступень» – «Технологический режим» типа «1-n»), например: режим реакции, регенерации и т.п. В общем случае режимы могут различаться между собой параметрами и составом рабочей среды. Вещественный состав среды представлен блоком «Компонент среды». Связь «Технологический режим» – «Компонент рабочей среды» типа «1-n»

позволяет описывать многокомпонентную рабочую среду с указанием набора характеристик каждого компонента;

3. «Конструкционные характеристики» – является иерархической структурой, отражающей взаимосвязь и параметры конструктивных элементов ДО;

4. «Техническое обслуживание» – содержит записи о ремонтах и результаты периодических геометрических замеров элементов конструкции ДО.

Элементы единицы ДО, находящиеся в составе ФР «Конструктивные элементы», разделены на две группы:

1. элементы, общие для всего динамического оборудования: привод (электродвигатель/паровая турбина), шкив, редуктор, подшипник (качения/скольжения), уплотнение (лабиринтное/торцевое). На рисунках 2.1.3 – 2.1.7 приведены параметры указанных выше общих элементов;

2. элементы, уникальные для динамического оборудования, зависящие от функционального назначения и конструктивного исполнения. Например, элемент «Рабочее колесо» – общий для центробежного динамического оборудования, а коленчатый вал – для поршневого.



Рисунок 2.1.3 – ФР «Привод»

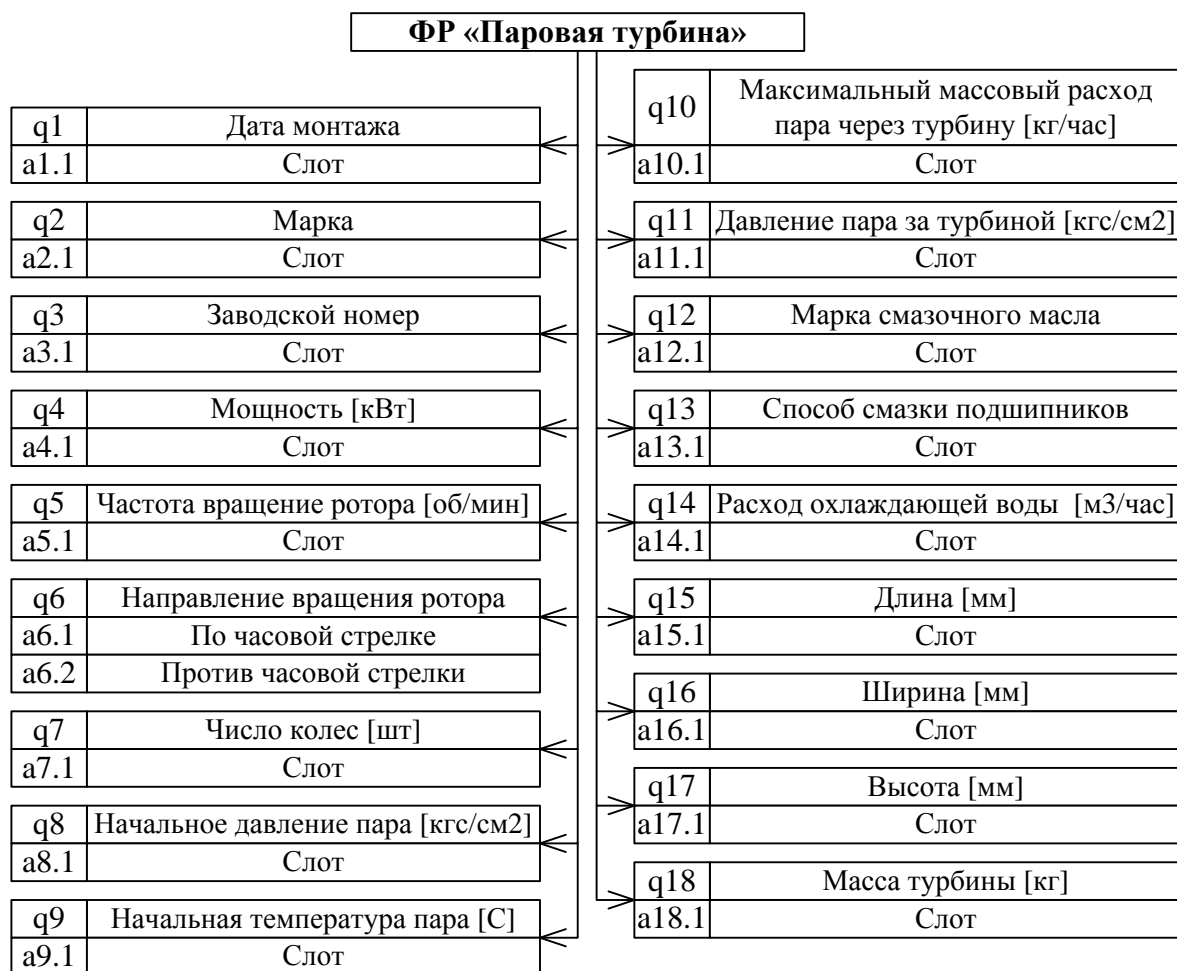


Рисунок 2.1.5 – ФР «Паровая турбина»

Элемент «Редуктор» (рисунок 2.2.5) связан с другими элементами более низкого уровня, такими как «Вал редуктора» и «Колесо редуктора», по связи типа «1-*n*». С помощью ввода параметров указанных элементов имеется возможность описания многоступенчатых редукторов.

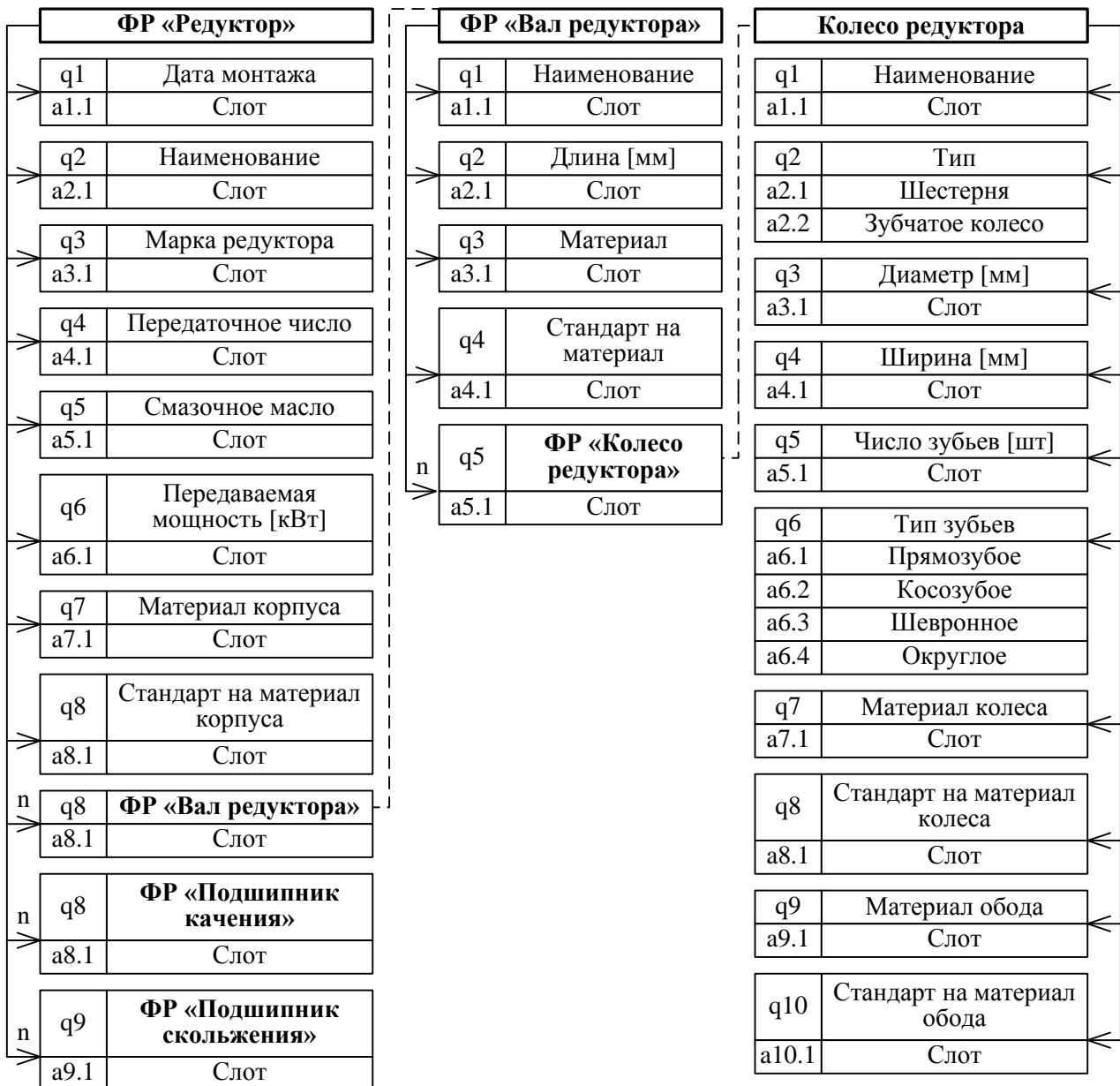


Рисунок 2.1.6 – ФР «Редуктор», ФР «Вал редуктора», ФР «Колесо редуктора»

«Тип подшипника» качения и скольжения (рисунок 2.1.7) может быть радиально-упорным, радиальным или упорным [111], [112]. Аналогичным типом может быть охарактеризован и подшипник качения, также он имеет параметр «Конструктивный тип», который может быть разъемным или целым.

ФР «Подшипник качения»		ФР «Подшипник скольжения»	
q1	Дата монтажа	q1	Дата монтажа
a1.1	Слот	a1.1	Слот
q2	Место расположения	q2	Место расположения
a2.1	Слот	a2.1	Слот
q3	Тип подшипника	q3	Тип подшипника
a3.1	Радиально-упорный	a3.1	Радиально-упорный
a3.2	Радиальный	a3.2	Радиальный
a3.3	Упорный	a3.3	Упорный
q4	Номер подшипника	q4	Конструктивный тип
a4.1	Слот	a4.1	Разъемный
		a4.2	Целый
q5	Диаметр внутренней обоймы [мм]	q5	Номер подшипника
a5.1	Слот	a5.1	Слот
q6	Диаметр внешней обоймы [мм]	q6	Внутренний диаметр [мм]
a6.1	Слот	a6.1	Слот
q7	Число тел качения [шт]	q7	Внешний диаметр [мм]
a7.1	Слот	a7.1	Слот
q8	Диаметр тел качения [мм]	q8	Материал заливки вкладышей
a8.1	Слот	a8.1	Слот
q9	Угол контакта [град]	q9	Стандарт на материал заливки
a9.1	Слот	a9.1	Слот
		q10	Чертеж на подшипник
		a10.1	Слот
		q11	Номер чертежа
		a11.1	Слот

Рисунок 2.1.7 – ФР «Подшипник качения», ФР «Подшипник скольжения»

ФР «Уплотнение»				
q1	Дата монтажа		q7	Материал гребней
a1.1	Слот		a7.1	Слот
q2	Номер ступени		q8	Стандарт на материал гребней
a2.1	Слот		a8.1	Слот
q3	Марка уплотнения		q9	Материал уплотнительных колец
a3.1	Слот		a9.1	Слот
q4	Место расположения		q10	Стандарт на материал уплотнительных колец
a4.1	После опорно-упорного подшипника		a10.1	Слот
a4.2	На колесе ступени		q11	Четех
a4.3	На валу после колеса ступени		a11.1	Слот
a4.4	На валу после колеса ступени		q12	Номер чертежа
a4.5	На правом диске		a12.1	Слот
a4.6	На думмисе			
q5	Номер уплотнения			
a5.1	Слот			
q6	Тип уплотнения			
a6.1	Торцевое			
a6.2	Лабиринтное			

Рисунок 2.1.8 – ФР «Уплотнение»

При дополнении общей модели соответствующими конструктивными элементами, будут получены модели соответственно центробежного насоса, центробежного компрессора, поршневого компрессора, вентиляционной установки, как наиболее распространенных видов ДО. Содержание указанного ФР будет определяться функциональным назначением и конструктивным исполнением конкретной единицы ДО.

2.2 Фреймовая модель декларативного представления знаний о поршневом компрессоре

В соответствии с целью диссертационной работы и поставленными в ее контексте задачами рассматривается частый случай общей ФР модели ДО – фреймовая модель декларативного представления знаний о поршневом компрессоре. Разработка фреймовой модели ПК производилась на основе анализа: паспортно-технической документации; записей о результатах диагностирования и ремонтов; научно-технической и производственно-технической литературы. В основе ФР модели находится формуляр ремонта ПК, так как он является документом, удостоверяющим гарантированные заводом-изготовителем основные параметры и техническую характеристику. В нем также

содержатся сведения об учете работы компрессора, техническом обслуживании, периодическом контроле основных параметров, изменении конструкции деталей в процессе эксплуатации и ремонта и т.п. [65]. Как часть общей ФР модели динамического оборудования, ФР модель ПК характеризуется следующим набором информационных структур:

1. «Основные характеристики» – включают в себя такие атрибуты как ФР «Паспортные данные», ФР «Изготовление и монтаж», ФР «Габаритные размеры» и ФР «Система смазки» (рисунок 2.2.1);

2. «Технологические характеристики» – каждый уровень иерархии данной структуры содержит свой набор атрибутов, характерный для ПК (рисунок 2.2.2);

3. «Конструкционные характеристики» (рисунок 2.2.3) – уникальные элементы ПК вместе с общими элементами ДО расположены на трех уровнях иерархии: на 1-ом находятся элементы: «Привод», «Редуктор», «Коленчатый вал», «Ряд»; на 2-ом – «Подшипник качения», «Подшипник скольжения» «Вал редуктора», «Коренная» и «Шатунная» шейки, «Шатун», «Болт шатуна», «Гайка болта шатуна», «Крейцкопф», «Палец крейцкопфа», «Корпус» и «Крышка» цилиндра, «Шток», «Клапан», «Палец поршня», «Поршень»; на 3-ем – «Колесо редуктора», «Подшипник качения», «Подшипник скольжения», «Сторона прямого хода» и «Сторона обратного хода» поршня, «Поршневое кольцо». Каждый из указанных элементов характеризуется своим набором атрибутов Структура ФР позволяет описывать ПКА различного конструктивного исполнения;

4. «Техническое обслуживание» (рисунок 2.2.4) – содержит характерные для ПК записи: «Карта замеров коленчатого вала по местам расположения подшипников», «Уклон вала от горизонтального положения», «Карты замеров» для таких элементов как: «Шатун», «Болт шатуна», «Поршень», «Поршневое кольцо», «Крейцкопф», «Палец крейцкопфа», «Цилиндр», «Шток», а также записи «Зазор между ротором и статором», «О проверках узлов и деталей и их ремонтах».

В целом, ФР модель поршневого компрессора содержит около 220 атрибутов. Полнота представления данных в указанных информационных структурах является достаточной для решения поставленных в диссертации задач.

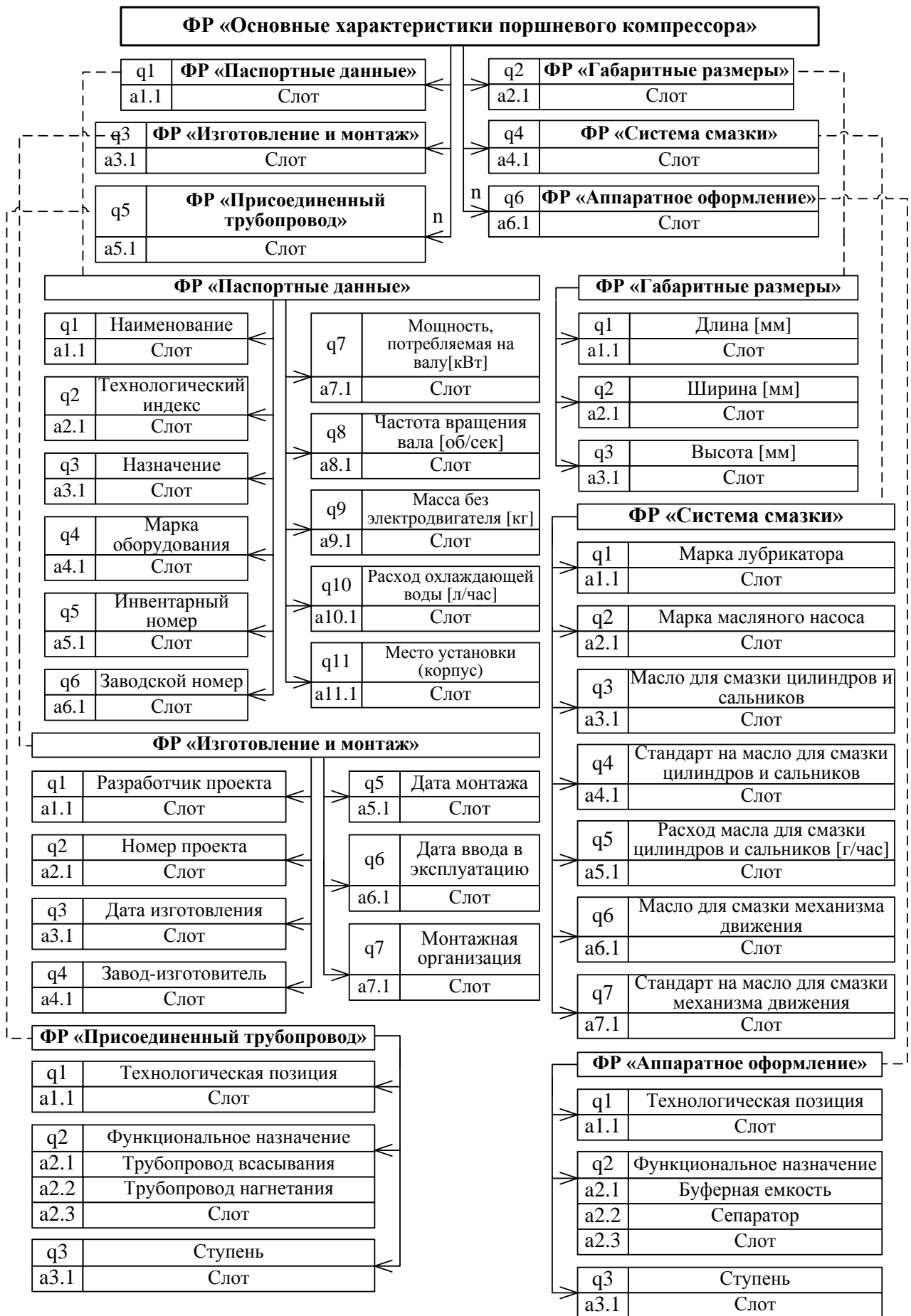


Рисунок 2.2.1 – ФР «Основные параметры» ПК

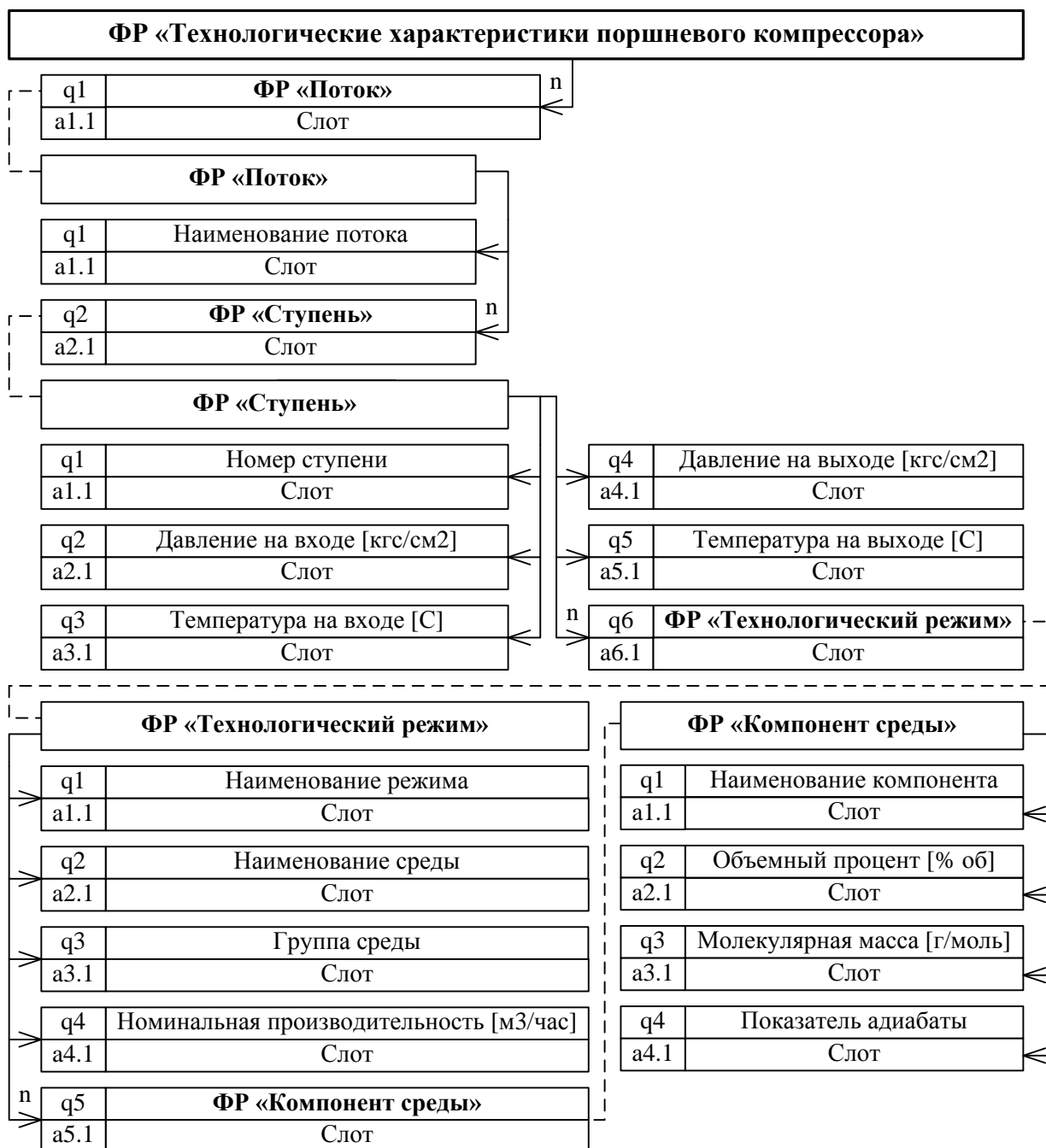


Рисунок 2.2.2 – ФР «Технологические параметры» ПК

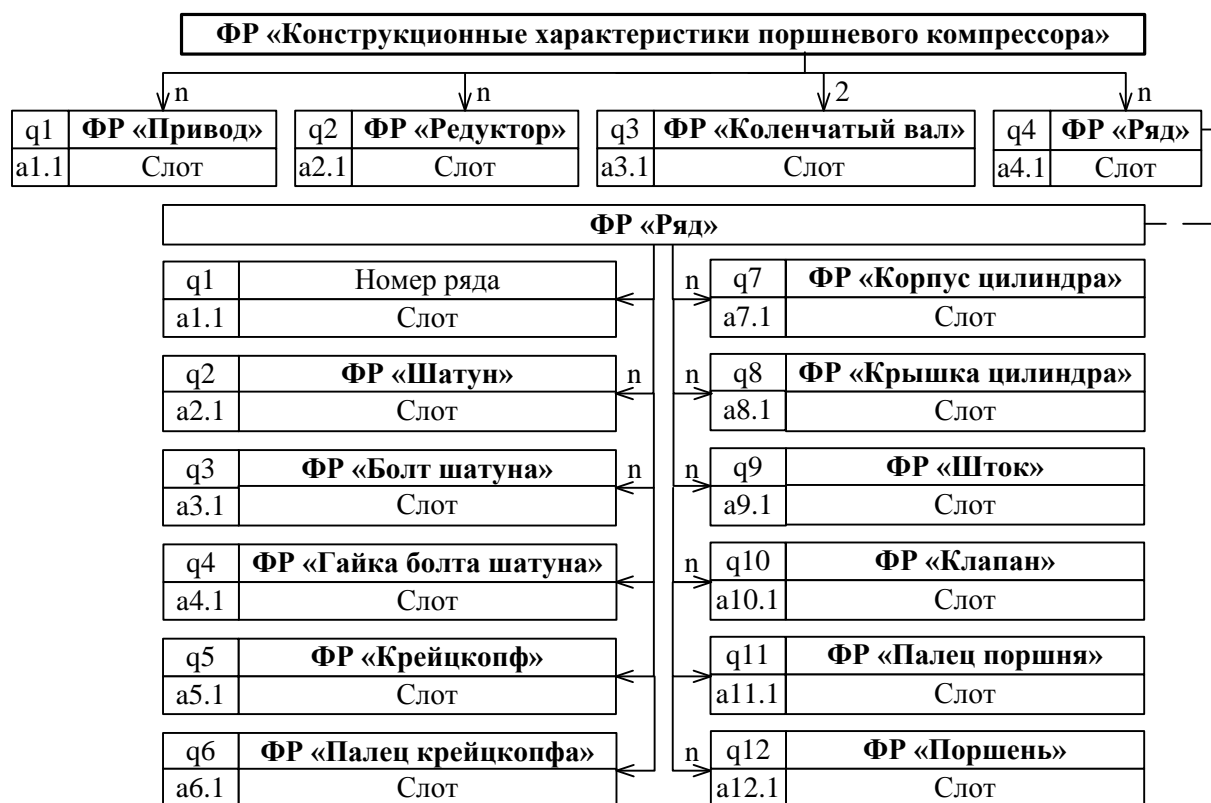


Рисунок 2.2.3 – ФР «Конструкционные характеристики» ПК

На первом уровне иерархии «Конструкционных характеристик поршневого компрессора» находятся элементы «Привод», «Редуктор», «Коленчатый вал» (рисунок 2.2.4), и отдельная выделенная совокупность деталей, имеющая название «Ряд» (характерный параметр – «Номер ряда»). Связь «Конструктивные характеристики поршневого компрессора»-«Коленчатый вал» типа «1-2» необходима для описания Н-образной базы компрессора [113]. Количество рядов определяется числом шатунов в поршневом агрегате [67].

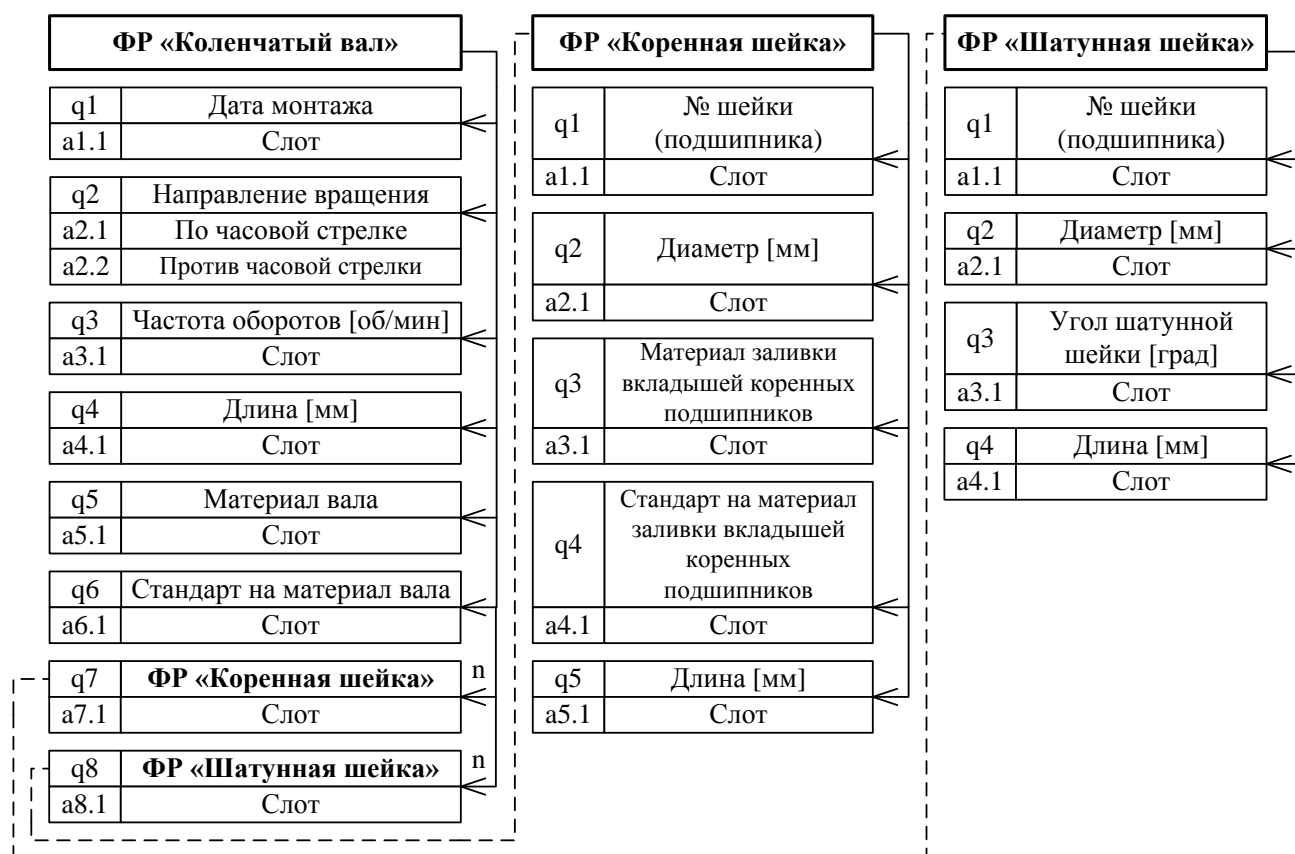


Рисунок 2.2.4 – ФР «Коленчатый вал», ФР «Коренная шейка», ФР «Шатунная шейка»

На втором уровне иерархии «Конструкционных характеристик поршневого компрессора» находятся параметры элементов конструкции ПК, образующих «Ряд» (рисунок 2.2.3): шатун, болт шатуна, гайка болта шатуна (рисунок 2.2.5), крейцкопф, палец крейцкопфа (рисунок 2.2.6), корпус цилиндра, крышка цилиндра (рисунок 2.2.7), шток, клапан (рисунок 2.2.8), палец поршня, поршень (рисунок 2.2.10), «Коренная» и «Шатунная» шейки коленчатого вала (рисунок 2.2.4). Все вышеуказанные элементы наследуют характеристику «Номер ряда», от соответствующего ряда, в котором они расположены.

В качестве «Положения» болта шатуна было принято: верхнее, нижнее или произвольная запись. «Способом стопорения» гайки болта шатуна может служить зубчатый венец гайки или гайка с закраиной.

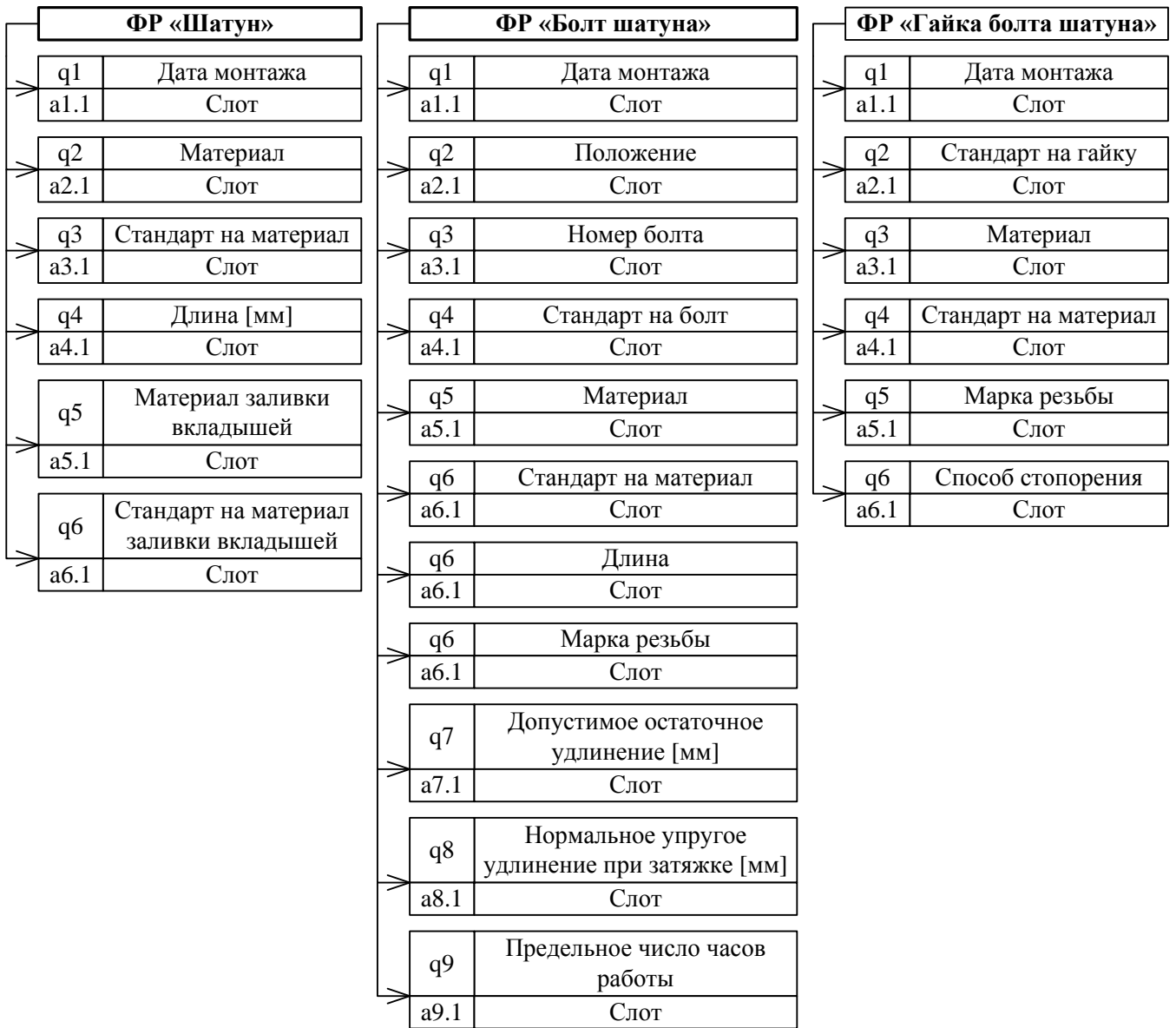


Рисунок 2.2.5 – ФР «Шатун», ФР «Болт шатуна», ФР «Гайка болта шатуна»



Рисунок 2.2.6 – ФР «Крейцкопф», ФР «Палец крейцкопфа»

Параметры элемента «Корпус цилиндра» приведены на рисунке 2.2.7. Присутствующий в данной записи параметр «Угол цилиндра» позволяет описывать различные конструкции поршневого компрессорного агрегата (оппозитный, V-образный, L-образный и т.п.). В качестве типа опоры цилиндра принято скользящая, качающаяся на роликах, качающаяся на сухарях, качающаяся на ножах, гибкая в форме трубы, гибкая в форме листа. Оребрение может выполнено в виде продольных или кольцевых ребер. При разработке структуры параметров элемента «Крышка цилиндра» (рисунок 2.2.7) были приняты следующие варианты исполнения крышки цилиндра: заодно с корпусом или отъемная крышка. Оребрение крышки рассматривалось как с применением продольных ребер, кольцевых ребер. Тип крышки характеризует ее как заднюю или переднюю.

ФР «Корпус цилиндра»		ФР «Крышка цилиндра»	
q1	Дата монтажа	q1	Дата монтажа
a1.1	Слот	a1.1	Слот
q2	Оребрение	q2	Тип
a2.1	Продольные ребра	a2.1	Передняя
a2.2	Кольцевые ребра	a2.2	Задняя
q3	Материал	q3	Оребрение
a3.1	Слот	a3.1	Продольные ребра
		a3.2	Кольцевые ребра
q4	Стандарт на материал	q4	Материал
a4.1	Слот	a4.1	Слот
q5	Диаметр цилиндра [мм]	q5	Стандарт на материал
a5.1	Слот	a5.1	Слот
q6	Относительная величина мертвого пространства [%]	q6	Исполнение
a6.1	Слот	a6.1	Заодно с корпусом
		a6.2	Отъемная крышка
q8	Тип опоры		
a8.1	Скользкая		
a8.2	Качающаяся на роликах		
a8.3	Качающаяся на сухарях		
a8.4	Качающаяся на ножах		
a8.5	Гибкая в форме трубы		
a8.6	Гибкая в форме листа		

Рисунок 2.2.7 – ФР «Корпус цилиндра», ФР «Крышка цилиндра»

Тип штока (рисунок 2.2.8) рассматривался как односторонний или сквозной. Конструктивно клапан может быть тарельчатым или пластинчатым.

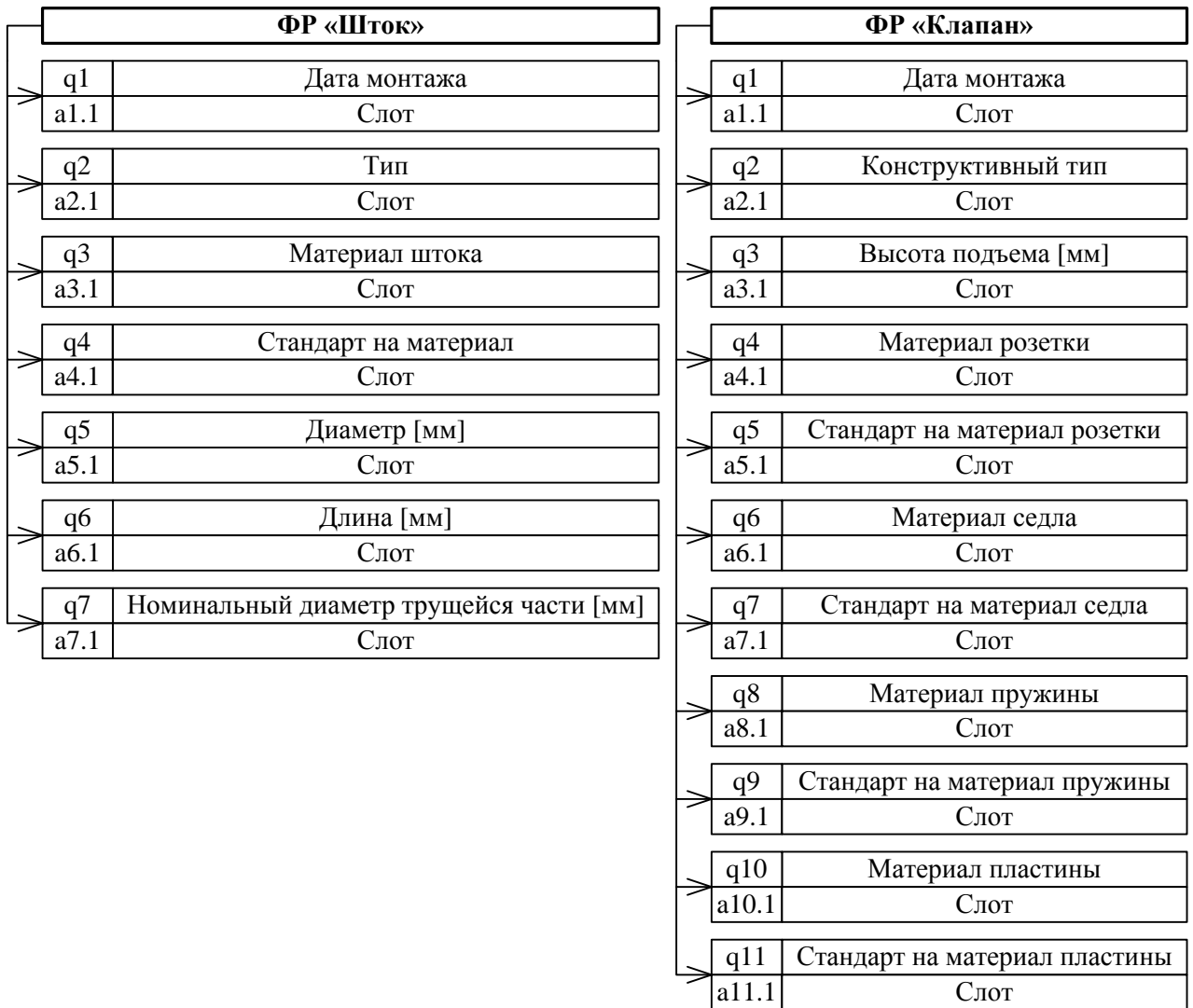


Рисунок 2.2.8 – ФР «Шток», ФР «Клапан»

При описании поршня (рисунок 2.2.10) были выделены элементы более низкого уровня, такие как «Сторона прямого хода», «Сторона обратного хода», которые расположены на **третьем уровне** иерархии. На данном уровне также находится элемент «Поршневое кольцо» (рисунок 2.2.10). Данный подход делает возможным описание поршней двойного действия (имеют две активные стороны рабочего хода) и дифференциальных поршней, участки которых описываются в виде отдельных поршней со своей высотой и своими активными сторонами прямого или обратного хода. Также данная структура позволяет описывать и комбинацию этих двух случаев, при которых у участков дифференциального поршня в работе принимают участие как сторона прямого, так и обратного хода. Так на рисунке 2.2.9 нагнетание в ступенях I и II обеспечивается, соответственно, при прямом и обратном ходе участка дифференциального поршня с наибольшим диаметром.

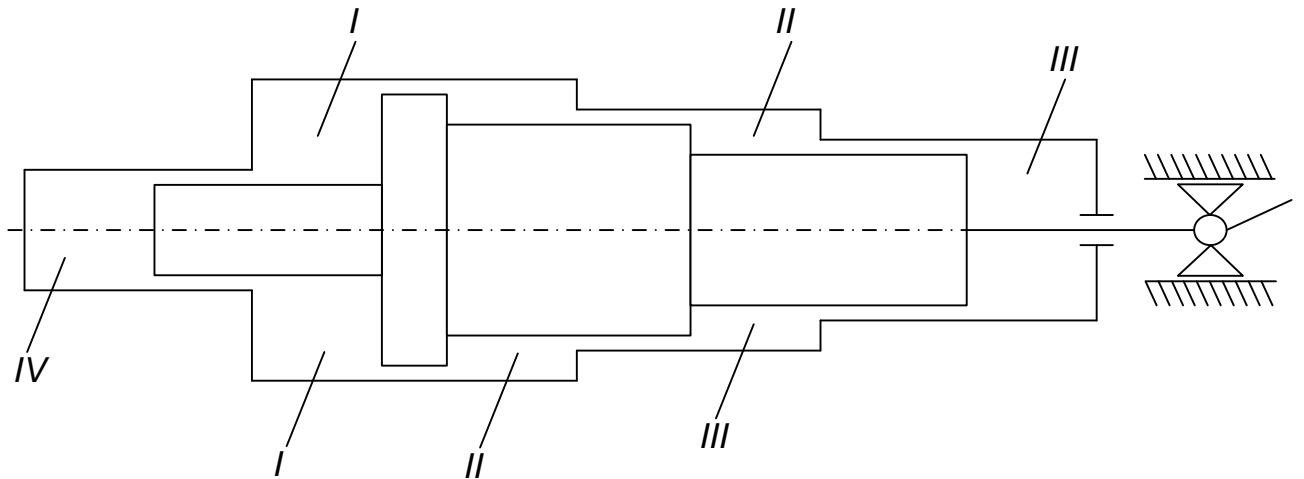


Рисунок 2.2.9 – Комбинация дифференциального поршня и поршня двойного действия

Связь «Технологических параметров» ПК (рисунок 2.2.2) и параметров элементов конструкции выражается в наличии атрибутов «Наименование потока» и «Номер ступени», принадлежащих элементам «Сторона прямого хода» и «Сторона обратного хода» (рисунок 2.2.10).

В качестве функционального назначения поршневого кольца рассматривались: уплотняющее и маслосъемное. Под типом замка понимается: прямой, косой 45°, косой 60°, внахлестку.

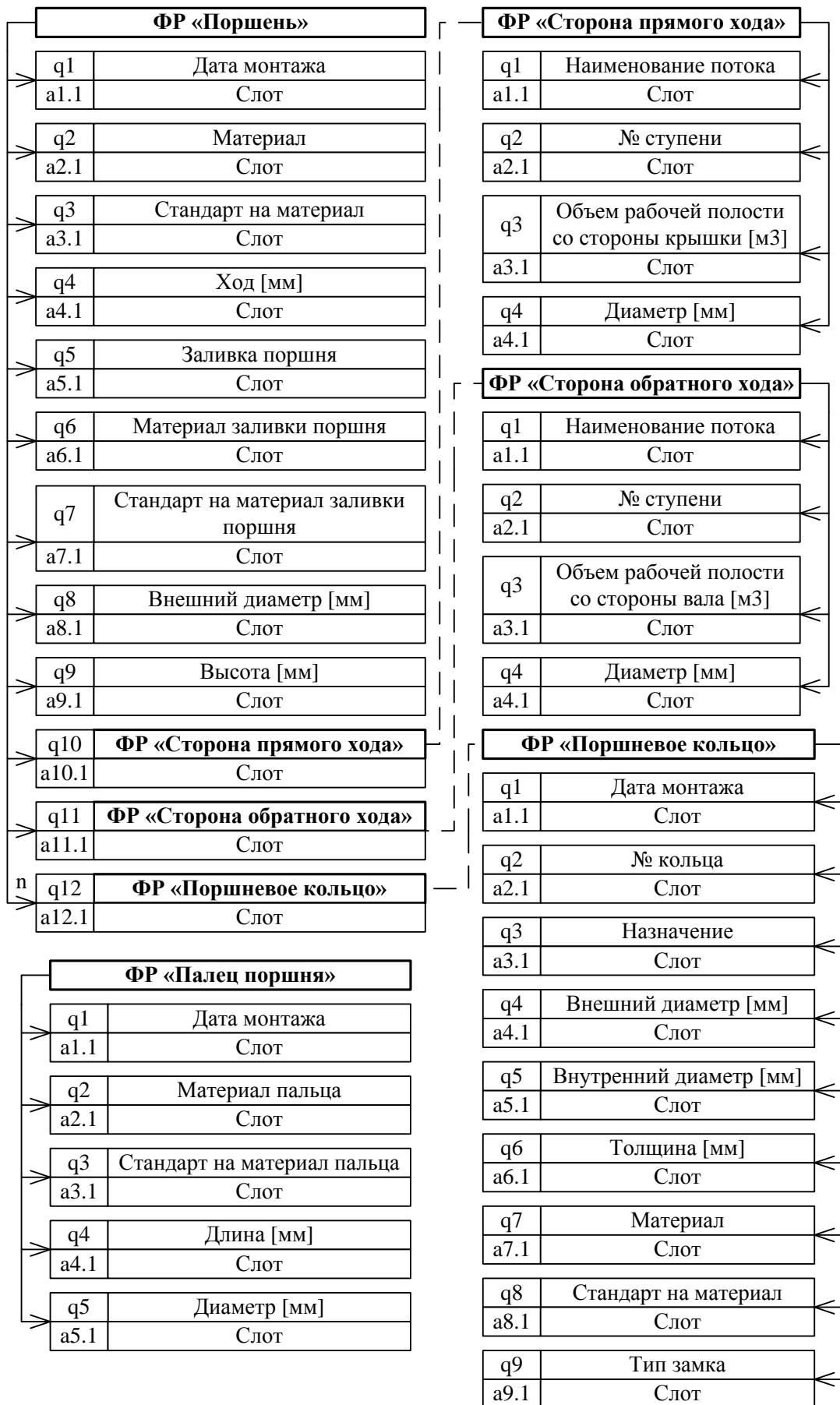


Рисунок 2.2.10 – ФР «Палец поршня», ФР «Поршень», ФР «Сторона прямого хода», ФР «Сторона обратного хода», ФР «Поршневое кольцо»

Содержание записи «Замеры элементов», применительно к поршневому компрессору, представлено на рисунке 2.2.11. Записи, включенные в структуру, содержат параметры, по которым осуществляется контроль соответствующих узлов и деталей ПК в процессе ремонта. Их состав приведен на рисунках 2.2.12 – 2.2.17.



