УДК 532.542.2

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Юлдашев Б.Э.

Центр по разработке программных продуктов и аппаратно-программных комплексов при Ташкентском университете информационных технологий, Ангрен, e-mail: baxrom@rambler.ru

Высокие темпы развития строительства трубопроводных систем городов и сельских населенных пунктов Республики Узбекистан для обеспечения потребности в жидких и газообразных продуктах, ставит задачу о необходимости построения адекватной системы управления, разработке четкой концепции совершенствования его форм и методов, позволяющих эффективно решать социально-экономические задачи. Именно поэтому, правительство Республики Узбекистан особое внимание уделяет разработке комплексных программ совершенствования управления, формированию экономического хозяйствования, развитию хозяйственного расчета и методов руководства, модернизации организационных структур, связанных с обеспечением населения целевым продуктом. Это, в свою очередь, требует строительство новых и реконструкции существующих сетей, что требует значительные капитальные вложения. Поэтому одной из актуальных проблем является решение вопросов бесперебойной и надежной эксплуатации объектов. В данной статье проведен анализ изучения истории развития исследования методов гидрогазодинамического расчета простых и сложных трубопроводов и информатизации систем газоснабжения. В ней приведены основные особенности математического и программного обеспечения жизненного цикла газотранспортной сети и относящейся к ней информации, методы расчета закольцованной сети газопровода.

Ключевые слова. Гидравлический расчет; подвод; отбор; кольцевая и лучевая сети; модель; программный комплекс, информатизация систем газоснабжения, математическое моделирование.

ANALITICAL REVIEW OF THE WORK ON MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF GAS SUPPLY SYSTEMS

Yuldashev B.E.

Centre for the development of software products and hardware-software complexes at the Tashkent University of Information Technologies, Angren, e-mail: baxrom@rambler.ru

High growth rates in the construction of piping systems in urban and rural settlements of the Republic of Uzbekistan for the need for liquid and gaseous products, puts the problem of the need to build an adequate system of management, the development of a clear vision of improving its forms and methods to effectively solve social and economic problems. That is why the Government of the Republic of Uzbekistan pays special attention to the development of comprehensive programs for improving the management, the formation of economic management, the development of cost accounting and management methods, modernization of organizational structures associated with the provision of the desired product. This, in turn, requires the construction of new and reconstruction of existing networks, which requires significant capital investment. Therefore, one of the pressing problems is to address the smooth and reliable operation of the facilities. This article analyzes the study of the history of the study of methods of calculation of hydro-simple and complex pipeline gas supply systems and information. It shows the main features of mathematical and software life cycle of the gas transmission network and related information, methods of calculation loopback network pipeline.

Keywords: Hydraulic calculation, supply, selection, ring and radial network model; software system, informatization of gas supply systems, mathematical modeling.

Введение

Высокие темпы развития строительства трубопроводных систем городов и сельских населенных пунктов Республики Узбекистан для обеспечения потребности в жидких и газообразных продуктах, ставит задачу о необходимости построения адекватной системы управления, разработке четкой концепции совершенствования его форм и методов, позволяющих эффективно решать социально-экономические задачи. Именно поэтому, правительство Республики Узбекистан особое внимание уделяет разработке комплексных программ совершенствования управления, формированию экономического хозяйствования, развитию хозяйственного расчета и методов руководства, модернизации организационных структур, связанных с обеспечением населения целевым продуктом. Это, в свою очередь, требует строительство новых и реконструкции существующих сетей, что требует значительные капитальные вложения. Поэтому одной из актуальных проблем является решение вопросов бесперебойной и надежной эксплуатации объектов.

Перспективы капитального строительства Республики Узбекистан, благоустройства его территорий, улучшение экологических и бытовых условий, а также стремление к росту благосостояния населения привели к значительному увеличению потребления водных и топливно-энергетических ресурсов. Возрастающие объемы потребления и расхода ресурсов могут быть покрыты не только за счет проектирования и строительства новых сетей, сооружений и их реконструкции, но и за счет использования резервов мощностей, правильной эксплуатации и эффективным управлением, существующим промыслов, магистральных газопроводов и подземных хранилищ газа и резервуаров, обеспечивающих неравномерность потребления целевых продуктов.