Рисунок 2.2.11 – ФР «Замеры элементов поршневого компрессора»

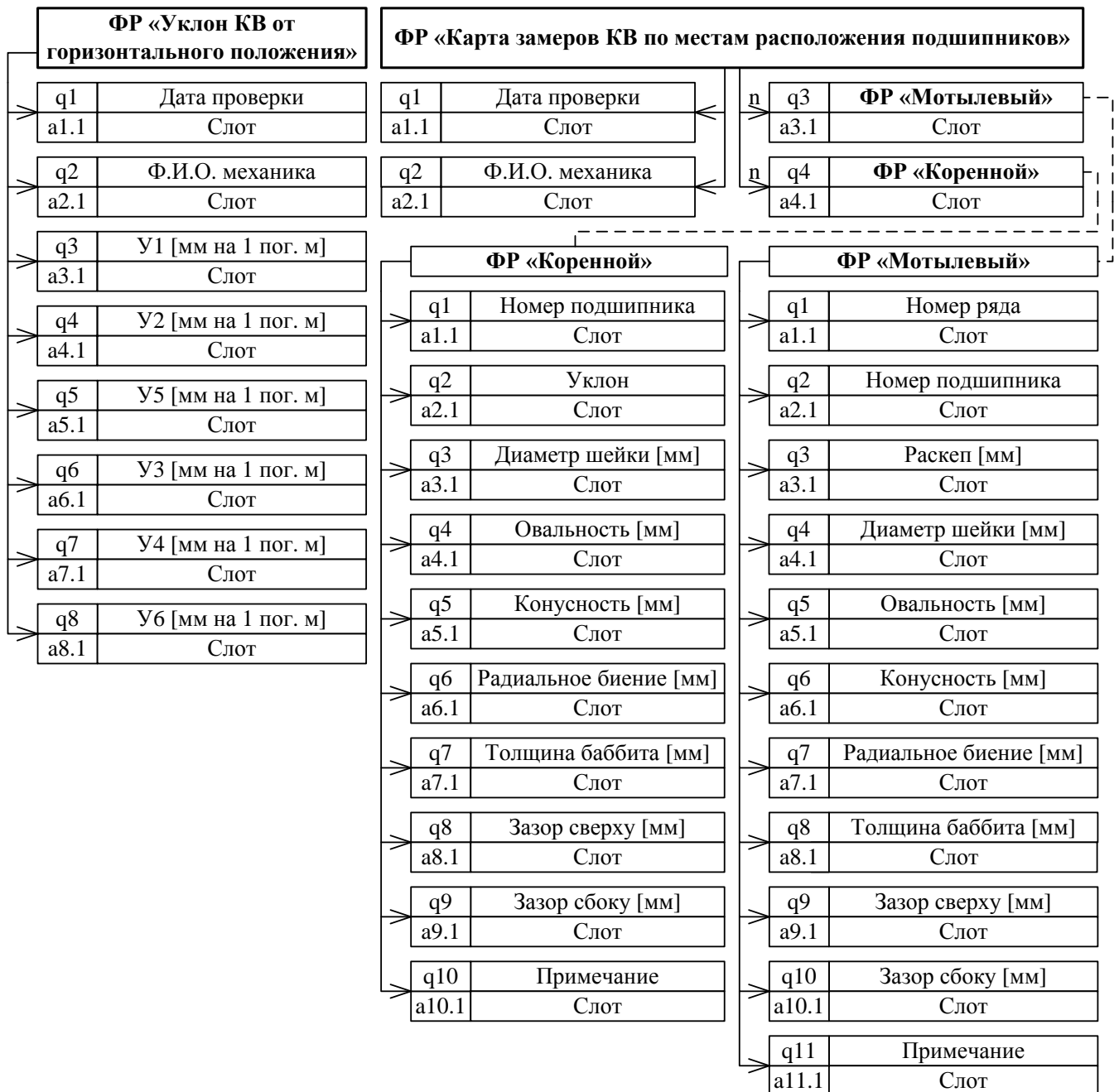


Рисунок 2.2.12 – ФР «Карта замеров общей геометрии KB», ФР «Карта замеров KB по местам расположения подшипников»

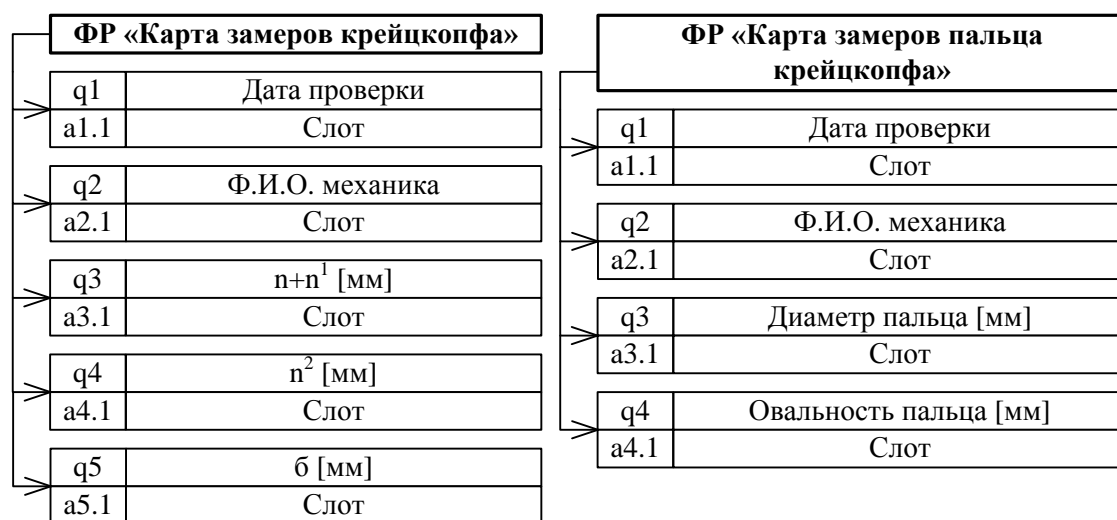


Рисунок 2.2.13 –ФР «Карта замеров крейцкопфа», ФР «Карта замеров пальца крейцкопфа»

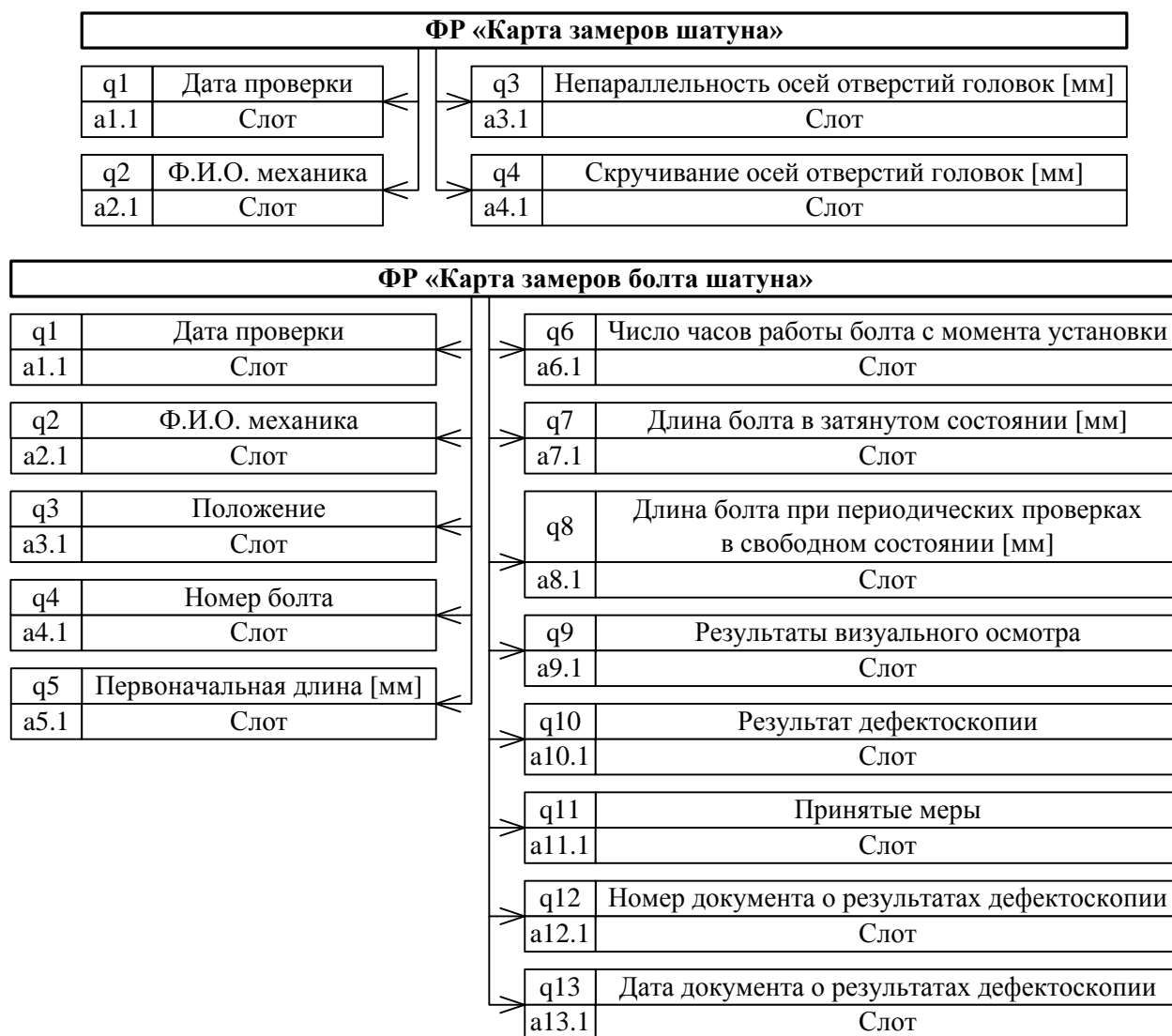


Рисунок 2.2.14 – ФР «Карта замеров шатуна», ФР «Карта замеров болта шатуна»

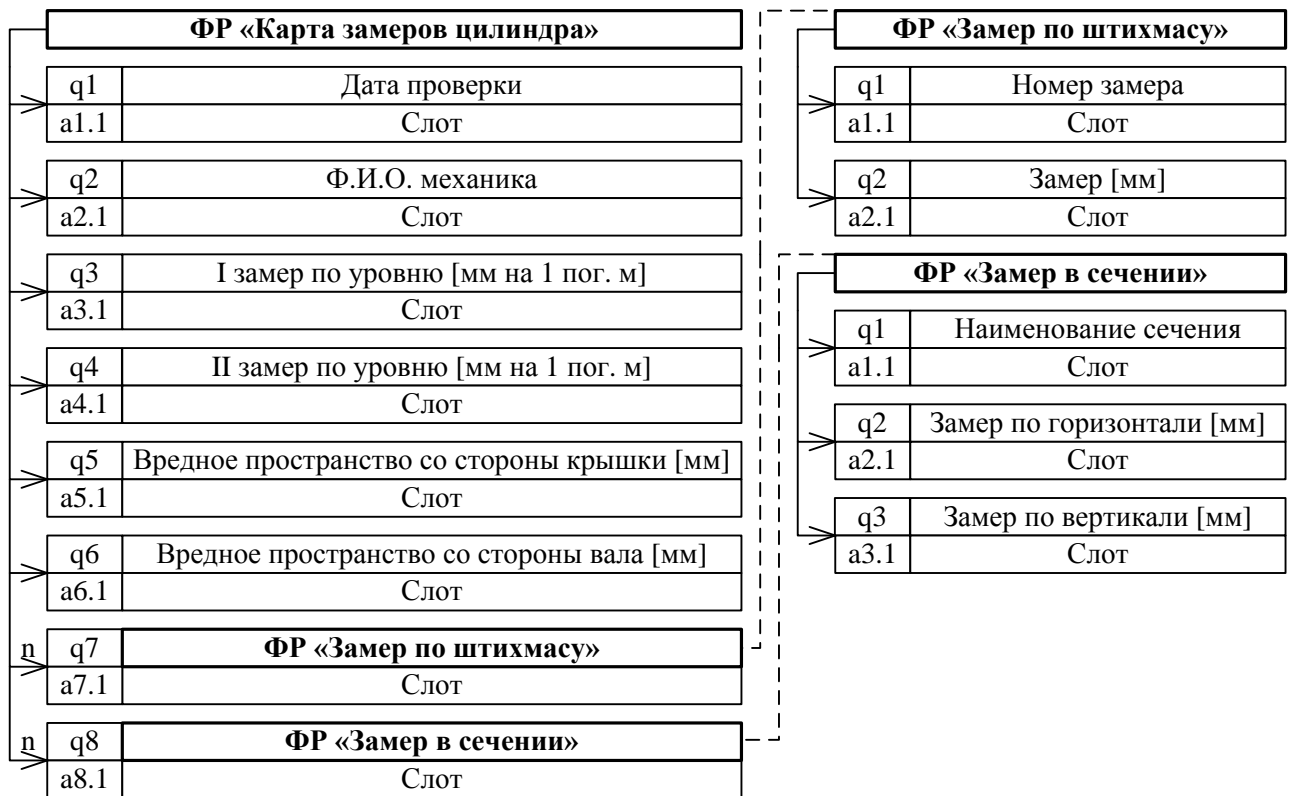


Рисунок 2.2.15 – ФР «Карта замеров цилиндра»



Рисунок 2.2.16 – ФР «Карта замеров поршня», ФР «Карта замеров поршневого кольца»

Запись «Зазор между статором и ротором» актуальна для случая использования в качестве привода ПК электродвигателя.

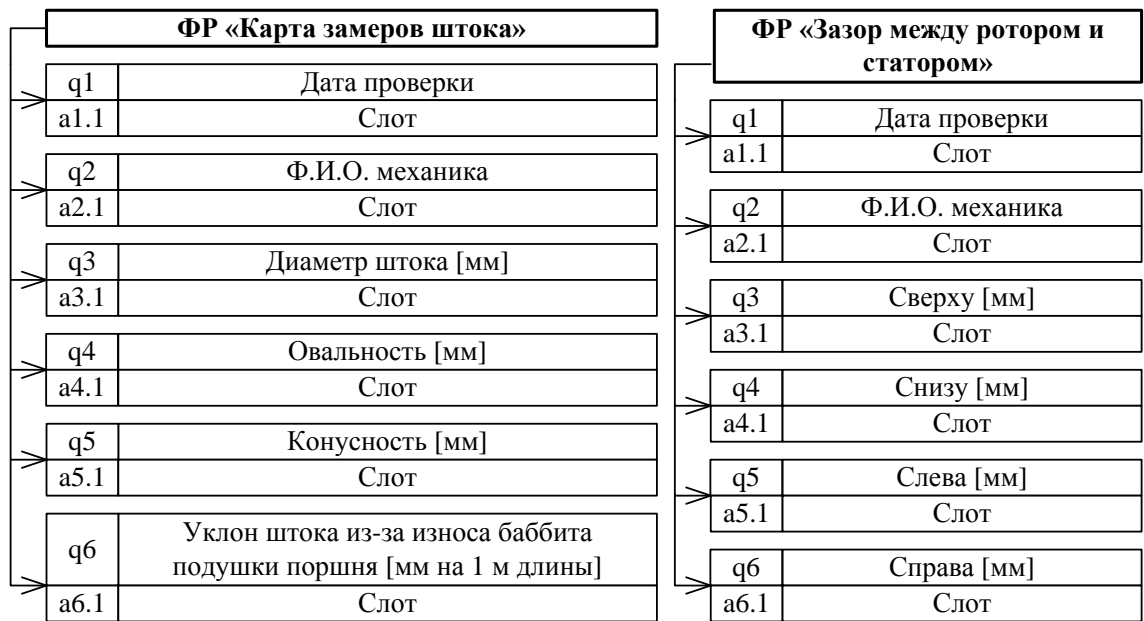


Рисунок 2.2.17 – ФР «Карта замеров штока», ФР «Зазор между статором и ротором»

Для поршневого компрессора в качестве «Записи о ремонте» вступает «Записи о проверках узлов и деталей и их ремонтов». Состав данной записи приведен на рисунке 2.2.18.



Рисунок 2.2.18 – ФР «Записей о проверках узлов и деталей поршневого компрессора и их ремонтов»

Структура отражает перечень произведенных работ, замененных при этом деталей, причины замены, исполнителей. В качестве «Вида ремонта» может выступать текущий, средний, капитальный или произвольная запись.

2.4 Выводы

Приведены требования, лежащие в основе разработки, которым удовлетворяет общая модель динамического оборудования и ее составная часть – модель декларативного представления знаний о поршневом компрессоре. Приводятся характеристики, которыми должны обладать разработанные модели. Производится обоснование разработки модели поршневого компрессора в составе общей модели для всех типов динамического оборудования, имеющихся на нефтехимическом предприятии.

В результате анализа научно-технической литературы и паспортно-технической документации установлено, что ДО в целом и ПКА в частности являются системами конструкционно-технологического типа, а описание его технологических и конструктивных характеристик может быть представлено фреймами.

Приводится совокупность записей общей фреймовой модели динамического оборудования: «Основные характеристики», «Технологические характеристики», «Конструкционные характеристики», «Техническое обслуживание». Раскрывается содержание записей фреймовой модели декларативного представления знаний о поршневом компрессоре как составной части общей модели. Приводится содержание иерархической структуры «Конструкционные характеристики поршневого компрессора», содержащей как общие для динамического оборудования, так и уникальные для поршневого компрессора элементы. Детализация и содержание модели для ПК достаточны для адекватности и полноты описания различных конструкций.

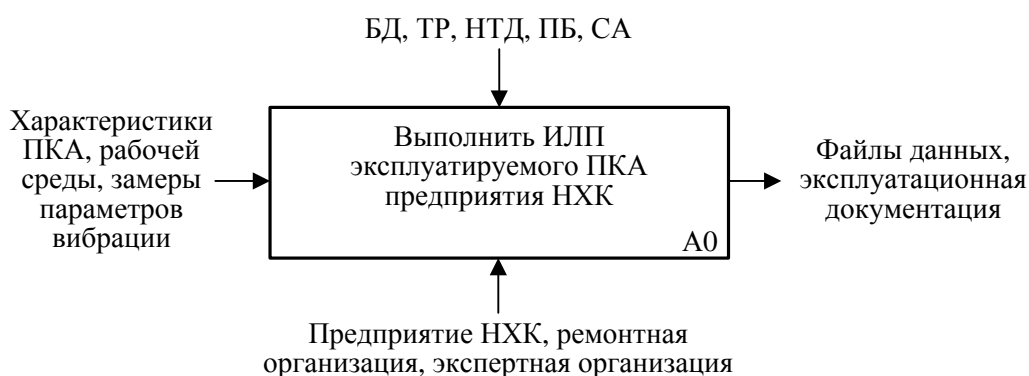
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКО-ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ

3.1 Логико-информационная метамодель интегрированной логистической поддержки эксплуатации поршневых компрессорных агрегатов

Разработанная обобщённая логико-информационная модель интегрированной логистической поддержки эксплуатируемого ПКА (рисунки 3.1.1-3.1.4) отличается учётом концепции ИИС и наличием системных взаимосвязей между процедурами вычисления промежуточных и выходных переменных ИЛП с помощью необходимых для этого моделей и алгоритмов, что позволяет с помощью единого программного комплекса автоматизировать решение поставленных в диссертационном исследовании актуальных задач: расчёт соответствующих требованиям НТД значений объёма буферной ёмкости и диаметра отверстия дроссельных диафрагм; поиск измеренных частот колебаний элементов конструкции ПКА, близких или совпадающих с частотами пульсаций рабочей среды; прогнозирование по результатам вибромониторинга даты достижения элементами ПКА недопустимого уровня вибрации. Для описания обобщённой модели использовалась методология структурного анализа и проектирования SADT (Structured Analysis & Design Technique) [114]. Методология SADT широко распространена при разработке сложных систем и рассматривается в стандартах семейства IDEF0, которые являются неотъемлемой частью CALS технологий и утверждены в качестве стандартов различных стран [115], [116], [117].

Разработка указанных в метамодели алгоритмов и моделей производилась с целью достижения оперативной экспертной оценки конструктивных характеристик аппаратного оформления ПКА, определения надёжности и оперативного анализа частотных характеристик на этапе эксплуатации ПКА, снижения затрат времени, повышение качества управления ТОиР. В процессе разработки алгоритмов и моделей ставилось условие достижения максимального количества автоматически рассчитываемых параметров для повышения скорости и качества выполнения расчёта. Функционирующая совместно с разработанными фреймовыми моделями декларативного представления знаний о ПК, аппроксимационными моделями номограмм и вычислительными алгоритмами, она позволяет полностью автоматизировать процесс определения

оптимального объема буферных ёмкостей, оптимального диаметра расточки диафрагм и частот пульсаций рабочей среды.



Цель: повышение качества ИЛП ПКА

Точка зрения: отдел главного механика предприятия

Рисунок 3.1.1 – А0: Контекстная диаграмма верхнего уровня,

где БД – база данных, ТР- технический регламент, НТД – нормативно-техническая документация, ПБ – правила безопасности, СА – стандарт ассоциации

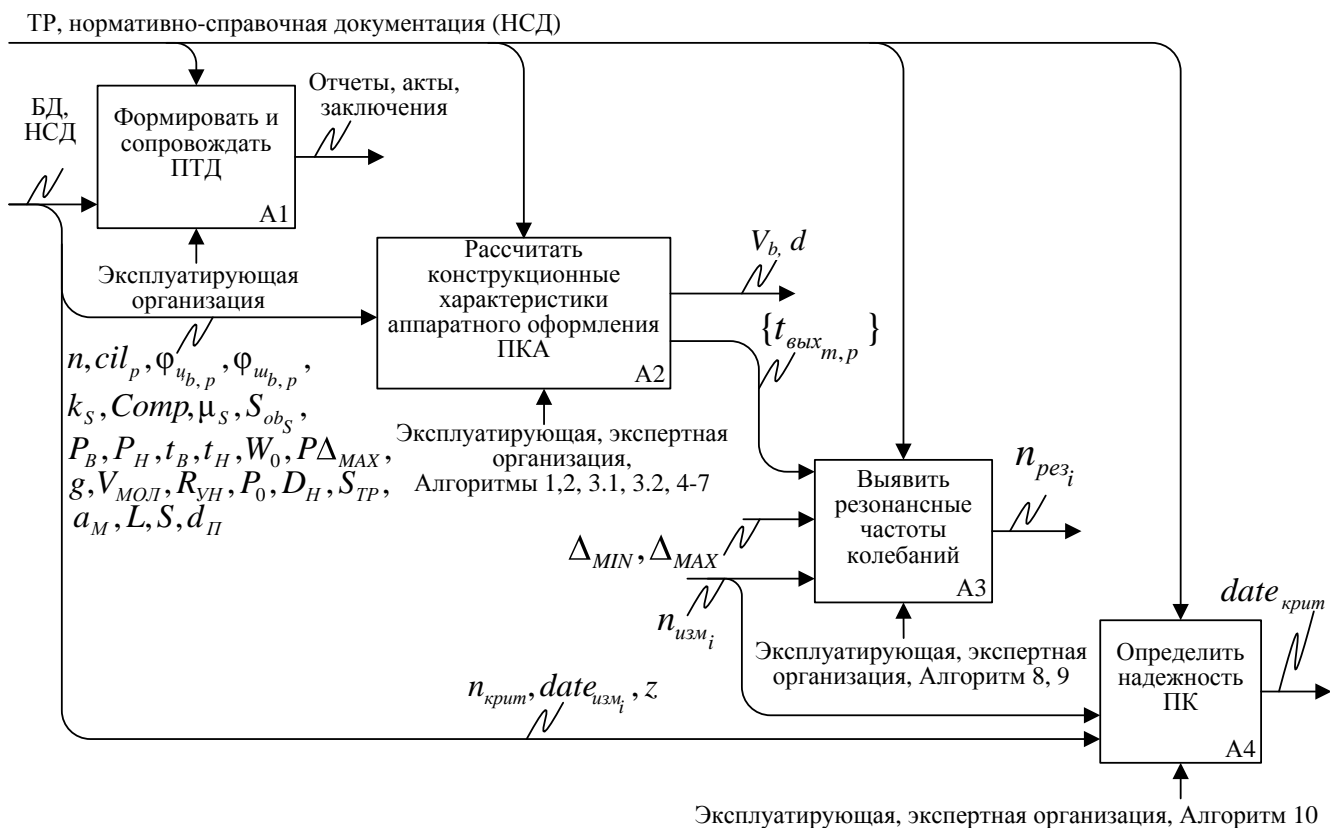


Рисунок 3.1.2 – Блок-схема логико-информационной метамодели интегрированной логистической поддержки эксплуатации поршневых компрессорных агрегатов

Декомпозиция блока А2 задаёт последовательность выполнения вычислительных процедур и распределения между ними информационных переменных.

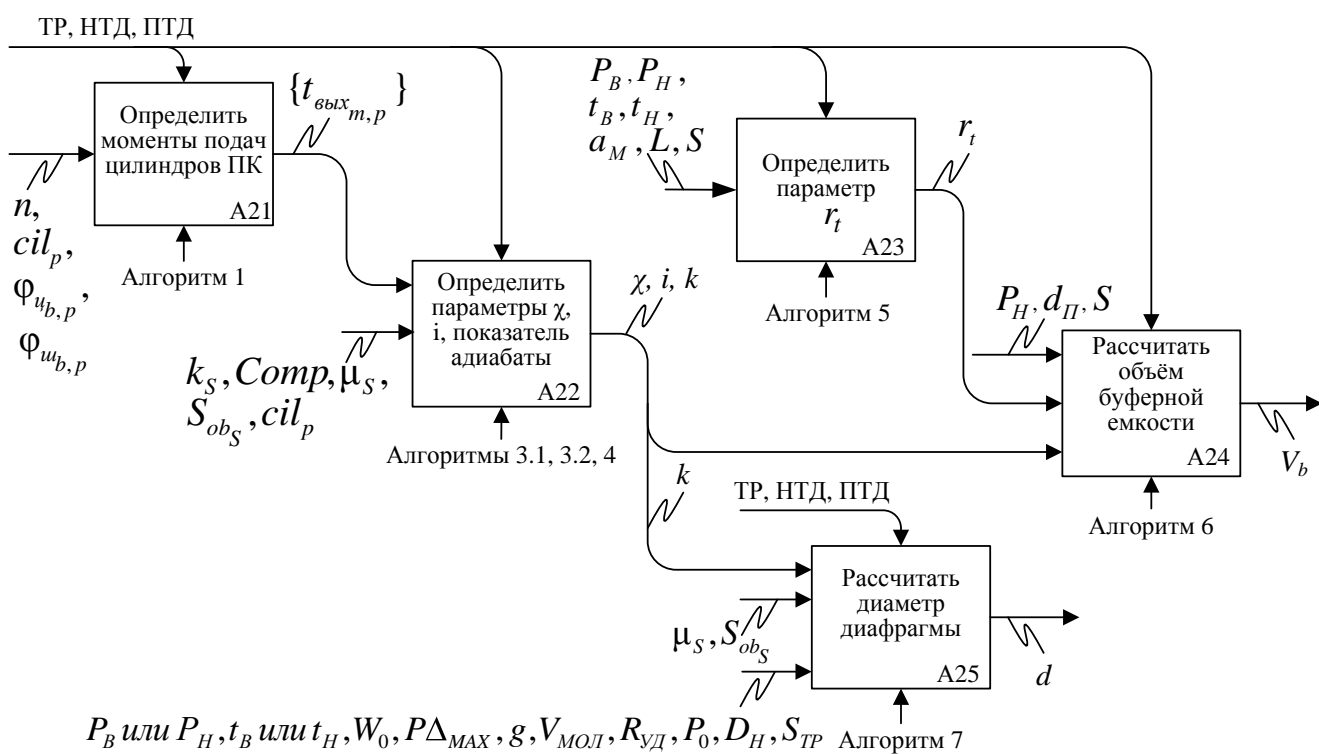


Рисунок 3.1.2 – Декомпозиция блока А2 «Расчитать конструкционные характеристики аппаратного оформления ПКА»

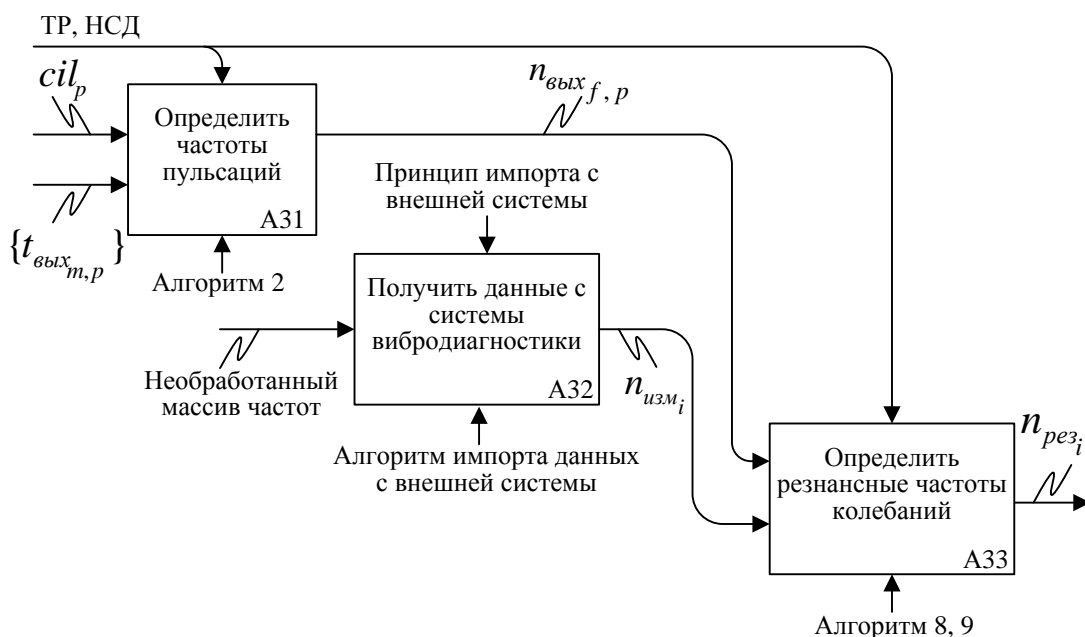


Рисунок 3.1.3 – Декомпозиция блока А3 «Выявить резонансные частоты колебаний»

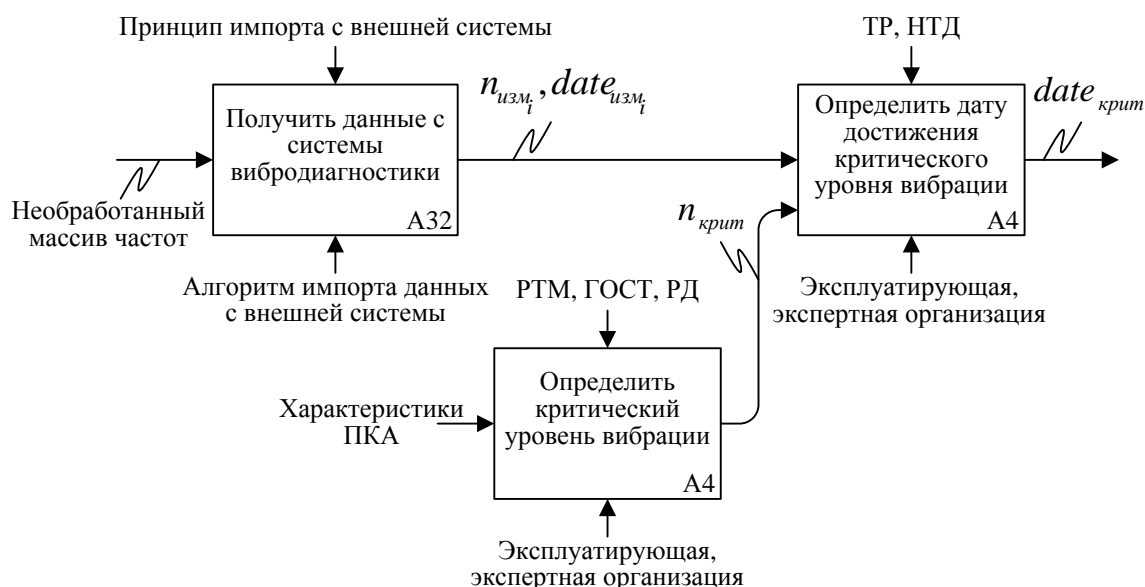


Рисунок 3.1.4 – Декомпозиция блока А4 «Определить надежность ПК»

3.1.1 Логическо-вычислительная математическая модель цилиндропоршневой группы и алгоритмы расчета частотно-технологических характеристик ступеней поршневого компрессора

Автоматизация определения частотно-технологических характеристик ступеней поршневого компрессора является актуальной задачей интегрированной логистической поддержки поршневого компрессора на этапе эксплуатации. Анализ функционирования ПК показал, что возбуждающие частоты пульсаций рабочей среды можно вычислить через временные периоды выхлопов, производимых поршнями, входящими в цилиндропоршневую группу (ЦПГ) за один оборот коленчатого вала (КВ) компрессора. ЦПГ включает цилиндр и обеспечивающие его работу элементы кривошипно-шатунного механизма (поршень, крейцкопф, шатун, кривошип). Путем применения общелогического метода абстрагирования при вычленении из ЦПГ траектории движения кривошипа, положения базового цилиндра и углов расположения цилиндра и соответствующей ему угла поворота кривошипа была получена принципиальная кинематическая схема ЦПГ для цилиндра двойного действия. Схема приведена на рисунке 3.1.1.1, где верхняя «мертвая» точка (ВМТ) движения поршня (соответствует моменту выхлопа в b -ом цилиндре простого действия (или двойного действия при прямом ходе поршня)); нижняя «мертвая» точка (НМТ) движения поршня (соответствует моменту выхлопа в b -ом цилиндре двойного действия при обратном ходе поршня). Принятое направление вращения КВ – «против часовой стрелки».

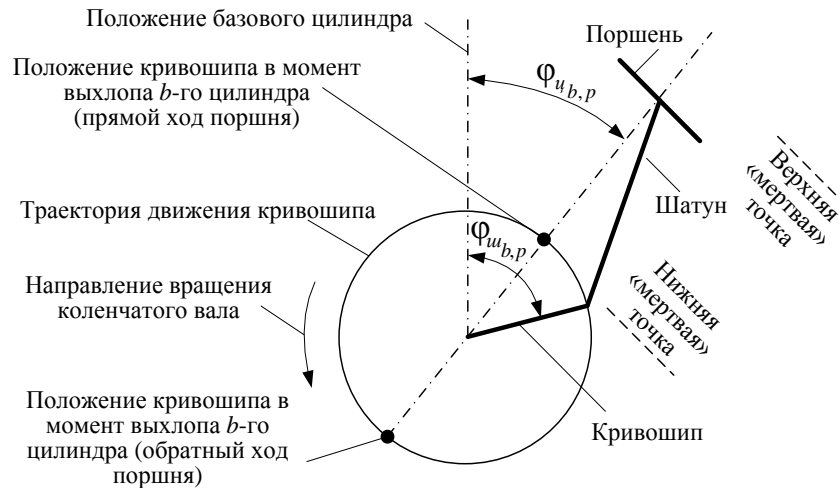


Рисунок 3.1.1.1 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ для b -го цилиндра

Анализ совместного функционирования работающих на одну ступень ЦПГ показал, что частота пульсаций рабочей среды в ступени зависит от следующих факторов:

- n – частота оборотов коленчатого вала ПК (ФР «Коленчатый вал», q3, а3.1, рисунок 2.3.4, вводится пользователем комплекса программ);
- cil_p – количество цилиндров, работающих на p -ю ступень, где $p = \overline{1, N}$, N – количество ступеней ПКА (ФР «Ряд», q7, а7.1, рисунок 2.2.3, определяется по связи конструктивных и технологических характеристик поршневого компрессора);
- количество рабочих ходов поршня (один или два) определяется автоматически по заполнению фреймов «Сторона прямого хода», «Сторона обратного хода» (ФР «Поршень», q11, q12, рисунок 2.2.10);
- $\varphi_{u,b,p}$ – угол между осями b -го и базового цилиндров, где $b = \overline{1, cil}$ – номер цилиндра компрессора, cil – общее количество цилиндров компрессора (ФР «Корпус цилиндра», q7, а7.1 рисунок 2.2.7, вводится пользователем комплекса программ);
- $\varphi_{ш,b,p}$ – угол между кривошипами поршней b -го и базового цилиндров (ФР «Шатунная шейка», q3, а3.1, рисунок 2.2.4, вводится пользователем комплекса программ).

Базовым считается цилиндр компрессора, для которого значения $\varphi_{u,b,p}$ и $\varphi_{ш,b,p}$ принимаются равными нулю. Вследствие разнообразия исполнений баз ПК, встречающихся на практике, (оппозитное, Г-образное, П-образное, V-образное,

векторное, вертикально-горизонтальное) динамическая математическая модель ЦПГ и алгоритм определения частот пульсаций рабочей среды разрабатывались для произвольных углов расположения цилиндров и кривошипов коленчатого вала ($\varphi_{u_{b,p}} \neq 0, \varphi_{w_{b,p}} \neq 0$). Математическая модель ЦПГ получена в результате анализа кинематической схемы (рисунок 3.1.1.1) для частных случаев конструктивных баз ПК (таблица 3.1.1.1).

Таблица 3.1.1.1 – Описание частных случаев конструктивных баз ПК

Ограничения	Конструктивная база*
$\varphi_{u_{b,p}} = 0$ $\varphi_{w_{b,p}} \neq 0$	Рядное расположение цилиндров с произвольными углами положения соответствующих шеек кривошипов
$\varphi_{u_{b,p1}} = 0, p1 = 1, 3, 5, \dots$ $\varphi_{u_{b,p2}} = 180, p2 = 2, 4, 6, \dots$ $\varphi_{w_{b,p1}} \neq 0, \varphi_{w_{b,p2}} \neq 0$	Оппозитное расположение цилиндров с произвольными углами положения соответствующих шеек кривошипов
$\varphi_{u_{b,p1}} = 0, p1 = 1, 3, 5, \dots$ $\varphi_{u_{b,p2}} = 45, p2 = 2, 4, 6, \dots$ $\varphi_{w_{b,p1}} \neq 0, \varphi_{w_{b,p2}} \neq 0$	Угловое расположение цилиндров с произвольными углами положения соответствующих шеек кривошипов
$\varphi_{u_{b,p1}} = 0, p1 = 1, 3, 5, \dots$ $\varphi_{u_{b,p2}} = 90, p2 = 2, 4, 6, \dots$ $\varphi_{w_{b,p1}} \neq 0, \varphi_{w_{b,p2}} \neq 0$	L-образное расположение цилиндров с произвольными углами положения соответствующих шеек кривошипов
$\varphi_{u_{b,p1}} = 0, p1 = 1, 3, 5, \dots$ $\varphi_{u_{b,p2}} = 270, p2 = 2, 4, 6, \dots$ $\varphi_{w_{b,p1}} \neq 0, \varphi_{w_{b,p2}} \neq 0$	L-образное расположение цилиндров с произвольными углами положения соответствующих шеек кривошипов
* углы расположения шеек кривошипов КВ для всех конструктивных баз произвольны	

Вид принципиальной кинематической схемы ЦПГ при **рядном расположении цилиндров** простого действия ($\varphi_{u_{b,p}} = 0, \varphi_{w_{b,p}} \neq 0$) представлен на рисунке 3.1.1.2.

Точка начала отсчета угла $\varphi_{w_{b,p}}$ совпадает с точкой выхлопа цилиндра простого действия, а расположение базового цилиндра совпадает с осевой линией.

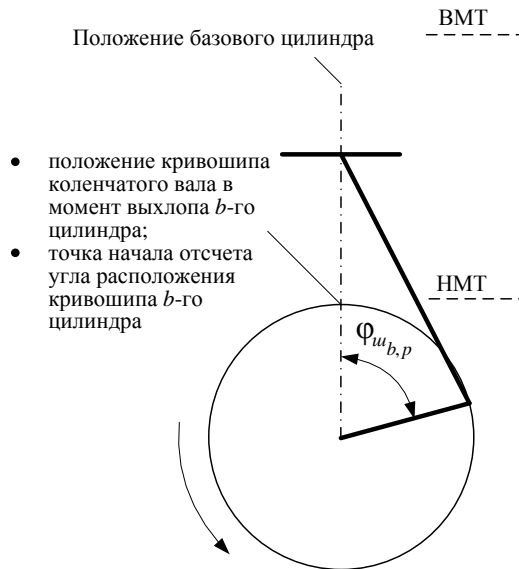


Рисунок 3.1.1.2 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при рядом расположении цилиндров простого действия

Шейка кривошипа b -го цилиндра, повернутая на угол $\varphi_{ш_{b,p}}$ относительно базового цилиндра, достигнет положения, соответствующего выхлопу цилиндра простого действия, пройдя угол $\varphi_{ш_{b,p}}$. Выхлоп b -го цилиндра будет происходить через отрезок времени, вычисляемый по выражению (3.1.1.1):

$$t_{\text{вых-}np_{b,p}} \left\} \frac{\varphi_{ш_{b,p}}}{n \cdot 360}, \quad (3.1.1.1)$$

где $\frac{1}{n \cdot 360}$ – отрезок времени, за который КВ повернется на 1 градус.

Математическая модель ЦПГ для случая рядного расположения цилиндров простого действия будет иметь вид выражения (3.1.1.2):

$$t_{\text{вых-}np_{b,p}} \left\} \frac{\varphi_{ш_{b,p}}}{n \cdot 360}, \text{ при } \varphi_{ш_{b,p}} < 360 \quad (4.1.1.2)$$

Вид принципиальной кинематической схемы ЦПГ при **оппозитном расположении цилиндров** простого действия ($\varphi_{u_{b,p1}} = 0$, $p1 = 1, 3, 5, \dots$, $\varphi_{u_{b,p2}} = 180$, $p2 = 2, 4, 6, \dots$, $\varphi_{u_{b,p1}} \neq 0$, $\varphi_{u_{b,p2}} \neq 0$) представлен на рисунке 3.1.1.3.

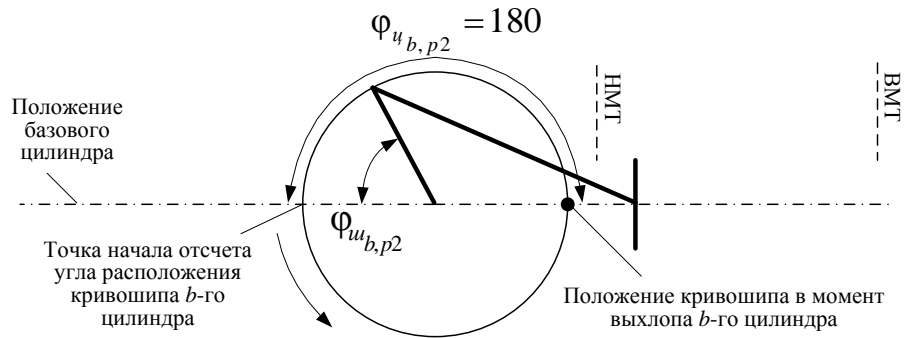


Рисунок 3.1.1.3 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при оппозитном расположении цилиндров простого действия, $\varphi_{u_{b,p2}} \leq 180$

Для случая оппозитного расположения цилиндров точка начала отсчета угла $\varphi_{u_{b,p2}}$ и точка выхлопа цилиндра простого действия не совпадают. Данная особенность оппозитной схемы позволяет мысленно разделить окружность, описываемую шейкой кривошипа КВ, на два сектора: №1 ($\varphi_{u_{b,p2}} \leq 180$) и №2 ($180 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360$).

Если $\varphi_{u_{b,p2}} \leq 180$ (сектор №1) (рис. 3.1.1.3), то выхлоп b -го оппозитного цилиндра простого действия, повернутого на угол, равный 180 град. относительно базового цилиндра, будет происходить через отрезок времени, вычисляемый по выражению (4.1.1.3):

$$t_{\text{вых-}np_{b,p}} = \frac{\varphi_{u_{b,p2}} + 180}{n \cdot 360} \quad (3.1.1.3)$$

Если $180 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360$ (сектор №2) (рисунок 3.1.1.4), то выхлоп b -го оппозитного цилиндра простого действия будет происходить через отрезок времени, вычисляемый по выражению (3.1.1.4):

$$\left. \begin{matrix} \varphi_{\text{вых-}np_{b,p}} \\ \varphi_{u_{b,p2}} \end{matrix} \right\} \varphi_{u_{b,p2}} - 180 \quad (3.1.1.4)$$

$$\left. \begin{matrix} \varphi_{\text{вых-}np_{b,p}} \\ \varphi_{u_{b,p2}} \end{matrix} \right\} \frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 180}{n \cdot 360}$$

При граничном условии $\varphi_{u_{b,p2}} = 180$ для оппозитного расположения цилиндров моменты выхлопов b -го и базового цилиндров совпадают по времени.

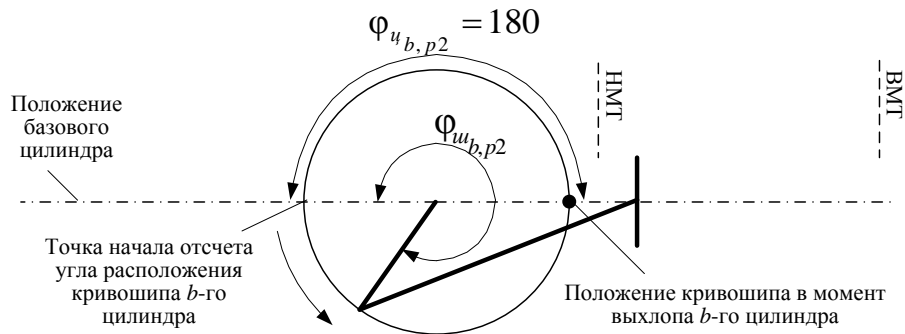


Рисунок 3.1.1.4 – Принципиальная кинематическая схема модель ЦПГ при оппозитном расположении цилиндров простого действия, $180 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360$

Математическая модель ЦПГ для случая оппозитного расположения цилиндров простого действия будет иметь вид выражения (3.1.1.5):

$$\left. \begin{matrix} \varphi_{\text{вых-}np_{b,p}} \\ \varphi_{u_{b,p2}} \end{matrix} \right\} \begin{cases} \frac{\varphi_{u_{b,p2}} + 180}{n \cdot 360}, & \varphi_{u_{b,p2}} \leq 180 \\ \frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 180}{n \cdot 360}, & 180 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360 \end{cases} \quad (3.1.1.5)$$

Производя аналогичные вычисления для других конструктивных баз, получим выражения, представленные ниже.

Математическая модель ЦПГ для случая **углового расположения цилиндров (угол 45 градусов)** ($\varphi_{u_{b,p1}} = 0$, $p1 = 1, 3, 5, \dots$, $\varphi_{u_{b,p2}} = 45$, $p2 = 2, 4, 6, \dots$, $\varphi_{u_{b,p1}} \neq 0$, $\varphi_{u_{b,p2}} \neq 0$) простого действия (рисунок 3.1.1.5) будет иметь вид выражения (3.1.1.6):

$$t_{\text{вых-}np_{b,p}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{60 - (5 - \varphi_{w_{b,p2}})}{n \cdot 360}, \varphi_{w_{b,p2}} \leq 45 \\ \frac{\varphi_{w_{b,p2}} - 45}{n \cdot 360}, 45 < \varphi_{w_{b,p2}} \leq 360 \end{array} \right. \quad (3.1.1.6)$$

При граничном условии $\varphi_{w_{b,p2}} = 45$ моменты выхлопов b -го и базового цилиндров совпадают по времени.

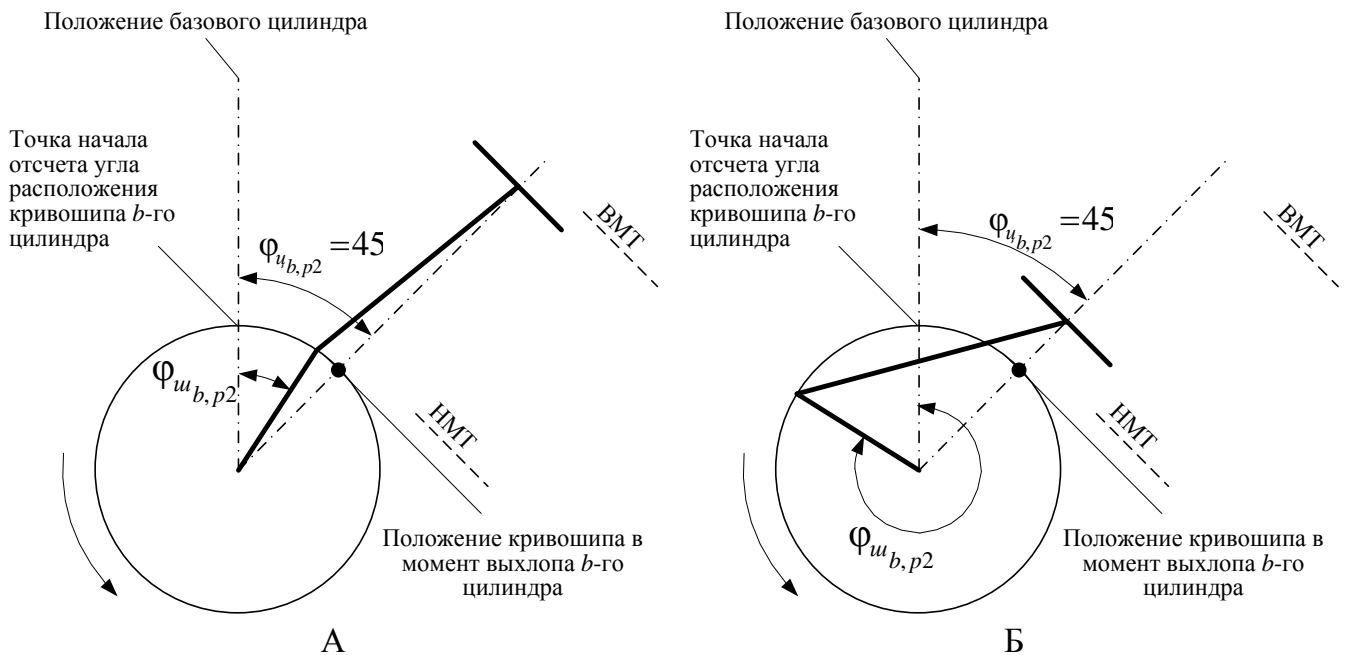


Рисунок 3.1.1.5 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при угловом расположении цилиндров простого действия (угол 45 градусов),

$$A - \varphi_{w_{b,p2}} \leq 45, B - 45 < \varphi_{w_{b,p2}} \leq 360$$

Математическая модель ЦПГ для случая **L-образное расположение цилиндров (угол 90 градусов)** ($\varphi_{u_{b,p1}} = 0$, $p1 = 1, 3, 5, \dots$, $\varphi_{u_{b,p2}} = 90$, $p2 = 2, 4, 6, \dots$, $\varphi_{w_{b,p1}} \neq 0$, $\varphi_{w_{b,p2}} \neq 0$) простого действия (рисунок 3.1.1.6) будет иметь вид выражения (3.1.1.7):

$$\left. \begin{matrix} \varphi_{\text{вх}} - n p_{b,p} \end{matrix} \right\} \begin{cases} \frac{360 - \varphi_{\omega_{b,p2}}}{n \cdot 360}, & \varphi_{\omega_{b,p2}} \leq 90 \\ \frac{\varphi_{\omega_{b,p2}} - 90}{n \cdot 360}, & 90 < \varphi_{\omega_{b,p2}} \leq 360 \end{cases} \quad (3.1.1.7)$$

При граничном условии $\varphi_{\omega_{b,p2}} = 90$ моменты выхлопов b -го и базового цилиндров совпадают по времени.

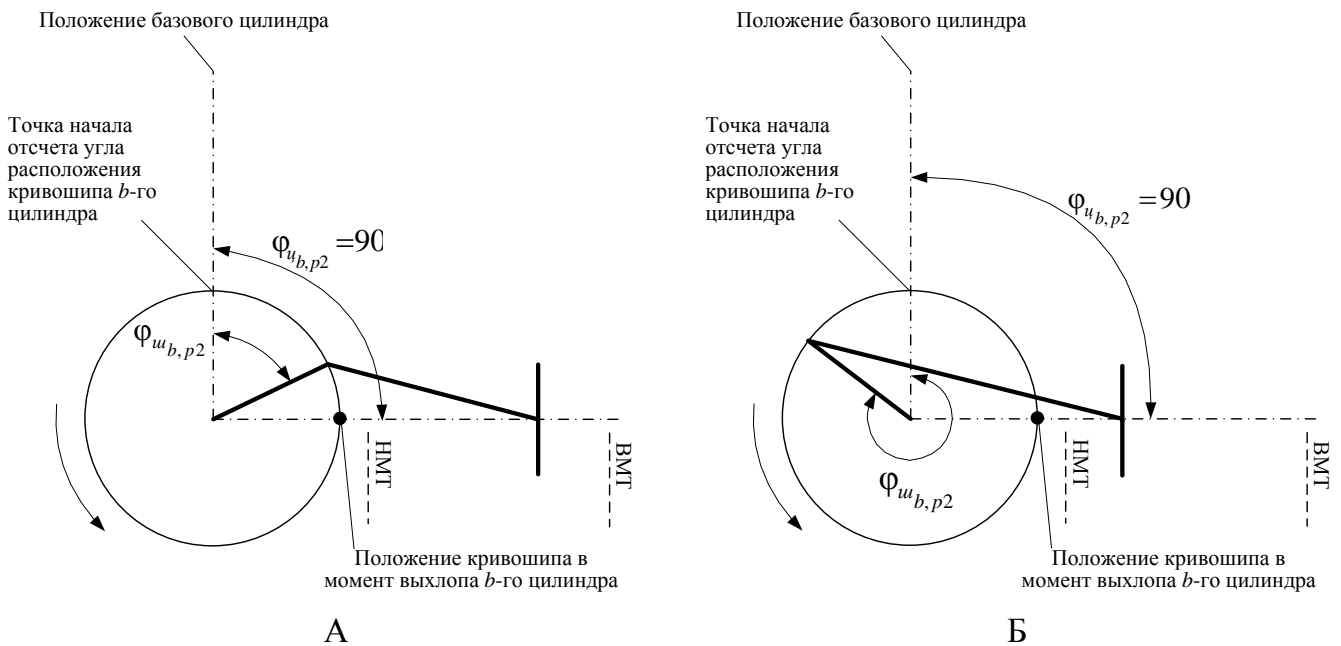


Рисунок 3.1.1.6 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при L-образном расположении цилиндров простого действия (угол 90 градусов)

$$A - \varphi_{\omega_{b,p2}} \leq 90, \quad B - 90 < \varphi_{\omega_{b,p2}} \leq 360$$

Математическая модель ЦПГ для случая **L-образное расположение цилиндров (угол 270 градусов)** ($\varphi_{\omega_{b,p1}} = 0, p1 = 1, 3, 5, \dots, \varphi_{\omega_{b,p2}} = 270, p2 = 2, 4, 6, \dots, \varphi_{\omega_{b,p1}} \neq 0,$) простого действия (рисунок 3.1.1.7) будет иметь вид выражения (3.1.1.8):

$$t_{\text{вых-}np_{b,p}} \left. \vphantom{t_{\text{вых-}np_{b,p}}} \right\} \begin{cases} \frac{60 - (70 - \varphi_{u_{b,p2}})}{n \cdot 360}, & \varphi_{u_{b,p2}} \leq 270 \\ \frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 270}{n \cdot 360}, & 270 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360 \end{cases} \quad (3.1.1.8)$$

При граничном условии $\varphi_{u_{b,p2}} = 270$ моменты выхлопов b -го и базового цилиндров совпадают по времени.

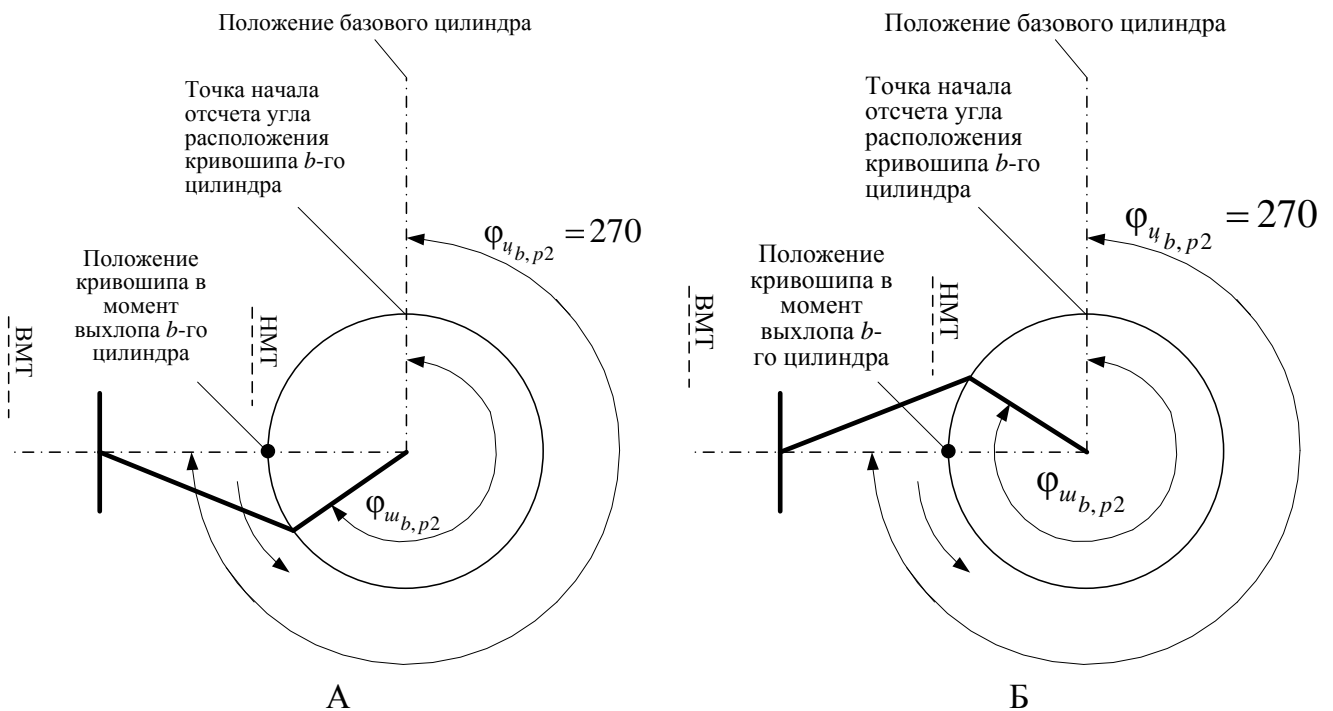


Рисунок 3.1.1.7 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при L-образном расположении цилиндров простого действия (270 градусов)

$$A - \varphi_{u_{b,p2}} \leq 270, B - 270 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360$$

Анализ вида выражений (3.1.1.2), (3.1.1.5), (3.1.1.6), (3.1.1.7), (3.1.1.8) показывает то, что между полученными выражениями имеется аналогия. Применение индукции как метода познания приводит к тому, что из полученных частных выражений, имеющих единую структуру, позволяет получить общее выражение (3.1.1.9), являющееся статической моделью ЦПГ времен выхлопов поршневой машины с цилиндрами простого действия:

$$\left. \begin{array}{l} \varphi_{\text{вых-}np_{b,p}} \end{array} \right\} \begin{cases} \frac{360 - \varphi_{u_{b,p2}} - \varphi_{ш_{b,p2}}}{n \cdot 360}, \varphi_{ш_{b,p2}} \leq \varphi_{u_{b,p2}} \\ \frac{\varphi_{ш_{b,p2}} - \varphi_{u_{b,p2}}}{n \cdot 360}, \varphi_{u_{b,p2}} < \varphi_{ш_{b,p2}} \leq 360 \end{cases} \quad (3.1.1.9)$$

Для частных случаев конструктивных баз ПК с цилиндрами двойного действия точка выхлопа при обратном ходе поршня смещена относительно точки выхлопа при прямом ходе на 180 град (рисунок 3.1.1.1). Выхлоп при обратном ходе поршня смещен по времени относительно выхлопа при прямом ходе на величину $\frac{1}{n \cdot 360} \cdot 180 = \frac{1}{2 \cdot n}$, где $\frac{1}{n \cdot 360}$ – отрезок времени, за который КВ повернется на 1 градус.

При **рядном расположении цилиндров** двойного действия ($\varphi_{u_{b,p}} = 0$, $\varphi_{ш_{b,p}} \neq 0$) (рисунок 3.1.1.8) точка начала отсчета угла $\varphi_{ш_{b,p}}$ совпадает с точкой выхлопа при прямом ходе поршня. Мысленно разделим окружность, описываемую шейкой КВ на два сектора: №1 ($\varphi_{ш_{b,p}} \leq 180$) и №2 ($180 < \varphi_{ш_{b,p}} < 360$).

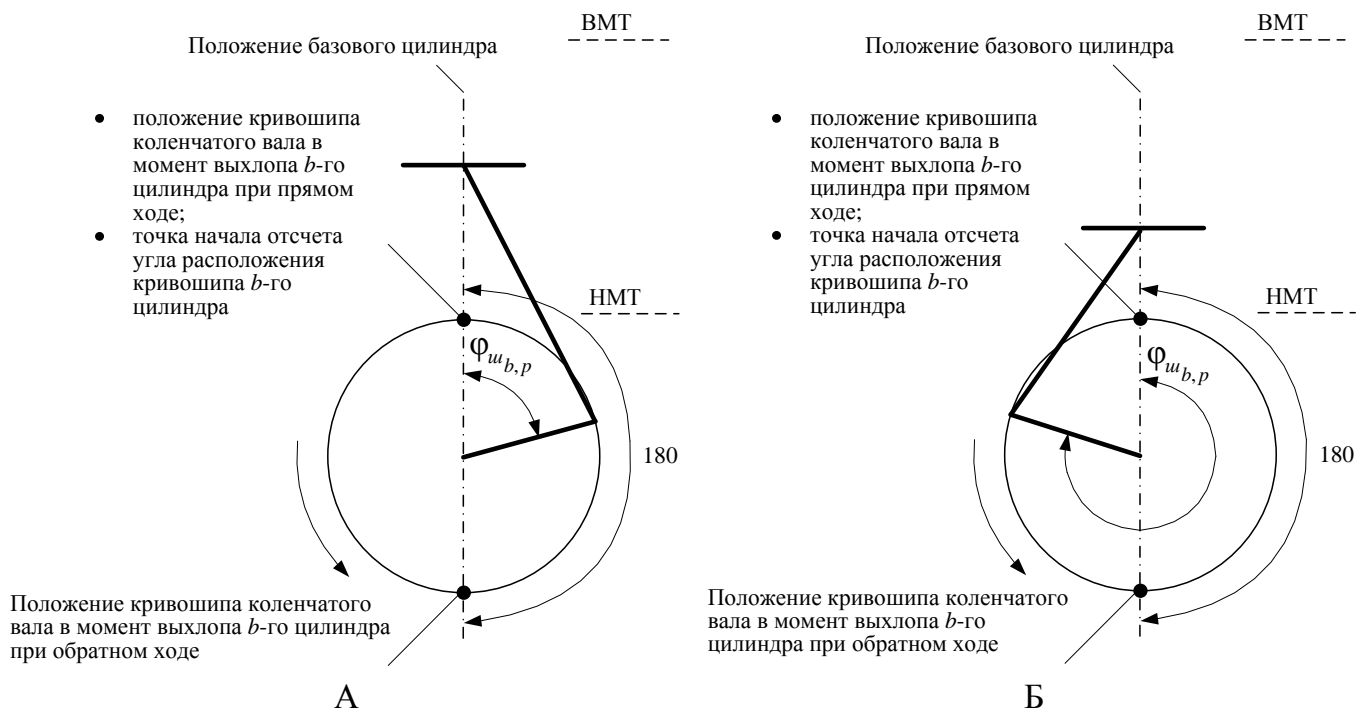


Рисунок 3.1.1.8 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при рядном расположении цилиндров двойного действия

$$A - \varphi_{ш_{b,p}} \leq 180, B - 180 < \varphi_{ш_{b,p}} < 360$$

Для соответствующих секторов выхлоп b -го цилиндра при обратном ходе поршня будет происходить через отрезки времени, вычисляемые по выражениям (3.1.1.9-3.1.1.10):

$$\left. \begin{matrix} \text{с} \\ \text{сектор} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \text{с} \\ \text{сектор} \end{matrix} \right\} \frac{\varphi_{ш_{b,p}} + 180}{n \cdot 360} = \frac{\varphi_{ш_{b,p}}}{n \cdot 360} + \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\text{вых-}np_{b,p}} + \frac{1}{n \cdot 2}, \quad (3.1.1.9)$$

$$\varphi_{ш_{b,p}} \leq 180, t_{\text{вых-}np_{b,p}} < \frac{1}{n \cdot 2}$$

$$\left. \begin{matrix} \text{с} \\ \text{сектор} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \text{с} \\ \text{сектор} \end{matrix} \right\} \frac{\varphi_{ш_{b,p}} - 180}{n \cdot 360} = \frac{\varphi_{ш_{b,p}}}{n \cdot 360} - \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\text{вых-}np_{b,p}} - \frac{1}{n \cdot 2}, \quad (3.1.1.10)$$

$$180 < \varphi_{ш_{b,p}} < 360, t_{\text{вых-}np_{b,p}} \geq \frac{1}{n \cdot 2}$$

Математическая модель ЦПГ для определения моментов выхлопа при обратном ходе поршня для случая рядного расположения цилиндров двойного действия будет иметь вид выражения (3.1.1.11):

$$\left. \begin{matrix} \text{с} \\ \text{сектор} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \text{с} \\ \text{сектор} \end{matrix} \right\} \begin{cases} t_{\text{вых-}np_{b,p}} + \frac{1}{n \cdot 2}, \varphi_{ш_{b,p}} < 180 \\ t_{\text{вых-}np_{b,p}} - \frac{1}{n \cdot 2}, 180 \leq \varphi_{ш_{b,p}} < 360 \end{cases} \quad (3.1.1.11)$$

При **оппозитном расположении цилиндров** двойного действия ($\varphi_{ш_{b,p1}} = 0, p1 = 1, 3, 5, \dots, \varphi_{ш_{b,p2}} = 180, p2 = 2, 4, 6, \dots, \varphi_{ш_{b,p1}} \neq 0, \varphi_{ш_{b,p2}} \neq 0$) (рисунок 3.1.1.9) можно разделить окружность, описываемую шейкой коленчатого вала на два сектора: №1 ($\varphi_{ш_{b,p2}} \leq 180$) и №2 ($180 < \varphi_{ш_{b,p2}} \leq 360$).

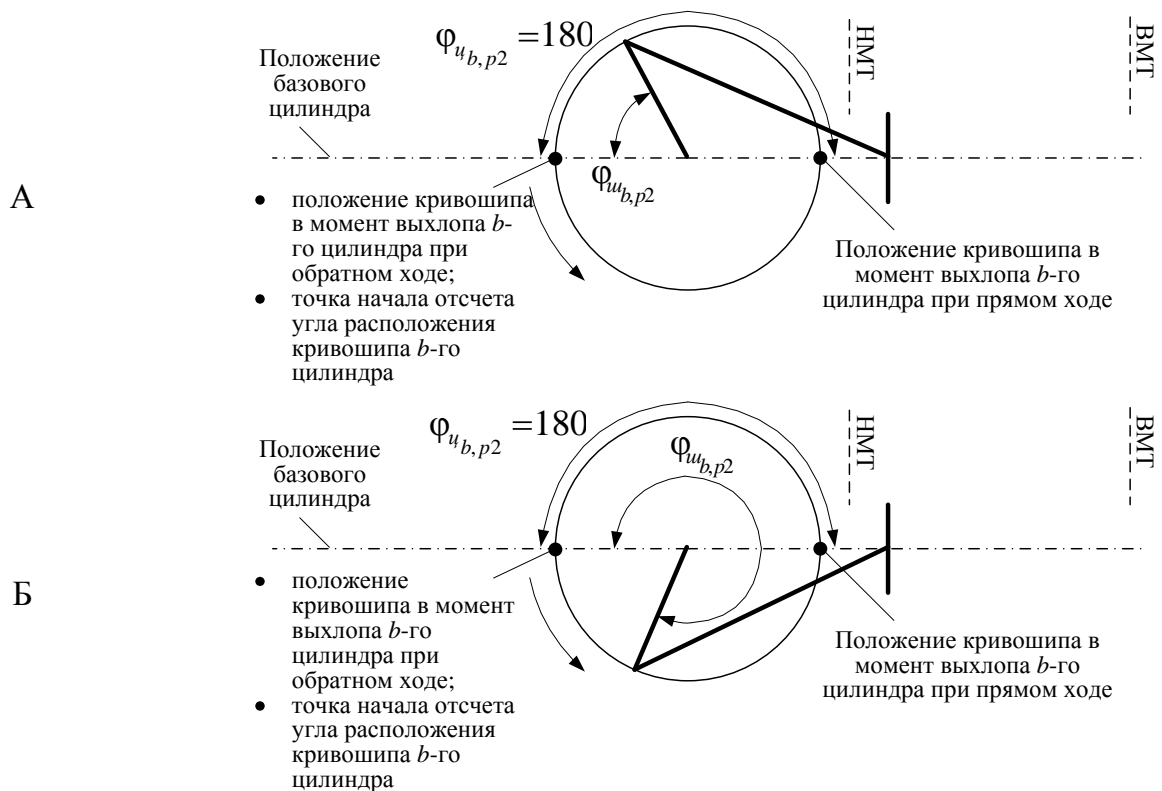


Рисунок 3.1.1.9 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при оппозитном расположении цилиндров простого действия

$$А - \varphi_{u,b,p2} \leq 180, Б - 180 < \varphi_{u,b,p2} \leq 360$$

Для соответствующих секторов выхлоп b -го цилиндра при обратном ходе поршня будет происходить через отрезки времени, вычисляемые по выражениям (3.1.1.12-3.1.1.13):

$$t_{\text{вых-об}p_{b,p}} \left. \vphantom{t_{\text{вых-об}p_{b,p}}} \right\} \varphi_{u,b,p2} = \frac{\varphi_{u,b,p2} + 180}{n \cdot 360} - \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\text{вых-}np_{b,p}} - \frac{1}{n \cdot 2} \quad (3.1.1.12)$$

$$\varphi_{u,b,p2} \leq 180, t_{\text{вых-}np_{b,p}} \geq \frac{1}{2 \cdot n}$$

$$t_{\text{вых-об}p_{b,p}} \left. \vphantom{t_{\text{вых-об}p_{b,p}}} \right\} \varphi_{u,b,p2} = \frac{\varphi_{u,b,p2} - 180}{n \cdot 360} + \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\text{вых-}np_{b,p}} + \frac{1}{n \cdot 2} \quad (3.1.1.13)$$

$$180 < \varphi_{u,b,p2} \leq 360, t_{\text{вых-}np_{b,p}} < \frac{1}{2 \cdot n}$$

Математическая модель ЦПГ для случая оппозитного расположения цилиндров двойного действия будет иметь вид выражения (3.1.1.14):

$$t_{\text{вых_об}p_{b,p}} \left\{ \begin{array}{l} t_{\text{вых_н}p_{b,p}} - \frac{1}{n \cdot 2}, \varphi_{\text{ш}_{b,p2}} \leq 180 \\ t_{\text{вых_н}p_{b,p}} + \frac{1}{n \cdot 2}, 180 < \varphi_{\text{ш}_{b,p2}} \leq 360 \end{array} \right. \quad (3.1.1.14)$$

При угловом расположении цилиндров двойного действия (угол 45 градусов) ($\varphi_{u_{b,p1}} = 0$, $p1 = 1, 3, 5, \dots$, $\varphi_{u_{b,p2}} = 45$, $p2 = 2, 4, 6, \dots$, $\varphi_{\text{ш}_{b,p1}} \neq 0$, $\varphi_{\text{ш}_{b,p2}} \neq 0$) (рисунок 3.1.1.10) можно разделить окружность, описываемую кривошипом коленчатого вала на три сектора: №1 $\varphi_{\text{ш}_{b,p2}} \leq 45$; №2 $45 < \varphi_{\text{ш}_{b,p2}} < 45 + 180$; №3 $45 + 180 \leq \varphi_{\text{ш}_{b,p2}} \leq 360$.

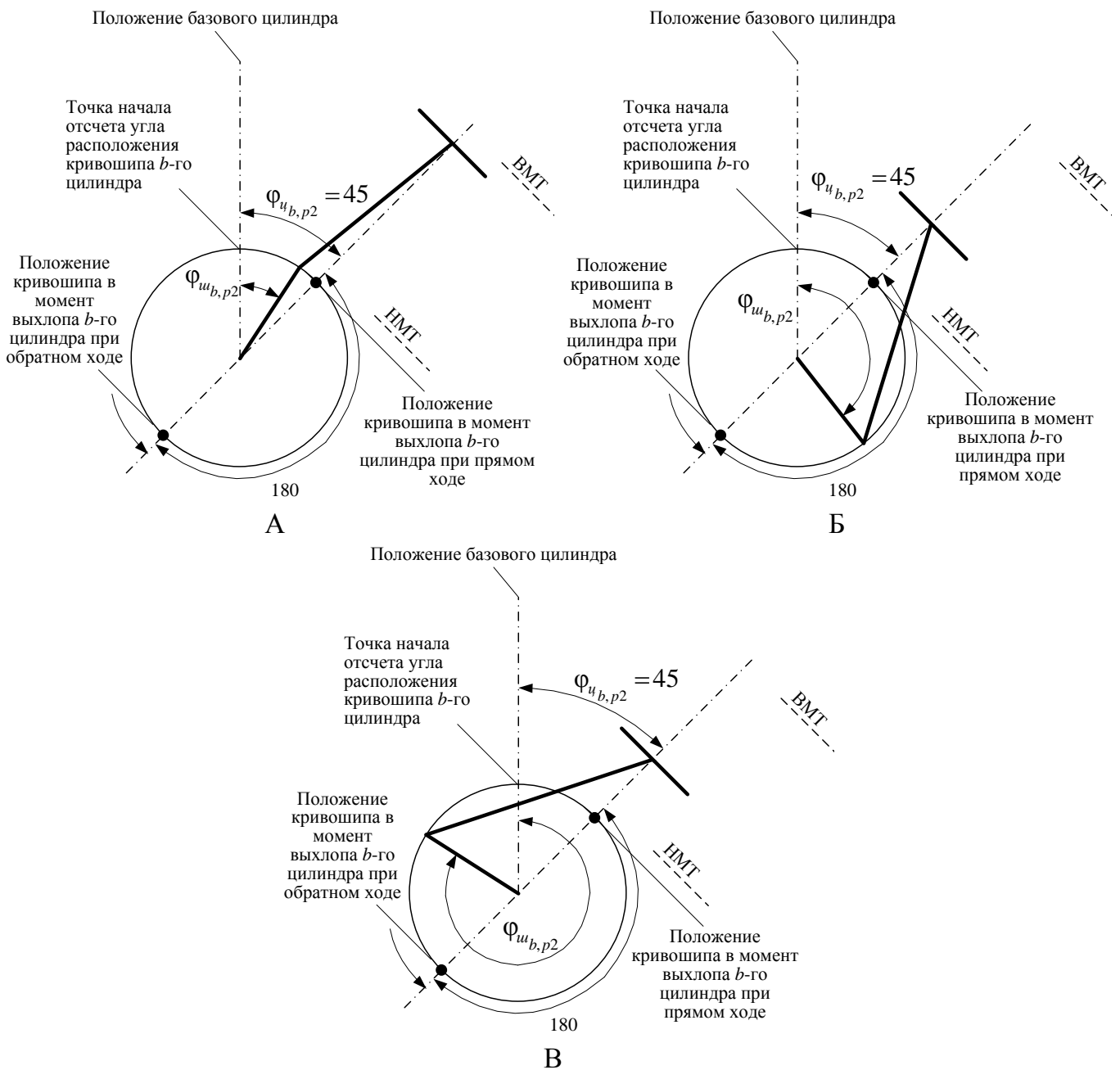


Рисунок 3.1.1.10 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при угловом расположении цилиндров двойного действия (угол 45 градусов)

$$A - \varphi_{u_{b,p2}} \leq 45, B - 45 < \varphi_{u_{b,p2}} < 45 + 180, B - 45 + 180 \leq \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360$$

Для соответствующих секторов выхлоп b -го цилиндра при обратном ходе поршня будет происходить через отрезки времени, вычисляемые по выражениям (3.1.1.14-3.1.1.16):

$$\left. \begin{array}{l} t_{\text{вых-об}p_{b,p}} \\ \varphi_{u_{b,p2}} \leq 45 \end{array} \right\} \frac{80 - (45 - \varphi_{u_{b,p2}})}{n \cdot 360} = \frac{60 - (45 - \varphi_{u_{b,p2}})}{n \cdot 360} - \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\text{вых-}np_{b,p}} - \frac{1}{n \cdot 2} \quad (3.1.1.14)$$

$$\left. \begin{array}{l} t_{\text{вых-об}p_{b,p}} \\ 45 \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 45 + 180 \end{array} \right\} \frac{80 + \varphi_{u_{b,p2}} - 45}{n \cdot 360} = \frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 45}{n \cdot 360} + \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\text{вых-}np_{b,p}} + \frac{1}{n \cdot 2} \quad (3.1.1.15)$$

$$\left. \begin{array}{l} t_{\text{вых-об}p_{b,p}} \\ 45 + 180 \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 360 \end{array} \right\} \frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 45 - 180}{n \cdot 360} = \frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 45}{n \cdot 360} - \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\text{вых-}np_{b,p}} - \frac{1}{n \cdot 2} \quad (3.1.1.16)$$

$$45 + 180 \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 360, t_{\text{вых-}np_{b,p}} \geq \frac{1}{n \cdot 2}$$

Математическая модель ЦПГ для случая углового расположения цилиндров двойного действия (угол 45 градусов) будет иметь вид выражения (3.1.1.17):

$$\left. \begin{array}{l} t_{\text{вых-об}p_{b,p}} \\ \varphi_{u_{b,p2}} \leq 45 \\ 45 \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 45 + 180 \\ 45 + 180 \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 360 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} t_{\text{вых-}np_{b,p}} + \frac{1}{n \cdot 2}, \varphi_{u_{b,p2}} \leq 45 \\ t_{\text{вых-}np_{b,p}} + \frac{1}{n \cdot 2}, 45 \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 45 + 180 \\ t_{\text{вых-}np_{b,p}} - \frac{1}{n \cdot 2}, 45 + 180 \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 360 \end{array} \right. \quad (3.1.1.17)$$

При **L-образное расположение цилиндров двойного действия (угол 270 градусов)** ($\varphi_{u_{b,p1}} = 0, p1 = 1, 3, 5, \dots, \varphi_{u_{b,p2}} = 270, p2 = 2, 4, 6, \dots, \varphi_{u_{b,p1}} \neq 0, \varphi_{u_{b,p2}} \neq 0$)

(рисунок 3.1.1.11) можно разделить окружность, описываемую шейкой коленчатого вала на три сектора: №1 $\varphi_{ш, b, p2} \leq \overset{\curvearrowright}{\llcorner} 70 - 180 \overset{\curvearrowright}{\lrcorner}$; №2 $\overset{\curvearrowright}{\llcorner} 70 - 180 \overset{\curvearrowright}{\lrcorner} < \varphi_{ш, b, p2} < 270$; №3 $270 \leq \varphi_{ш, b, p2} \leq 360$.

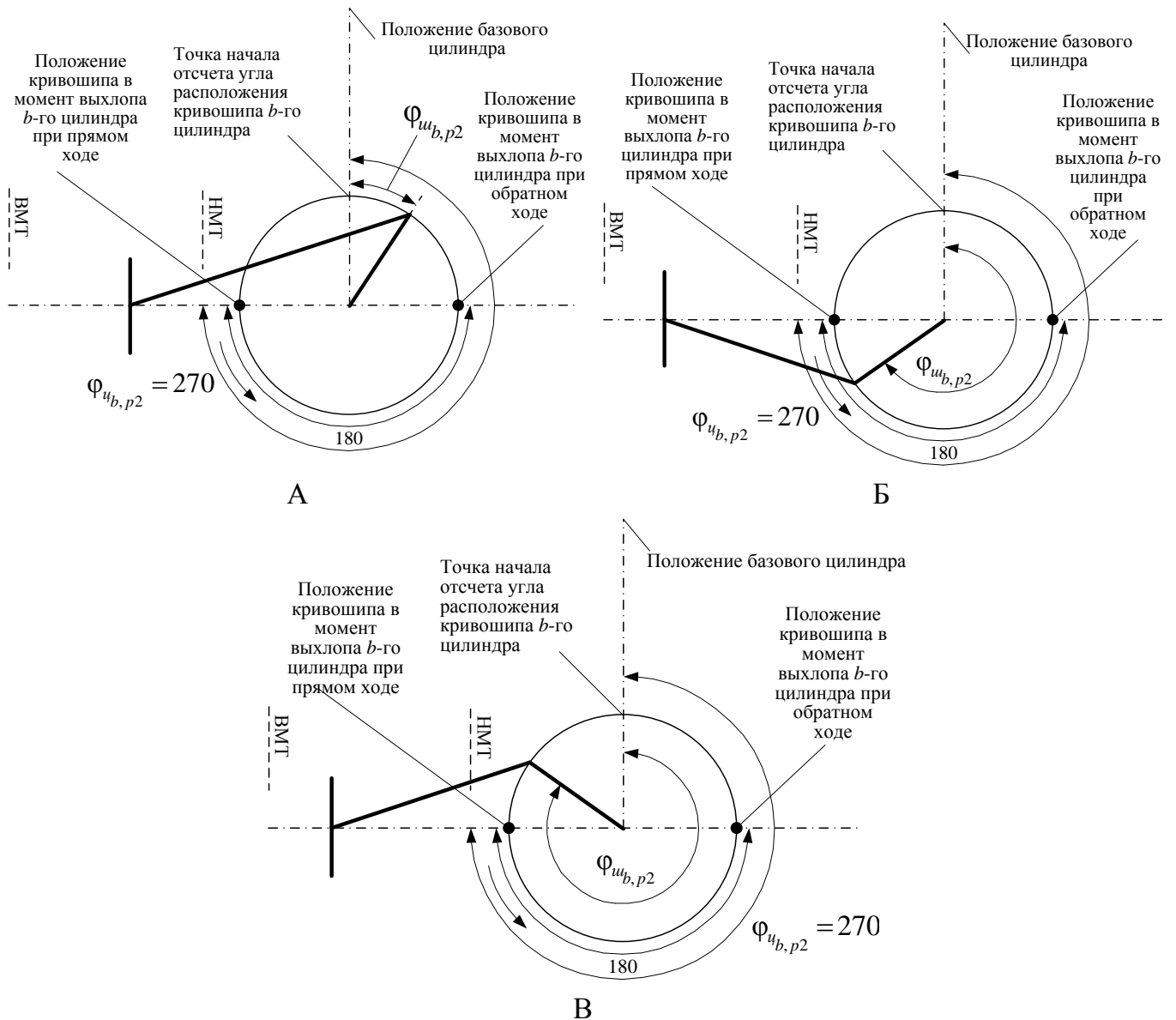


Рисунок 3.1.1.11 – Принципиальная кинематическая схема ЦПГ при L-образном расположении цилиндров двойного действия (угол 270 градусов),

А - $\varphi_{ш, b, p2} \leq \overset{\curvearrowright}{\llcorner} 70 - 180 \overset{\curvearrowright}{\lrcorner}$, Б - $\overset{\curvearrowright}{\llcorner} 70 - 180 \overset{\curvearrowright}{\lrcorner} < \varphi_{ш, b, p2} < 270$, В - $270 \leq \varphi_{ш, b, p2} \leq 360$

Для соответствующих секторов выхлоп b -го цилиндра при обратном ходе поршня будет происходить через отрезки времени, вычисляемые по выражениям (3.1.1.18-3.1.1.20):

$$\left. \vphantom{\frac{60 - (70 - \varphi_{u_{b,p2}} - 180)}{n \cdot 360}} \right\} \frac{60 - (70 - \varphi_{u_{b,p2}} - 180)}{n \cdot 360} =$$

$$= \frac{60 - (70 - \varphi_{u_{b,p2}} - 180)}{n \cdot 360} - \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} - \frac{1}{n \cdot 2} \quad (3.1.1.18)$$

$$\varphi_{u_{b,p2}} \leq (70 - 180) \Rightarrow t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} \geq \frac{1}{n \cdot 2}$$

$$\left. \vphantom{\frac{80 - (70 - \varphi_{u_{b,p2}})}{n \cdot 360}} \right\} \frac{80 - (70 - \varphi_{u_{b,p2}})}{n \cdot 360} =$$

$$= \frac{60 - (70 - \varphi_{u_{b,p2}} - 180)}{n \cdot 360} - \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} - \frac{1}{n \cdot 2} \quad (3.1.1.19)$$

$$(70 - 180) \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 270, t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} \geq \frac{1}{n \cdot 2}$$

$$\left. \vphantom{\frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 270 + 180}{n \cdot 360}} \right\} \frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 270 + 180}{n \cdot 360} =$$

$$= \frac{\varphi_{u_{b,p2}} - 270}{n \cdot 360} + \frac{180}{n \cdot 360} = t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} + \frac{1}{n \cdot 2} \quad (3.1.1.20)$$

$$270 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360, t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} < \frac{1}{n \cdot 2}$$

Математическая модель ЦПГ для случая L-образного расположения цилиндров двойного действия (угол 270 градусов) будет иметь вид выражения (3.1.1.21):

$$\left. \vphantom{\begin{cases} t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} - \frac{1}{n \cdot 2}, \varphi_{u_{b,p2}} \leq (70 - 180) \\ t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} - \frac{1}{n \cdot 2}, (70 - 180) \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 270 \\ t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} + \frac{1}{n \cdot 2}, 270 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360 \end{cases}} \right\} \begin{cases} t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} - \frac{1}{n \cdot 2}, \varphi_{u_{b,p2}} \leq (70 - 180) \\ t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} - \frac{1}{n \cdot 2}, (70 - 180) \leq \varphi_{u_{b,p2}} < 270 \\ t_{\varepsilon_{\text{вых-}np_{b,p}}} + \frac{1}{n \cdot 2}, 270 < \varphi_{u_{b,p2}} \leq 360 \end{cases} \quad (3.1.1.21)$$

Анализ вида выражений (3.1.1.11), (3.3.1.14), (3.1.1.17), (3.1.1.21) показывает то, что между полученными выражениями имеется аналогия. Применение индукции как метода

познания приводит к тому, что из полученных частных формул, имеющих единую структуру, имеем динамическую математическую модель для определения моментов выхлопов ступени p с цилиндрами двойного действия при обратном ходе поршня, представляющую собой систему уравнений 3.1.1.22:

$$t_{\text{вых_об}p_{b,p}} \in \begin{cases} t_{\text{вых_н}p_{b,p}} - \frac{1}{2 \cdot n}, t_{\text{вых_н}p_{b,p}} \geq \frac{1}{2 \cdot n} \\ t_{\text{вых_н}p_{b,p}} + \frac{1}{2 \cdot n}, t_{\text{вых_н}p_{b,p}} < \frac{1}{2 \cdot n} \end{cases} \quad (3.1.1.22)$$

Полученная с помощью анализа кинематической схемы (рисунок 3.1.1.1) математическая модель ЦПГ (выражения 3.1.1.9, 3.1.1.22) содержит угол расположения цилиндра, угол расположения кривошипа, частоту оборотов коленчатого вала и отличается тем, что позволяет с помощью вычислительно-логических алгоритмов рассчитать моменты выхлопов всех цилиндров компрессора как простого, так и двойного действия относительно выхлопа базового цилиндра для любого исполнения базы ПК.

В случае цилиндров простого действия математическое описание модели будет иметь вид выражения 3.1.1.9; в случае цилиндров двойного действия математическое описание модели (3.1.1.22) дополняется выражением (3.1.1.9) для определения моментов выхлопа при обратном ходе поршня и выражением (3.1.1.23).

$$\{t_{\text{вых}b,p}\} = \{t_{\text{вых_н}p_{b,p}}\} \cup \{t_{\text{вых_об}p_{b,p}}\} \quad (3.1.1.23)$$

В соответствии с методологией математического моделирования, исходный объект (ЦПГ компрессора) был заменен его «образом» (математической моделью). Изучение указанной модели с помощью разработанного алгоритма 1 (рисунок 3.1.1.24) [118], дает возможность получения данных о моментах времени выхлопа поршневой машины с цилиндрами простого или двойного действия. Блок-схема алгоритма 1 расчёта моментов выхлопа цилиндров, использующего выражения (3.1.1.9, 3.1.1.22, 3.1.1.23), приведена на рисунке 3.1.1.24.