Анализ состояния, связанное с эксплуатацией и управлением трубопроводных систем Республики Узбекистан, показал, что в настоящее время ряд общетеоретических проблем исследован недостаточно; большинство населенных пунктов не обеспечены необходимым объемом питьевой воды, топливно-энергетическими ресурсами; промышленность слабо обеспечена контролирующими системами расхода воды, газа и топлива.

Трубопроводные сети подземных и надземных коммуникаций городов Узбекистана представляют собой сложную систему, нормальное функционирование которых требует решения большого круга научно-технических задач. Это связано со спецификой планировочной структуры городов, их историческим развитием, уровнем инженерного обеспечения, условиями рельефа местности, дефицитом топливно-энергетических и водных ресурсов.

Имеющиеся недостатки связаны, прежде всего, с отсутствием четкой, научно обоснованной концепции в практике проектирования, управления и эксплуатации инженерных систем.

Интенсификация работы трубопроводных систем, определение перспективы их развития с учетом урбанизации населенных пунктов, проведение работ по уточнению фактических нагрузок, поиск резервов и повышение эффективности при эксплуатации и управлении трубопроводными сетями, эффективность проектных работ для создаваемых, расширяемых и реконструируемых трубопроводных инженерных сетей, а также оперативное управление их функционированием в значительной мере зависят от адекватности и корректности используемых на всех этапах проектирования и эксплуатации математических моделей потокораспределения и организационно-экономических методов моделирования, являющихся базой для повышения эффективности функционирования и управления инженерных сетей.

Среди вопросов совершенствования эксплуатации и управления трубопроводными системами наиболее важной задачей является проектирование новых, реконструкция существующих инженерных сетей с учетом оптимального количества технологических объектов, мест размещения и зон обслуживания.

Нуждаются в более глубокой разработке проблемы планирования и экономического стимулирования отрасли коммунального хозяйства с учетом взаимосвязи со всей системой народнохозяйственного баланса республики.

В связи с этим разработка математических моделей, вычислительных алгоритмов и исследование компьютерных моделей в этом направлении представляется актуальной проблемой дальнейшего развития автоматизации научных исследований для различных предметных областей, в частности трубопроводных систем. С другой стороны актуальность исследований проблем по анализу состояния и функционирования трубопроводных систем (ТС) при различных условиях и в обеспечении потребности потребителей в целевом продукте в настоящее время весьма высока. Это связано со значительным количеством угроз нормального функционирования трубопроводных систем (изношенность оборудования, чрезмерная концентрация транспортных коммуникаций и т.д.).

В 1847 году вышла статья Г. Кирхгофа, где описан метод решения задачи о линейном распределении гальванического тока в многоконтурной электрической цепи.

По мнению историков науки, она послужила толчком формирования и развития теории графов, топологии, операционного исчисления, теории гидравлических цепей и других отраслей точной науки. Сформированные в этой статье две гипотезы, известные как два закона Кирхгофа, на сегодняшний день в том, или ином виде используются при моделировании трубопроводного транспорта нефти и газа, теплоснабжения, потоков транспортных средств и т.д.

Из-за отсутствия единой теоретической базы, аналогов закона Г. Ома, применимость законов Кирхгофа к гидравлическим системам теоретически была доказана позже – 30-е годы прошлого века. Публикации М.М. Андрияшева (1932), В.Г. Лобачева (1934) и Х. Кросса (1936) показали, что аналогом закона Ома при моделировании гидравлических цепей, может служить формула Дарси, которая для малосжимаемых жидкостей выражает линейную связь между перепадом давления и квадратом расхода в развитом турбулентном режиме течения. На основе применения данной формулы построена теория гидравлических цепей, что отражена в монографиях А.П. Меренкова, В.Я. Хасилева (1985) [1] и Е.В. Сенновой, В.Г. Сидлера (1987) [2]. Дальнейшее развитие данного направления непосредственно связано с развитием возможностей компьютерного парка и, в определенном смысле, новыми вычислительными способами.