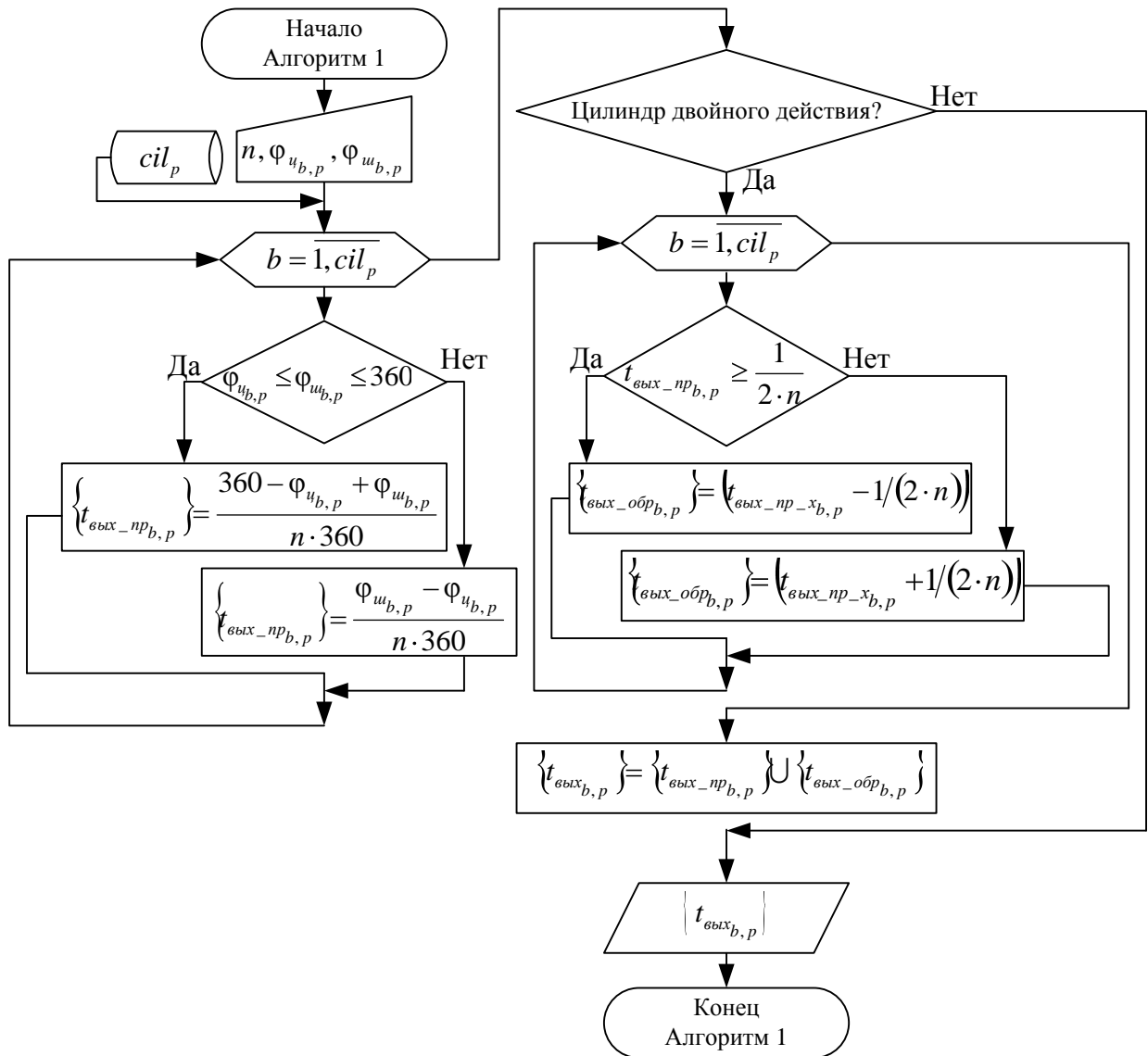


Рисунок 3.1.1.24 – Блок-схема алгоритма 1 формирования массива моментов подач рабочей среды

Частоты пульсации рабочей среды являются частотами, возбуждающими вибрацию и знание их величин необходимы для анализа результатов вибродиагностики, как неотъемлемой части оценки технического состояния ПКА. Блок-схема алгоритма 2 определения частот пульсаций давления рабочей среды для цилиндров простого действия представлена на рисунке 3.1.1.25. В данном алгоритме 2 с помощью обработки значений отсортированного массива $t_{вых_{b,p}}$, формируется массив частот пульсаций рабочей среды $n_{вых_{f,p}}$ для p -ой ступени компрессора, вычисляемых с помощью выражений (3.1.1.24), (3.1.1.25):

$$n_{\text{вых}f,p} = \frac{1}{|t_{\text{вых}b,p} - t_{\text{вых}b-1,p}|} \quad (3.11.24)$$

$$n_{\text{вых}f,p} = \frac{1}{t_{\text{вых}b,p}} \quad (3.1.1.25)$$

где $f = \overline{1, N_n}$ – номер частоты для p -ой ступени ПКА,

N_n – общее количество учитываемых частот.

Данные выражения позволяют вычислять, соответственно, значения частот пульсации среды между соседними временами выхлопов и частоты, характерные для отдельных моментов выхлопов.

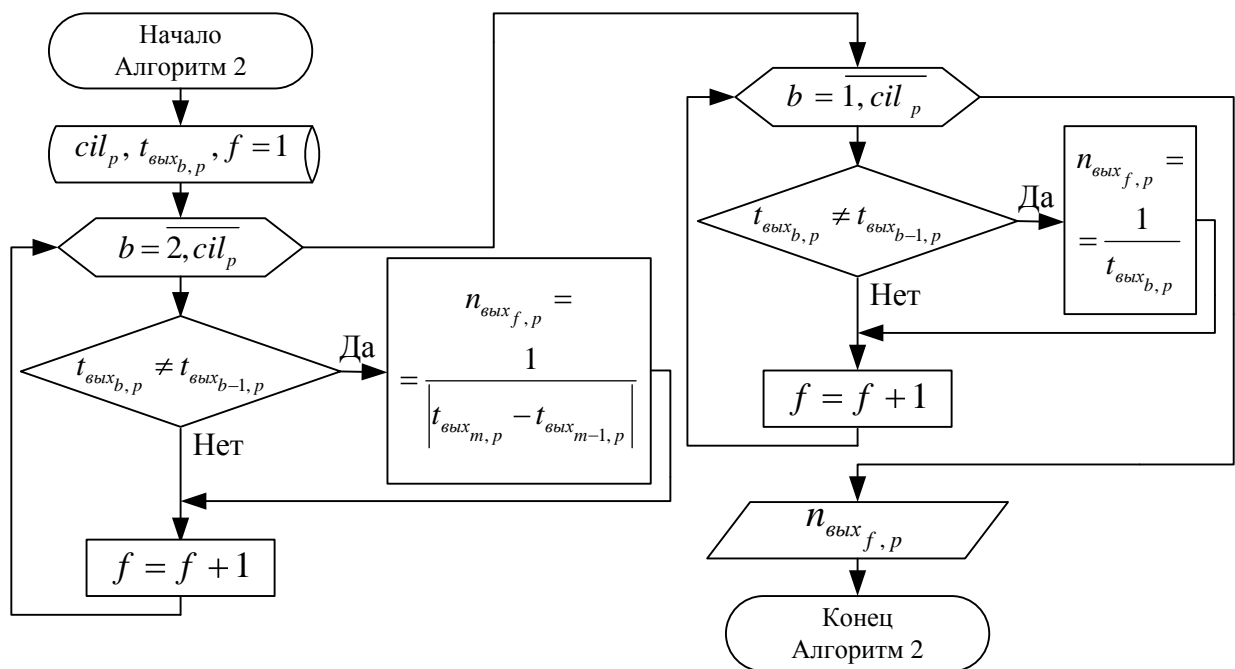


Рисунок 3.1.1.25 – Блок-схема алгоритма 2 определения частот пульсаций рабочей среды (случай цилиндров простого действия)

Для цилиндров двойного действия параметр b алгоритма 2 (см. рисунок 3.1.1.25) в первом случае будет изменяться в диапазоне $b = \overline{2, 2 \cdot cil_p}$, во втором случае – $b = \overline{1, 2 \cdot cil_p}$ по причине того, что каждый из цилиндров производит 2 выхлопа: при прямом и обратном ходе поршня.

3.1.2 Алгоритм расчета количества одновременно совершаемых подач рабочей среды

Число одновременно совершающих выхлоп в ступень компрессора цилиндров χ используется в методике расчёта объёма буферной ёмкости и позволяет оценить интенсивность локальных пульсаций рабочей среды. Число одновременно воздействующих на трубопровод цилиндров (коэффициент χ) равно числу цилиндров с совпадающими значениями времен выхлопов. Разработка алгоритма определения χ осуществлялась на основе источника [98] и анализа большого количества кинематических схем ПК [67]. Вычислительный алгоритм определения χ отличается тем, что расчёт числа цилиндров, одновременно совершающих выхлоп в ступень компрессора, осуществляется с использованием массива моментов выхлопа цилиндров ступени, сформированного с помощью алгоритма 1, приведённого на рисунке 3.1.1.24. Блок-схема алгоритма 3.1 расчёта χ для цилиндров простого действия приведена на рисунке 3.1.2.1.

Алгоритм 3.1 предназначен для расчёта параметра χ (количество одновременно совершаемых подач рабочей среды в ступень ПК), необходимого для определения объёма буферной ёмкости. Алгоритм отличается учётом данных о моментах подач рабочей среды в ступени ПК $\{t_{\text{выхл}}_{m,p}\}$ и количестве цилиндров в каждой ступени, что позволяет автоматизировать расчёт χ и оценить максимальную мощность выхлопа ПК. В теле Алгоритма происходит последовательное сравнение соответствующих (1-го, h -го, последнего) элементов массива $t_{\text{выхл}}_{b,p}$ с другими элементами этого же массива. Фиксация и подсчет числа совпадений производится соответствующими счетчиками ($k1$, $k2_h$, $k3$). Начальные значения счетчиков $k1$, $k3$ приняты равными единице для учета случая отсутствия совпадений моментов выхлопов (одновременно на трубопровод обвязки ПК воздействует один цилиндр – выхлопы не пересекаются по времени и производятся последовательно каждым цилиндром ступени). Определение числа χ p -ой ступени производится как нахождение максимального значения из величин полученных счетчиков, что дает возможность характеризовать максимальную мощность выхлопа в ступени. Для цилиндров двойного действия параметры m , h в алгоритме 3.1 будет принимать

максимальное значение, равное $2 \cdot cil_p$ по причине того, что каждый из цилиндров производит 2 выхлопа: при прямом и обратном ходе поршня.

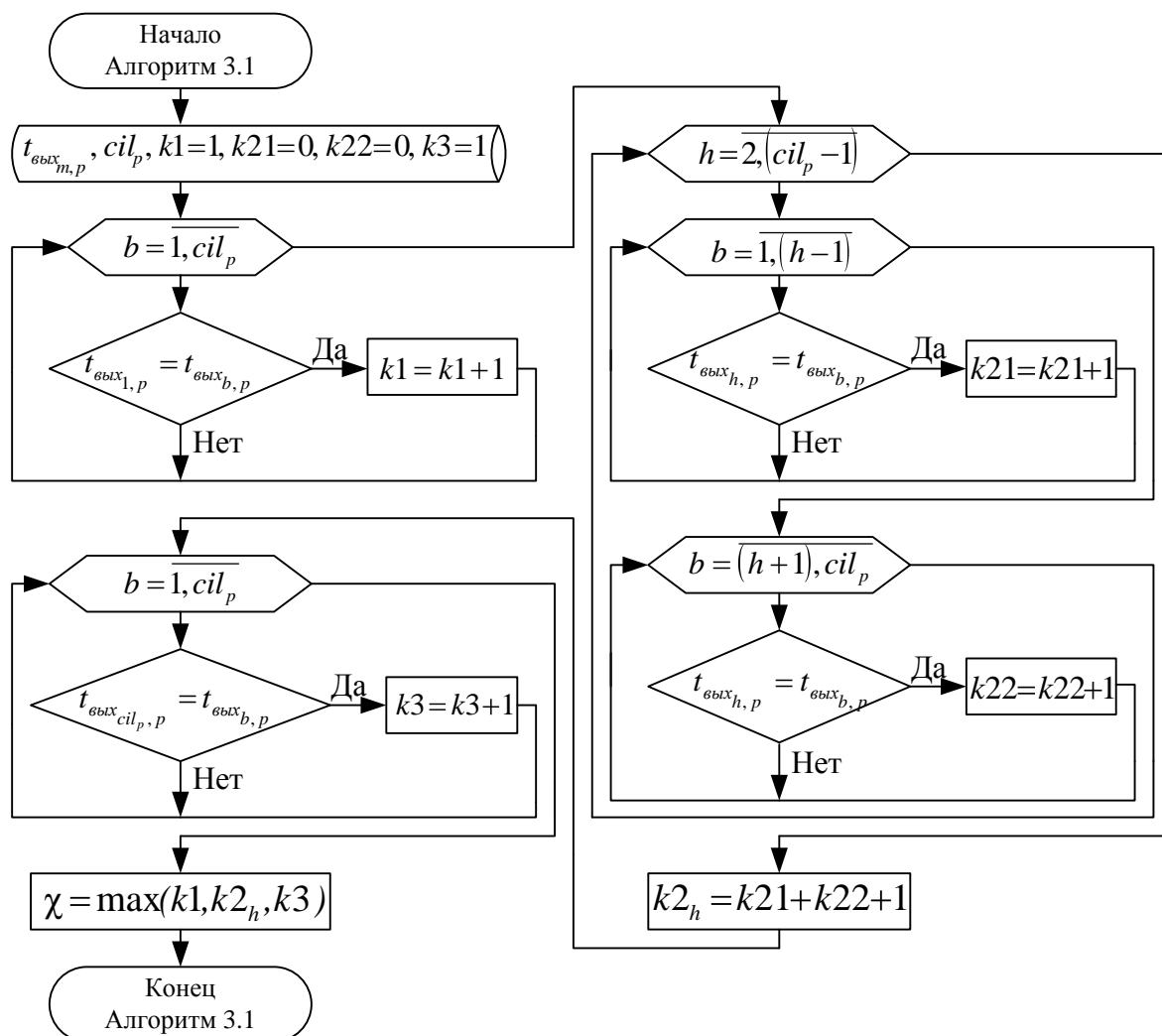


Рисунок 3.1.2.1 – Блок-схема алгоритма 3.1 расчета числа одновременно воздействующих на трубопровод цилиндров (цилиндр простого действия)

3.1.3 Алгоритм расчета числа подач рабочей среды за один поворот коленчатого вала

Коэффициент i , характеризующий число подач ступени за один оборот коленчатого вала, также используется при расчёте объёма буферной ёмкости по методике [98]. Обычно значение коэффициента i определяется с помощью специальных таблиц, которые содержат заданные кинематические схемы действия цилиндров. Однако в этих таблицах приведена только часть возможных вариантов кинематических схем, что делает определение числа подач ступени во многих случаях невозможным. С целью устранения описанного

недостатка был разработан алгоритм 3.2 (блок-схема представлена на рисунке 3.1.3.1), служащий для расчёта параметра i и отличающийся использованием данных о числе цилиндров в ступенях ПКА и максимальном количестве одновременно совершаемых в ступени подач рабочей среды, что позволяет автоматизировать расчёт значения числа подач рабочей среды за один оборот коленчатого вала для произвольной конструктивной базы ПК и независимо от количества ходов поршней.

Данный алгоритм использует выражения, полученные на основе анализа конструкции и принципа работы поршневой машины:

- разница числа цилиндров cil_p и числа одновременно воздействующих на трубопровод цилиндров p -ой ступени отражает количество несовпадающих по времени выхлопов цилиндров простого действия ($i = cil_p - \chi$).

- учет одного синхронного выхлопа числа совпадающих друг с другом цилиндров производится путем добавления к полученной величине единицы ($i = cil_p - \chi + 1$).

- так как один цилиндр двойного действия эквивалентен двум цилиндрам простого действия, то для случая цилиндров двойного действия справедливо $i = (cil_p - \chi + 1) \cdot 2$.

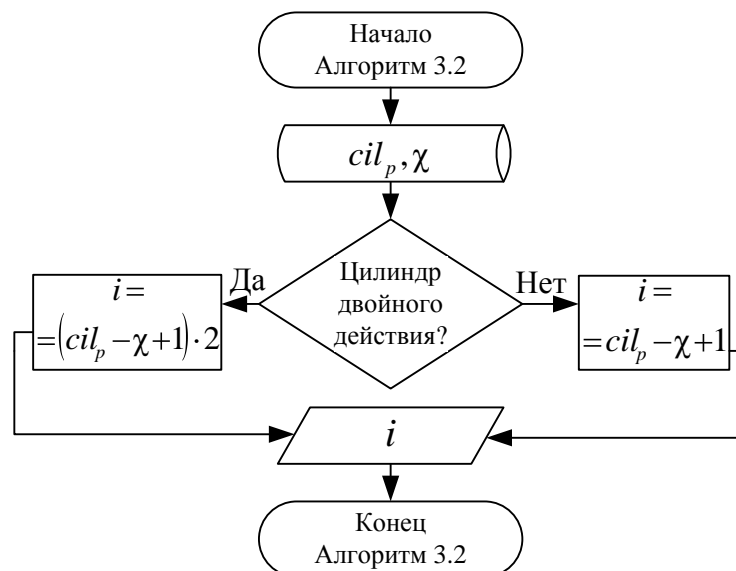


Рисунок 3.1.3.1 – Блок-схема алгоритма 3.2 расчета числа подач ступени за один оборот коленчатого вала

3.1.4 Алгоритм расчета показателя адиабаты рабочей среды

Показатель адиабаты k характеризует упругие свойства газа и используется в методиках расчёта объёма буферных ёмкостей ПКА [98] и рассеивающих энергию пульсаций рабочей среды дроссельных диафрагм [91]. Для однокомпонентных газовых сред значения k зависят от давления и температуры, являются экспериментальной величиной и приводятся в справочной литературе. Для многокомпонентных газовых сред k является функцией показателей адиабаты компонентов и состава газовой смеси и определяется по методике [67]. В химической технологии, сжимаемые газовые среды в большинстве случаев являются многокомпонентными, поэтому определение их показателя адиабаты k практически всегда сопряжено с математическими расчётами. С целью автоматизации расчёта показателя адиабаты газовой смеси был разработан вычислительный алгоритм 4, который отличается учётом компонентного состава газовой смеси, а также использованием базы данных показателей адиабаты k_s и молекулярной массы μ_s различных газовых компонентов, что позволяет автоматизировать определение значения k для рабочей среды произвольного состава. Исходными данными для работы алгоритма являются:

- $S.ob_s$ – объёмный процент s -го компонента сжимаемой среды, $s = \overline{1, Comp}$ (ФР «Компонент среды», q2, a2.1, рисунок 2.1.2, вводится пользователем комплекса программ);

- μ_s – молекулярная масса s -го компонента сжимаемой среды (ФР «Компонент среды», q3, a3.1, рисунок 2.1.2, хранится в постоянной части блока «База данных» комплекса программ).

- k_s – показатель адиабаты s -го компонента сжимаемой среды (ФР «Компонент среды», q4, a4.1, рисунок 2.1.2, хранится в постоянной части блока «База данных» комплекса программ);

Блок-схема алгоритма определения k приведена на рисунок 3.1.4.1 и включает два этапа. На первом этапе работы алгоритма вычисляются и суммируются объёмные доли компонентов смеси r_s , где $s = \overline{1, Comp}$ – номер компонента в газовой смеси, $Comp$ – общее количество компонентов в газовой смеси. На втором этапе вычисляется показатель адиабаты k для S -компонентной газовой смеси.

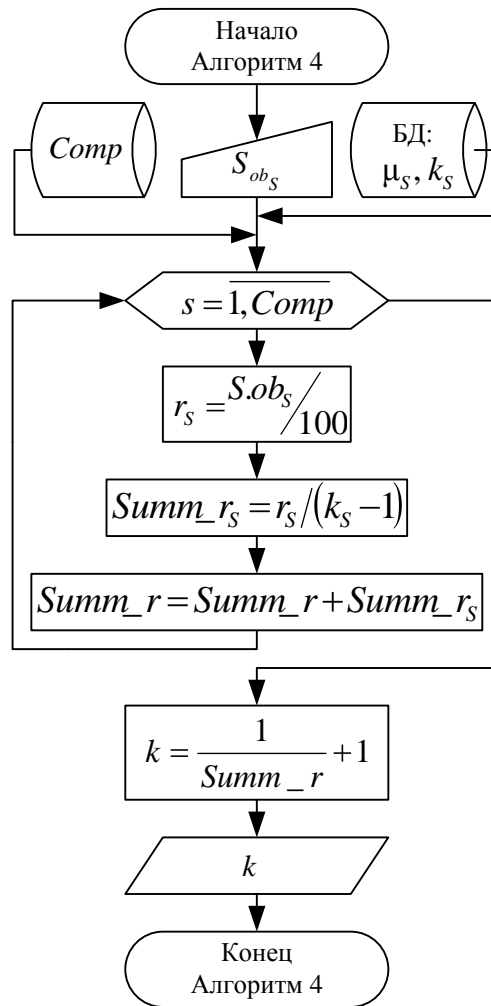


Рисунок 3.1.4.1 – Блок-схема алгоритма 4 определения показателя адиабаты смеси компонентов рабочей среды

3.1.5 Алгоритм расчета величины отношения времени всасывания и нагнетания ко времени одного оборота коленчатого вала

Отношение времени всасывания (нагнетания) ко времени одного оборота коленчатого вала r_i характеризует равномерность подачи рабочей среды в трубопроводы обвязки ступени ПКА и используется в методике [98] при определении допустимого объема буферной ёмкости так как является одной из составных частей этого расчета. На практике задача определения r_i решается преимущественно графически с помощью использования номограмм (рисунок 3.1.5.1) [98], [66] и ручного поиска решения по ним, что приводит к появлению субъективной ошибки. Процесс работы с номограммами для всасывающего и нагнетательного трубопроводов одинаков и состоит из трех шагов:

1. по отношению давления нагнетания к давлению всасывания ступени ε и показателю политропы расширения n_2 находят первое промежуточное значение r_{i-1} (шаг «вверх и влево»);
2. по первому промежуточному значению r_{i-1} и мертвому пространству цилиндра a_M определяют промежуточное значение ε_2 (шаг «влево и вверх»);
3. по промежуточному значению ε_2 и отношению длины шатуна к ходу поршня L/S определяют итоговое значение r_i (шаг «вверх и влево»).

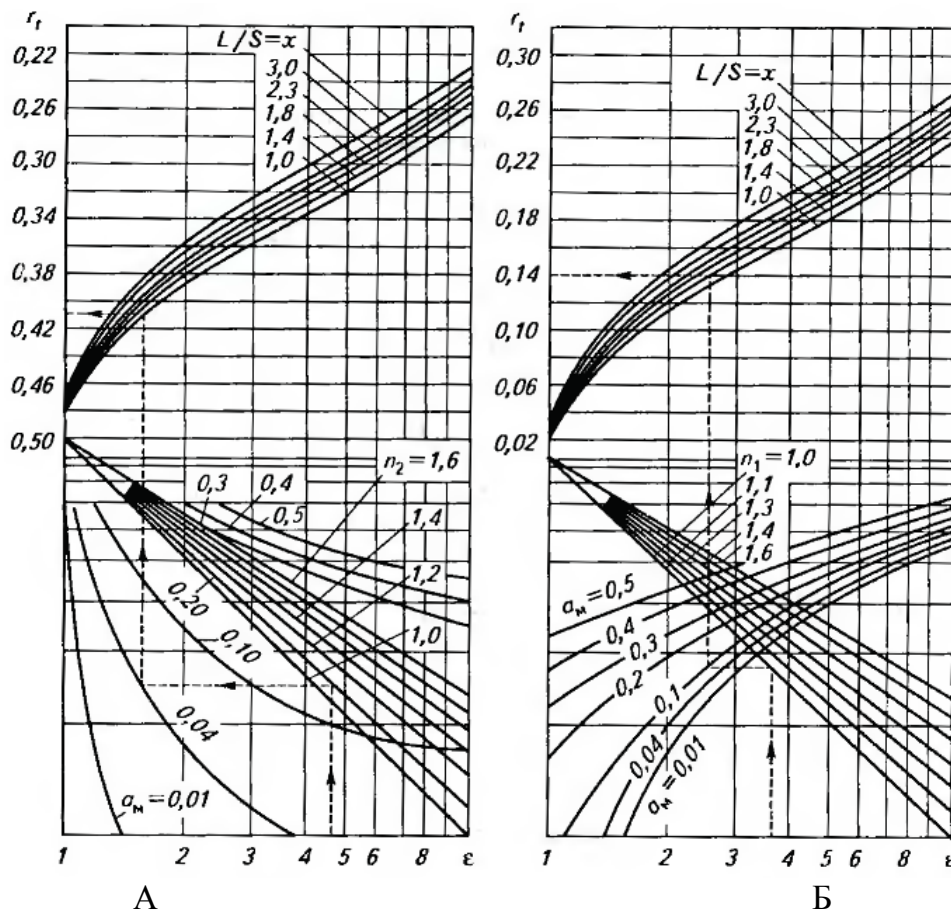


Рисунок 3.1.5.1 – Номограммы определения параметра r_i :

А – для всасывающего трубопровода; Б – для нагнетательного трубопровода

По причине наличия логарифмических шкал на осях номограмм графический метод не позволяет получить точное значение параметра r_i , поэтому для повышения точности его определения была создана модель, представленная семейством аппроксимационных зависимостей, приведённых в таблицах 3.1.5.1, 3.1.5.2. Аппроксимация осуществлялась с помощью специализированного программного средства *TableCurve*.

Таблица 3.1.5.1 – Набор зависимостей для всасывающего трубопровода

Шаг	Зависимость
1	$r_{t-1} = F_{1B}(\epsilon, n_2) = -57,778 - 119,476 \cdot n_2 \cdot \ln(n_2) + 76,298 \cdot n_2^2 + 28,751 \cdot n_2^2 \ln(n_2) - \dots$ $\dots - 20,639 \cdot n_2^3 - 0,2748 \cdot \epsilon \cdot \ln(\epsilon) + 0,126 \cdot \epsilon^{1.5} + 2,698 \cdot e^{-\frac{\epsilon}{3,909}} + 0,729 \cdot \epsilon^{0.5} \cdot \ln(\epsilon)$
2	$\epsilon_{-2} = F_{2B}(\epsilon_{t-1}, a_M) =$ $\frac{\left(1,218 + 1,454 \cdot \ln(r_{t-1}) + 5,196 \cdot a_M + 0,392 \cdot \ln(r_{t-1})^2 + \dots\right)}{\left(\dots + 26,319 \cdot a_M^2 - 12,375 \cdot a_M \cdot \ln(r_{t-1})\right)}, a_M \in [0,01; 0,3]$ $\frac{\left(1 + 1,291 \cdot \ln(r_{t-1}) - 17,101 \cdot a_M + 0,548 \cdot \ln(r_{t-1})^2 + \dots\right)}{\left(\dots + 45,626 \cdot a_M^2 - 5,656 \cdot a_M \cdot \ln(r_{t-1})\right)}, a_M \in (0,3; 0,5]$ $\frac{\left(1,311 - 1,579 \cdot \ln(r_{t-1}) + 0,342 \cdot a_M + 0,349 \cdot \ln(r_{t-1})^2 - \dots\right)}{\left(\dots - 0,714 \cdot a_M^2 + 1,716 \cdot a_M \cdot \ln(r_{t-1})\right)}, a_M \in (0,3; 0,5]$ $\frac{\left(1 - 1,306 \cdot \ln(r_{t-1}) - 1,299 \cdot a_M + 0,346 \cdot \ln(r_{t-1})^2 - \dots\right)}{\left(\dots - 2,145 \cdot a_M^2 + 1,967 \cdot a_M \cdot \ln(r_{t-1})\right)}$
3	$r_t = F_{3B}(\epsilon_{-2}, L, S) =$ $\left\{ \frac{\left(0,48 - 0,215 \cdot \ln(L/S) + 0,153 \cdot \ln(\epsilon_{-2}) + 0,022 \cdot \ln(L/S)^2 - 0,084 \cdot \ln(\epsilon_{-2})^2 + \dots\right)}{\left(\dots + 0,036 \cdot \ln(L/S) \cdot \ln(\epsilon_{-2})\right)}, L/S \leq 3 \right.$ $\left. \frac{\left(1 - 0,438 \cdot \ln(L/S) + 0,752 \cdot \ln(\epsilon_{-2}) + 0,04 \cdot \ln(L/S)^2 - 0,241 \cdot \ln(\epsilon_{-2})^2 + \dots\right)}{\left(\dots + 0,038 \cdot \ln(L/S) \cdot \ln(\epsilon_{-2})\right)}, L/S > 3 \right.$ $\left. \left(0,189 - \frac{1,109}{\epsilon_{-2}} + \frac{34,376}{\epsilon_{-2}^2} - \frac{298,497}{\epsilon_{-2}^3} + \frac{1405,557}{\epsilon_{-2}^4} - \frac{4063,573}{\epsilon_{-2}^5} + \dots \right)$ $\left. \left(\dots + \frac{7538,571}{\epsilon_{-2}^6} - \frac{9014,722}{\epsilon_{-2}^7} + \frac{6725,079}{\epsilon_{-2}^8} - \frac{2849,116}{\epsilon_{-2}^9} + \frac{523,726}{\epsilon_{-2}^{10}} \right) \right\}, L/S > 3$

Таблица 3.1.5.2 – Набор зависимостей для нагнетающего трубопровода

Шаг	Зависимость
1	$r_{t-1} = F_{1H}(\epsilon, n_2) =$ $= -8,452 + 17,106 \cdot n_2 + \frac{10,413}{\epsilon} - 12,073 \cdot n_2^2 - \frac{2,464}{\epsilon^2} + 1,308 \cdot \frac{n_2}{\epsilon} + 3,158 \cdot n_2^3 + \dots$ $\dots + \frac{5,487}{\epsilon^3} - 5,101 \cdot \frac{n_2}{\epsilon^2} + 0,662 \cdot \frac{n_2^2}{\epsilon}$
2	$\epsilon_{-2} = F_{2H}(\epsilon_{t-1}, a_M) = \frac{\left(0,081 + 0,261 \cdot r_{t-1} + 0,062 \cdot r_{t-1}^2 - 3,492 \cdot a_M\right)}{\left(-0,108 \cdot r_{t-1} + 0,767 \cdot a_M - 2,785 \cdot a_M^2 + 4,067 \cdot a_M^3\right)}$

Шаг	Зависимость
3	$r_t = F_{3H}(\varepsilon, L, S) =$ $= \begin{cases} \frac{(3,684 + 8,264 \cdot \varepsilon - 2^2 - 4,147 \cdot \varepsilon - 2^4 - 0,449 \cdot \varepsilon - 2^6 + 28,739 \cdot \varepsilon - 2^2 - 28,821 \cdot \varepsilon - 2^4)}{(0,018 - 0,001 \cdot \ln(L/S) + 0,266 \cdot \ln(\varepsilon - 2))} & L/S \leq 3 \\ \frac{(-0,344 \cdot \ln(L/S) + 0,057 \cdot \ln(L/S)^2 + 1,299 \cdot \ln(L/S) - 0,243 \cdot \ln(\varepsilon - 2)^2)}{} & L/S > 3 \end{cases}$

Входными переменными модели являются (вводятся пользователем комплекса программ):

- P_B – давление рабочей среды со стороны всасывания (на входе) ступени ПКА (ФР «Ступень», q2, а2.1, рисунок 2.2.2);
- P_H – давление рабочей среды со стороны нагнетания (на выходе) ступени ПКА (ФР «Ступень», q4, а4.1, рисунок 2.2.2);
- t_B – температура рабочей среды со стороны всасывания (на входе) ступени ПКА (ФР «Ступень», q2, а2.1, рисунок 2.2.2);
- t_H – температура рабочей среды со стороны нагнетания (на выходе) ступени ПКА (ФР «Ступень», q5, а5.1, рисунок 2.2.2);
- a_M – относительная величина мертвое пространство цилиндра (ФР «Корпус цилиндра», q6, а6.1, рис. 2.2.7);
- L – длина шатуна (ФР «Шатун», q4, а4.1, рисунок 2.2.5);
- S – ход поршня (ФР «Поршень», q4, а4.1, рисунок 2.2.10).

Необходимые для работы с номограммой значения степени сжатия – ε и показателя политропы – n_2 определяются автоматически с помощью соответствующих выражений (3.1.5.1), (3.1.5.2) на основе введенных пользователем данных.

$$\varepsilon = P_H / P_B \quad (3.1.5.1)$$

$$n_2 = 1 / \left(1 - \frac{\ln(t_H / t_B)}{\ln(\varepsilon)} \right) \quad (3.1.5.2)$$

Последовательность определения r_t для всасывающего и нагнетательного трубопровода одинакова и состоит из трёх шагов, указанных в таблицах 3.1.5.1, 3.1.5.2.

Блок-схема алгоритма 5 определения значения r_t , соответствующая указанным в таблицах 4.1.5.1, 4.1.5.2 шагам, представлена на рисунке 4.1.5.1. **Алгоритм 5** предназначен для расчёта отношения времени всасывания (нагнетания) поршня ко времени одного оборота коленчатого вала – r_t и отличается использованием семейства аппроксимационных моделей номограмм, описывающих взаимосвязь между степенью сжатия, показателем политропы рабочей среды, долей мёртвого пространства цилиндра, величине отношения длины шатуна к ходу поршня и искомой величины, что позволяет не только автоматизировать процесс определения параметра r_t , но и повысить точность получаемого результата.

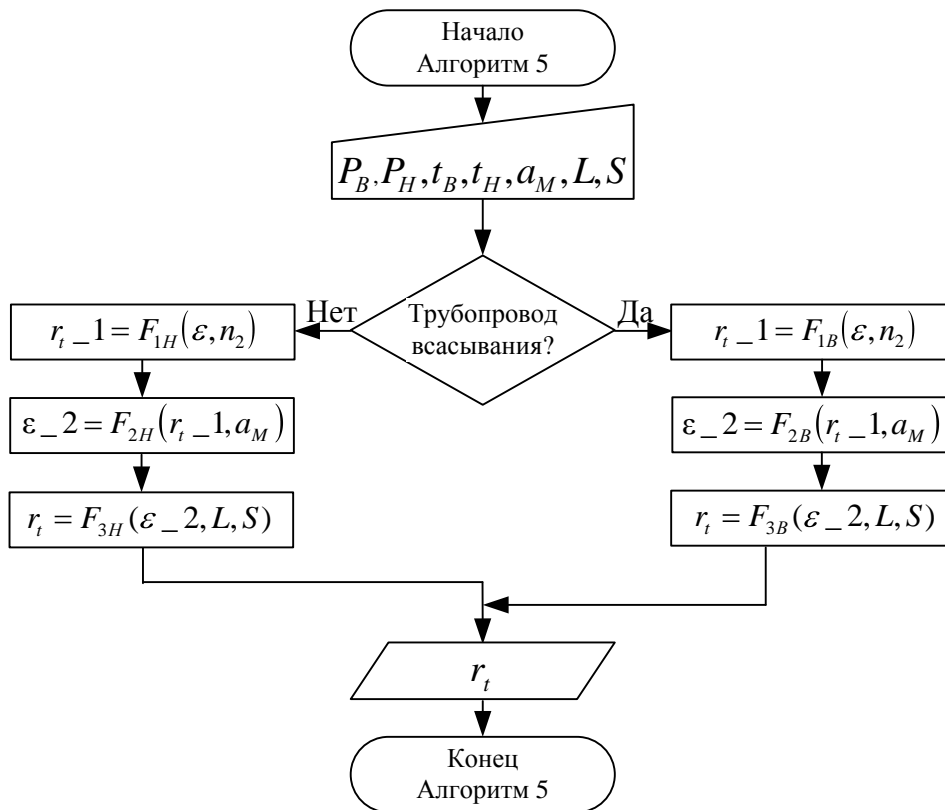


Рисунок 4.1.5.1 – Блок-схема алгоритма 5 определения значения r_t

Первоначальная оценка адекватности полученной математической модели производилась при помощи вычисления средней ошибки аппроксимации каждого шага работы с номограммой для всасывающего и нагнетательного трубопроводов. Величина средней ошибки аппроксимации не должна превышать 8-10% (максимально допустимое значение) по выражению (3.1.5.3):

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \tilde{y}_i|}{y_i} \cdot 100\% \quad (3.1.5.3)$$

где $i = \overline{1, N}$ – порядковый номер расчётного или фактического значения результативного признака;

N – общее количество расчётных или фактических значений результативного признака;

y_i – фактическое i -ое значение результативного признака;

\tilde{y}_i – расчётное i -ое значение результативного признака, полученное с помощью математической модели.

В качестве значений результативного признака по опыту принимались точечные значения графических зависимостей, полученные в результате формализации исходных данных из номограмм. Таблицы расчётных значений для определения средней ошибки аппроксимации представлены в приложениях 1.1-1.6.

Установление значимости функции производилось при использовании коэффициента нелинейной множественной корреляции R [119] и его значимостью t_R для 5% уровня, определяемых, соответственно, по выражениям (3.1.5.4), (3.1.5.5) (таблица 3.1.5.3).

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1) \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2}{(N-K-1) \sum_{i=1}^N (y_i - y_{CP})^2}}, \quad (3.1.5.4)$$

$$t_R = \frac{R \cdot \sqrt{N-K-1}}{1-R^2} > 2, \quad (3.1.5.5)$$

где $K=2$ – число действующих факторов;

y_{CP} – среднее значение результативного признака.

В таблице 3.1.5.3 представлены результаты оценки точности аппроксимации, коэффициента нелинейной множественной корреляции, значимости t_R зависимостей определения r_f . Таблицы расчётных значений для определения коэффициента нелинейной

множественной корреляции R и его значимости t_R для 5% уровня представлены в приложениях 2.1-2.6.

Таблица 3.1.5.3 – Результаты оценки точности аппроксимации, коэффициента нелинейной множественной корреляции, значимости t_R зависимостей определения r_t

Тип трубопровода	Шаг	Средняя ошибка аппроксимации $\bar{\varepsilon}$, %	Коэффициент нелинейной множественной корреляции R	Значимость t_R
всасывающий	1	2,825	0,99877	2919,451
всасывающий	2 $a_M \in [0.01; 0.3]$	2,806	0,99812	1634,327
всасывающий	2 $a_M \in (0.3; 0.5]$	0,748	0,99885	2349,186
всасывающий	3, $L/S > 3$	0,053	0,9999979	18343212,961
всасывающий	3, $L/S \leq 3$	0,236	0,99984	23877,917
нагнетательный	1	0,860	0,99988	32278,012
нагнетательный	2	1,844	0,99902	4375,287
нагнетательный	3, $L/S > 3$	0,169	0,999997	1341818,073
нагнетательный	3, $L/S \leq 3$	1,458	0,99986	28610,353

Результат проведенных оценок показал, что статические математические модели определения отношения времени всасывания (нагнетания) ко времени одного оборота коленчатого вала для всасывающего и нагнетательного трубопроводов признаются адекватными и значимыми.

3.1.6 Информационно-вычислительный алгоритм расчета оптимального размера объема буферной ёмкости, соответствующего нормативно-допустимой степени неравномерности давления

Применение буферных ёмкостей является одним из наиболее распространённых способов гашения энергии пульсаций рабочей среды в трубопроводах обвязки, расположенных как на всасе, так и на выхлопе поршневых компрессоров. Основным параметром, определяющим эффективность работы буферных ёмкостей, является их объём V_b . При небольшом объёме эффективность гашения пульсаций будет низкой, с увеличением объёма эффективность гашения будет возрастать, но будет возрастать и металлоёмкость буфера. В связи со сказанным оптимальным будет тот объём буферной ёмкости, который минимально необходим для эффективного гашения пульсаций. Количественной оценкой эффективности гашения пульсаций рабочей среды является степень неравномерности давления δ , возникающая на всасе и выхлопе цилиндров при работе ПК. В соответствии с требованиями [99] объём или вместимость буферных ёмкостей должны удовлетворять условию (3.1.6.1):

$$\delta \leq 3 \cdot P^{-0.34}, \quad (3.1.6.1)$$

где P , в зависимости от условий расчёта, принимается равным P_B , либо P_H (ФР «Ступень», q2, a2.1, q4, a4.1, рисунок 2.2.2).

Рекомендуется ограничивать степень неравномерности давления следующими значениями: для всасывающей линии при атмосферном давлении всасывания $\delta=0.02\dots0.06$; для всасывающих линий дожимающих компрессоров и для межступенчатых нагнетательных линий $\delta=0.02\dots0.04$; в компрессорах большой производительности при газах повышенной плотности (близкой к воздуху и больше) $\delta=0.02$ [67]. Исходя из сказанного выше, для расчёта величины объёма буферной ёмкости также целесообразно использовать методику [98], которая учитывает значение параметра δ . На практике определение V_b по этой методике осуществляется графическим способом при помощи номограмм представленных на рисунке 3.1.6.1.

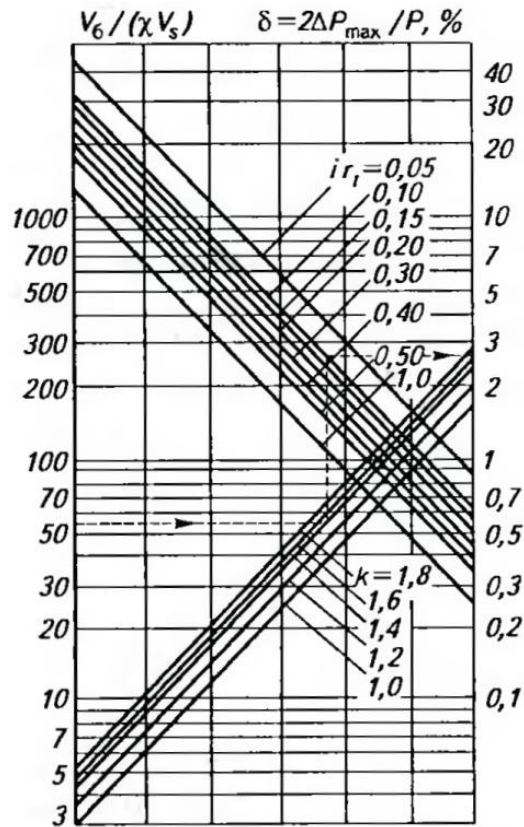


Рисунок 3.1.6.1 – Номограмма для расчета допустимого объема буферной емкости для гашения колебаний давления газа [98]

Процесс работы с номограммой для расчета буферной емкости для гашения колебаний давления газа состоит из двух шагов:

1. по степени неравномерности давления δ через значение произведения $i \cdot r_1$ определяется промежуточное значение XI (шаг «влево – вниз»);
2. по промежуточному значению XI и переменной k определяется значение величины $V_b / (\chi \cdot V_s)$ (шаг «вниз – влево»).

Применение графического метода достаточно субъективно, что вместе логарифмическими шкалами на осях номограммы не позволяет оперативно получить точное значение величины V_b , поэтому для повышения точности определения объема буферных емкостей была создана статическая математическая модель. Модель представляет собой совокупность математических зависимостей аппроксимирующих номограммы на рисунке 3.1.6.1 и отличающаяся тем, что позволяет автоматизировать процесс определения объема буферной емкости в соответствии с условием (3.1.6.1). Аппроксимация номограмм осуществлялась с помощью специализированного программного средства *TableCurve*, результаты аппроксимации сведены в таблицу 3.1.6.1.

Входными параметрами статической математической модели являются следующие описанные выше переменные:

- δ – степень неравномерности давления (дол.ед.);
- r_t – отношение времени всасывания (нагнетания) ко времени одного оборота коленчатого вала (рисунок 3.1.4.2);
- i – число подач ступени за один оборот коленчатого вала (рисунок 3.1.2.4);
- k – показатель адиабаты рабочей среды (рисунок 3.1.3.1).

Таблица 3.1.6.1 – Набор зависимостей для расчёта минимально необходимого V_b

Шаг	Зависимость
1	$X1 = F_1(i, r_t) = \begin{cases} \frac{(-0,864 - 32,066 \cdot i \cdot r_t + 196,904 \cdot (r_t)^2 - 439,459 \cdot (r_t)^3 - 1,4626 \cdot \ln(\delta)) \cdot (i \cdot r_t \in [0,05; 0,2])}{(-0,055 \cdot i \cdot r_t + 0,0267 \cdot \ln(\delta) - 0,014 \cdot \ln(\delta)^2 + 0,005 \cdot \ln(\delta)^3)} \\ \frac{6,41 - 3,228 \cdot i \cdot r_t + 1,355 \cdot (r_t)^2 - 0,738 \cdot \ln(\delta) + 0,031 \cdot \ln(\delta)^3}{1 - 0,06 \cdot i \cdot r_t + 0,149 \cdot \ln(\delta) - 0,023 \cdot \ln(\delta)^2 - 0,002 \cdot \ln(\delta)^3}, i \cdot r_t \in (0,2; 1] \end{cases}$
2	$\ln(X2) = F_2(X1, k) = 2095,303 + 15,082 \cdot X1 - 1,39 \cdot X1^{1,5} - 12,068 \cdot X1^{0,5} \cdot \ln(X1) + \dots$ $\dots + 9175,208 \cdot k^{0,5} - 11245,837 \cdot \ln(k) - \frac{9246,465}{k^{0,5}} - 5536,171 \cdot e^{-k}$
3	$V_b = e^{\ln(X2)} \cdot \chi \cdot V_s,$

где V_s – объем газа, всасываемого (нагнетаемого) цилиндром компрессора, вычисляемый по выражению 3.1.6.2:

$$V_s = 0,785 \cdot d_{II}^2 \cdot S, \quad (3.1.6.2)$$

где d_{II} – внешний диаметр поршня (ФР «Поршень», q8, а8.1, рисунок 2.2.10, вводится пользователем комплекса программ);

S – длина хода поршня (ФР «Поршень», q4, а4.1, рисунок 2.2.10, вводится пользователем комплекса программ).

Блок-схема разработанного алгоритма б определения V_b приведена на рисунке 3.1.6.2. Алгоритм б отличается использованием семейства аппроксимационных моделей

номограмм, описывающих взаимосвязь между объемом буферной ёмкости, показателем адиабаты, числом, одновременно совершаемым подач рабочей среды в ступень ПКА, числом подач рабочей среды за один оборот КВ, отношением времени всаса (нагнетания) ко времени одного оборота КВ, объемом цилиндра и степенью неравномерности давления, что позволяет автоматизировать и повышать точность определения вместимости буфера V_b , обеспечивающей нормативно-допустимую величину степени неравномерности давления δ в трубопроводных системах ПКА (выражение 4.1.6.1).

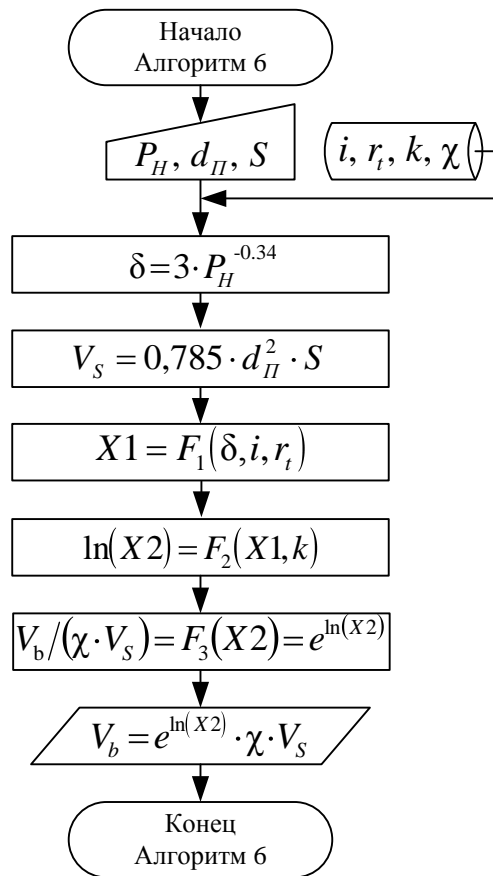


Рисунок 3.1.6.2 – Блок-схема работы алгоритма 6 расчёта оптимального объёма буферной ёмкости

Проводя сравнение расчетного значения буферной емкости с объемом емкости, установленной фактически на рассматриваемом объекте, можно сделать вывод о достаточности или недостатке объема емкости для нормального функционирования поршневой компрессорной машины при данных технологических параметрах.

Для первоначальной оценки адекватности полученной математической модели использована средняя ошибка аппроксимации для каждого шага работы с номограммой

для всасывающего и нагнетательного трубопровода, величина которой не должна превышать 8-10% (максимально допустимое значение) по выражению (3.1.5.3). Таблицы расчетных значений для определения средней ошибки аппроксимации представлены в приложении 3.1.3.2.

Установление значимости функции производилось при использовании коэффициента нелинейной множественной корреляции R [119] и его значимостью t_R для 5% уровня, определяемых, соответственно, по выражениям (3.1.5.4), (3.1.5.5). Результаты расчёта средней ошибки аппроксимации, коэффициента нелинейной множественной корреляции, значимости t_R статической математической модели приведены в таблице 3.1.6.2. Таблицы расчетных значений для определения коэффициента нелинейной множественной корреляции R и его значимости t_R для 5% уровня представлены в приложениях 3.1, 3.2.

Таблица 3.1.6.2 – Средняя ошибка аппроксимации, коэффициент нелинейной множественной корреляции, значимость t_R шагов работы с номограммой для расчета буферной емкости

Номер шага	Средняя ошибка аппроксимации $\bar{\varepsilon}$, %	Коэффициент нелинейной множественной корреляции R	Значимость t_R
1 $i \cdot r_i \in [0,05; 0,2]$	0,409	0,9999304	57016,351
1 $i \cdot r_i \in (0,2; 1]$	0,063	0,9999991	5263060,763
2	1,082	0,9999681	88612,555

По результатам оценки можно говорить, что статическая математическая модель определения отношения величины буферной емкости на стороне всасывания (нагнетания) к объему газа, всасываемым (нагнетаемым) ступенью/одним цилиндром признается адекватной и значимой.

3.2 Итерационный алгоритм расчета диаметра расточки сглаживающей диафрагмы

Наиболее доступным способом снижения энергии пульсаций рабочей среды является установка дроссельных диафрагм. Введение сопротивления в трубопровод в виде диафрагмы приводит к рассеиванию энергии колебаний рабочей среды, изменяют амплитудно-частотный спектр рабочей среды в трубопроводной системе [98]. Использование диафрагм является не самым эффективным способом борьбы с повышенной вибрацией, так как при ее установке появляются потери статического давления (которые ниже, чем при резонансе колебаний потока газа), поэтому его обычно применяют одновременно с другими способами, например с установкой буферных ёмкостей. Эффективность работы диафрагмы зависит от диаметра её отверстия d или диаметра расточки. Величина d является функцией от внутреннего диаметра трубопровода D и скорости газового потока в месте установки диафрагмы V_{CP} , а также скорости звука в рабочей среде при адиабатических условиях C . Оптимальное значение диаметра расточки диафрагмы с достаточной точностью определяется по формуле (3.2.1) [91], [96]:

$$d = D \cdot \left(V_{CP} / C \right)^{0,25}, \quad (3.2.1)$$

Скорость звука C определяется по уравнению (3.2.2) [120]:

$$C = \sqrt{k \cdot R \cdot t}, \quad (3.2.2)$$

где k – показатель адиабаты (алгоритм 4, рисунок 3.1.4.1);

t – температуры рабочей среды;

$R_{уд} = R_{уН} / \mu_{СМ}$ – удельная газовая постоянная;

$R_{уН} = 8314,4$ – универсальная газовая постоянная для 1 кмоль газа (Дж/(кмоль*град));

$\mu_{СМ}$ – молекулярная масса рабочей среды (кмоль).

В связи с тем, что для расчёта k и $\mu_{СМ}$ требуется нахождение справочных величин, определение d может занять достаточно много времени. С целью ускорения процесса вычисления d был разработан алгоритм 7, который предназначен для расчёта дроссельных диафрагм и отличается учётом значений диаметра трубопровода; температуры, давления, молекулярной массы, показателя адиабаты, расхода и скорости звука рабочей среды;

универсальной газовой постоянной и заданного процента гидравлических потерь, что позволяет автоматизировать определение оптимального диаметра отверстия диафрагмы, сглаживающей пульсации давления рабочей среды. Его блок-схема приведена на рисунке 3.2.1. Исходными параметрами для работы алгоритма являются:

- P – давление рабочей среды в месте установки диафрагмы (кгс/см^2) (ФР «Ступень», q2, a2.1 или q4, a4.1, рисунок 2.2.2);
- t – температура рабочей среды в месте установки диафрагмы ($^{\circ}\text{C}$) (ФР «Ступень», q3, a3.1 или q5, a5.1, рисунок 2.2.2);
- μ_s – молекулярная масса s -го компонента рабочей среды (ФР «Компонент среды», q2, a3.1, рисунок 2.2.2);
- S_{ob_s} – объёмный процент s -го компонента рабочей среды, $s = \overline{1, Comp}$ (ФР «Компонент среды», q2, a2.1, рисунок 2.2.2);
- W_0 – номинальная производительность ПКА ($\text{м}^3/\text{час}$) (ФР «Технологический режим», q4, a4.1, рисунок 2.2.2, вводится пользователем);
- $ksns$ – коэффициент снижения производительности ступени (вводится пользователем и зависит от условий обвязки поршневого компрессора);
- D_H – наружный диаметр трубопровода в месте расположения диафрагмы, мм (вводится пользователем или значение устанавливается автоматически по ассоциативной связи с соответствующим трубопроводом);
- S_{TP} – толщина стенки трубопровода в месте расположения диафрагмы, мм (вводится пользователем или значение устанавливается автоматически по ассоциативной связи с соответствующим трубопроводом);
- Δ_{MAX} – допустимые гидравлические потери диафрагмы в процентах от среднего давления в трубопроводе (вводится пользователем);
- k – показатель адиабаты (алгоритм 4, рисунок 3.1.4.1).

Для решения данной задачи используются следующие константы:

- $g = 9.807$ – ускорение свободного падения (м/с^2);
- $V_{МОЛ} = 22,4$ – молярный объем (л/моль);
- $P_0 = 0.101$ – давление при нормальных условиях (МПа).

Расчет осуществляется в два этапа. На первом определяется диаметр расточки d , мм, по формуле оптимального диаметра по выражению (3.2.1) и вычисляются следующие величины:

- ρ_0 – плотность рабочей среды при нормальных условиях (кг/м^3);
- ρ – плотность среды при рабочих условиях (кг/м^3);
- W – объемный расход среды при рабочих условиях ($\text{м}^3/\text{с}$).

На втором этапе расчета осуществляется проверка соответствия процента гидравлического сопротивления диафрагмы от среднего давления в трубопроводе максимальному заданному значению $P\Delta_{\text{MAX}}$. Если процент гидравлического сопротивления диафрагмы от среднего давления в трубопроводе больше максимального заданного значения, то к рассчитанному значению диаметра расточки добавляется 1 мм и расчет повторяется. Расчет прекращается, если процент гидравлического сопротивления диафрагмы от среднего давления в трубопроводе не будет превышать максимального заданного значения. Величины, определяемые на втором этапе:

- w_d – скорость рабочей среды в диафрагме (м/с);
- F_d – площадь сечения отверстия диафрагмы (мм^2);
- F_T – площадь проходного сечения трубопровода (мм^2);
- ξ_d – коэффициент сопротивления диафрагмы;
- Δp – гидравлическое сопротивление диафрагмы (МПа);
- Δ – процент гидравлического сопротивления диафрагмы от среднего давления в трубопроводе.

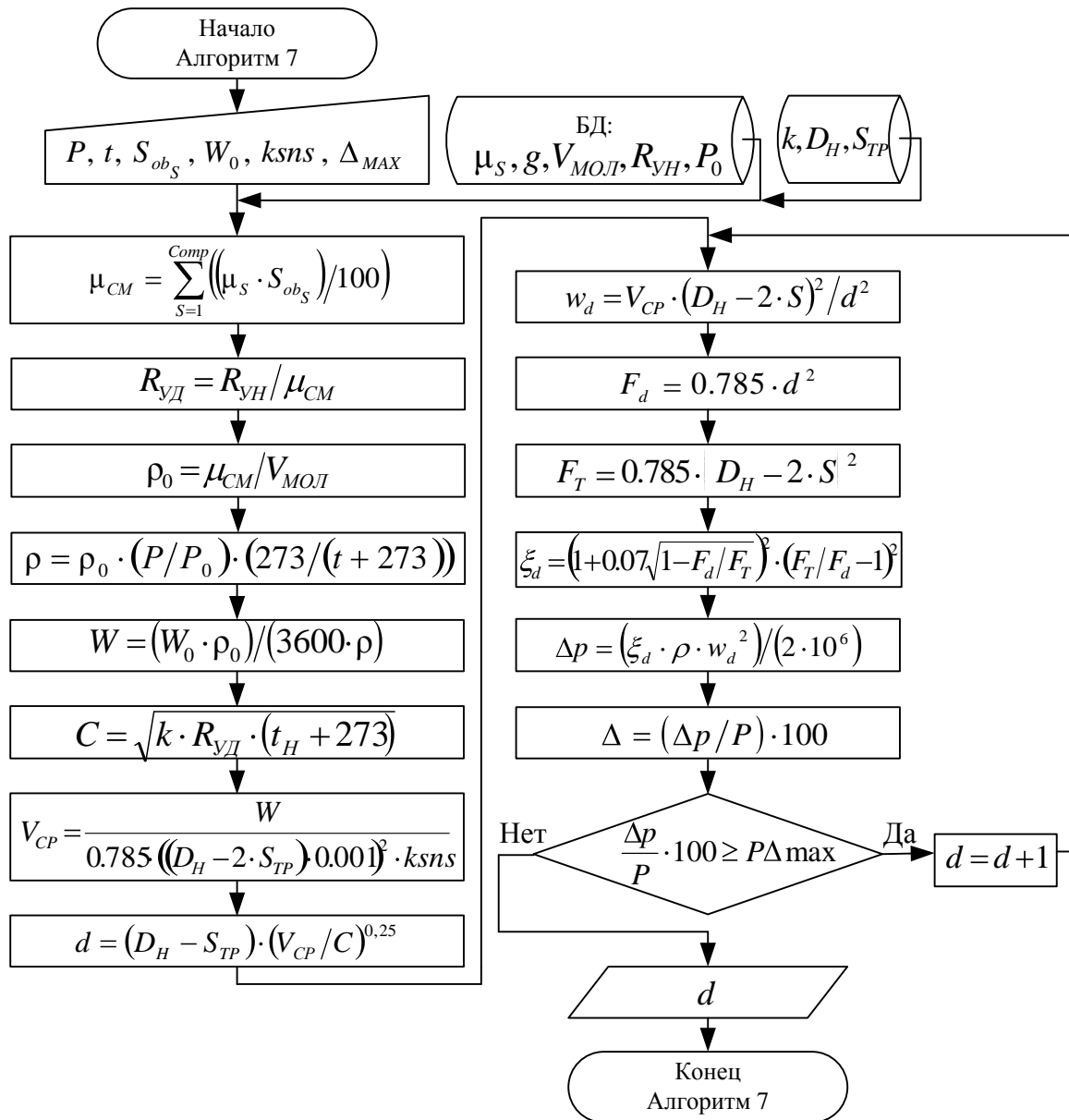


Рисунок 3.2.1 – Блок-схема алгоритма 7 расчета диаметра расточки сглаживающей диафрагмы

3.3 Итерационные алгоритмы выявления резонансных частот колебаний трубопроводных систем поршневого компрессорного агрегата

В соответствии с требованиями ТОиР в процессе эксплуатации ПКА производится периодическое измерение параметров вибрации ПК, его аппаратного оформления и трубопроводов обвязки, в процессе которого формируются массивы значений вибропараметров. Для определения причин повышенной вибрации осуществляется сравнение значений измеренных частот вибрации и их гармоник с частотами пульсаций рабочей среды. По степени совпадения этих частот, с учётом заданной погрешности, может быть сделан вывод о причине повышенной вибрации. Решение указанной задачи

осложнено необходимостью обработки значительных объемов информации измеренных частот с учетом минимальной и максимальной разностей сравнения, при которой измеренная частота считается совпадающей с рассчитанной. По указанным причинам одним из недостатков существующей практики решение данной задачи является значительные затраты временных ресурсов. Для преодоления указанного недостатка был разработан алгоритм для выявления резонансных частот колебаний элементов ПКА. Исходными данными для работы этого алгоритма являются:

- Массив рассчитанных возбуждающих частот $n_{\text{вых } f, p}$ (алгоритм 2, рисунок 3.1.1.23);
- Массив измеренных частот $n_{\text{изм } i}$, $i = \overline{1, N_{\text{изм}}}$ ($N_{\text{изм}}$ – количество измеренных частот), полученный с помощью системы вибромониторинга или при проведении экспертизы промышленной безопасности;
- Значение минимальной $\Delta_{\text{MIN}} < 0$ и максимальной $\Delta_{\text{MAX}} > 0$ разницы сравнения между расчетной и измеренной частотой, при которой они принимаются в качестве совпадающих (Гц) (значения находятся в зависимости от погрешности измеряющего вибратора прибора и методики первичной обработки данных вибрации; в общем случае данные величины задаются пользователем).

Блок схема работы алгоритма 8 сравнения рассчитанных возбуждающих и доминирующих измеренных частот представлена на рисунке 3.3.1. Работа данного алгоритма заключается в последовательном сравнении каждого элемента массива измеренных частот $n_{\text{изм } i}$ с каждым элементом массива возбуждающих частот $n_{\text{вых } f, p}$ с учетом значения минимальной и максимальной границы сравнения. Измеренная частота $n_{\text{изм } i}$ считается совпадающей с возбуждающей частотой $n_{\text{вых } f, p}$, если выполняется неравенство (4.3.1).

$$n_{\text{вых } f, p} + \Delta_{\text{MIN}} \leq n_{\text{изм } i} \leq n_{\text{вых } f, p} + \Delta_{\text{MAX}} \quad (4.3.1)$$

Измеренные частоты, удовлетворяющие неравенству (4.2.1) составляют массив k_i (переименовать в $n_{\text{рез}}$), являющийся результатом работы алгоритма.

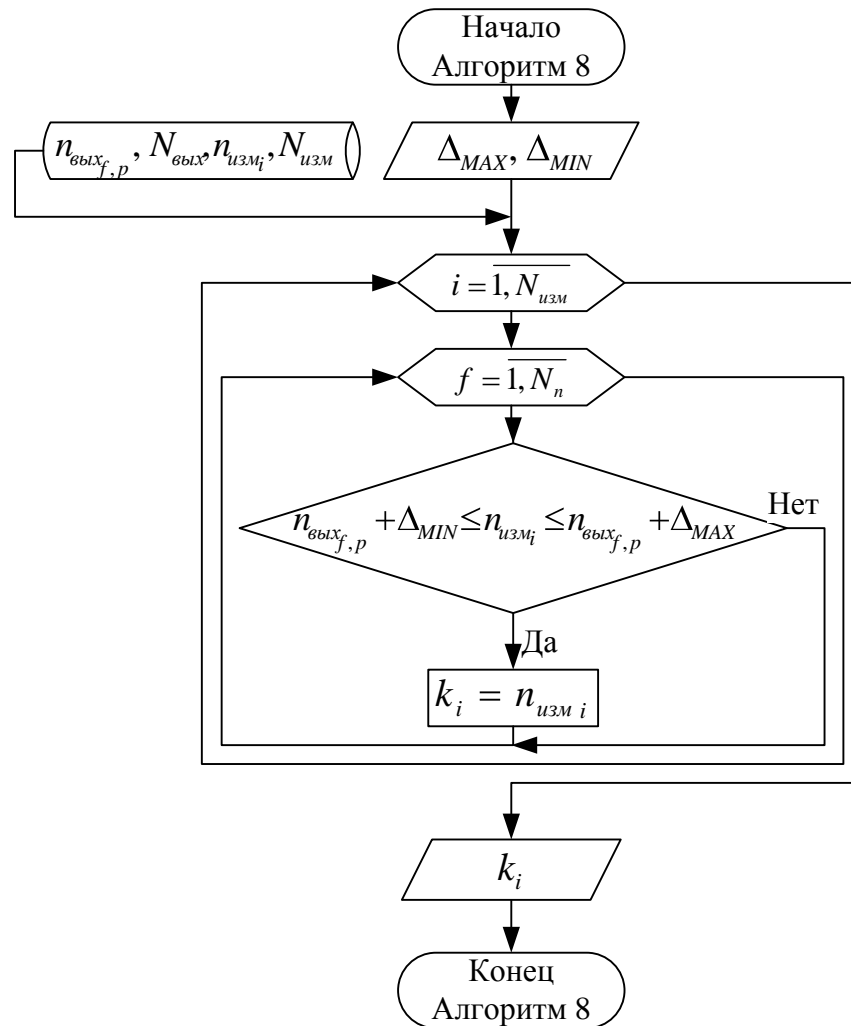


Рисунок 3.3.1 – Блок-схема алгоритма 8 сравнения рассчитанных возбуждающих и доминирующих измеренных частот

В процессе осуществления вибродиагностики поршневой машины также появляется задача сравнения измеренных прибором частот не только с самими возбуждающим частотами, но и с их гармониками. Блок-схема алгоритма 9, разработанного для решения данной задачи, представлена на рисунке 4.3.2. В качестве дополнительных исходных данных (по отношению к аналогичному алгоритму сравнения с возбуждающими частотами) для работы алгоритма принимается:

- Номер возбуждающей частоты j , с гармониками которой производится сравнение измеренных частот;
- Массив номеров гармоник $g = \overline{2, g1}$ возбуждающей частоты;
- Количество рассматриваемых гармоник $g1$, задается пользователем.

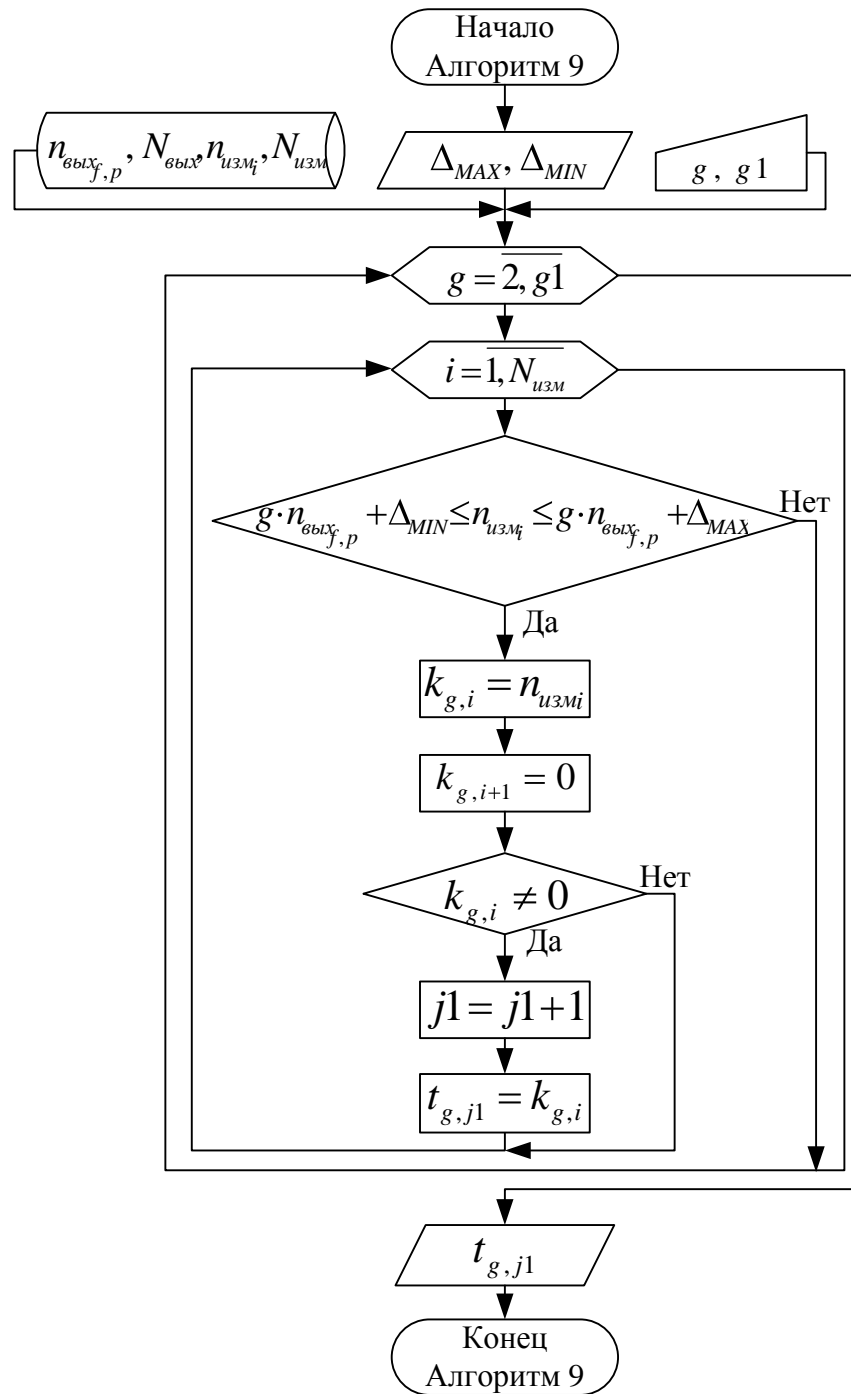


Рисунок 4.2.2 – Блок-схема алгоритма 9 сравнения измеренных частот с гармониками возбуждающих частот

Работа данного алгоритма заключается в последовательном сравнении каждого элемента массива измеренных частот $n_{измi}$ с каждым элементом массива гармоник возбуждающих частот $g \cdot n_{выхf,p}$ с учетом значения минимальной и максимальной

границы сравнения. Измеренная частота $n_{изм_i}$ считается совпадающей с g -ой гармоникой возбуждающей частоты, если выполняется неравенство (4.2.2).

$$g \cdot n_{вых_{f,p}} + \Delta_{MIN} \leq n_{изм_i} \leq g \cdot n_{вых_{f,p}} + \Delta_{MAX} \quad (4.2.2)$$

Алгоритм 9 содержит в своем составе комбинацию структур веления и циклов. Дополнительная вычислительная операция $k_{g,i+1} = 0$ необходима для предотвращения остановки работы алгоритма в случае отсутствия совпадений. Измеренные частоты, удовлетворяющие неравенству (4.5.2) составляют двумерный массив $k_{g,i}$, являющийся результатом работы первой части алгоритма. Индекс g обозначает номер гармоники j -ой возбуждающей частоты, с которой совпадает значение измеренной i -ой частоты. Далее происходит формирование итогового массива $t_{g,j1}$ из результатов сравнения для удаления из значений, равных нулю.

Таким образом, алгоритмы 8, 9 предназначены для выявления резонансных частот колебаний элементов ПКА и отличаются поиском совпадений экспериментально-измеренных частот вибраций элементов конструкции ПКА с частотами пульсаций давления рабочей среды, что позволяет выявить резонансные частоты колебаний элементов ПКА и использовать полученную информацию для разработки монтажно-технических решений по отстройке трубопроводов от резонансных частот колебаний.

3.4 Эвристико-вычислительный алгоритм определения характеристик надежности поршневого компрессорного агрегата

В расчетной практике часто возникают задачи по нахождению значения функции для аргументов, которые отсутствуют в таблице экспериментальных данных (задачи интерполирования или экстраполирования). Задача **интерполирования функции** заключается в нахождении значения y_k табличной функции в некоей промежуточной точке x_k , расположенной внутри некоторого интервала $[x_0; x_n]$; задача **экстраполирования функции** – нахождение значения y_l табличной функции в точке x_l , которая не входит в интервал $[x_0; x_n]$ (задача прогноза) [65]. Определение даты перехода в предельное

состояние в данной работе основано на решении задачи прогноза (определение состояния динамического оборудования условиях эксплуатации, оценка остаточного ресурса). Задачи интерполирования и экстраполирования решаются при помощи нахождения аналитического выражения вспомогательной функции $\varphi = f(\xi)$, которая приближала бы заданную табличную функцию $y = f(\xi)$. Цели установления неизвестной связи $y = f(\xi)$ служит **задача о приближении** (аппроксимации) [121]. Неизвестную функцию $y = f(\xi)$ приближенно заменяют некоторой иной функцией. При этом ставится условие, заключающееся в том, чтобы отклонение замещающей функции $\varphi = f(\xi)$ от заменяемой функции $y = f(\xi)$ в заданной области было наименьшим.

В контексте темы диссертационной работы рассматривается процесс определения (восстановления) аналитических функциональных зависимостей по некоторому набору экспериментальных данных, в качестве которых может выступать значения определяющего показателя работы динамического оборудования, изменяющиеся во времени. В качестве определяющего показателя работы оборудования могут выступать результаты замеров амплитуды виброперемещений фундамента в местах крепления компрессора (на головках фундаментных болтов), цилиндров компрессоров, сосудов, трубопроводов [122], дефектоскопии конструктивных элементов (шек коленчатого вала, замеры цилиндров по штихмасу и т.п), сделанные в различные временные периоды. По известному состоянию динамического оборудования в предшествующие моменты времени и по текущему состоянию необходимо определить, в какое состояние перейдет оборудование после t часов работы [65]. Получение зависимости позволит производить прогнозирование значения, которое принимает интересующая функция вне имеющегося промежутка экспериментальных данных в точке, соответствующей предельному значению определяющего показателя работы. Возможность вычисления значений подобного рода необходимо для разработки модели определения времени перехода конкретной единицы ДО в предельное состояние.

Экспериментальные данные (набор параметров $x_i, y_i, i = 1 \dots N$, N – количество результатов эксперимента) могут быть представлены как в виде таблицы, так и в графическом виде [123]. В рамках данной работы рассматривается вариант табличного представления результатов эксперимента (измерений).

Как отмечается в [124], задача определения зависимости по эмпирическим данным была и, вероятно, будет занимать центральное место в прикладной математике. Также

отмечается, что задача нахождения существующей закономерности по имеющемуся набору фактов является одной из основных проблем естествознания. Многие авторы на протяжении сотен лет в своих работах решали проблему построения функций по эмпирическим данным [125]. С формальной точки зрения задача восстановления функции по набору данных является одной из классических задач вычислительной математики [126]. Методы, в которых требуется точное совпадение значений аппроксимирующей функции с заданными величинами, на практике малопригодны в условиях зашумленных данных. В случае их применения предъявляются высокие требования к точности исходных экспериментальных данных [121]. Задача подбора функциональной зависимости, описывающей результаты эксперимента, имеет определенную особенность, заключающаяся в том, что не следует подбирать формулу таким образом, чтобы она проходила через все точки (точно описывала все экспериментальные значения). Это связано с тем, что результаты эксперимента содержат в себе случайные ошибки измерения («шум» в эксперименте). Если определенная формула будет проходить через все опытные значения, то это будет означать точное повторение и экспериментального «шума» [123], [121]. Таким образом, подбираемая функция $\varphi = f(\xi)$ должна в некоторой степени сглаживать «шум» эксперимента. На основе этих положений при обработке экспериментальных данных в данном исследовании не применялись такие методы, как методы интерполирующих полиномов Лагранжа, Ньютона, Гаусса, Стирлинга, Бесселя и т.д. В источнике [124] также говорится о достаточно общем классическом принципе восстановления функциональных зависимостей по эмпирическим данным, заключающегося в выборе из допустимого множества функций той, которая наилучшим образом приближается к имеющемуся набору эмпирических данных. Вместе с тем отмечается, что указанный принцип оставляет определенную свободу в вопросе определения меры качества приближения функции к набору имеющихся данных.

Одним из вариантов определения качества приближения функции к набору имеющихся данных является величина S , которая равна сумме квадратов разностей между значениями замещающей функции $\varphi = f(\xi)$ и заменяемой функции $y = f(\xi)$ в данных точках (среднеквадратичное приближение) (выражение (4.4.1)):

$$S = \sum_{i=0}^n \left(\varphi(x_i) - y_i \right)^2 \quad (4.4.1)$$

При этом подбирается такая функция $\varphi = f(\cdot)$, которая характеризуется минимальным значением величины S по сравнению с другими функциями (метод наименьших квадратов). Как отмечается в [121] во многих случаях и, в особенности при обработке экспериментальных данных, среднеквадратичное приближение вполне приемлемо. Оно сглаживает неточности функции и дает достаточно правильное представление о ней. Преимуществом метода наименьших квадратов является сравнительно простой математический способ определения коэффициентов подбираемой функции, а также то, что он допускает достаточно веское теоретическое обоснование с вероятностной точки зрения [127]. Данный метод применяется, когда необходима высокая точность аппроксимации, но он требует проведение большого объема вычислительных операций [128].

Саму эмпирическую формулу обычно выбирают из формул определенного вида (линейная, показательная и т.п.). Так как приближение в данной работе строится на заданном дискретном множестве значений переменной, обозначающей время (набор экспериментальных данных замеров в разные моменты времени), то рассматривается случай точечной аппроксимации [121]. При использовании полученной зависимости для приближенного вычисления интересующего параметра вне рассматриваемого временного отрезка применяется экстраполяция. В работе [129] отмечается, что подходы формально-логического направления интерполяции (априорное принятие явного вида интерполирующей функции в виде полиномов, сплайнов и т.д.) скорее применимы для определения функций с конечными областями определения, например в приложении к различным областям техники.

Пусть для исходных экспериментальных данных $x_i, y_i, i = \overline{1..N}$ (N - количество результатов эксперимента) выбран некоторый вид зависимости: $y = \varphi(\cdot, a_0, a_1, \dots, a_m)$ с неизвестными коэффициентами a_0, a_1, \dots, a_m . Согласно выражению (4.4.1), сумма квадратов разностей между значениями выбранной функции $\varphi = f(\cdot)$ и исходными экспериментальными данными $y = f(\cdot)$ в данных точках будет выглядеть следующим образом (выражение (4.4.2)).

$$S(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^N \varphi(a_0, a_1, \dots, a_m) - f_i \quad (4.4.2)$$

Параметры a_0, a_1, \dots, a_m находятся из условия минимума функции $S(a_0, a_1, \dots, a_m)$. Минимум функции $S(a_0, a_1, \dots, a_m)$ находится, путем приравнявая нулю ее частных производных по переменным a_0, a_1, \dots, a_m (выражение (4.7.3)).

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0 \quad (4.4.3)$$

В процессе расчета используются следующие выбранные зависимости: линейная ($\varphi(x) = a_0 + a_1 x$); квадратичная ($\varphi(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$); логарифмическая, ($\varphi(x) = a \cdot \ln(x) + b$); степенная ($\varphi(x) = a \cdot x^b$); показательная ($\varphi(x) = a \cdot e^{k \cdot x}$). **Линейная аппроксимация** прямой линией, наилучшим образом описывающей имеющийся набор данных, применяется в случае переменных, которые увеличиваются или убывают с постоянной скоростью. **Полиномиальная аппроксимация** применяется, если описываемая величина попеременно увеличивается и уменьшается. Также данный вид аппроксимации имеет смысл применять для обработки значительного объема данных нестабильной величины. **Логарифмическая аппроксимация используется, если значения интересующей** величины вначале с достаточной скоростью увеличиваются или убывают, а после со временем стабилизируется. **Степенная аппроксимация** используется при наличии постоянной скорости роста значений исходных данных. При этом, если данные в рассматриваемом промежутке имеют нулевые или отрицательные значения, использование степенной аппроксимации невозможно. **Показательную аппроксимацию** применяется в случае, если скорость изменения исходных данных возрастает непрерывно. При этом, если данные в рассматриваемом промежутке имеют нулевые или отрицательные значения, использование показательной аппроксимации невозможно. По причине неизвестного заранее характера поведения значений исходных данных, необходимо рассмотреть каждую аппроксимацию в процессе прогноза даты перехода оборудования в предельное состояние.

Используя в качестве выбранной зависимости полином вида $\varphi(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$ порядка m , выражение (4.4.2) будет выглядеть следующим образом: $S(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m - f_i)$. Частные производные функции S находятся по выражению (4.4.4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_0} &= 2 \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m - f_i) \\ \frac{\partial S}{\partial a_1} &= 2 \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m - f_i) x_i \\ &\dots \\ \frac{\partial S}{\partial a_m} &= 2 \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m - f_i) x_i^m \end{aligned} \quad (4.4.4)$$

После приравнивания полученных выражений частных производных к нулю и собирания их коэффициентов при неизвестных a_0, a_1, \dots, a_m , имеется система линейных уравнений (4.4.5):

$$\begin{cases} N \cdot a_0 + a_1 \sum_{i=1}^N x_i + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^2 + \dots + a_m \sum_{i=1}^N x_i^m = \sum_{i=1}^N f_i \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^3 + \dots + a_m \sum_{i=1}^N x_i^{m+1} = \sum_{i=1}^N x_i f_i \\ \dots \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i^m + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^{m+1} + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^{m+2} + \dots + a_m \sum_{i=1}^N x_i^{2m} = \sum_{i=1}^N x_i^m f_i \end{cases} \quad (4.4.5)$$

Решение этой системы уравнений дает значения неизвестных a_0, a_1, \dots, a_m .

Для линейной зависимости $\varphi(x) = a_0 + a_1x$ (полином порядка $m=1$) система уравнений (4.4.5) имеет вид:

$$\begin{cases} N \cdot a_0 + a_1 \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N f_i \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N x_i f_i \end{cases} \quad (4.4.6)$$

Сумма квадратов разностей между значениями выбранной линейной зависимости $\varphi(x) = a_0 + a_1 x$ и исходными экспериментальными данными $y = f(x)$ по выражению (4.7.2) будет выглядеть следующим образом:

$$S(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 x_i - f_i)^2 \quad (4.4.7)$$

Для квадратичной зависимости $\varphi(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$ (полином порядка $m=2$) система уравнений (4.4.5) имеет вид:

$$\begin{cases} N \cdot a_0 + a_1 \sum_{i=1}^N x_i + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N f_i \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^3 = \sum_{i=1}^N x_i f_i \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^N x_i^4 = \sum_{i=1}^N x_i^2 f_i \end{cases} \quad (4.4.8)$$

Сумма квадратов разностей между значениями выбранной квадратичной зависимости $\varphi(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$ и исходными экспериментальными данными $y = f(x)$ по выражению (4.4.2) будет выглядеть следующим образом:

$$S(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 - f_i)^2 \quad (4.4.9)$$

Сумма квадратов разностей между значениями выбранной логарифмической функцией $\varphi(x) = a \cdot \ln x + b$ и исходными экспериментальными данными $y = f(x)$ по выражению (4.4.2) будет выглядеть следующим образом:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^N (a \cdot \ln x_i + b - f_i)^2 \quad (4.4.10)$$

Система уравнений (4.4.5) для логарифмической зависимости преобразуется следующим образом:

$$\begin{cases} 2 \cdot b \cdot \sum_{i=1}^N \ln x_i - 2 \cdot \sum_{i=1}^N (a \cdot \ln x_i + b - f_i) + 2 \cdot a \cdot \sum_{i=1}^N (a \cdot \ln x_i + b - f_i)^2 = 0 \\ 2 \cdot a \cdot \sum_{i=1}^N \ln x_i - 2 \cdot \sum_{i=1}^N f_i + 2 \cdot N \cdot b = 0 \end{cases} \quad (4.4.11)$$

Сумма квадратов разностей между значениями выбранной степенной функцией $\varphi(x) = a \cdot x^b$ и исходными экспериментальными данными $y = f(x)$ по выражению (4.4.2) будет выглядеть следующим образом:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^N (a \cdot x_i^b - f_i)^2 \quad (4.4.12)$$

Система уравнений (4.4.5) для степенной зависимости преобразуется следующим образом:

$$\begin{cases} 2 \cdot a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^{2b} - 2 \cdot \sum_{i=1}^N (a \cdot x_i^b - f_i) = 0 \\ 2 \cdot a \cdot \left(a \cdot \sum_{i=1}^N (a \cdot x_i^b - f_i)^2 - \sum_{i=1}^N \ln x_i \cdot (a \cdot x_i^b - f_i) \right) = 0 \end{cases} \quad (4.4.13)$$

Сумма квадратов разностей между значениями выбранной показательной функцией $\varphi(x) = a \cdot e^{k \cdot x}$ и исходными экспериментальными данными $y = f(x)$ по выражению (4.4.2) будет выглядеть следующим образом:

$$S_{a,b} = \sum_{i=1}^N \left(a \cdot e^{k \cdot x_i} - f_i \right)^2 \quad (4.4.14)$$

Система уравнений (4.4.5) для показательной зависимости преобразуется следующим образом:

$$\begin{cases} 2 \cdot a \cdot \sum_{i=1}^N e^{2kx_i} - 2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(e^{k \cdot x_i} \cdot f_i \right) = 0 \\ -2 \cdot a \cdot \left(\sum_{i=1}^N \left(e^{k \cdot x_i} \cdot f_i \cdot x_i \right) - a \cdot \sum_{i=1}^N \left(e^{2kx_i} \cdot x_i \right) \right) = 0 \end{cases} \quad (4.4.15)$$

Для работы алгоритма определения даты перехода динамического оборудования в предельное состояние необходимы следующие исходные данные:

- Массив исходных экспериментальных данных $x_i, i = \overline{1 \dots N}$ (показатель работы ДО, изменяющиеся во времени – результаты замеров параметров вибрации, дефектоскопии конструктивных элементов, сделанные в различные временные периоды);
- Массив дат замеров $y_i, i = \overline{1 \dots N}$, соответствующий исходным экспериментальным данным;
- Критическое значение x_{cr} , при достижении которого выносится решение о том, что оборудование перешло в предельное состояние. Принимается на основе нормативных документов или требований завода-изготовителя оборудования. Например, для амплитуды виброперемещения нормативными документами служат [130], [131], [132], [133];
- Количество последних экспериментальных данных $z = \overline{1 \dots N}$, которое следует учитывать при расчете даты перехода оборудования в предельное состояние.

Алгоритм 10 предназначен для расчёта характеристик надёжности ПКА и отличается учётом результатов дискретного вибромониторинга, а также использованием комплекта стандартных аппроксимационных зависимостей, что позволяет автоматизировать решение задачи прогнозирования даты достижения элементами ПКА недопустимого нормативно-технической документацией уровня вибрации (рисунок 4.4.1).

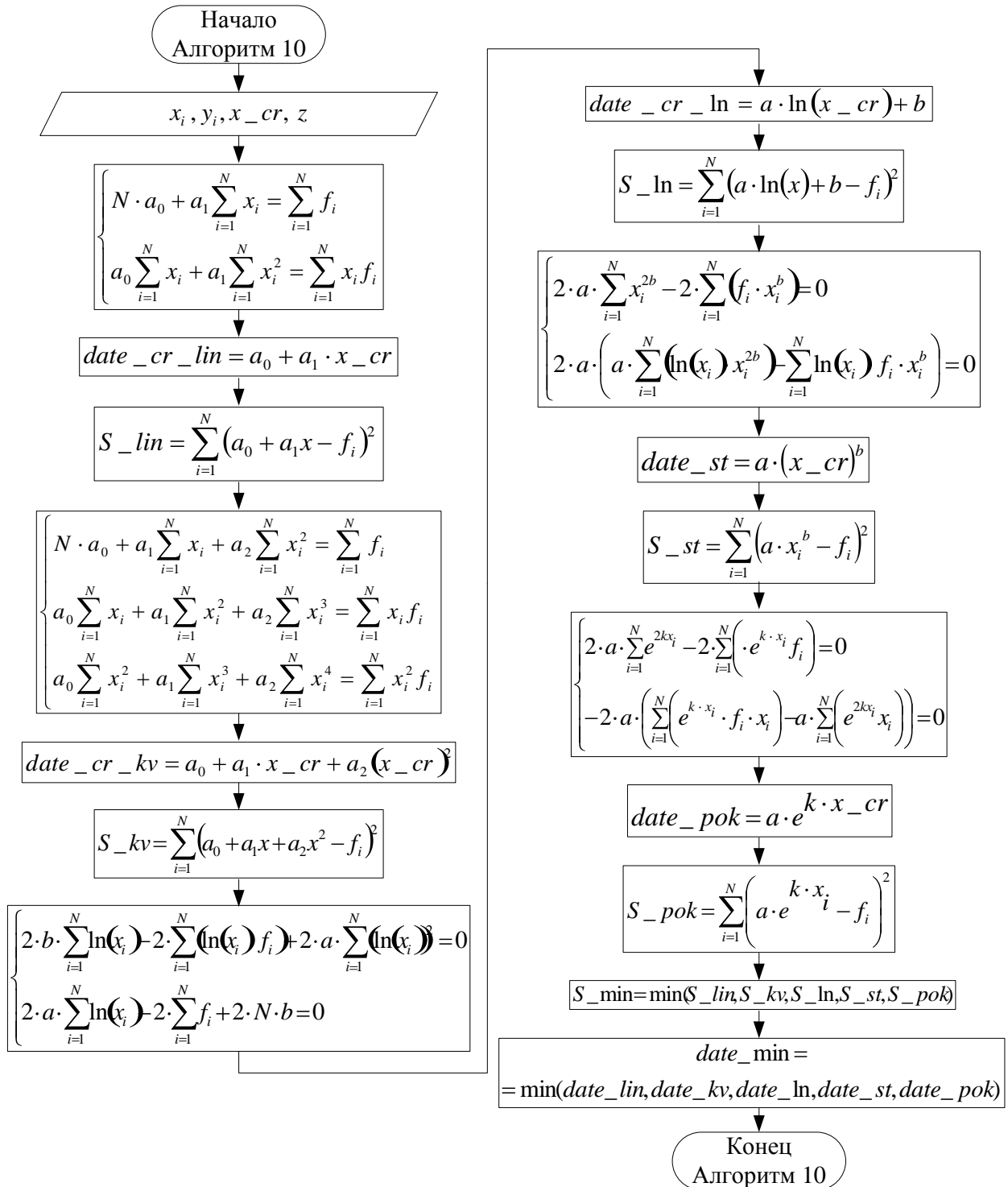


Рисунок 4.4.1 – Блок-схема алгоритма 10 определения характеристик надёжности ПКА

Разработанные модели и алгоритмы тестировались в среде MathCAD на исходных данных и результатах проведения экспертизы промышленной безопасности, данных вибродиагностики при оценке технического состояния ПКА предприятий НГХК Пермского края (ООО «СИБУР-Химпром», ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез»). Итоги тестирования позволяют сделать вывод о соответствии получаемых в результате работы алгоритмов значений, аналогичным величинам, являющихся результатом обработки соответствующих данных экспертами в области промышленной безопасности и вибродиагностики ПКА.

3.5 Выводы

Приводятся результаты разработки моделей и алгоритмов, необходимых для решения актуальных задач ИЛП на этапе эксплуатации ПКА:

- обобщённая логико-информационная метамодель ИЛП эксплуатируемого ПКА;
- логическо-вычислительная модель системы цилиндропоршневых групп с цилиндрами простого и двойного действия и алгоритм формирования множества моментов подач в ступени ПКА;
- алгоритм определения частот пульсаций давления рабочей среды;
- алгоритм выявления синхронности выхлопов цилиндров ступени;
- алгоритм определения числа подач среды в ступень;
- алгоритм определения показателя адиабаты рабочей среды;
- семейство аппроксимационных моделей номограмм и алгоритм определения отношения времени всасывания (нагнетания) ко времени одного оборота КВ;
- алгоритм определения вместимости буферной ёмкости;
- алгоритм расчета диаметра расточки дроссельной диафрагмы;
- алгоритм выявления резонансных частот колебаний элементов ПКА;
- алгоритм определения надежности ПКА.

Приведены расчетные зависимости, необходимые для работы данных моделей и алгоритмов.

**ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ИНФОРМАЦИОННОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ
«ЭЛПАДО» ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ
ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**4.1 Архитектура комплекса программ «ЭЛПАДО» работы с данными по
динамическому оборудованию**

Исходное комплекс программ «СИБУР-Трубопровод» имеет модульную архитектуру, что позволило осуществить добавление нового модуля в виде комплекса программ «ЭЛПАДО» для работы с данными по динамическому оборудованию без коренной перестройки исходного комплекса программ. Комплекс программ «ЭЛПАДО» функционирует по архитектуре «клиент-сервер», где в качестве системы управления базой данных используется Oracle, расположенная на сервере нефтехимического предприятия. Это обеспечивает доступность и актуальность информации, исключается ее дублирование, снижается вероятность появления противоречивости в содержании данных при обеспечении доступа широкому кругу специалистов (рисунок 4.1.1).

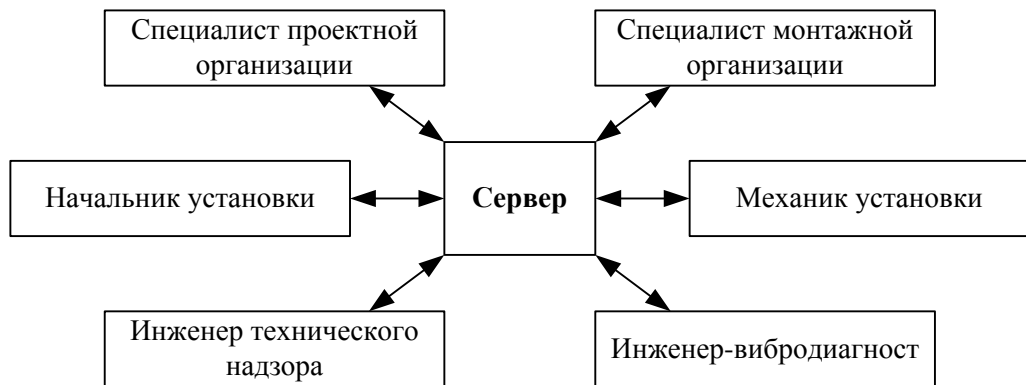


Рисунок 4.1.1 – Принципиальная схема функционирования комплекса программ
«ЭЛПАДО»

Архитектура комплекса программ для работы с данными по динамическому оборудованию имеет строение в виде комплекса функциональных блоков, связанных радиально с базой данных (рисунок 4.1.2): «Электронный формуляр», «Отчеты», «Буферная емкость», «Диафрагма», «Прогноз», «Частотный анализ».

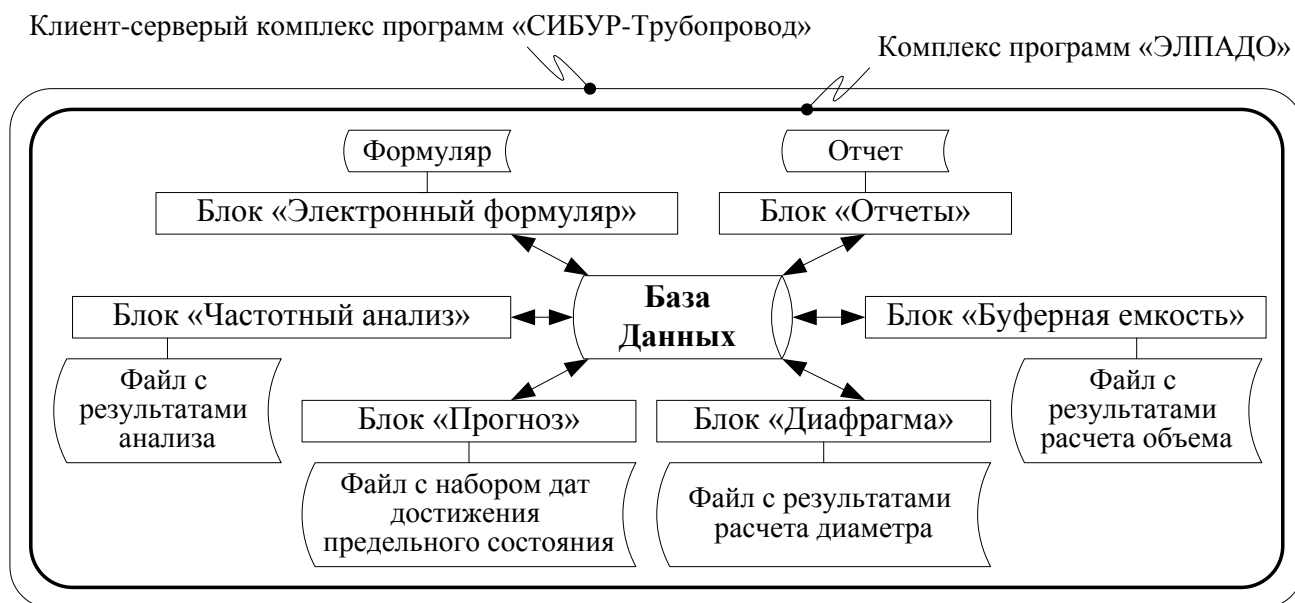


Рисунок 4.1.2 – Архитектура комплекса программ «ЭЛПАДО»

4.2 Информационное обеспечение комплекса программ «ЭЛПАДО»

4.2.1 Блок «База данных»

Блок «База данных» (БД) служит для ввода, хранения, обработки данных и обеспечивает связь между функциональными блоками комплекса программ «ЭЛПАДО» и имеющихся в составе «СИБУР-Трубопровод» комплексов программ для работы с данными по аппаратам и трубопроводам нефтехимического предприятия (рисунок 4.2.1.1). Блок «База данных» структурно состоит из постоянной и переменной частей.

Содержание постоянной части базы данных определяется действующими стандартами, ГОСТами, нормативными документами и т.п. В состав постоянной части БД также включены значения физических и химических постоянных величин, необходимых для работы алгоритмов комплекса программ. Пользователь не имеет возможности прямого редактирования содержания постоянной части БД. Возможность внесения изменений в содержание постоянной части базы данных имеется только у разработчика комплекса программ.



Рисунок 4.2.1.1 – Структура блока «База данных» и его взаимодействие с комплексами программ по аппаратам, трубопроводам

Для конструктивного элемента «Электродвигатель» была разработана структура и заполнен на основе источников [134], [135] фрагмент постоянной части базы данных (рис. 4.2.1.2). В своем составе он насчитывает 12688 записей, что позволяет пользователю выбирать из около 200 модификаций 58 моделей электродвигателей.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1	Типоразмер	Тип	Исполнение по способу монтажа	Исполнение по взрывозащите	Мощность [кВт]	Число оборотов [об/мин]	Скольжение [%]	КПД [%]	cos φ	Длина [мм]	Ширина [мм]	Высота оси вращения [мм]	Высота [мм]	Масса [кг]	Число полюсов [шт]	Частота тока сети [А]	Напряжение [В]		
2	BAO22-14У1	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,4	3000	0,06	78	0,86	365	270	90	325	38	2	50	220/380		
3	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,6	1500	0,067	72	0,73	365	270	90	325	38	4	50	220/380		
4	BAO-11-4	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	270	90	325	38	6	50	220/380		
5	BAO-11-6	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,4	3000	0,06	78	0,86	365	260	90	325	38	2	50	220/380		
6	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,6	1500	0,067	72	0,73	365	260	90	325	38	4	50	220/380		
7	BAO-11-4	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	260	90	325	38	6	50	220/380		
8	BAO-11-6	Асинхронный	ИМ3001	В4Г	0,4	3000	0,06	78	0,86	365	260	100	325	38	2	50	220/380		
9	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ3001	В4Г	0,6	1500	0,067	72	0,73	365	260	100	325	38	4	50	220/380		
10	BAO-11-4	Асинхронный	ИМ3001	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	260	100	325	38	6	50	220/380		
11	BAO-11-6	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,4	1000	0,067	72	0,73	365	270	90	325	38	2	50	380/660		
12	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,6	1500	0,067	72	0,73	365	270	90	325	38	4	50	380/660		
13	BAO-11-4	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	270	90	325	38	6	50	380/660		
14	BAO-11-6	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	270	90	325	38	6	50	380/660		
15	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,4	3000	0,06	78	0,86	365	260	90	325	38	2	50	380/660		
16	BAO-11-4	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,6	1500	0,067	72	0,73	365	260	90	325	38	4	50	380/660		
17	BAO-11-6	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	260	90	325	38	6	50	380/660		
18	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ3001	В4Г	0,4	3000	0,06	78	0,86	365	260	100	325	38	2	50	380/660		
19	BAO-11-4	Асинхронный	ИМ3001	В4Г	0,6	1500	0,067	72	0,73	365	260	100	325	38	4	50	380/660		
20	BAO-11-6	Асинхронный	ИМ3001	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	260	100	325	38	6	50	380/660		
21	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,4	3000	0,06	78	0,86	365	270	90	325	38	2	50	500		
22	BAO-11-4	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,6	1500	0,067	72	0,73	365	270	90	325	38	4	50	500		
23	BAO-11-6	Асинхронный	ИМ1081	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	270	90	325	38	6	50	500		
24	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,4	3000	0,06	78	0,86	365	260	90	325	38	2	50	500		
25	BAO-11-4	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,6	1500	0,067	72	0,73	365	260	90	325	38	4	50	500		
26	BAO-11-6	Асинхронный	ИМ2001	В4Г	0,4	1000	0,085	66	0,66	365	260	90	325	38	6	50	500		
27	BAO-11-2	Асинхронный	ИМ3001	В4Г	0,4	3000	0,06	78	0,86	365	260	100	325	38	2	50	500		

Рисунок 4.2.1.2 – Фрагмент постоянной части базы данных элемента «Электродвигатель»

Также были разработаны структура и получены экземпляры постоянной части базы данных для элемента «Подшипник качения» в количестве 2169 записей, заполненная на основе источников [136], [137], [138], [139], [140] (рисунок 4.2.1.3).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Стандарт на подшипник	Номер подшипника (обозначение)	Диаметр внутренней обоймы (d, номинальный диаметр отверстия внутреннего кольца [мм])	Диаметр внешней обоймы (D, номинальный диаметр наружной цилиндрической поверхности наружного кольца [мм])	В, номинальная ширина [мм]	Масса [кг]	Тело качения	Тип подшипника	Число рядов [шт]	Конструктивное исполнение
2	ГОСТ 8338-75	16	6	17	6	0,008	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
3	ГОСТ 8338-75	17	7	19	6	0,009	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
4	ГОСТ 8338-75	18	8	22	7	0,015	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
5	ГОСТ 8338-75	19	9	24	7	0,018	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
6	ГОСТ 8338-75	100	10	26	8	0,019	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
7	ГОСТ 8338-75	101	12	28	8	0,022	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
8	ГОСТ 8338-75	102	15	32	9	0,03	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
9	ГОСТ 8338-75	103	17	35	10	0,04	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
10	ГОСТ 8338-75	104	20	42	12	0,07	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
11	ГОСТ 8338-75	105	25	47	12	0,082	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
12	ГОСТ 8338-75	106	30	55	13	0,119	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
13	ГОСТ 8338-75	107	35	62	14	0,154	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
14	ГОСТ 8338-75	108	40	68	15	0,191	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
15	ГОСТ 8338-75	109	45	75	16	0,241	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
16	ГОСТ 8338-75	110	50	80	16	0,26	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
17	ГОСТ 8338-75	111	55	90	18	0,383	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
18	ГОСТ 8338-75	112	60	95	18	0,411	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
19	ГОСТ 8338-75	113	65	100	18	0,437	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
20	ГОСТ 8338-75	114	70	110	20	0,604	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
21	ГОСТ 8338-75	115	75	115	20	0,638	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
22	ГОСТ 8338-75	116	80	125	22	0,845	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
23	ГОСТ 8338-75	117	85	130	22	0,892	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
24	ГОСТ 8338-75	118	90	140	24	1,167	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца
25	ГОСТ 8338-75	119	95	145	24	1,224	Шарик	Радиальный	1	С цилиндрическим отверстием внутреннего кольца

Рисунок 4.2.1.3 – Фрагмент постоянной части базы данных элемента «Подшипник качения»

Содержание переменной части базы данных комплекса программ наполняется в результате работы пользователей в процессе внесения информации о поршневых компрессорах и других единицах динамического оборудования, эксплуатирующихся на нефтехимическом предприятии. В процессе работы пользователями в переменную часть БД было внесено единиц поршневых компрессоров в количестве 19 агрегатов. Примеры внесения пользователем комплекса программ паспортных данных поршневого компрессора предприятия НХК в переменную часть базы данных приведены на рисунках 4.2.1.4 – 4.2.1.6).

Техн. индекс	Наименование	Вид оборудования	Назначение	Марка	Инвентарный №
ПК-1	Поршневой компрессор	Компрессор поршневой	Перемещение продукта в реакт	2M16-32/35-50	15-548/11
Элемент	Обозначение	Размеры, мм	Материал		
Электродвигатель	СДКП 16-41-16	L=975, S=2450, H=8450			
Ряд	Ряд №2				
Элемент	Обозначение	Размеры, мм	Материал		
Шатун	Шатун ряда №2	L=315	Ст40 ГОСТ 1050-60		
Корпус цилиндра	Цилиндр ряда №2 D=350	D=350	СЧ-32-52 НФ 28-01		
Крышка цилиндра	Крышка цилиндра Передняя		СЧ-32-52 НФ 28-02		
Крышка цилиндра	Крышка цилиндра Задняя		СЧ-32-52 НФ 28-02		
Клапан	Клапан Пластинчатый	H=10			
Поршень	Дисковый поршень	D=320; H=18	Ст40 ГОСТ 1050-60		
Элемент	Обозначение	Размеры, мм	Материал		
Сторона прямого хода поршн		D=320			
Ряд	Ряд №1				
Элемент	Обозначение	Размеры, мм	Материал		
Клапан	Клапан Пластинчатый	H=10			
Корпус цилиндра	Цилиндр ряда №1 D=350	D=350	СЧ-32-52 НФ 28-01		
Крышка цилиндра	Крышка цилиндра Передняя		СЧ-32-52 НФ 28-02		
Крышка цилиндра	Крышка цилиндра Задняя		СЧ-32-52 НФ 28-02		
Поршень	Дисковый поршень	D=320; H=180	Ст40 ГОСТ 1050-60		
Элемент	Обозначение	Размеры, мм	Материал		
Сторона прямого хода поршн		D=320			
Шатун	Шатун ряда №1	L=315	Ст40 ГОСТ 1050-60		
Коленчатый вал	Коленчатый вал Ст 40 ГОСТ	L=6500	Ст 40		
Элемент	Обозначение	Размеры, мм	Материал		
Коренная шейка	Коренная шейка D=130; L=130; L=150	D=130; L=150	баббит Б-83		
Коренная шейка	Коренная шейка D=130; L=130; L=150	D=130; L=150	баббит Б-83		
Шатунная шейка	Шатунная шейка 180° D=130; L=150	D=130; L=150			
Шатунная шейка	Шатунная шейка 0° D=130; L=150	D=130; L=150			

Рисунок 4.2.1.4 – Пример заполнения переменной части базы данных

Паспортно-техническая информация поршневого компрессора

Основные параметры | Технологические параметры

Паспортные данные

Наименование: Поршневой компрессор

Технологический индекс: ПК-1

Назначение: Перемещение продукта в реакт

Тип (марка) оборудования: 2М16-32/35-50

Инвентарный номер: 15-548/11

Заводской номер: 4

Мощность, потребляемая на валу [кВт]: 934

Частота вращения вала [об/мин]: 120

Направление вращения вала со стороны привода: [выбор]

Масса, без двигателя [кг]: 15000

Расход охлаждающей воды [л/час]: 8

Место установки (корпус): 91

Группа критичности: 2

Габаритные размеры

Длина [мм]: 6870 Ширина [мм]: 5000

Высота [мм]: 2000

Изготовление и монтаж

Разработчик проекта: Завод им. Фрунзе, г. Сумы

Номер проекта: 247/9

Дата изготовления: 1967

Завод-изготовитель: Завод им. Фрунзе, г. Сумы

Дата монтажа: 1966

Монтажная организация: Монтаж-Сервис

Дата ввода в эксплуатацию: 1967

Система смазки

Марка лубриката: [выбор]

Марка масляного насоса: [выбор]

Масло для смазки цилиндров и сальников: компрессорное 19Т

Стандарт на масло для смазки цилиндров и сальников: ГОСТ 1861-54

Расход масла для смазки цилиндров и сальников [г/час]: 100

Масло для смазки механизма движения: Индустриальное 50С

Стандарт на масло для смазки механизма движения: ГОСТ 1707-51

Сохранить | Отменить

Рисунок 4.2.1.5 – Пример заполнения переменной части базы данных

Паспортно-техническая информация поршневого компрессора

Основные параметры | Технологические параметры

Поток

Наименование потока: Основной поток Свойства Добавить Удалить

Список ступеней потока

I Свойства Добавить Удалить

Технологические режимы потока

Рабочий режим Добавить Удалить

Параметры ступени в выбранном режиме потока

Параметры на входе (фактические)

Давление [кгс/см²]

Избыточное: 20

Вакуум: [выбор]

Температура [°C]: 42

Параметры на выходе (фактические)

Давление [кгс/см²]

Избыточное: 49

Вакуум: [выбор]

Температура [°C]: 67

Параметры режима

Наименование режима: Рабочий режим

Наименование среды: Водородсодержащий газ

Группа среды: Б

Номинальная производительность [м³/час]: 56700

Сохранить | Отменить

Рисунок 4.2.1.6 – Пример заполнения переменной части базы данных

4.3 Программное обеспечение комплекса программ «ЭЛПАДО»

Программное обеспечение комплекса программ состоит из следующих блоков, предназначенных для решения поставленных в рамках диссертационного исследования задач:

1. Блоки формирования эксплуатационной документации – «Электронный формуляр», «Отчёты»;
2. Блоки расчета конструктивных характеристик аппаратного оформления ПКА – «Буферная емкость», «Диафрагма»;
3. Блоки прогнозирования состояния и обработки экспериментально-вычислительных данных ПКА – «Прогноз», «Частотный анализ».

4.3.1 Блоки формирования эксплуатационной документации – «Электронный формуляр», «Отчеты»

Данная совокупность блоков используется для формирования различных типовых отчетов и бланков, необходимых при эксплуатации поршневого компрессора, включая электронный формуляр ремонта, на основе информации, внесенной пользователем комплекса программ в диалоговом режиме. Принципиальная блок-схема работы блока «Электронный формуляр», служащего для ввода и обработки паспортно-технических данных поршневого компрессора нефтехимического предприятия представлена на рисунке 4.3.1.1.

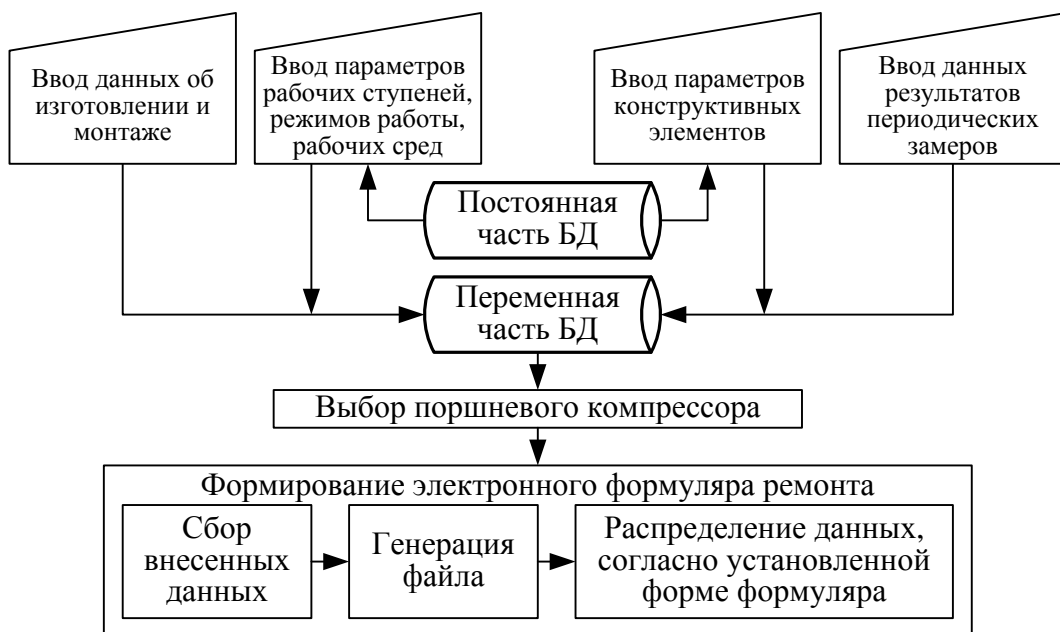


Рисунок 4.3.1.1 – Блок-схема работы блока «Электронный формуляр»

Анализ процесса эксплуатации компрессорного оборудования в целом и его поршневого конструктивного типа в частности показал, что на нефтехимическом предприятии актуальны для формирования в автоматическом режиме следующие эксплуатационные документы: акт сдачи агрегата в ремонт, акт приемки агрегата из ремонта; акт центровки; акт правильности установки оборудования на фундаменте; акт результатов испытаний на стенде по вибрации подшипников; акт отбраковки подшипников; заключение о проверке качества цветной дефектоскопии шеек роторов, валов зубчатых шестерен и колес редуктора; заключение о проверке качества ультразвуком баббитовых поверхностей подшипников скольжения; ведомость работ, подлежащих выполнению во время ремонта; акт поведения гидравлического испытания цилиндра компрессора и т.п. Блок «Отчёты» реализует процессы выбора типа документа, обработки данных и генерации файла в рамках создания соответствующей электронной эксплуатационной документации. Принципиальная блок-схема работы данного блока при формировании типовых отчетов для поршневого компрессора представлена на рисунке 4.3.1.2.



Рисунок 4.3.1.2 – Блок-схема работы блока «Отчеты»

4.3.2 Блоки «Буферная емкость», «Диафрагма» расчета конструктивных характеристик аппаратного оформления поршневого компрессорного агрегата

Блок «Диафрагма» производит на основе предложенных моделей и алгоритмов определение диаметра расточки диафрагмы в соответствии с [96] и осуществляет процесс проверки полученного значения заданной величине гидравлических потерь (рисунок 4.3.2.1). Расчет осуществляется на основе заданных пользователем комплекса программ и полученным из постоянной части база данных технологических характеристик единицы динамического оборудования и конструктивных характеристик контактных элементов присоединенного к ней трубопровода. Характеристики элементов трубопровода передаются по ассоциативным связям из комплекса программ для работы с данными по трубопроводам.



Рисунок 4.3.2.1 –Блок-схема работы блока «Диафрагма»

Блок «Буферная емкость» служит для определения на основе разработанных моделей и алгоритмов оптимальной вместимости буферной ёмкости. Принципиальная схема работы блока приведена на рисунке 4.3.2.2. Для осуществления расчета необходимы данные из переменной и постоянной частей блока «База данных». Для реализации расчета данный блок использует алгоритмы 1, 2, 3.1, 4.1 (рисунок 3.1.6.2).

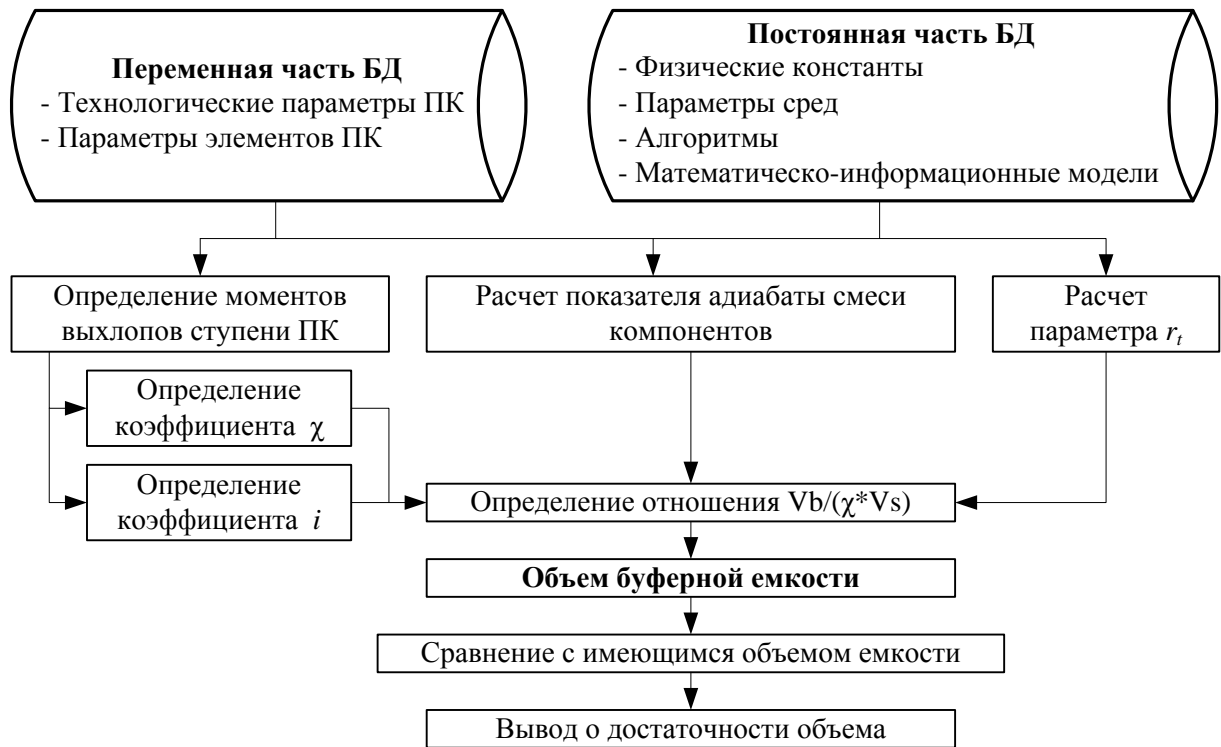


Рисунок 4.3.2.2 – Блок-схема работы блока «Буферная емкость»

4.3.3 Блоки «Прогноз», «Частотный анализ» прогнозирования состояния и обработки экспериментально-вычислительных данных поршневого компрессора

Назначение блока «Прогноз» – определение на основе данных вибродиагностики, микрометрических измерений и т.п. даты достижения единицей динамического оборудования предельного значения соответствующего параметра. В основе работы блока – линейный алгоритм, предложенный в п. 4.3.3 главы 4 и производящий аппроксимацию данных замеров по пяти различным функциям. С целью исчерпывающего информирования лица, принимающего решение, комплексом программ выводятся все рассчитанные даты перехода в предельное состояние с указанием минимальной из них. Принципиальная схема работы блока приведена на рисунке 4.3.3.1.

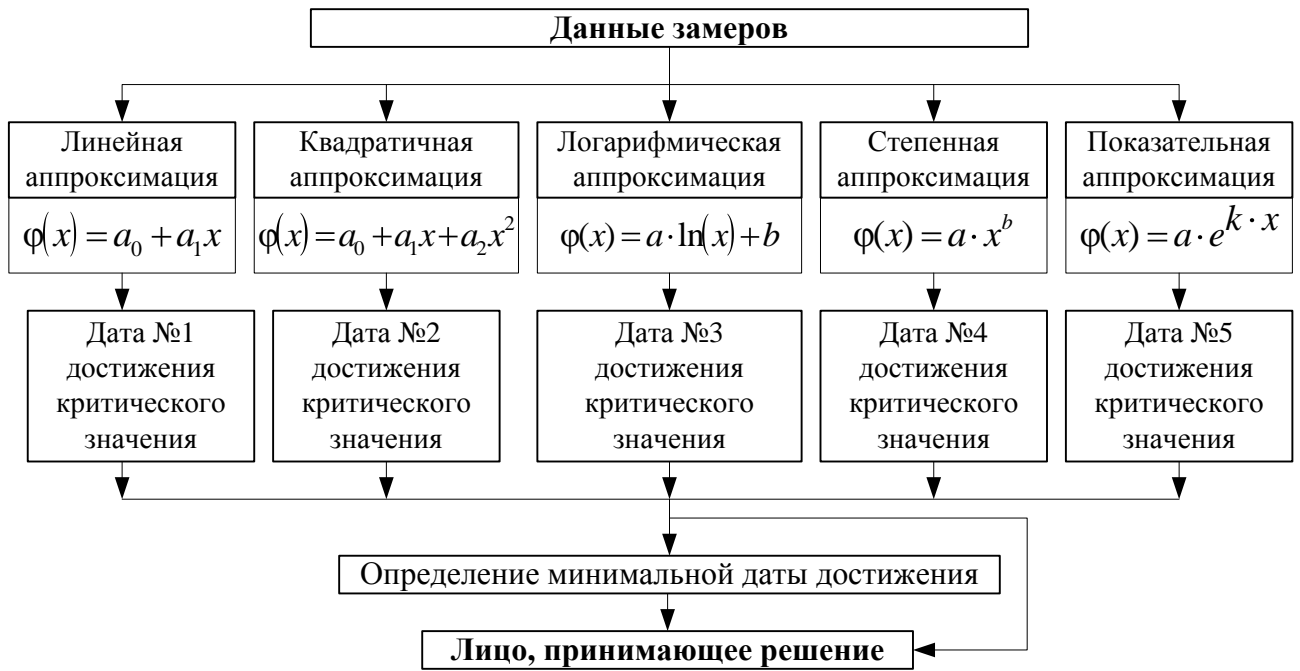


Рисунок 4.3.3.1 – Блок-схема работы блока «Прогноз»

Блок «Частотный анализ» служит для выявления на основе результатов вибродиагностики и аналитических расчётов с помощью разработанных алгоритмов, предложенных в п. 4.3.3 главы 4, резонансных частот колебаний и их гармоник трубопроводных систем ПКА. Принципиальная схема работы блока приведена на рисунке 4.3.3.2.

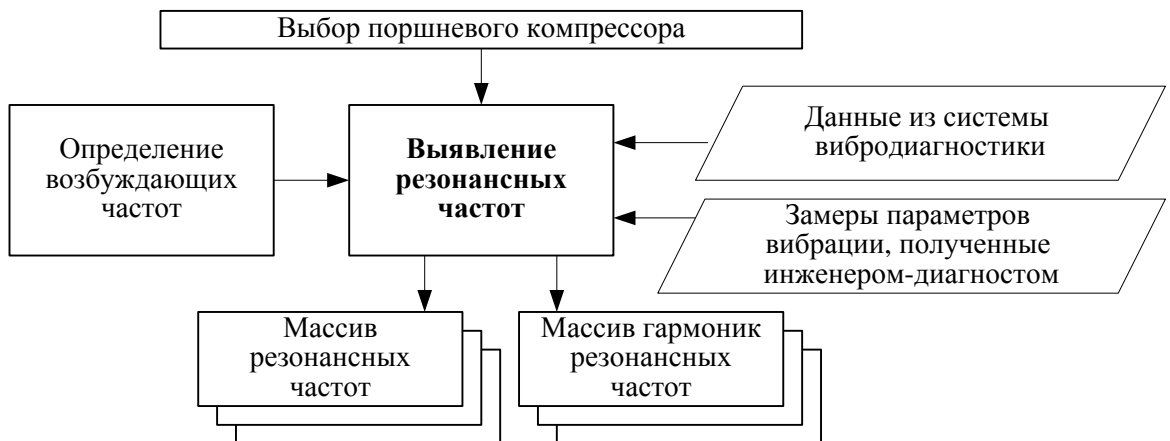


Рисунок 4.3.3.2 – Блок-схема работы блока «Частотный анализ»

4.4 Выводы

Приводятся результаты разработки программно-информационного обеспечения и практического применения комплекса программ интегрированной логистической поддержки динамического оборудования «ЭЛПАДО», входящего в состав комплекса программ «СИБУР Трубопровод».

Рассматривается архитектура программного комплекса и блок-схемы работы его функциональных блоков.

Информационное обеспечение комплекса программ реализуется с помощью блока «База данных»; программное обеспечение комплекса программ производится в составе набора блоков формирования эксплуатационной документации, расчета конструктивных характеристик аппаратного оформления поршневого компрессорного агрегата, обработки экспериментально-вычислительных данных и достижения ими критических значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация содержит следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработана фреймовая модель декларативного представления знаний о ПК, отличающаяся отображением технологических, паспортно-технических и конструкционных характеристик, результатов технического диагностирования и проведённых ремонтов, что позволяет автоматизировать ИЛП действующих ПКА нефтехимических предприятий, а также исследовать свойства и режимы функционирования поршневых компрессоров.

2. Разработана обобщённая модель интегрированной логистической поддержки эксплуатируемого ПКА, включающая алгоритмы расчёта частотно-технологических характеристик ступеней ПК и оптимальных конструкционных характеристик устройств гашения энергии пульсаций давления рабочей среды, которые обеспечивают повышение надёжности и безопасности ПКА, отличающаяся учётом концепции ИИС, требований нормативно-технической документации, системных взаимосвязей между процедурами вычисления промежуточных и выходных переменных ИЛП, что позволяет с помощью единого программного комплекса автоматизировать расчёт частот пульсаций давления рабочей среды в ступенях ПК, а также соответствующих требованиям НТД значений объёма буферной ёмкости и оптимального внутреннего диаметра дроссельных диафрагм.

3. Разработана логическо-вычислительная модель системы цилиндропоршневых групп (ЦПГ) поршневого компрессора, отличающаяся учётом числа оборотов коленчатого вала, количества цилиндров в ступени, количества рабочих ходов поршней, величины угла между осями текущего и базового цилиндров и величины угла между осями кривошипов смежных с текущим и базовым цилиндрами, что позволяет автоматизировать расчёт моментов подач рабочей среды в ступень для любого исполнения и типа цилиндров ПК.

4. Разработан информационно-вычислительный алгоритм расчёта оптимального размера буферной ёмкости, отличающийся использованием семейства аппроксимационных моделей номограмм, описывающих взаимосвязь между объёмом буферной ёмкости, показателем адиабаты, числом, одновременно совершаемым подач рабочей среды в ступень ПКА, числом подач рабочей среды за один оборот коленчатого вала, отношением времени всаса (нагнетания) ко времени одного оборота коленчатого вала, объёмом цилиндра и степенью неравномерности давления, что позволяет автоматизировать и повысить точность определения вместимости буфера V_b ,

обеспечивающей нормативно-допустимую величину степени неравномерности давления δ в трубопроводных системах ПКА.

5. Разработан итерационный алгоритм расчёта дроссельных диафрагм, отличающийся учетом значений температуры, давления, молекулярной массы, скорости звука, расхода и показателя адиабаты рабочей среды, универсальной газовой постоянной и процента допустимых гидравлических потерь, что позволяет автоматизировать расчёт оптимального диаметра отверстия рассеивающей энергию потока диафрагмы.

6. Разработан итерационный алгоритм расчёта резонансных частот колебаний трубопроводных систем ПКА, отличающийся использованием экспериментально-измеренных параметров вибрации и расчётных частотно-технологических характеристик ПКА, что позволяет выявлять частоты пульсаций давления рабочей среды, возбуждающие повышенную вибрацию трубопроводных систем для последующего принятия монтажно-технических решений по их отстройке.

7. Разработан эвристическо-вычислительный алгоритм определения характеристик надежности поршневого компрессорного агрегата, отличающийся учётом результатов дискретного вибромониторинга, а также использованием комплекта стандартных аппроксимационных зависимостей, что позволяет автоматизировать решение задачи прогнозирования даты достижения элементами ПКА недопустимого нормативно-технической документацией уровня вибрации.

8. Разработаны архитектура, программно-информационное обеспечение, вычислительно-сетевая структура и режимы функционирования комплекса программ «ЭЛПАДО», программно реализующего предложенные информационно-эвристическо-вычислительные модели и алгоритмы, применение которых позволяет существенно повысить качество, снизить стоимость и трудоёмкость ИЛП технического обслуживания и ремонта поршневых компрессорных агрегатов.

По мнению соискателя, настоящая диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены совокупность научно-обоснованных разработок в области фреймовых моделей, итерационных и информационно-вычислительных алгоритмов, архитектура комплекса программ интегрированной логистической поддержки поршневых компрессорных агрегатов, которые имеют существенное значение для повышения эффективности и безопасность эксплуатации компрессорного оборудования нефтехимических предприятий.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить свою глубокую благодарность научному руководителю – к.т.н, доценту каф. «Машины и аппараты производственных процессов» ПНИПУ Мошеву Евгению Рудольфовичу за оказанное внимание, поддержку и терпение, а также научно-методические консультации в процессе написания данной диссертационной работы.

Автор признателен д.т.н., зав. кафедрой МАПП ПНИПУ Загидуллину Сафару Хабибулловичу и к.т.н., доценту каф. МАПП ПНИПУ Мырзину Глебу Семеновичу, члену-корреспонденту РАН, профессору, д.т.н. Мешалкину Валерию Павловичу за оказанную методическую помощь и поддержку в процессе подготовки диссертационной работы к процедуре защиты

Также автор выражает благодарность работникам ЗАО «СИБУР-ХИМПРОМ» и ООО «УралПромБезопасность» за предоставленную техническую информацию и полезные советы при разработке комплекса программ.

ГЛОССАРИЙ

- ТОиР – техническое обслуживание и ремонт
- ПК – поршневой компрессор
- ПКА – поршневой компрессорный агрегат
- ДО – динамическое оборудование
- ИП – информационная поддержка
- ИЛП – интегрированная логистическая поддержка;
- БД – база данных
- ЖЦ – жизненный цикл
- АС – автоматизированная система
- НТД – нормативно-техническая документация
- ПТД – паспортно-техническая документация
- НТЛ – нормативно-техническая литература
- ПТЛ – паспортно-техническая литература
- ПБ – правила безопасности
- СА – стандарт ассоциации
- ММ – математическая модель
- ЦПГ – цилиндро-поршневая группа
- КВ – коленчатый вал

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2007. 11 с.
2. ГОСТ Р 53394-2009. Интегрированная логистическая поддержка. Основные термины и определения. М.: Стандартиформ, 2010. 23 с.
3. Судов Е. В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. М.: МВМ, 2003. 264 с.
4. Левин А. И., Судов Е. В. CALS - сопровождение жизненного цикла // Открытые системы. 2001. №3. С. 58-62
5. Судов Е. В., Левин А. И., Петров А. В., Чубарова Е. В. Технологии интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения. М.: ИнформБюро, 2006. 232 с.
6. Судов Е. В., Левин А. И., Давыдов А. Н., Барабанов В. В. Концепция развития CALS- технологий в промышленности России, М.: Прикладная логистика. 2002. 28 с.
7. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с.
8. Мыслицкий Е. Н., Киселёв Г. Ф., Рахмилевич З. З. Техническое обслуживание и ремонт поршневых компрессорных машин. М.: Химия, 1978. 160 с.
9. Бром А. Е., Колобов А. А., Омельченко И. Н. Интегрированная логистическая поддержка жизненного цикла наукоемкой продукции. М.: МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2008. 296 с.
10. Александров А. А. Разработка организационно-экономических методов и моделей управления логистической системой поддержки жизненного цикла наукоемкой продукции: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 180 с.
11. Терентьева З. С. Разработка организационно-экономических методов и моделей создания системы интегрированной логистической поддержки наукоемкой продукции на этапе эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. М.: 2006. 154 с.
12. Судов Е. В. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки процессов жизненного цикла наукоемкой продукции: дис. ... д-ра техн. наук. М.: 2004. 310 с.

13. Селезнева Е. В. Автоматизация процессов анализа логистической поддержки изделий машиностроения в интегрированной информационной среде: дис. ... канд. техн. наук. М.: 2007. 134 с.
14. Гацак М. П. Совершенствование методов интегрированной логистической поддержки жизненного цикла наукоемких изделий: дис. ... канд. эком. наук. СПб.: 2005. 197 с.
15. Бром А. Е. Разработка концепции и методологических основ создания организационной системы логистической поддержки жизненного цикла наукоемкой продукции: дис. ... д-ра. техн. наук. М., 2009. 318 с.
16. Новиков Е. В., Бугреев В. А. Повышение надежности технических систем железнодорожного транспорта за счет оптимизации параметров системы технического обслуживания // Наука и техника транспорта. 2012. №1. С. 73-74
17. Петухов И. С. Модели и методы поддержки принятия решений по обеспечению надежности объектов электроэнергетики: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 159 с.
18. Martin P., Kolesár J. Logistic support and computer aided acquisition // Journal of logistics management. 2012. Vol. 1 pp. 1-5
19. P. J. Pretorius How integrated is integrated logistics? // South african journal of industrial engineering. 1997. Vol.8. №2. pp. 11-16
20. Свищев А. В. Роль интегрированной логистической поддержки в снижении издержек организационно-технического обслуживания сложных наукоемких объектов // Право и управление. XXI век. 2009. №4. С. 52-60
21. Мельник В. Ю., Кизим А. В., Камаев В. А. Поддержка принятия решения при формировании очередей работ с помощью средств автоматизации планирования технического обслуживания и ремонта оборудования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 12. С. 107-110
22. Сергушичева М. А., Швецов А. Н. Иерархическая распределенная система поддержки управления техническим обслуживанием и ремонтом энергооборудования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 3. С. 14-19
23. Меньшин А. Б., Лисовский О. Н. Оценка несущей способности и ресурса продления эксплуатации буферной емкости поршневого газового компрессора при вибрации и пульсации давления // Вестник Оренбургского Государственного Университета. 2011. № 16. С.84-88

24. Винокуров И.В. Анализ сложившегося состояния производственно-технологического потенциала предприятий промышленности в России [Электронный ресурс] // Управление экономическими системами (электронный научный журнал). 2013. №5 [сайт]. URL: <http://www.uecs.ru/marketing/item/2167-2013-05-30-07-53-10> (дата обращения: 22.12.2012)
25. Антоненко И. Н. Возможности программного обеспечения для ТОиР химического предприятия // Химагрегаты. 2009. № 2. С. 36-39
26. Кизим А. В., Чиков Е. В., Мельник В. Ю. Задачи прогнозирования и планирования для программно-информационной поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования // Открытое образование. 2011. № 2. Ч. 2. С. 224-227
27. Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф., Ибрагимов И. М., Никифоров А. Д. Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения: принципы, системы и технологии CALS/ИПИ: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 304 с.
28. Дудукалов Ю. В., Тернюк Н. Э. Формирование ремонтно-эксплуатационных эталонов для обеспечения эффективности капитального ремонта средств транспорта // Автомобильный транспорт. 2011. № 29. С. 203-206
29. Ханов В. А., Марьин Б. Н., Фролов Д. Н., Куриная Н. П., Шпорт Р. В. Необходимость централизации управления процессами автоматизации управления в рамках крупной корпорации // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2011. Т. 1. № 7. С. 66-70
30. Сеницын И. Н., Шаламов А. С., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Агафонов Е. С., Шоргин В. С. Методы и средства анализа и моделирования стохастических систем интегрированной логистической поддержки // Системы и средства информатики. 2012. №2. Т.22 С.3-28
31. Гурьев А. Т., Казнин А. А. Информационная система сервисного обслуживания технологических машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т. 2. № 12. С. 157-164
32. Масляков Н. С., Островский М. С. Информационная поддержка технологии ремонта деталей горных машин // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2011. № 10. С. 85-92

33. Шарков А. А. Автоматизация процессов мониторинга поставок комплектующих в региональной структуре предприятий автомобильной промышленности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 180 с.
34. Фаддеева Е. Ю. Автоматизация складской логистики и планирование цепи поставок для промышленного объединения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 161 с.
35. Каракозова И. В. Методы управления материально-техническими ресурсами и нормирования их расхода в строительных организациях: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 157 с.
36. Сатышев С. Н. Автоматизация оперативного управления материальными потоками в подсистеме материально-технического снабжения производственного объединения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 154 с.
37. Ивлиев А. В. Автоматизация процесса управления ресурсами промышленного предприятия: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 126 с.
38. Новицкий К. А. Автоматизированная система управления непрерывными технологическими процессами перераспределения транспортных потоков: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 159 с.
39. Балабанов А. А. Система поддержки принятия решений при автоматизированном оперативно-диспетчерском управлении объектами добычи и транспорта газа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 190 с.
40. Котлов А. А. Математическая модель воздушного поршневого компрессора среднего давления для решения задач энергоаудита: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 138 с.
41. Юша В. Л., Бусаров С. С., Гуров А. А., Кабаков А. Н., Васильев В. К. К вопросу об определении тепловых потоков при математическом моделировании рабочих процессов объемных компрессоров с нетрадиционной проточной частью // Омский научный вестник. 2013. Омск. № 3 С. 218-221
42. Загородников А. П. Разработка и совершенствование методов расчёта рабочих процессов поршневых расширительных машин и агрегатов с самодействующими клапанами. автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2011. 18 с.
43. Пирумов И. Б. Разработка методов газодинамического, динамического и прочностного расчетов, моделирование работы и оптимизация самодействующих клапанов поршневых компрессоров: дис. ... д-ра. техн. наук. Л., 1984. 379 с.
44. Пластинин П. И. Расчет и исследование поршневых компрессоров с использованием ЭВМ. Т. 2. М.: ВИНТИ, 1981. 168 с.

45. Григорьев А. Ю. Анализ и прогнозирование параметров рабочих процессов в поршневых расширительных и компрессорных машинах: дис. ... д-ра. техн. наук. СПб., 2005. 308 с.
46. Давыдов В. М., Жуков Р. В. Особенности технической диагностики поршневых компрессорных машин [Электронный ресурс] // Вибродиагностика для начинающих и специалистов. [сайт]. URL: http://www.vibration.ru/kompres_diagn.shtml (дата обращения: 22.12.2012)
47. Жуков Р. В. Разработка метода технического диагностирования поршневых компрессоров химических производств: дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. 204 с.
48. Вартан Л. М. Математическая модель рабочих процессов во всасывающей системе с несколькими присоединенными емкостями для бытовых холодильных компрессоров: дис. ... канд. полит. наук. СПб., 2006. 96 с.
49. Юша В. Л. Создание и совершенствование ступеней компрессоров объемного действия для автономных мобильных установок: дис. ... д-ра. техн. наук. Омск, 2008. 434 с.
50. Новиков Д. Г. Разработка конструкций и метода расчета поршневых компрессорных машин с оребренной несмазываемой рабочей камерой: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2009. 194 с.
51. Туголуков Е. Н. , Егоров Е. С. Методика математического моделирования термодинамических процессов поршневого компрессора // Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2014. Астрахань. № 1. С. 45-53
52. Захаренко В. П. Основы теории уплотнений и создание поршневых компрессоров без смазки: дис. ... д-ра. техн. наук. СПб., 2001. 341 с.
53. Волегов С. А. Обоснование конструктивно-технологических параметров запорных органов клапанов поршневых компрессоров: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2008. 148 с.
54. Куликов С. П. Разработка и исследование двухмерной математической модели клапанов пластинчатых полосовых поршневых компрессоров: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2009. 316 с.
55. Сапрыкин С. А. Вибродиагностирование оборудования автомобильных газонаполнительных компрессорных станций // Вестник харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 32. С. 44-49

56. Науменко А. П. Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени: дис. ... д-ра. техн. наук. Омск, 2012. 423 с.
57. Бутусов Д. С. Исследование пульсации потока в технологических трубопроводах компрессорных станций магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. 202 с.
58. Белый А. А. Методика оценки и прогнозирования технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 181 с.
59. Корольков М. В. Разработка и исследование аналитических моделей динамики механизмов с зазорами в сопряжениях деталей: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 152 с.
60. Гринчар Н. Г. Методы и средства повышения эксплуатационной надежности гидроприводов дорожных и строительных машин: дис. ... д-ра. техн. наук. М., 2007. 369 с.
61. Точилин Н. В. Автоматизация управления процессом технического обслуживания и ремонта технологического оборудования компрессорных станций газотранспортного предприятия: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 174 с.
62. Костюков А. В., Костюков В. Н. Диагностика и прогнозирование состояния агрегатов нефтехимических комплексов по трендам вибропараметров // Омский научный вестник. 2001. Омск. № 17. С. 109-112
63. Костюков А. В. Прогнозирование технического состояния машин по скоростям изменения вибропараметров // Международный симпозиум «Образование через науку». Материалы докладов секции «Двигатели внутреннего сгорания». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 48-49
64. Гладких П. А., Хачатурян С. А. Предупреждение и устранение колебаний нагнетательных установок. М.: Машиностроение, 1964. 275 с.
65. Рахмилевич З. З., Мыслицкий Е. Н., Хачатурян С. А. Компрессорные установки в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 280 с.
66. Видякин Ю. А., Доброклонский Е. Б., Кондратьева Т. Ф. Оппозитные компрессоры. 2-е изд. перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1979. 279 с.
67. Френкель М. И. Поршневые компрессоры. Теория, конструкция и основы проектирования. 3-е изд. перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.

68. Владиславлев А. П., Козобков А. А., Малышев В. А. Трубопроводы поршневых компрессорных машин. М.: Машиностроение, 1972. 288 с.
69. Шорин В. П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М: Машиностроение, 1980. 155 с.
70. Писаревский В. М. Гасители колебаний газа. М.: Недра, 1986. 117 с.
71. ОАО «КБ Энергоавтоматика». Основные направления. ИСУ «ТЕХНО». [сайт]. [2010]. URL: <http://www.cbe.ru/razrab/> (дата обращения: 12.11.2012)
72. ООО «АРМСофт». Программа автоматизации технического обслуживания и ремонта. Система автоматизации технического обслуживания и ремонта АСТОР (краткая информация).[сайт]. [22.08.2010]. URL: <http://arm-soft.ru/?q=ASTOR> (дата обращения: 12.11.2012)
73. Software products. iMaint EAM / DPSI [сайт]. [2002-2013]. URL: <http://www.dpsi.com/software-products/imaint/> (дата обращения: 20.12.2012)
74. НПП «СпецТек». TRIM-PMS - типовая платформа для организации управления ТОиР. [сайт]. URL: <http://www.trim.ru/content/view/255/90/> (дата обращения: 20.12.2012)
75. Seascope. Управление жизненным циклом [сайт]. [2014]. URL: <http://www.seaproject.ru/products/seascope> (дата обращения: 14.02.2014)
76. Global-EAM – Управление ремонтами и техническим обслуживанием оборудования: [сайт]. [2012]. URL: <http://www.global-eam.ru/> (дата обращения: 14.12.2012)
77. «АСКОН». Комплексные решения для машиностроения. Лоцман:PLM. [сайт]. URL: <http://machinery.ascon.ru/software/tasks/items/?prcid=167&prpid=889> (дата обращения: 13.12.2012)
78. Autodesk. Возможности AutoCAD [сайт]. URL: <http://www.autodesk.ru/products/autodesk-autocad/overview> (дата обращения: 13.12.2012)
79. Bentley Systems, Incorporated. AutoPlant Equipment V8i. Трёхмерное параметрическое моделирование оборудования [сайт]. URL: <http://www.bentley.com/ru-RU/Products/AutoPLANT+Equipment/> (дата обращения: 15.12.2012)
80. «АСКОН». Комплексные решения для промышленного и гражданского строительства. Универсальная система автоматизированного проектирования КОМПАС-График. [сайт]. URL: <http://construction.ascon.ru/software/developers/items/?prpid=154> (дата обращения: 15.12.2012)

81. Лоция Софт. Продукты. Lotsia PLM: Интегрированное решение по управлению данными о продукции на протяжении всего жизненного цикла. [сайт]. URL: http://www.lotsia.com/index.php?option=c.om_content&task=view&id=101&Itemid=66 (дата обращения: 12.12.2012)
82. НПФ «Эдмон». Системы диагностики и мониторинга. [сайт]. [17.10.2005]. URL: <http://edmon.narod.ru/systemd.htm> (дата обращения: 12.12.2012)
83. НПП «ВИБРОБИТ». АСКВМ «ВИБРОБИТ». [сайт]. URL: <http://www.vibrobit.ru/askv> (дата обращения: 12.02.2012)
84. ООО «ИНКОТЕС». «АРМИД – База данных» – автоматизированное место работы инженера-диагноста. [сайт]. [2011]. URL: <http://www.encotes.ru/?q=node/19> (дата обращения: 19.12.2012)
85. ООО «ИНКОТЕС». «АРМИД – Эксперт» – экспертная система автоматизированной диагностики. [сайт]. [2011]. URL: <http://www.encotes.ru/?q=node/26> (дата обращения: 19.12.2012)
86. Смирнов В. А. Новая версия программного обеспечения АРМИД-ЭКСПЕРТ для мониторинга технического состояния и автоматизированной диагностики неисправностей оборудования. [Электронный ресурс] // Вибродиагностика для начинающих и специалистов [сайт]. URL: <http://www.vibration.ru/armid4-32bit/armid4-32bit.shtml> (дата обращения: 19.12.2012)
87. ООО "Топаз-Контроль". Т-115. Система вибротемпературного мониторинга. [сайт]. URL: <http://www.topazcontrol.ru/index.shtml?t115> (дата обращения: 18.12.2012)
88. Костюков В. Н., Науменко А. П. Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 3. С. 27-36
89. Костюков В. Н., Бойченко С. Н., Кадисов Л. Г., Науменко А. П., Стариков В. А., Сеницын А. А. Система мониторинга металлургического оборудования // Технический альманах «Оборудование». 2006. № 2. С. 59-61
90. Wenisch M. Новая система защиты и диагностики поршневых компрессоров // Компрессорная техника пневматика. 2012. № 7. С. 30-34
91. Методические рекомендации по снижению вибрации межступенчатых коммуникаций поршневых компрессоров. Черкассы.: НИИТЭХИМ, 1979. 31 с.
92. Научно-исследовательский центр «СтаДио». ПК АСТРА-НОВА. [сайт]. [2012]. URL: http://www.stadyo.ru/astra_nova.html (дата обращения: 17.10.2012)

93. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
94. Ганиев Р. Ф., Низамов Х. Н., Дебруков Е. И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий на трубопроводах. М.: Издательство МГТУ им.Баумана, 1996. 260 с.
95. Низамова Г. Х. Разработка технических средств защиты трубопроводов с поршневыми насосами и компрессорами от аварийных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 127 с.
96. СА 03-003-07. Расчет на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов, М.. Ростехэкспертиза. 2007. 71 с.
97. Сулименко В. В. Разработка методов предупреждения аварийных ситуаций в системах городской инфраструктуры: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 129 с.
98. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Т. 1. Теория и расчет. 3-е изд. перераб. и доп. М.: КолоС, 2006. 456 с.
99. ПБ 03-582-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации компрессорных установок с поршневыми компрессорами, работающими на взрывоопасных и вредных газах. М.: ПИО ОБТ, 2003. 26 с.
100. Методические рекомендации по снижению вибрации межступенчатых коммуникаций поршневых компрессоров. Черкассы.: НИИТЭХИМ, 1980. 24 с.
101. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука. 1968. 356 с.
102. Васильев К. К., Служивый М. Н. Математическое моделирование систем связи: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 170 с.
103. Хорафас А. Н. Системы и моделирование. М.: Мир, 1967. 415 с.
104. Мешалкин В. П. Экспертные системы в химической технологии. Основы теории, опыт разработки и применения. М.: Химия, 1995; Представление и использование знаний: Пер. с япон./ Под ред. Х.Уэно , М. Изидзука . М.: Мир. 1989. 220 с.
105. Поршневые компрессоры. учеб. пособие для студентов под общ. ред. Б.С. Фотина. Л.: Машиностроение, 1987. 872 с.
106. Рахмилевич З. З. Компрессорные установки: Справ. Изд. М.: Химия, 1989. 272 с.
107. Костенко Е. П. Эксплуатация поршневых компрессоров. М.: Машиностроение, 1964. 107 с.
108. Мошев Е. Р., Мухин О. И., Рябчиков Н. М., Мырзин Г. С., Чечкин С. В., Власов В. Г., Селезнев Г. М., Вустин В. В., Долгих В. И., Чазов В. А. Программное средство для автоматизации информационной поддержки и обеспечения промышленной

безопасности технологических трубопроводов // Безопасность труда в промышленности. 2007. № 10. С. 24-29

109. Мошев Е. Р., Мырзин Г. С., Власов В. Г., Рябчиков Н. М., Ромашкин М. А. Опыт использования автоматизированной системы «Трубопровод» при техническом надзоре и экспертизе промышленной безопасности технологических трубопроводов // Химическая техника. 2012. № 5. С. 37-44

110. Горловский Д. М., Альтшулер Л. Н., Кучерявый В. И. Технология карбамида. Л.: Химия, 1981. 320 с.

111. ГОСТ ИСО 4378-1-2001. Подшипники скольжения. Термины, определения и классификация. Часть 1. Конструкция, подшипниковые материалы и их свойства. М.: Издательство стандартов, 2002. 17 с.

112. ГОСТ 24955-81. Подшипники качения. Термины и определения. Издательство стандартов, 1988. 22 с.

113. Михайлов А. К., Ворошилов В. П. Компрессорные машины. Ученик для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 288 с.

114. Дэвид А. Марка, Клемент МакГоуэн. Методология структурного анализа и проектирования SADT. М.: Метатехнология, 1993. 243 с.

115. Р 50.1.028–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. М.: Издательство стандартов, 2001. 49 с.

116. Р 50.1.029–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Интерактивные электронные технические руководства. Общие требования к содержанию, стилю и оформлению. М.: Издательство стандартов, 2001. 23 с.

117. Р 50.1.031–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Стадии жизненного цикла продукции. М.: Издательство стандартов, 2001. 27 с.

118. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры, М.: ФИЗМАТЛИТ. 2000. 320 с.

119. Дукарский О. М., Закурдаев А. Г. Статистический анализ и обработка данных на ЭВМ «Минск-22». М.: Статистика, 1975. 242 с.

120. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 томах. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

121. Турчак Л. И Основы численных методов: Учеб. Поосбие. М.: Наука, 1987. 320 с.
122. СА-03-007-06 Методика технического диагностирования компрессорных установок с поршневыми компрессорами. М.: РОСЭКСПЕРТИЗА-ЛЕННИИХММАШ, 2006. 41 с.
123. Румшиский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. 192 с.
124. Вапник В. М. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 448 с.
125. Жилияков Е. Г., Мисливец И. Ю., Созонова Т. Н. Вариационный метод оценивания производных и интерполяции сигналов по эмпирическим данным // Вестник ВГУ, серия Системный анализ и информационные технологии. 2006. № 2. С. 70-73
126. Катковник В. Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных. Метод локальной аппроксимации. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1985. 336 с.
127. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 6-е изд. стер. М.: Высшая школа, 1969. 576 с.
128. Попов В. П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 1985. 496 с.
129. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам. М.: Радио и связь, 1985. 304 с.
130. РТМ 38.001-94 Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов, М.: ВНИПИнефть, 1995. 85 с.
131. ГОСТ 12.1.012 Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2010. 20 с.
132. РД 09-244-98 Инструкция по проведению диагностирования технического состояния сосудов, трубопроводов и компрессоров промышленных аммиачных холодильных установок, М.: НТЦ "Промышленная безопасность", 2002. 91 с.
133. СНиП 2.02.05-87 Фундаменты машин с динамическими нагрузками. М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1988. 36 с.
134. Копылов И. П., Клоков Б. К. Справочник по электрическим машинам: в 2т. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.
135. Копылов И. П., Клоков Б. К. Справочник по электрическим машинам: в 2т. Т.2. М.: Энергоатомиздат, 1988. 668 с.

136. ГОСТ 28428-90 Подшипники радиальные шариковые сферические двухрядные. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2005. 10 с.

137. ГОСТ 831-75 Подшипники шариковые радиально-упорные однорядные. Типы и основные размеры. М.: Стандартиформ, 2005. 14 с.

138. ГОСТ 832-78 Подшипники шариковые радиально-упорные сдвоенные. Типы и основные размеры. М.: Стандартиформ, 2005. 5 с.

139. ГОСТ 8338-75 Подшипники шариковые радиальные однорядные. Основные размеры. М.: Издательство стандартов, 2003. 11 с.

140. ГОСТ 8882-75 Подшипники шариковые радиальные однорядные с уплотнениями. М.: Издательство стандартов, 1984. 24 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Результаты расчета средней ошибки аппроксимации выражений
определения величины отношения времени всасывания и нагнетания ко времени одного
оборота коленчатого вала**

П.1.1. Шаг №1 (всасывающий трубопровод)

N=55

Значение результативного признака r_{i-1_i} по опыту	ε	n2	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_{i-1_i}	$\frac{ r_{i-1_i} - \tilde{r}_{i-1_i} }{r_{i-1_i}}$
1	10	1	0,94471	0,05529
1,5	6,66	1	1,56651	0,04434
2	5,09	1	2,14785	0,07393
3	3,45	1	3,21659	0,07220
4	2,53	1	4,25997	0,06499
5	2,01	1	5,19347	0,03869
6	1,69	1	6,04148	0,00691
7	1,44	1	6,98795	0,00172
8	1,28	1	7,82106	0,02237
9	1,13	1	8,86848	0,01461
10	1	1	10,10730	0,01073
1	10	1,1	0,96115	0,03885
1,5	6,86	1,1	1,55348	0,03566
2	5,31	1,1	2,12614	0,06307
3	3,71	1,1	3,16985	0,05662
4	2,79	1,1	4,20716	0,05179
5	2,25	1,1	5,15361	0,03072
6	1,9	1,1	6,04932	0,00822
7	1,65	1,1	6,94804	0,00742
8	1,45	1,1	7,94118	0,00735
9	1,32	1,1	8,79940	0,02229
10	1,17	1,1	10,12493	0,01249
1	10	1,2	0,98463	0,01537
1,5	7,12	1,2	1,53889	0,02592
2	5,61	1,2	2,09441	0,04720
3	4,05	1,2	3,11194	0,03731
4	3,11	1,2	4,18040	0,04510
5	2,57	1,2	5,12656	0,02531
6	2,22	1,2	5,99509	0,00082
7	1,93	1,2	6,99258	0,00106
8	1,75	1,2	7,82492	0,02188
9	1,58	1,2	8,85511	0,01610
10	1,42	1,2	10,16956	0,01696
1	10	1,4	1,00359	0,00359
1,5	7,23	1,4	1,55319	0,03546
2	5,85	1,4	2,06436	0,03218
3	4,31	1,4	3,06359	0,02120
4	3,37	1,4	4,13345	0,03336
5	2,82	1,4	5,09855	0,01971
6	2,46	1,4	5,98822	0,00196
7	2,17	1,4	6,96640	0,00480

8	2	1,4	7,71487	0,03564
9	1,8	1,4	8,85947	0,01561
10	1,62	1,4	10,27911	0,02791
1	10	1,6	1,06126	0,06126
1,5	8	1,6	1,46157	0,02562
2	6,5	1,6	1,98587	0,00706
3	5,08	1,6	2,87105	0,04298
4	4,15	1,6	3,88722	0,02819
5	3,59	1,6	4,83613	0,03277
6	3,2	1,6	5,76713	0,03881
7	2,86	1,6	6,88441	0,01651
8	2,65	1,6	7,80108	0,02487
9	2,45	1,6	8,92504	0,00833
10	2,25	1,6	10,42809	0,04281

П.1.2. Шаг №2 (всасывающий трубопровод)

$$a_M \in [0,01; 0,3], N=41$$

Значение резуль­тативного признака ε_{-2_i} по опыту	a_M	rt_{-1}	Расчетное значение резуль­тативного признака $\tilde{\varepsilon}_{-2_i}$	$\frac{ \varepsilon_{-2_i} - \tilde{\varepsilon}_{-2_i} }{\varepsilon_{-2_i}}$
1,39	0,01	1	1,52700	0,09856
1,23	0,01	1,5	1,31749	0,07113
1,16	0,01	2	1,22031	0,05199
1,09	0,01	3	1,12461	0,03175
1,06	0,01	4	1,07532	0,01446
1,04	0,01	5	1,04431	0,00414
1,02	0,01	6	1,02256	0,00251
1,01	0,01	7	1,00623	0,00373
3,68	0,04	1	3,77445	0,02567
3	0,04	1,17	2,85825	0,04725
2,54	0,04	1,4	2,26729	0,10737
2	0,04	1,75	1,83928	0,08036
1,81	0,04	2	1,66909	0,07785
1,5	0,04	2,53	1,45727	0,02849
1,36	0,04	3	1,34846	0,00848
1,23	0,04	4	1,21636	0,01109
1,15	0,04	5	1,14289	0,00619
1,1	0,04	6	1,09542	0,00416
1,07	0,04	7	1,06188	0,00759
10	0,1	1,63	9,50007	0,04999
4,5	0,1	1,95	4,88149	0,08478
4	0,1	2,02	4,44967	0,11242
3	0,1	2,41	3,08463	0,02821
2,25	0,1	3	2,25016	0,00007
2	0,1	3,34	1,99617	0,00192
1,72	0,1	4	1,69129	0,01669
1,45	0,1	5	1,44134	0,00597
1,29	0,1	6	1,29945	0,00733
1,19	0,1	7	1,20773	0,01490

10	0,3	3,36	10,29337	0,02934
9	0,3	3,49	9,01001	0,00111
8	0,3	3,64	7,84548	0,01932
7	0,3	3,79	6,92373	0,01090
6,26	0,3	3,95	6,13410	0,02011
5	0,3	4,26	4,99241	0,00152
4	0,3	4,65	4,01375	0,00344
3,39	0,3	5	3,39675	0,00199
3	0,3	5,3	2,99397	0,00201
2,28	0,3	6	2,33444	0,02388
2	0,3	6,49	2,01887	0,00944
1,81	0,3	7	1,76919	0,02255

$a_M \in (0.3; 0.5]$, $N=32$

Значение резуль- тативного признака ε_{-2_i} по опыту	a_M	rt_{-1}	Расчетное значение результативного признака $\tilde{\varepsilon}_{-2_i}$	$\frac{ \varepsilon_{-2_i} - \tilde{\varepsilon}_{-2_i} }{\varepsilon_{-2_i}}$
10	0,3	3,36	9,89	0,01
9	0,3	3,49	8,95828	0,00464
8	0,3	3,64	7,97148	0,00357
7	0,3	3,79	7,09964	0,01423
6,26	0,3	3,95	6,29830	0,00612
5	0,3	4,26	5,07839	0,01568
4	0,3	4,65	4,01429	0,00357
3,39	0,3	5	3,35741	0,00961
3	0,3	5,3	2,94261	0,01913
2,28	0,3	6	2,30027	0,00889
2	0,3	6,49	2,01416	0,00708
1,81	0,3	7	1,79973	0,00568
10	0,4	3,95	9,96092	0,00391
9	0,4	4,01	9,18946	0,02105
8	0,4	4,13	7,95226	0,00597
7	0,4	4,25	7,00654	0,00093
6	0,4	4,42	5,99771	0,00038
5	0,4	4,66	4,99246	0,00151
4,13	0,4	5	4,05350	0,01852
4	0,4	5,04	3,96756	0,00811
3	0,4	5,67	3,00917	0,00306
2,65	0,4	6	2,69417	0,01667
2,11	0,4	7	2,10472	0,00250
10	0,5	4,43	9,96324	0,00368
9	0,5	4,5	9,01443	0,00160
7	0,5	4,71	7,04830	0,00690
6	0,5	4,9	5,92144	0,01309
5	0,5	5,12	5,02690	0,00538
4	0,5	5,5	4,03582	0,00895
3,39	0,5	5,9	3,38823	0,00052
3	0,5	6,27	2,98114	0,00629
2,46	0,5	7	2,46289	0,00118

П.1.3. Шаг №3 (всасывающий трубопровод)

 $N=65, L/S \leq 3$

Значение результативного признака r_{t_i} по опыту	ε	L/S	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_{t_i}	$\frac{ r_{t_i} - \tilde{r}_{t_i} }{r_{t_i}}$
0,48	1	1	0,48002	0,00003
0,46	1,12	1	0,45859	0,00306
0,44	1,26	1	0,44003	0,00007
0,42	1,45	1	0,42145	0,00344
0,4	1,76	1	0,40020	0,00050
0,38	2,19	1	0,38024	0,00064
0,36	2,86	1	0,35932	0,00189
0,34	3,8	1	0,33916	0,00247
0,32	5	1	0,32021	0,00067
0,3	6,64	1	0,29973	0,00089
0,28	8,46	1	0,28031	0,00111
0,265	10	1	0,26514	0,00054
0,48	1	1,4	0,47864	0,00283
0,46	1,09	1,4	0,46006	0,00012
0,44	1,22	1,4	0,43982	0,00040
0,42	1,39	1,4	0,42053	0,00126
0,4	1,63	1,4	0,40113	0,00283
0,38	2	1,4	0,38064	0,00169
0,36	2,55	1,4	0,36028	0,00079
0,34	3,39	1,4	0,33936	0,00187
0,32	4,48	1,4	0,32002	0,00008
0,3	6	1,4	0,29926	0,00248
0,28	7,64	1,4	0,28042	0,00149
0,26	9,68	1,4	0,25918	0,00316
0,255	10	1,4	0,25595	0,00374
0,48	1	1,8	0,47791	0,00436
0,46	1,06	1,8	0,46374	0,00813
0,44	1,19	1,8	0,44030	0,00067
0,42	1,35	1,8	0,41982	0,00043
0,4	1,57	1,8	0,40000	0,00001
0,38	1,89	1,8	0,38020	0,00053
0,36	2,38	1,8	0,35992	0,00022
0,34	3,11	1,8	0,33972	0,00083
0,32	4,09	1,8	0,32063	0,00196
0,3	5,49	1,8	0,30003	0,00011
0,28	7,02	1,8	0,28143	0,00510
0,26	8,94	1,8	0,26052	0,00198
0,25	10	1,8	0,24947	0,00211
0,48	1	2,3	0,47758	0,00504
0,46	1,06	2,3	0,46192	0,00418
0,44	1,17	2,3	0,43991	0,00020
0,42	1,31	2,3	0,41971	0,00069
0,4	1,52	2,3	0,39856	0,00361
0,38	1,81	2,3	0,37879	0,00319

0,36	2,25	2,3	0,35881	0,00331
0,337	3	2,3	0,33673	0,00079
0,32	3,75	2,3	0,32118	0,00370
0,3	5,08	2,3	0,30029	0,00096
0,28	6,71	2,3	0,27970	0,00109
0,26	8,56	2,3	0,25900	0,00386
0,245	10	2,3	0,24363	0,00560
0,48	1	3	0,47789	0,00440
0,46	1,05	3	0,46288	0,00627
0,44	1,14	3	0,44182	0,00414
0,42	1,27	3	0,41991	0,00023
0,4	1,44	3	0,39988	0,00029
0,38	1,69	3	0,37982	0,00047
0,36	2,08	3	0,35932	0,00189
0,34	2,66	3	0,33954	0,00135
0,32	3,48	3	0,32064	0,00199
0,3	4,72	3	0,30006	0,00020
0,28	6,2	3	0,28057	0,00205
0,26	8	3	0,25981	0,00074
0,24	9,84	3	0,23974	0,00107
0,237	10	3	0,23041	0,02779

$N=14, L/S>3$

Значение результативного признака r_i по опыту	ε	L/S	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_i	$\frac{ r_i - \tilde{r}_i }{r_i}$
0,48	1	∞	0,47997	0,00006
0,46	1,04	∞	0,46006	0,00013
0,44	1,12	∞	0,43985	0,00035
0,42	1,23	∞	0,42024	0,00058
0,4	1,39	∞	0,39969	0,00079
0,38	1,6	∞	0,38029	0,00075
0,36	1,93	∞	0,35984	0,00045
0,34	2,41	∞	0,33998	0,00005
0,32	3,06	∞	0,32021	0,00065
0,3	4,08	∞	0,29964	0,00121
0,28	5,39	∞	0,28038	0,00137
0,26	7	∞	0,25978	0,00083
0,24	8,85	∞	0,24002	0,00008
0,23	10	∞	0,23003	0,00011

П.1.4. Шаг №1 (нагнетательный трубопровод)

$N=62$

Значение результативного признака $r_i - 1_i$ по опыту	ε	n2	Расчетное значение результативного признака $\tilde{r}_i - 1_i$	$\frac{ r_i - 1_i - \tilde{r}_i - 1_i }{r_i - 1_i}$
1	10	1	0,90738	0,09262
1,5	6,46	1	1,49517	0,00322
2	4,8	1	2,04027	0,02013

3	3,2	1	3,03753	0,01251
4	2,37	1	4,02936	0,00734
5	1,88	1	5,01116	0,00223
6	1,57	1	5,97508	0,00415
7	1,35	1	6,99086	0,00131
8	1,2	1	7,98004	0,00250
9	1,09	1	8,96921	0,00342
10	1	1	10,04400	0,00440
1,14	10	1,1	1,14997	0,00875
1,5	7,45	1,1	1,52609	0,01739
2	5,5	1,1	2,02648	0,01324
3	3,49	1,1	3,05145	0,01715
4	2,55	1,1	4,01081	0,00270
5	2	1,1	4,95332	0,00934
6	1,65	1,1	5,88357	0,01941
7	1,37	1,1	7,02692	0,00385
8	1,21	1,1	7,99847	0,00019
9	1,08	1,1	9,10796	0,01200
10	1	1,2	9,98515	0,00149
1,35	10	1,2	1,36088	0,00806
1,5	8,9	1,2	1,50052	0,00035
2	6,41	1,2	1,97761	0,01119
3	3,9	1,2	2,99257	0,00248
4	2,72	1,2	4,01567	0,00392
5	2,05	1,2	5,05175	0,01035
6	1,67	1,2	5,99331	0,00112
7	1,43	1,2	6,87161	0,01834
8	1,22	1,2	8,00430	0,00054
9	1,1	1,2	8,93461	0,00727
10	1	1,2	9,98515	0,00149
1,54	10	1,3	1,55906	0,01238
2	7,33	1,3	1,97116	0,01442
3	4,22	1,3	3,01915	0,00638
4	2,95	1,3	3,97534	0,00617
5	2,16	1,3	5,04226	0,00845
6	1,72	1,3	6,01824	0,00304
7	1,42	1,3	7,04526	0,00647
8	1,22	1,3	8,07813	0,00977
9	1,09	1,3	9,04239	0,00471
10	1	1,3	9,94503	0,00550
1,74	10	1,4	1,76345	0,01348
2	8,5	1,4	1,96898	0,01551
3	4,8	1,4	2,95374	0,01542
4	3,2	1,4	3,96103	0,00974
5	2,32	1,4	4,99156	0,00169
6	1,8	1,4	5,99915	0,00014
7	1,47	1,4	6,99406	0,00085
8	1,24	1,4	8,05132	0,00641
9	1,09	1,4	9,07561	0,00840
10	1	1,4	9,92304	0,00770

2,21	10	1,6	2,26669	0,02565
3	6,24	1,6	2,97283	0,00906
4	3,9	1,6	3,98248	0,00438
5	2,7	1,6	5,02807	0,00561
6	2,05	1,6	5,98298	0,00284
7	1,61	1,6	6,98314	0,00241
8	1,32	1,6	7,99277	0,00090
9	1,13	1,6	8,99556	0,00049
10	1	1,6	10,00930	0,00093

П.1.5. Шаг №2 (нагнетательный трубопровод)

$N=76$

Значение результативного признака ε_{-2_i} по опыту	am	rt_1	Расчетное значение результативного признака $\tilde{\varepsilon}_{-2_i}$	$\frac{ \varepsilon_{-2_i} - \tilde{\varepsilon}_{-2_i} }{\varepsilon_{-2_i}}$
1,55	0,01	1	1,52247	0,01776
2	0,01	1,6	1,94375	0,02813
3	0,01	2,53	2,86324	0,04559
4	0,01	3,3	3,96329	0,00918
5	0,01	3,85	5,01414	0,00283
6	0,01	4,21	5,86087	0,02319
7	0,01	4,58	6,89748	0,01465
7,99	0,01	4,9	7,96226	0,00347
9	0,01	5,11	8,76394	0,02623
10	0,01	5,37	9,89206	0,01079
1,38	0,04	1	1,37679	0,00233
1,5	0,04	1,21	1,50483	0,00322
2	0,04	1,92	2,03943	0,01972
3	0,04	2,85	3,04317	0,01439
4	0,04	3,52	4,06197	0,01549
5	0,04	4,04	5,08959	0,01792
6	0,04	4,45	6,09205	0,01534
7	0,04	4,79	7,08656	0,01237
8	0,04	5,06	8,00592	0,00074
9	0,04	5,3	8,93894	0,00678
10	0,04	5,58	10,19295	0,01930
1,11	0,1	1	1,11656	0,00591
1,5	0,1	1,57	1,46519	0,02320
2	0,1	2,2	1,96897	0,01552
3	0,1	3,12	2,99951	0,00016
4	0,1	3,81	4,08881	0,02220
5	0,1	4,3	5,09054	0,01811
6	0,1	4,7	6,09275	0,01546
7	0,1	5,07	7,20718	0,02960
8	0,1	5,3	8,01112	0,00139
9	0,1	5,57	9,08630	0,00959
10	0,1	5,85	10,38123	0,03812
1	0,2	1,57	1,04435	0,04435
1,5	0,2	2,28	1,56846	0,04564
2	0,2	2,81	2,08024	0,04012

3	0,2	3,53	2,99095	0,00302
4	0,2	4,12	3,98072	0,00482
5	0,2	4,56	4,90801	0,01840
6	0,2	5	6,04492	0,00749
7	0,2	5,24	6,77444	0,03222
8	0,2	5,49	7,63359	0,04580
9	0,2	5,78	8,78081	0,02435
10	0,2	6,04	9,97505	0,00249
1	0,3	2,11	0,99785	0,00215
1,5	0,3	2,75	1,53805	0,02537
2	0,3	3,21	2,03049	0,01524
3	0,3	3,95	3,06030	0,02010
4	0,3	4,46	3,99252	0,00187
5	0,3	4,9	4,99023	0,00195
6	0,3	5,22	5,85779	0,02370
7	0,3	5,55	6,90776	0,01318
8	0,3	5,8	7,83024	0,02122
9	0,3	6,03	8,79498	0,02278
10	0,3	6,3	10,09756	0,00976
1	0,4	2,61	0,93671	0,06329
1,5	0,4	3,25	1,53794	0,02529
2	0,4	3,71	2,08461	0,04231
3	0,4	4,39	3,12037	0,04012
4	0,4	4,9	4,12903	0,03226
5	0,4	5,28	5,04955	0,00991
6	0,4	5,63	6,05837	0,00973
7	0,4	5,9	6,96560	0,00491
8	0,4	6,16	7,96756	0,00406
9	0,4	6,41	9,07304	0,00812
10	0,4	6,7	10,56780	0,05678
1	0,5	3,17	0,91781	0,08219
1,5	0,5	3,72	1,46189	0,02541
2	0,5	4,14	1,96910	0,01545
3	0,5	4,82	3,00324	0,00108
4	0,5	5,34	4,02193	0,00548
5	0,5	5,74	4,98029	0,00394
6	0,5	6,07	5,91396	0,01434
7	0,5	6,39	6,97054	0,00421
8	0,5	6,6	7,76040	0,02995
9	0,5	6,9	9,04784	0,00532
10	0,5	7,1	10,02870	0,00287

П.1.6. Шаг №6 (нагнетательный трубопровод)

$N=65, L/S \leq 3$

Значение результативного признака r_i по опыту	ε	L/S	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_i	$\frac{ r_i - \tilde{r}_i }{r_i}$
0,23	10	1	0,23296	0,01286
0,22	8,36	1	0,21858	0,00645
0,2	6,41	1	0,19864	0,00679

0,18	5	1	0,18097	0,00538
0,16	3,73	1	0,16057	0,00353
0,14	2,79	1	0,13979	0,00151
0,12	2,14	1	0,11898	0,00846
0,1	1,72	1	0,09906	0,00940
0,08	1,43	1	0,07860	0,01744
0,06	1,25	1	0,06020	0,00334
0,04	1,12	1	0,04172	0,04299
0,02	1	1	0,01761	0,11965
0,245	10	1,4	0,24259	0,00985
0,24	9,47	1,4	0,23797	0,00845
0,22	7,56	1,4	0,21980	0,00090
0,2	5,79	1,4	0,19975	0,00123
0,18	4,47	1,4	0,18121	0,00670
0,16	3,38	1,4	0,16136	0,00852
0,14	2,55	1,4	0,14043	0,00311
0,12	2	1,4	0,12027	0,00224
0,1	1,64	1,4	0,10084	0,00840
0,08	1,38	1,4	0,08002	0,00028
0,06	1,22	1,4	0,06142	0,02368
0,04	1,09	1,4	0,04000	0,00002
0,02	1	1,4	0,01923	0,03861
0,25	10	1,8	0,24950	0,00202
0,24	9	1,8	0,24045	0,00189
0,22	7	1,8	0,22019	0,00088
0,2	5,31	1,8	0,19947	0,00266
0,18	4,09	1,8	0,18067	0,00375
0,16	3,08	1,8	0,16020	0,00123
0,14	2,35	1,8	0,13937	0,00453
0,12	1,88	1,8	0,11980	0,00167
0,1	1,56	1,8	0,10020	0,00198
0,08	1,34	1,8	0,08036	0,00444
0,06	1,2	1,8	0,06235	0,03917
0,04	1,08	1,8	0,04064	0,01598
0,02	1	1,8	0,02051	0,02562
0,255	10	2,3	0,25591	0,00359
0,24	8,34	2,3	0,24025	0,00104
0,22	6,58	2,3	0,22124	0,00564
0,2	5	2,3	0,20063	0,00314
0,18	3,78	2,3	0,18038	0,00210
0,16	2,84	2,3	0,15937	0,00397
0,14	2,21	2,3	0,13938	0,00446
0,12	1,8	2,3	0,12053	0,00445
0,1	1,5	2,3	0,10019	0,00189
0,08	1,3	2,3	0,08000	0,00002
0,06	1,18	2,3	0,06285	0,04752
0,04	1,06	2,3	0,03855	0,03633
0,02	1	2,3	0,02181	0,09037
0,262	10	3	0,26242	0,00161
0,26	9,77	3	0,26031	0,00118

0,24	7,75	3	0,24031	0,00129
0,22	6,01	3	0,22010	0,00047
0,2	4,57	3	0,19965	0,00174
0,18	3,46	3	0,17940	0,00334
0,16	2,63	3	0,15882	0,00740
0,14	2,06	3	0,13854	0,01043
0,12	1,68	3	0,11850	0,01247
0,1	1,43	3	0,09885	0,01151
0,08	1,25	3	0,07782	0,02725
0,06	1,14	3	0,05939	0,01025
0,04	1,05	3	0,03851	0,03736
0,02	1	3	0,02323	0,16134

$N=14, L/S>3$

Значение результативного признака r_i по опыту	ε	LS	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_i	$\frac{ r_i - \tilde{r}_i }{r_i}$
0,27	10	∞	0,27003	0,00012
0,26	9	∞	0,25998	0,00007
0,24	7	∞	0,23982	0,00075
0,22	5,35	∞	0,22043	0,00195
0,2	4	∞	0,19950	0,00251
0,18	3,09	∞	0,18033	0,00181
0,16	2,39	∞	0,16000	0,00003
0,14	1,91	∞	0,13970	0,00213
0,12	1,6	∞	0,12026	0,00215
0,1	1,38	∞	0,10019	0,00193
0,08	1,22	∞	0,07957	0,00542
0,06	1,11	∞	0,06023	0,00386
0,04	1,03	∞	0,03997	0,00083
0,02	1	∞	0,02000	0,00007

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Результаты расчета коэффициента нелинейной корреляции, его значимости для выражений определения величины отношения времени всасывания и нагнетания ко времени одного оборота коленчатого вала

П.2.1. Шаг №1 (всасывающий трубопровод)

$N=55, r_{t-1_{CP}} = 5.1, K=2$

Значение результативного признака r_{t-1_i} по опыту	ε	n2	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_{t-1_i}	$\llcorner_{-1_i - \tilde{r}_{t-1_i}} \gg$	$\llcorner_{-1_i - r_{t-1_{CP}}} \gg$
1	10	1	0,94471	0,003	17,110
1,5	6,66	1	1,56651	0,004	13,223
2	5,09	1	2,14785	0,022	9,837
3	3,45	1	3,21659	0,047	4,564
4	2,53	1	4,25997	0,068	1,291
5	2,01	1	5,19347	0,037	0,019
6	1,69	1	6,04148	0,002	0,746
7	1,44	1	6,98795	0,000	3,473
8	1,28	1	7,82106	0,032	8,200
9	1,13	1	8,86848	0,017	14,928
10	1	1	10,10730	0,012	23,655
1	10	1,1	0,96115	0,002	17,110
1,5	6,86	1,1	1,55348	0,003	13,223
2	5,31	1,1	2,12614	0,016	9,837
3	3,71	1,1	3,16985	0,029	4,564
4	2,79	1,1	4,20716	0,043	1,291
5	2,25	1,1	5,15361	0,024	0,019
6	1,9	1,1	6,04932	0,002	0,746
7	1,65	1,1	6,94804	0,003	3,473
8	1,45	1,1	7,94118	0,003	8,200
9	1,32	1,1	8,79940	0,040	14,928
10	1,17	1,1	10,12493	0,016	23,655
1	10	1,2	0,98463	0,000	17,110
1,5	7,12	1,2	1,53889	0,002	13,223
2	5,61	1,2	2,09441	0,009	9,837
3	4,05	1,2	3,11194	0,013	4,564
4	3,11	1,2	4,18040	0,033	1,291
5	2,57	1,2	5,12656	0,016	0,019
6	2,22	1,2	5,99509	0,000	0,746
7	1,93	1,2	6,99258	0,000	3,473
8	1,75	1,2	7,82492	0,031	8,200
9	1,58	1,2	8,85511	0,021	14,928
10	1,42	1,2	10,16956	0,029	23,655
1	10	1,4	1,00359	0,000	17,110
1,5	7,23	1,4	1,55319	0,003	13,223
2	5,85	1,4	2,06436	0,004	9,837
3	4,31	1,4	3,06359	0,004	4,564

4	3,37	1,4	4,13345	0,018	1,291
5	2,82	1,4	5,09855	0,010	0,019
6	2,46	1,4	5,98822	0,000	0,746
7	2,17	1,4	6,96640	0,001	3,473
8	2	1,4	7,71487	0,081	8,200
9	1,8	1,4	8,85947	0,020	14,928
10	1,62	1,4	10,27911	0,078	23,655
1	10	1,6	1,06126	0,004	17,110
1,5	8	1,6	1,46157	0,001	13,223
2	6,5	1,6	1,98587	0,000	9,837
3	5,08	1,6	2,87105	0,017	4,564
4	4,15	1,6	3,88722	0,013	1,291
5	3,59	1,6	4,83613	0,027	0,019
6	3,2	1,6	5,76713	0,054	0,746
7	2,86	1,6	6,88441	0,013	3,473
8	2,65	1,6	7,80108	0,040	8,200
9	2,45	1,6	8,92504	0,006	14,928
10	2,25	1,6	10,42809	0,183	23,655

П.2.2. Шаг №2 (всасывающий трубопровод)

$$a_M \in [0,01; 0,3], N=41, \varepsilon_{-2_{CP}} = 2,99, K=2$$

Значение результативного признака ε_{-2_i} по опыту	a_M	rt_{-1}	Расчетное значение результативного признака $\tilde{\varepsilon}_{-2_i}$	$\llbracket \varepsilon_{-2_i} - \tilde{\varepsilon}_{-2_i} \rrbracket$	$\llbracket \varepsilon_{-2_i} - \varepsilon_{-2_{CP}} \rrbracket$
1,39	0,01	1	1,52700	0,019	2,559
1,23	0,01	1,5	1,31749	0,008	3,097
1,16	0,01	2	1,22031	0,004	3,348
1,09	0,01	3	1,12461	0,001	3,609
1,06	0,01	4	1,07532	0,000	3,724
1,04	0,01	5	1,04431	0,000	3,802
1,02	0,01	6	1,02256	0,000	3,880
1,01	0,01	7	1,00623	0,000	3,919
3,68	0,04	1	3,77445	0,009	0,476
3	0,04	1,17	2,85825	0,020	0,000
2,54	0,04	1,4	2,26729	0,074	0,202
2	0,04	1,75	1,83928	0,026	0,980
1,81	0,04	2	1,66909	0,020	1,392
1,5	0,04	2,53	1,45727	0,002	2,219
1,36	0,04	3	1,34846	0,000	2,656
1,23	0,04	4	1,21636	0,000	3,097
1,15	0,04	5	1,14289	0,000	3,385
1,1	0,04	6	1,09542	0,000	3,571
1,07	0,04	7	1,06188	0,000	3,685
10	0,1	1,63	9,50007	0,250	49,144
4,5	0,1	1,95	4,88149	0,146	2,281
4	0,1	2,02	4,44967	0,202	1,021
3	0,1	2,41	3,08463	0,007	0,000
2,25	0,1	3	2,25016	0,000	0,547

2	0,1	3,34	1,99617	0,000	0,980
1,72	0,1	4	1,69129	0,001	1,612
1,45	0,1	5	1,44134	0,000	2,371
1,29	0,1	6	1,29945	0,000	2,889
1,19	0,1	7	1,20773	0,000	3,239
10	0,3	3,36	10,29337	0,086	49,144
9	0,3	3,49	9,01001	0,000	36,123
8	0,3	3,64	7,84548	0,024	25,103
7	0,3	3,79	6,92373	0,006	16,082
6,26	0,3	3,95	6,13410	0,016	10,694
5	0,3	4,26	4,99241	0,000	4,041
4	0,3	4,65	4,01375	0,000	1,021
3,39	0,3	5	3,39675	0,000	0,160
3	0,3	5,3	2,99397	0,000	0,000
2,28	0,3	6	2,33444	0,003	0,504
2	0,3	6,49	2,01887	0,000	0,980
1,81	0,3	7	1,76919	0,002	1,392

$a_M \in (0.3; 0.5]$, $N=32$, $\varepsilon_{-2_{CP}} = 5.39$, $K=2$

Значение результативного признака ε_{-2_i} по опыту	a_M	rt_{-1}	Расчетное значение результативного признака $\tilde{\varepsilon}_{-2_i}$	$\llbracket \varepsilon_{-2_i} - \tilde{\varepsilon}_{-2_i} \rrbracket$	$\llbracket \varepsilon_{-2_i} - \varepsilon_{-2_{CP}} \rrbracket$
10	0,3	3,36	9,89	0,012	21,2521
9	0,3	3,49	8,95828	0,002	13,0321
8	0,3	3,64	7,97148	0,001	6,8121
7	0,3	3,79	7,09964	0,010	2,5921
6,26	0,3	3,95	6,29830	0,001	0,7569
5	0,3	4,26	5,07839	0,006	0,1521
4	0,3	4,65	4,01429	0,000	1,9321
3,39	0,3	5	3,35741	0,001	4
3	0,3	5,3	2,94261	0,003	5,7121
2,28	0,3	6	2,30027	0,000	9,6721
2	0,3	6,49	2,01416	0,000	11,4921
1,81	0,3	7	1,79973	0,000	12,8164
10	0,4	3,95	9,96092	0,002	21,2521
9	0,4	4,01	9,18946	0,036	13,0321
8	0,4	4,13	7,95226	0,002	6,8121
7	0,4	4,25	7,00654	0,000	2,5921
6	0,4	4,42	5,99771	0,000	0,3721
5	0,4	4,66	4,99246	0,000	0,1521
4,13	0,4	5	4,05350	0,006	1,5876
4	0,4	5,04	3,96756	0,001	1,9321
3	0,4	5,67	3,00917	0,000	5,7121
2,65	0,4	6	2,69417	0,002	7,5076
2,11	0,4	7	2,10472	0,000	10,7584
10	0,5	4,43	9,96324	0,001	21,2521
9	0,5	4,5	9,01443	0,000	13,0321
7	0,5	4,71	7,04830	0,002	2,5921
6	0,5	4,9	5,92144	0,006	0,3721

5	0,5	5,12	5,02690	0,001	0,1521
4	0,5	5,5	4,03582	0,001	1,9321
3,39	0,5	5,9	3,38823	0,000	4
3	0,5	6,27	2,98114	0,000	5,7121
2,46	0,5	7	2,46289	0,000	8,5849

П.2.3. Шаг №3 (всасывающий трубопровод)

$L/S \leq 3$, $N=65$, $r_{t_{CP}} = 0.36$, $K=2$

Значение результативного признака r_i по опыту	ε	L/S	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_i	$(r_i - \tilde{r}_i)^2$	$(r_i - r_{t_{CP}})^2$
0,48	1	1	0,48002	0,000000000265	0,014
0,46	1,12	1	0,45859	0,000001978850	0,010
0,44	1,26	1	0,44003	0,000000000986	0,006
0,42	1,45	1	0,42145	0,000002090190	0,004
0,4	1,76	1	0,40020	0,000000040166	0,002
0,38	2,19	1	0,38024	0,000000059187	0,000
0,36	2,86	1	0,35932	0,000000464193	0,000
0,34	3,8	1	0,33916	0,000000705908	0,000
0,32	5	1	0,32021	0,000000045342	0,002
0,3	6,64	1	0,29973	0,000000071919	0,004
0,28	8,46	1	0,28031	0,000000097200	0,006
0,265	10	1	0,26514	0,000000020111	0,009
0,48	1	1,4	0,47864	0,000001851639	0,014
0,46	1,09	1,4	0,46006	0,000000003158	0,010
0,44	1,22	1,4	0,43982	0,000000031741	0,006
0,42	1,39	1,4	0,42053	0,000000279509	0,004
0,4	1,63	1,4	0,40113	0,000001280753	0,002
0,38	2	1,4	0,38064	0,000000414769	0,000
0,36	2,55	1,4	0,36028	0,000000079973	0,000
0,34	3,39	1,4	0,33936	0,000000404985	0,000
0,32	4,48	1,4	0,32002	0,000000000603	0,002
0,3	6	1,4	0,29926	0,000000552692	0,004
0,28	7,64	1,4	0,28042	0,000000174261	0,006
0,26	9,68	1,4	0,25918	0,000000676780	0,010
0,255	10	1,4	0,25595	0,000000907123	0,011
0,48	1	1,8	0,47791	0,000004377131	0,014
0,46	1,06	1,8	0,46374	0,000013994188	0,010
0,44	1,19	1,8	0,44030	0,000000087874	0,006
0,42	1,35	1,8	0,41982	0,000000032387	0,004
0,4	1,57	1,8	0,40000	0,000000000023	0,002
0,38	1,89	1,8	0,38020	0,000000040369	0,000
0,36	2,38	1,8	0,35992	0,000000006101	0,000
0,34	3,11	1,8	0,33972	0,000000079826	0,000
0,32	4,09	1,8	0,32063	0,000000391452	0,002
0,3	5,49	1,8	0,30003	0,000000001067	0,004
0,28	7,02	1,8	0,28143	0,000002039938	0,006
0,26	8,94	1,8	0,26052	0,000000266323	0,010

0,25	10	1,8	0,24947	0,000000277978	0,012
0,48	1	2,3	0,47758	0,000005849976	0,014
0,46	1,06	2,3	0,46192	0,000003698628	0,010
0,44	1,17	2,3	0,43991	0,000000007724	0,006
0,42	1,31	2,3	0,41971	0,000000083735	0,004
0,4	1,52	2,3	0,39856	0,000002082754	0,002
0,38	1,81	2,3	0,37879	0,000001473662	0,000
0,36	2,25	2,3	0,35881	0,000001418854	0,000
0,337	3	2,3	0,33673	0,000000070974	0,001
0,32	3,75	2,3	0,32118	0,000001404143	0,002
0,3	5,08	2,3	0,30029	0,000000083374	0,004
0,28	6,71	2,3	0,27970	0,000000092969	0,006
0,26	8,56	2,3	0,25900	0,000001007846	0,010
0,245	10	2,3	0,24363	0,000001884651	0,013
0,48	1	3	0,47789	0,000004456948	0,014
0,46	1,05	3	0,46288	0,000008320051	0,010
0,44	1,14	3	0,44182	0,000003315867	0,006
0,42	1,27	3	0,41991	0,000000008991	0,004
0,4	1,44	3	0,39988	0,000000013421	0,002
0,38	1,69	3	0,37982	0,000000031788	0,000
0,36	2,08	3	0,35932	0,000000465144	0,000
0,34	2,66	3	0,33954	0,000000210923	0,000
0,32	3,48	3	0,32064	0,000000404672	0,002
0,3	4,72	3	0,30006	0,000000003452	0,004
0,28	6,2	3	0,28057	0,000000329268	0,006
0,26	8	3	0,25981	0,000000036797	0,010
0,24	9,84	3	0,23974	0,000000065694	0,015
0,237	10	3	0,23041	0,000043384152	0,015

$N=14$, $r_{tCP} = 0.351$, $L/S > 3$, $K=2$

Значение результативного признака r_i по опыту	ε	L/S	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_i	$\left(r_i - \tilde{r}_i \right)^2$	$\left(r_i - r_{tCP} \right)^2$
0,48	1	∞	0,47997	0,00000000082	0,017
0,46	1,04	∞	0,46006	0,00000000354	0,212
0,44	1,12	∞	0,43985	0,00000002359	0,194
0,42	1,23	∞	0,42024	0,00000005962	0,176
0,4	1,39	∞	0,39969	0,00000009904	0,160
0,38	1,6	∞	0,38029	0,00000008136	0,144
0,36	1,93	∞	0,35984	0,00000002568	0,130
0,34	2,41	∞	0,33998	0,00000000027	0,116
0,32	3,06	∞	0,32021	0,00000004339	0,102
0,3	4,08	∞	0,29964	0,00000013131	0,090
0,28	5,39	∞	0,28038	0,00000014764	0,078
0,26	7	∞	0,25978	0,00000004671	0,068
0,24	8,85	∞	0,24002	0,00000000041	0,058
0,23	10	∞	0,23003	0,00000000063	0,053

П.2.4. Шаг №1 (нагнетательный трубопровод)

 $N=62, r_{t-1_{CP}} = 5.41, K=2$

Значение результативного признака r_{t-1_i} по опыту	ε	n2	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_{t-1_i}	$ r_{t-1_i} - \tilde{r}_{t-1_i} $	$\frac{ r_{t-1_i} - \tilde{r}_{t-1_i} }{r_{t-1_i}}$
1	10	1	0,90738	0,00858	19,457
1,5	6,46	1	1,49517	0,00002	15,296
2	4,8	1	2,04027	0,00162	11,635
3	3,2	1	3,03753	0,00141	5,813
4	2,37	1	4,02936	0,00086	1,991
5	1,88	1	5,01116	0,00012	0,169
6	1,57	1	5,97508	0,00062	0,347
7	1,35	1	6,99086	0,00008	2,525
8	1,2	1	7,98004	0,00040	6,703
9	1,09	1	8,96921	0,00095	12,881
10	1	1	10,04400	0,00194	21,059
1,14	10	1,1	1,14997	0,00010	18,241
1,5	7,45	1,1	1,52609	0,00068	15,296
2	5,5	1,1	2,02648	0,00070	11,635
3	3,49	1,1	3,05145	0,00265	5,813
4	2,55	1,1	4,01081	0,00012	1,991
5	2	1,1	4,95332	0,00218	0,169
6	1,65	1,1	5,88357	0,01356	0,347
7	1,37	1,1	7,02692	0,00072	2,525
8	1,21	1,1	7,99847	0,00000	6,703
9	1,08	1,1	9,10796	0,01166	12,881
10	1	1,2	9,98515	0,00022	21,059
1,35	10	1,2	1,36088	0,00012	16,491
1,5	8,9	1,2	1,50052	0,00000	15,296
2	6,41	1,2	1,97761	0,00050	11,635
3	3,9	1,2	2,99257	0,00006	5,813
4	2,72	1,2	4,01567	0,00025	1,991
5	2,05	1,2	5,05175	0,00268	0,169
6	1,67	1,2	5,99331	0,00004	0,347
7	1,43	1,2	6,87161	0,01648	2,525
8	1,22	1,2	8,00430	0,00002	6,703
9	1,1	1,2	8,93461	0,00428	12,881
10	1	1,2	9,98515	0,00022	21,059
1,54	10	1,3	1,55906	0,00036	14,984
2	7,33	1,3	1,97116	0,00083	11,635
3	4,22	1,3	3,01915	0,00037	5,813
4	2,95	1,3	3,97534	0,00061	1,991
5	2,16	1,3	5,04226	0,00179	0,169
6	1,72	1,3	6,01824	0,00033	0,347
7	1,42	1,3	7,04526	0,00205	2,525
8	1,22	1,3	8,07813	0,00610	6,703
9	1,09	1,3	9,04239	0,00180	12,881

10	1	1,3	9,94503	0,00302	21,059
1,74	10	1,4	1,76345	0,00055	13,476
2	8,5	1,4	1,96898	0,00096	11,635
3	4,8	1,4	2,95374	0,00214	5,813
4	3,2	1,4	3,96103	0,00152	1,991
5	2,32	1,4	4,99156	0,00007	0,169
6	1,8	1,4	5,99915	0,00000	0,347
7	1,47	1,4	6,99406	0,00004	2,525
8	1,24	1,4	8,05132	0,00263	6,703
9	1,09	1,4	9,07561	0,00572	12,881
10	1	1,4	9,92304	0,00592	21,059
2,21	10	1,6	2,26669	0,00321	10,246
3	6,24	1,6	2,97283	0,00074	5,813
4	3,9	1,6	3,98248	0,00031	1,991
5	2,7	1,6	5,02807	0,00079	0,169
6	2,05	1,6	5,98298	0,00029	0,347
7	1,61	1,6	6,98314	0,00028	2,525
8	1,32	1,6	7,99277	0,00005	6,703
9	1,13	1,6	8,99556	0,00002	12,881
10	1	1,6	10,00930	0,00009	21,059

П.2.5. Шаг №2 (нагнетательный трубопровод)

$N=76$, $\varepsilon_{-2_{CP}} = 5.198$, $K=2$

Значение результативного признака ε_{-2_i} по опыту	a_M	rt_{-1}	Расчетное значение результативного признака $\tilde{\varepsilon}_{-2_i}$	$\langle \varepsilon_{-2_i} - \tilde{\varepsilon}_{-2_i} \rangle$	$\langle \varepsilon_{-2_i} - \varepsilon_{-2_{CP}} \rangle$
1,55	0,01	1	1,52247	0,00076	13,306
2	0,01	1,6	1,94375	0,00316	10,226
3	0,01	2,53	2,86324	0,01870	4,830
4	0,01	3,3	3,96329	0,00135	1,435
5	0,01	3,85	5,01414	0,00020	0,039
6	0,01	4,21	5,86087	0,01936	0,644
7	0,01	4,58	6,89748	0,01051	3,248
7,99	0,01	4,9	7,96226	0,00077	7,797
9	0,01	5,11	8,76394	0,05573	14,457
10	0,01	5,37	9,89206	0,01165	23,061
1,38	0,04	1	1,37679	0,00001	14,575
1,5	0,04	1,21	1,50483	0,00002	13,673
2	0,04	1,92	2,03943	0,00155	10,226
3	0,04	2,85	3,04317	0,00186	4,830
4	0,04	3,52	4,06197	0,00384	1,435
5	0,04	4,04	5,08959	0,00803	0,039
6	0,04	4,45	6,09205	0,00847	0,644
7	0,04	4,79	7,08656	0,00749	3,248
8	0,04	5,06	8,00592	0,00004	7,853
9	0,04	5,3	8,93894	0,00373	14,457
10	0,04	5,58	10,19295	0,03723	23,061

1,11	0,1	1	1,11656	0,00004	16,710
1,5	0,1	1,57	1,46519	0,00121	13,673
2	0,1	2,2	1,96897	0,00096	10,226
3	0,1	3,12	2,99951	0,00000	4,830
4	0,1	3,81	4,08881	0,00789	1,435
5	0,1	4,3	5,09054	0,00820	0,039
6	0,1	4,7	6,09275	0,00860	0,644
7	0,1	5,07	7,20718	0,04292	3,248
8	0,1	5,3	8,01112	0,00012	7,853
9	0,1	5,57	9,08630	0,00745	14,457
10	0,1	5,85	10,38123	0,14534	23,061
1	0,2	1,57	1,04435	0,00197	17,621
1,5	0,2	2,28	1,56846	0,00469	13,673
2	0,2	2,81	2,08024	0,00644	10,226
3	0,2	3,53	2,99095	0,00008	4,830
4	0,2	4,12	3,98072	0,00037	1,435
5	0,2	4,56	4,90801	0,00846	0,039
6	0,2	5	6,04492	0,00202	0,644
7	0,2	5,24	6,77444	0,05088	3,248
8	0,2	5,49	7,63359	0,13426	7,853
9	0,2	5,78	8,78081	0,04804	14,457
10	0,2	6,04	9,97505	0,00062	23,061
1	0,3	2,11	0,99785	0,00000	17,621
1,5	0,3	2,75	1,53805	0,00145	13,673
2	0,3	3,21	2,03049	0,00093	10,226
3	0,3	3,95	3,06030	0,00364	4,830
4	0,3	4,46	3,99252	0,00006	1,435
5	0,3	4,9	4,99023	0,00010	0,039
6	0,3	5,22	5,85779	0,02022	0,644
7	0,3	5,55	6,90776	0,00851	3,248
8	0,3	5,8	7,83024	0,02882	7,853
9	0,3	6,03	8,79498	0,04203	14,457
10	0,3	6,3	10,09756	0,00952	23,061
1	0,4	2,61	0,93671	0,00401	17,621
1,5	0,4	3,25	1,53794	0,00144	13,673
2	0,4	3,71	2,08461	0,00716	10,226
3	0,4	4,39	3,12037	0,01449	4,830
4	0,4	4,9	4,12903	0,01665	1,435
5	0,4	5,28	5,04955	0,00246	0,039
6	0,4	5,63	6,05837	0,00341	0,644
7	0,4	5,9	6,96560	0,00118	3,248
8	0,4	6,16	7,96756	0,00105	7,853
9	0,4	6,41	9,07304	0,00533	14,457
10	0,4	6,7	10,56780	0,32239	23,061
1	0,5	3,17	0,91781	0,00675	17,621
1,5	0,5	3,72	1,46189	0,00145	13,673
2	0,5	4,14	1,96910	0,00095	10,226
3	0,5	4,82	3,00324	0,00001	4,830
4	0,5	5,34	4,02193	0,00048	1,435
5	0,5	5,74	4,98029	0,00039	0,039

6	0,5	6,07	5,91396	0,00740	0,644
7	0,5	6,39	6,97054	0,00087	3,248
8	0,5	6,6	7,76040	0,05741	7,853
9	0,5	6,9	9,04784	0,00229	14,457
10	0,5	7,1	10,02870	0,00082	23,061

П.2.4. Шаг №3 (нагнетательный трубопровод)

$N=80$, $r_{tCP} = 0.139$, $K=2$, $L/S \leq 3$

Значение результативного признака r_{t_i} по опыту	ε	L/S	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_{t_i}	$\left(r_{t_i} - \tilde{r}_{t_i} \right)^2$	$\left(r_{t_i} - r_{tCP} \right)^2$
0,23	10	1	0,23296	0,00000874307	0,00821
0,22	8,36	1	0,21858	0,00000201098	0,00649
0,2	6,41	1	0,19864	0,00000184345	0,00367
0,18	5	1	0,18097	0,00000093798	0,00165
0,16	3,73	1	0,16057	0,00000031973	0,00042
0,14	2,79	1	0,13979	0,00000004476	0,00000
0,12	2,14	1	0,11898	0,00000103052	0,00038
0,1	1,72	1	0,09906	0,00000088440	0,00155
0,08	1,43	1	0,07860	0,00000194674	0,00353
0,06	1,25	1	0,06020	0,00000004015	0,00631
0,04	1,12	1	0,04172	0,00000295768	0,00988
0,02	1	1	0,01761	0,00000572640	0,01426
0,245	10	1,4	0,24259	0,00000582688	0,01115
0,24	9,47	1,4	0,23797	0,00000411426	0,01012
0,22	7,56	1,4	0,21980	0,00000003922	0,00649
0,2	5,79	1,4	0,19975	0,00000006076	0,00367
0,18	4,47	1,4	0,18121	0,00000145518	0,00165
0,16	3,38	1,4	0,16136	0,00000185636	0,00042
0,14	2,55	1,4	0,14043	0,00000018902	0,00000
0,12	2	1,4	0,12027	0,00000007234	0,00038
0,1	1,64	1,4	0,10084	0,00000070509	0,00155
0,08	1,38	1,4	0,08002	0,00000000051	0,00353
0,06	1,22	1,4	0,06142	0,00000201791	0,00631
0,04	1,09	1,4	0,04000	0	0,00988
0,02	1	1,4	0,01923	0,00000059615	0,01426
0,25	10	1,8	0,24950	0,00000025448	0,01223
0,24	9	1,8	0,24045	0,00000020467	0,01012
0,22	7	1,8	0,22019	0,00000003777	0,00649
0,2	5,31	1,8	0,19947	0,00000028293	0,00367
0,18	4,09	1,8	0,18067	0,00000045482	0,00165
0,16	3,08	1,8	0,16020	0,00000003886	0,00042
0,14	2,35	1,8	0,13937	0,00000040229	0,00000
0,12	1,88	1,8	0,11980	0,00000004000	0,00038
0,1	1,56	1,8	0,10020	0,00000003922	0,00155
0,08	1,34	1,8	0,08036	0,00000012619	0,00353
0,06	1,2	1,8	0,06235	0,00000552221	0,00631
0,04	1,08	1,8	0,04064	0,00000040863	0,00988

0,02	1	1,8	0,02051	0,00000026264	0,01426
0,255	10	2,3	0,25591	0,00000083585	0,01336
0,24	8,34	2,3	0,24025	0,00000006245	0,01012
0,22	6,58	2,3	0,22124	0,00000153767	0,00649
0,2	5	2,3	0,20063	0,00000039555	0,00367
0,18	3,78	2,3	0,18038	0,00000014271	0,00165
0,16	2,84	2,3	0,15937	0,00000040301	0,00042
0,14	2,21	2,3	0,13938	0,00000038916	0,00000
0,12	1,8	2,3	0,12053	0,00000028575	0,00038
0,1	1,5	2,3	0,10019	0,00000003571	0,00155
0,08	1,3	2,3	0,08000	0	0,00353
0,06	1,18	2,3	0,06285	0,00000813017	0,00631
0,04	1,06	2,3	0,03855	0,00000211194	0,00988
0,02	1	2,3	0,02181	0,00000326681	0,01426
0,262	10	3	0,26242	0,00000017686	0,01503
0,26	9,77	3	0,26031	0,00000009410	0,01454
0,24	7,75	3	0,24031	0,00000009576	0,01012
0,22	6,01	3	0,22010	0,00000001079	0,00649
0,2	4,57	3	0,19965	0,00000012129	0,00367
0,18	3,46	3	0,17940	0,00000036180	0,00165
0,16	2,63	3	0,15882	0,00000140068	0,00042
0,14	2,06	3	0,13854	0,00000213296	0,00000
0,12	1,68	3	0,11850	0,00000224023	0,00038
0,1	1,43	3	0,09885	0,00000132390	0,00155
0,08	1,25	3	0,07782	0,00000475238	0,00353
0,06	1,14	3	0,05939	0,00000037799	0,00631
0,04	1,05	3	0,03851	0,00000223285	0,00988
0,02	1	3	0,02323	0,00001041237	0,01426

$N=14$, $r_{tCP} = 0.1429$, $L/S > 3$, $K=2$

Значение результативного признака r_i по опыту	ε	L/S	Расчетное значение результативного признака \tilde{r}_i	$\left(r_i - \tilde{r}_i \right)^2$	$\left(r_i - r_{tCP} \right)^2$
0,27	10	∞	0,27003	0,000000001130	0,015
0,26	9	∞	0,25998	0,000000000354	0,068
0,24	7	∞	0,23982	0,000000032529	0,004
0,22	5,35	∞	0,22043	0,000000184386	0,004
0,2	4	∞	0,19950	0,000000252673	0,004
0,18	3,09	∞	0,18033	0,000000105862	0,004
0,16	2,39	∞	0,16000	0,000000000021	0,026
0,14	1,91	∞	0,13970	0,000000089092	0,020
0,12	1,6	∞	0,12026	0,000000066496	0,014
0,1	1,38	∞	0,10019	0,000000037250	0,010
0,08	1,22	∞	0,07957	0,000000188318	0,006
0,06	1,11	∞	0,06023	0,000000053644	0,004
0,04	1,03	∞	0,03997	0,000000001108	0,002
0,02	1	∞	0,02000	0,000000000002	0,000

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Результаты расчета средней ошибки аппроксимации выражений
определения отношения объема буферной емкости к объему газа, всасываемым
(нагнетаемым) ступенью**

П.3.1. Шаг №1

$i \cdot r_i \in [0,05; 0,2], N=66$

Значение результативного признака X_{1_i} по опыту	δ	$i \cdot r_i$	Расчетное значение результативного признака \tilde{X}_{1_i}	$\left \frac{X_{1_i} - \tilde{X}_{1_i}}{X_{1_i}} \right $
1	43,3	0,05	1,00274	0,00274
1,13	40	0,05	1,11158	0,01630
1,51	30	0,05	1,51891	0,00590
2,11	20	0,05	2,11832	0,00394
3,18	10	0,05	3,17674	0,00102
3,35	9	0,05	3,33857	0,00341
3,5	8	0,05	3,51929	0,00551
3,72	7	0,05	3,72380	0,00102
3,93	6	0,05	3,95923	0,00744
4,24	5	0,05	4,23668	0,00078
4,58	4	0,05	4,57489	0,00112
5	3	0,05	5,00963	0,00193
5,62	2	0,05	5,62467	0,00083
6,77	1	0,05	6,71639	0,00792
7	0,84	0,05	7,00802	0,00115
1	31,75	0,10	0,99183	0,00817
1,07	30	0,10	1,07103	0,00096
1,64	20	0,10	1,65509	0,00920
2,68	10	0,10	2,69628	0,00607
2,85	9	0,10	2,85638	0,00224
3,06	8	0,10	3,03542	0,00803
3,25	7	0,10	3,23831	0,00360
3,48	6	0,10	3,47222	0,00224
3,75	5	0,10	3,74827	0,00046
4,07	4	0,10	4,08525	0,00375
4,49	3	0,10	4,51895	0,00645
5,15	2	0,10	5,13290	0,00332
6,24	1	0,10	6,22104	0,00304
6,41	0,9	0,10	6,39511	0,00232
6,6	0,8	0,10	6,59379	0,00094
6,81	0,7	0,10	6,82510	0,00222
7	0,63	0,10	7,01286	0,00184
1	27,88	0,15	1,01156	0,01156
1,49	20	0,15	1,48855	0,00097
2,52	10	0,15	2,52526	0,00209
2,71	9	0,15	2,68503	0,00922
2,87	8	0,15	2,86377	0,00217
3,09	7	0,15	3,06643	0,00763
3,32	6	0,15	3,30020	0,00596

3,58	5	0,15	3,57624	0,00105
3,91	4	0,15	3,91338	0,00086
4,32	3	0,15	4,34747	0,00636
5	2	0,15	4,96212	0,00758
6,06	1	0,15	6,05099	0,00149
6,24	0,9	0,15	6,22502	0,00240
6,43	0,8	0,15	6,42361	0,00099
6,65	0,7	0,15	6,65472	0,00071
6,89	0,6	0,15	6,93083	0,00593
7	0,56	0,15	7,05811	0,00830
1	24,82	0,20	1,00737	0,00737
1,32	20	0,20	1,31724	0,00209
2,34	10	0,20	2,34925	0,00395
2,51	9	0,20	2,50864	0,00054
2,69	8	0,20	2,68707	0,00109
2,9	7	0,20	2,88948	0,00363
3,13	6	0,20	3,12309	0,00221
3,41	5	0,20	3,39909	0,00320
3,74	4	0,20	3,73636	0,00097
4,13	3	0,20	4,17083	0,00989
4,78	2	0,20	4,78616	0,00129
5,87	1	0,20	5,87568	0,00097
6	0,9	0,20	6,04967	0,00828
6,23	0,8	0,20	6,24814	0,00291
6,46	0,7	0,20	6,47903	0,00295
6,79	0,6	0,20	6,75474	0,00519
7	0,55	0,20	6,91537	0,01209

$i \cdot r_i \in (0,2; 1]$, $N=89$

Значение резуль­тативного признака X_{1i} по опыту	δ	$i \cdot r_i$	Расчетное значение резуль­тативного признака \tilde{X}_{1i}	$\frac{ X_{1i} - \tilde{X}_{1i} }{X_{1i}}$
1	24,82	0,20	1,02056	0,02056
1,32	20	0,20	1,34248	0,01703
2,34	10	0,20	2,36404	0,01028
2,51	9	0,20	2,51902	0,00359
2,69	8	0,20	2,69248	0,00092
2,9	7	0,20	2,88954	0,00361
3,13	6	0,20	3,11775	0,00391
3,41	5	0,20	3,38894	0,00618
3,74	4	0,20	3,72319	0,00449
4,13	3	0,20	4,15880	0,00697
4,78	2	0,20	4,78372	0,00078
5,87	1	0,20	5,88927	0,00328
6	0,9	0,20	6,06211	0,01035
6,23	0,8	0,20	6,25697	0,00433
6,46	0,7	0,20	6,48007	0,00311
6,79	0,6	0,20	6,74061	0,00727
7	0,55	0,20	6,88914	0,01584
1	21,72	0,30	1,01012	0,01012

1,15	20	0,30	1,13384	0,01405
2,14	10	0,30	2,16099	0,00981
2,32	9	0,30	2,31633	0,00158
2,49	8	0,30	2,49005	0,00002
2,7	7	0,30	2,68721	0,00474
2,92	6	0,30	2,91530	0,00161
3,22	5	0,30	3,18603	0,01055
3,56	4	0,30	3,51924	0,01145
3,92	3	0,30	3,95270	0,00834
4,57	2	0,30	4,57298	0,00065
5,67	1	0,30	5,66559	0,00078
5,84	0,9	0,30	5,83581	0,00072
6	0,8	0,30	6,02752	0,00459
6,24	0,7	0,30	6,24672	0,00108
6,47	0,6	0,30	6,50230	0,00499
6,78	0,5	0,30	6,80819	0,00416
7	0,44	0,30	7,02506	0,00358
1	20	0,40	0,94609	0,05391
2	10	0,40	1,97885	0,01058
2,12	9	0,40	2,13459	0,00688
2,3	8	0,40	2,30862	0,00375
2,5	7	0,40	2,50599	0,00240
2,75	6	0,40	2,73410	0,00578
3,05	5	0,40	3,00456	0,01490
3,37	4	0,40	3,33701	0,00979
3,75	3	0,40	3,76878	0,00501
4,39	2	0,40	4,38525	0,00108
5,5	1	0,40	5,46693	0,00601
5,66	0,9	0,40	5,63492	0,00443
5,84	0,8	0,40	5,82392	0,00275
6,05	0,7	0,40	6,03978	0,00169
6,29	0,6	0,40	6,29109	0,00017
6,6	0,5	0,40	6,59132	0,00131
7	0,4	0,40	6,96322	0,00525
1	17,35	0,50	0,99482	0,00518
1,77	10	0,50	1,81792	0,02707
2	9	0,50	1,97412	0,01294
2,11	8	0,50	2,14855	0,01827
2,32	7	0,50	2,34621	0,01130
2,56	6	0,50	2,57448	0,00566
2,86	5	0,50	2,84487	0,00529
3,19	4	0,50	3,17685	0,00412
3,58	3	0,50	3,60740	0,00766
4,19	2	0,50	4,22092	0,00738
5,3	1	0,50	5,29375	0,00118
5,45	0,9	0,50	5,45990	0,00182
5,64	0,8	0,50	5,64668	0,00118
5,85	0,7	0,50	5,85977	0,00167
6,1	0,6	0,50	6,10754	0,00124
6,4	0,5	0,50	6,40306	0,00048

6,78	0,4	0,50	6,76831	0,00172
7	0,34	0,50	7,03666	0,00524
1	12,7	1,00	0,97987	0,02013
1,35	10	1,00	1,34334	0,00493
1,51	9	1,00	1,50260	0,00490
1,66	8	1,00	1,68012	0,01212
1,87	7	1,00	1,88087	0,00581
2,09	6	1,00	2,11215	0,01060
2,4	5	1,00	2,38540	0,00609
2,73	4	1,00	2,71985	0,00372
3,15	3	1,00	3,15198	0,00063
3,74	2	1,00	3,76464	0,00659
4,83	1	1,00	4,82719	0,00058
5	0,9	1,00	4,99069	0,00186
5,18	0,8	1,00	5,17413	0,00113
5,4	0,7	1,00	5,38292	0,00316
5,64	0,6	1,00	5,62500	0,00266
5,91	0,5	1,00	5,91268	0,00045
6,28	0,4	1,00	6,26648	0,00215
6,71	0,3	1,00	6,72444	0,00215
7	0,25	1,00	7,01490	0,00213

П.3.2. Шаг №2

N=35

Значение результивного признака $\left(\frac{V_b}{\chi \cdot V_s}\right)_i$ по опыту	XI	k	Расчетное значение результивного признака $\left(\frac{\tilde{V}_b}{\tilde{\chi} \cdot \tilde{V}_s}\right)_i$	$\frac{\left \left(\frac{V_b}{\chi \cdot V_s}\right)_i - \left(\frac{\tilde{V}_b}{\tilde{\chi} \cdot \tilde{V}_s}\right)_i\right }{\left(\frac{V_b}{\chi \cdot V_s}\right)_i}$
287,8	7	1,8	287,04867	0,00261
156,04	6	1,8	157,01435	0,00624
80	5	1,8	81,11233	0,01390
41,27	4	1,8	40,61423	0,01589
20,34	3	1,8	20,37358	0,00165
10,38	2	1,8	10,54968	0,01635
5,12	1	1,8	5,17735	0,01120
254,2	7	1,6	255,24908	0,00413
141,21	6	1,6	139,62011	0,01126
72,28	5	1,6	72,12661	0,00212
36,92	4	1,6	36,11493	0,02181
18,2	3	1,6	18,11657	0,00458
9,21	2	1,6	9,38098	0,01856
4,61	1	1,6	4,60380	0,00135
234,22	7	1,4	234,81128	0,00252
129,45	6	1,4	128,44073	0,00780
65,96	5	1,4	66,35143	0,00593
34,2	4	1,4	33,22321	0,02856
16,72	3	1,4	16,66598	0,00323
8,49	2	1,4	8,62984	0,01647

4,2	1	1,4	4,23517	0,00837
200	7	1,2	199,71632	0,00142
109,31	6	1,2	109,24394	0,00060
55,27	5	1,2	56,43453	0,02107
28,4	4	1,2	28,25766	0,00501
14,02	3	1,2	14,17508	0,01106
7,14	2	1,2	7,34002	0,02801
3,47	1	1,2	3,60218	0,03809
166,19	7	1	165,64819	0,00326
90	6	1	90,60882	0,00676
46,01	5	1	46,80778	0,01734
23,59	4	1	23,43739	0,00647
11,57	3	1	11,75705	0,01617
6	2	1	6,08794	0,01466
3	1	1	2,98771	0,00410

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Результаты расчета коэффициента нелинейной множественной корреляции, его значимости для выражений определения отношения объема буферной емкости к объему газа, всасываемым (нагнетаемым) ступенью

П.4.1. Шаг №1

$i \cdot r_i \in [0,05; 0,2]$, $N=66$, $X1_{CP} = 4.08$, $K=2$

Значение результативного признака $X1_i$ по опыту	δ	$i \cdot r_i$	Расчетное значение результативного признака $\tilde{X}1_i$	$\langle X1_i - \tilde{X}1_i \rangle^2$	$\langle X1_i - X1_{CP} \rangle^2$
1	43,3	0,05	1,00274	0,00001	9,513
1,13	40	0,05	1,11158	0,00034	8,728
1,51	30	0,05	1,51891	0,00008	6,628
2,11	20	0,05	2,11832	0,00007	3,898
3,18	10	0,05	3,17674	0,00001	0,818
3,35	9	0,05	3,33857	0,00013	0,539
3,5	8	0,05	3,51929	0,00037	0,342
3,72	7	0,05	3,72380	0,00001	0,133
3,93	6	0,05	3,95923	0,00085	0,024
4,24	5	0,05	4,23668	0,00001	0,024
4,58	4	0,05	4,57489	0,00003	0,246
5	3	0,05	5,00963	0,00009	0,838
5,62	2	0,05	5,62467	0,00002	2,358
6,77	1	0,05	6,71639	0,00287	7,212
7	0,84	0,05	7,00802	0,00006	8,501
1	31,75	0,10	0,99183	0,00007	9,513
1,07	30	0,10	1,07103	0,00000	9,087
1,64	20	0,10	1,65509	0,00023	5,975
2,68	10	0,10	2,69628	0,00026	1,972
2,85	9	0,10	2,85638	0,00004	1,524
3,06	8	0,10	3,03542	0,00060	1,049
3,25	7	0,10	3,23831	0,00014	0,696
3,48	6	0,10	3,47222	0,00006	0,365
3,75	5	0,10	3,74827	0,00000	0,112
4,07	4	0,10	4,08525	0,00023	0,000
4,49	3	0,10	4,51895	0,00084	0,165
5,15	2	0,10	5,13290	0,00029	1,136
6,24	1	0,10	6,22104	0,00036	4,647
6,41	0,9	0,10	6,39511	0,00022	5,408
6,6	0,8	0,10	6,59379	0,00004	6,328
6,81	0,7	0,10	6,82510	0,00023	7,429
7	0,63	0,10	7,01286	0,00017	8,501
1	27,88	0,15	1,01156	0,00013	9,513
1,49	20	0,15	1,48855	0,00000	6,731
2,52	10	0,15	2,52526	0,00003	2,447
2,71	9	0,15	2,68503	0,00062	1,889
2,87	8	0,15	2,86377	0,00004	1,475
3,09	7	0,15	3,06643	0,00056	0,989

3,32	6	0,15	3,30020	0,00039	0,584
3,58	5	0,15	3,57624	0,00001	0,254
3,91	4	0,15	3,91338	0,00001	0,030
4,32	3	0,15	4,34747	0,00075	0,056
5	2	0,15	4,96212	0,00143	0,838
6,06	1	0,15	6,05099	0,00008	3,903
6,24	0,9	0,15	6,22502	0,00022	4,647
6,43	0,8	0,15	6,42361	0,00004	5,502
6,65	0,7	0,15	6,65472	0,00002	6,582
6,89	0,6	0,15	6,93083	0,00167	7,871
7	0,56	0,15	7,05811	0,00338	8,501
1	24,82	0,20	1,00737	0,00005	9,513
1,32	20	0,20	1,31724	0,00001	7,642
2,34	10	0,20	2,34925	0,00009	3,043
2,51	9	0,20	2,50864	0,00000	2,479
2,69	8	0,20	2,68707	0,00001	1,944
2,9	7	0,20	2,88948	0,00011	1,403
3,13	6	0,20	3,12309	0,00005	0,911
3,41	5	0,20	3,39909	0,00012	0,455
3,74	4	0,20	3,73636	0,00001	0,119
4,13	3	0,20	4,17083	0,00167	0,002
4,78	2	0,20	4,78616	0,00004	0,484
5,87	1	0,20	5,87568	0,00003	3,188
6	0,9	0,20	6,04967	0,00247	3,670
6,23	0,8	0,20	6,24814	0,00033	4,604
6,46	0,7	0,20	6,47903	0,00036	5,644
6,79	0,6	0,20	6,75474	0,00124	7,320
7	0,55	0,20	6,91537	0,00716	8,501

$i \cdot r_i \in (0,2; 1]$, $N=89$, $X1_{CP} = 4.07$, $K=2$

Значение результативного признака $X1_i$ по опыту	δ	$i \cdot r_i$	Значение результативного признака $X1_i$ по опыту	$\langle X1_i - \tilde{X}1_i \rangle$	$\langle X1_i - X1_{CP} \rangle$
1	24,82	0,20	1,02056	0,00042	9,410
1,32	20	0,20	1,34248	0,00051	7,549
2,34	10	0,20	2,36404	0,00058	2,984
2,51	9	0,20	2,51902	0,00008	2,426
2,69	8	0,20	2,69248	0,00001	1,898
2,9	7	0,20	2,88954	0,00011	1,363
3,13	6	0,20	3,11775	0,00015	0,879
3,41	5	0,20	3,38894	0,00044	0,432
3,74	4	0,20	3,72319	0,00028	0,107
4,13	3	0,20	4,15880	0,00083	0,004
4,78	2	0,20	4,78372	0,00001	0,508
5,87	1	0,20	5,88927	0,00037	3,249
6	0,9	0,20	6,06211	0,00386	3,734
6,23	0,8	0,20	6,25697	0,00073	4,676
6,46	0,7	0,20	6,48007	0,00040	5,724
6,79	0,6	0,20	6,74061	0,00244	7,412

7	0,55	0,20	6,88914	0,01229	8,599
1	21,72	0,30	1,01012	0,00010	9,410
1,15	20	0,30	1,13384	0,00026	8,512
2,14	10	0,30	2,16099	0,00044	3,715
2,32	9	0,30	2,31633	0,00001	3,054
2,49	8	0,30	2,49005	0,00000	2,489
2,7	7	0,30	2,68721	0,00016	1,870
2,92	6	0,30	2,91530	0,00002	1,317
3,22	5	0,30	3,18603	0,00115	0,718
3,56	4	0,30	3,51924	0,00166	0,258
3,92	3	0,30	3,95270	0,00107	0,022
4,57	2	0,30	4,57298	0,00001	0,252
5,67	1	0,30	5,66559	0,00002	2,568
5,84	0,9	0,30	5,83581	0,00002	3,142
6	0,8	0,30	6,02752	0,00076	3,734
6,24	0,7	0,30	6,24672	0,00005	4,720
6,47	0,6	0,30	6,50230	0,00104	5,772
6,78	0,5	0,30	6,80819	0,00079	7,358
7	0,44	0,30	7,02506	0,00063	8,599
1	20	0,40	0,94609	0,00291	9,410
2	10	0,40	1,97885	0,00045	4,275
2,12	9	0,40	2,13459	0,00021	3,793
2,3	8	0,40	2,30862	0,00007	3,124
2,5	7	0,40	2,50599	0,00004	2,457
2,75	6	0,40	2,73410	0,00025	1,736
3,05	5	0,40	3,00456	0,00206	1,035
3,37	4	0,40	3,33701	0,00109	0,487
3,75	3	0,40	3,76878	0,00035	0,101
4,39	2	0,40	4,38525	0,00002	0,104
5,5	1	0,40	5,46693	0,00109	2,052
5,66	0,9	0,40	5,63492	0,00063	2,536
5,84	0,8	0,40	5,82392	0,00026	3,142
6,05	0,7	0,40	6,03978	0,00010	3,930
6,29	0,6	0,40	6,29109	0,00000	4,939
6,6	0,5	0,40	6,59132	0,00008	6,413
7	0,4	0,40	6,96322	0,00135	8,599
1	17,35	0,50	0,99482	0,00003	9,410
1,77	10	0,50	1,81792	0,00230	5,279
2	9	0,50	1,97412	0,00067	4,275
2,11	8	0,50	2,14855	0,00149	3,832
2,32	7	0,50	2,34621	0,00069	3,054
2,56	6	0,50	2,57448	0,00021	2,273
2,86	5	0,50	2,84487	0,00023	1,458
3,19	4	0,50	3,17685	0,00017	0,770
3,58	3	0,50	3,60740	0,00075	0,238
4,19	2	0,50	4,22092	0,00096	0,015
5,3	1	0,50	5,29375	0,00004	1,519
5,45	0,9	0,50	5,45990	0,00010	1,911
5,64	0,8	0,50	5,64668	0,00004	2,473
5,85	0,7	0,50	5,85977	0,00010	3,177

6,1	0,6	0,50	6,10754	0,00006	4,131
6,4	0,5	0,50	6,40306	0,00001	5,440
6,78	0,4	0,50	6,76831	0,00014	7,358
7	0,34	0,50	7,03666	0,00134	8,599
1	12,7	1,00	0,97987	0,00041	9,410
1,35	10	1,00	1,34334	0,00004	7,385
1,51	9	1,00	1,50260	0,00005	6,541
1,66	8	1,00	1,68012	0,00040	5,796
1,87	7	1,00	1,88087	0,00012	4,829
2,09	6	1,00	2,11215	0,00049	3,911
2,4	5	1,00	2,38540	0,00021	2,781
2,73	4	1,00	2,71985	0,00010	1,789
3,15	3	1,00	3,15198	0,00000	0,842
3,74	2	1,00	3,76464	0,00061	0,107
4,83	1	1,00	4,82719	0,00001	0,581
5	0,9	1,00	4,99069	0,00009	0,870
5,18	0,8	1,00	5,17413	0,00003	1,238
5,4	0,7	1,00	5,38292	0,00029	1,775
5,64	0,6	1,00	5,62500	0,00022	2,473
5,91	0,5	1,00	5,91268	0,00001	3,395
6,28	0,4	1,00	6,26648	0,00018	4,895
6,71	0,3	1,00	6,72444	0,00021	6,983
7	0,25	1,00	7,01490	0,00022	8,599

II.4.2. Шаг №2

$$N=35, \left(\frac{V_b}{\chi \cdot V_s} \right)_{CP} = 68.42, K=2$$

Значение результативного признака $\left(\frac{V_b}{\chi \cdot V_s} \right)_i$ по опыту	XI	k	Расчетное значение результативного признака $\left(\frac{\tilde{V}_b}{\tilde{\chi} \cdot \tilde{V}_s} \right)_i$	$\left(\left(\frac{V_b}{\chi \cdot V_s} \right)_i - \dots \right)^2$	$\left(\left(\frac{V_b}{\chi \cdot V_s} \right)_i - \dots \right)^2$
287,8	7	1,8	287,04867	0,56449	48126,456
156,04	6	1,8	157,01435	0,94935	7676,814
80	5	1,8	81,11233	1,23728	134,037
41,27	4	1,8	40,61423	0,43004	737,262
20,34	3	1,8	20,37358	0,00113	2311,934
10,38	2	1,8	10,54968	0,02879	3368,940
5,12	1	1,8	5,17735	0,00329	4007,216
254,2	7	1,6	255,24908	1,10056	34513,253
141,21	6	1,6	139,62011	2,52775	5298,010
72,28	5	1,6	72,12661	0,02353	14,880
36,92	4	1,6	36,11493	0,64813	992,412
18,2	3	1,6	18,11657	0,00696	2522,307
9,21	2	1,6	9,38098	0,02923	3506,129
4,61	1	1,6	4,60380	0,00004	4072,044
234,22	7	1,4	234,81128	0,34962	27488,787
129,45	6	1,4	128,44073	1,01863	3724,347

65,96	5	1,4	66,35143	0,15322	6,064
34,2	4	1,4	33,22321	0,95412	1171,184
16,72	3	1,4	16,66598	0,00292	2673,156
8,49	2	1,4	8,62984	0,01956	3591,913
4,2	1	1,4	4,23517	0,00124	4124,539
200	7	1,2	199,71632	0,08048	17312,620
109,31	6	1,2	109,24394	0,00436	1671,782
55,27	5	1,2	56,43453	1,35612	172,990
28,4	4	1,2	28,25766	0,02026	1601,806
14,02	3	1,2	14,17508	0,02405	2959,640
7,14	2	1,2	7,34002	0,04001	3755,554
3,47	1	1,2	3,60218	0,01747	4218,837
166,19	7	1	165,64819	0,29356	9558,470
90	6	1	90,60882	0,37066	465,585
46,01	5	1	46,80778	0,63645	502,323
23,59	4	1	23,43739	0,02329	2009,959
11,57	3	1	11,75705	0,03499	3232,215
6	2	1	6,08794	0,00773	3896,577
3	1	1	2,98771	0,00015	4280,113

Приложение 5. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ
«Программный модуль для электронной паспортизации динамического оборудования»
(ЭЛПАДО)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2014616651

**«Программный модуль для электронной паспортизации
динамического оборудования»**

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«УралПромБезопасность» (RU)*

Авторы: *Власов Василий Геннадьевич (RU), Ромашкин Макар
Андреевич (RU), Мошев Евгений Рудольфович (RU), Мызгин Глеб
Семёнович (RU), Рябчиков Николай Михайлович (RU)*

Заявка № **2014614086**
Дата поступления **05 мая 2014 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **01 июля 2014 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Б.П. Симонов

Приложение 6. Акт о внедрении результатов диссертационной работы на ЗАО «СИБУР-Химпром»



Закрытое Акционерное Общество
«Сибур-Химпром» (ЗАО «Сибур-Химпром»)
614055, г. Пермь, ул. Промышленная, 98,
тел.: (342) 290-82-82, факс: (342) 290-86-60
e-mail: mail@siburperm.ru
ИНН 5905018998, ОГРН 1025901207804
ОКПО 53505711

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ЗАО «Сибур-Химпром»

М.В. Шайбаков

06. 10. 2014 г. № 4274/08-10
на № _____ от _____ 201 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы М.А. Ромашкина
«Математическо-информационные модели и комплексы программ интегрированной логистической поддержки поршневых компрессорных агрегатов нефтехимических предприятий»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы аспиранта кафедры «Машины и аппараты производственных процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета Ромашкина М.А.:

- общая фреймовая модель представления декларативных знаний о динамическом оборудовании;
- фреймовая модель представления декларативных знаний о поршневом компрессоре;
- структура нормативной части базы данных по динамическому оборудованию;
- алгоритмы режимов функционирования комплекса программ интегрированной логистической поддержки динамического оборудования,

были использованы при разработке модуля электронной паспортизации динамического оборудования и внедрены на ЗАО «СИБУР-Трубопровод» в составе комплекса программ «Сибур-Трубопровод» разработанного ООО «УралПромБезопасность» по договору №341-11/сх/97-11/ДВР от 16.06.2011 г.

Председатель _____

Шайбаков М.В.

Члены комиссии: _____

Голов Л.М.
Велицкий Р.Р.



**Приложение 7. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО
«УралПромБезопасность»**



УРАЛПРОМБЕЗОПАСНОСТЬ
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ



614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 4, тел/факс: +7 (342) 237-80-21
Лицензия Ростехнадзора № 00-ДЭ-003170 от 06.05.2009 г.

№ 4дВ от 06.10. 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

Н.М. Рябчиков

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы М.А. Ромашкина
«Математическо-информационные модели и комплексы программ интегрированной
логистической поддержки поршневых компрессорных агрегатов нефтехимических
предприятий»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы аспиранта кафедры «Машины и аппараты производственных процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета Ромашкина М.А.:

- общая фреймовая модель представления декларативных знаний о динамическом оборудовании;
- фреймовая модель представления декларативных знаний о поршневом компрессоре;
- структура нормативной части базы данных по динамическому оборудованию;
- алгоритмы режимов функционирования комплекса программ интегрированной логистической поддержки динамического оборудования,

были использованы при разработке модуля электронной паспортизации динамического оборудования (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014616651) в составе комплекса программ «Сибур-Трубопровод». Разработанный на основе результатов диссертационной работы М.А. Ромашкина указанный выше модуль комплекса программ активно используются в деятельности ООО «УралПромБезопасность» при создании электронных паспортов динамического оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий.

Руководитель отдела
технического диагностирования

 _____ **Беляев В.М.**

Руководитель отдела анализа и количественной
оценки техногенных рисков

 _____ **Хлуденёв А.Г.**

Руководитель лаборатории неразрушающего
контроля

 _____ **Кобелев А.В.**