При проектировании сети газопроводов с лучистой структурой, в частности, магистральных газопроводов широко используется метод коэффициента расхода [3], отражающий изменения пропускной способности отдельно взятого участка относительно эталонного газопровода. Данный метод, учитывающий параллельные и последовательные подключения участков в сети, обобщен для случаев концентрированного отбора газа и постоянного уклона отдельных участков [4]. С использованием обобщенного метода коэффициентов расхода решены отдельные задачи проектирования многониточных, многозвенных магистральных газопроводов с учетом концентрированных отборов газа.

При расчете многоконтурных сетей газопроводов аналогом метода коэффициента расхода служат законы Кирхгофа и замыкающие их соотношения между узловыми давлениями и участковыми расходами газа. Реализацией положения теории графов, общих для цепи постоянного электрического тока и трубопроводного транспорта, достигаются решения многочисленных практических задач. Тем не менее, большие размеры, в тоже время разреженность матриц инциденций и базисных контуров требуют разработки более тонких экономичных алгоритмов построения основных матриц, основных деревьев и фундаментальных контуров сети и решения системы смешанных уравнений.

Используемые при решении задач методы Лобачева-Кросса, Выханду, верхней релаксации и комбинированные методы зачастую не сходятся [2]. Причиной тому, по нашему мнению, наряду с многомерностью искомых и неверным заданием начальных данных, может быть образование нештатных ситуаций, связанные несогласованностью основных параметров. Первая из них выражается в нехватке потенциальной энергии подводов газа на преодоление силы сопротивления сети или для обеспечения необходимого наименьшего статистического давления в узлах отбора. Второй тип нештатной ситуации в сети образуется при наличии более одного узла подвода и выражается «давкой» подвода с меньшим давлением.

Математическое и информационное обеспечение газотранспортной сети. Особенности информации

Технический прогресс в различных областях народного хозяйства Республики Узбекистан в значительной мере зависит от степени использования средств автоматики, информационных технологий и уровня автоматизации процессов управления. Вместе с тем возможности современных компьютерных систем и развитие математических методов моделирования используются далеко не полностью из-за неформализации многих задач, а также несовершенства или отсутствия ряда алгоритмов, обеспечивающих возможность произвести анализ функционирования объекта, обработать поступающую информацию и принять соответствующие решения по оптимальному управлению многосвязных систем.

В связи с этим разработка и исследование компьютерных моделей, вычислительных алгоритмов и на их основе создание объектно-ориентированных программных средств в этом направлении представляется актуальной проблемой дальнейшего развития автоматизации научных исследований для различных предметных областей, в частности трубопроводных систем. С другой стороны актуальность исследований проблем по анализу состояния и функционирования трубопроводных систем (ТС) при различных условиях, а также определения их «узких мест» в обеспечении потребности потребителей в целевом продукте в настоящее время весьма высока. Это связано со значительным количеством угроз нор-

мального функционирования трубопроводных систем (изношенность оборудования, чрезмерная концентрация транспортных коммуникаций, политические акции и т.д.). Под **«узким местом»** мы понимаем тот элемент системы, который ограничивает производственные возможности данной системы. При этом «узкое место» представляет собой не обязательно сам аварийный элемент, но узел или транспортную дугу, ограничивающую манёвр по переадресации потоков целевого продукта для удовлетворения потребителя.

Под **компьютерными моделями** здесь понимаются модели, реализованные в определённой программной среде. При моделировании физических и технологических процессов на ПЭВМ экспериментатору необходимо иметь представление о классах программных средств, их назначении, инструментарии и приёмах работы. Это знание позволяет при наличии информации об объекте, разработать информационную модель и преобразовать её в компьютерную модель объекта. Тогда на базе этих моделей можно путём проведения вычислительных экспериментов определить оптимальные параметры, значимые факторы, а также дать анализ статических и динамических процессов, происходящих в действующем объекте с последующим прогнозированием его состояния и оптимальным управлением.

В настоящее время опубликованы решения многих локальных задач, касающихся в частности гидравлики, оптимизации, надёжности объектов. Однако в глобальном масштабе все вопросы создания и решения отдельных задач без систематизации и без учёта реальных факторов по оптимальному функционированию и управлению трубопроводных систем остаются одной из глобальных проблем дальнейшего развития науки и техники.

Поэтому необходимым становятся автоматизации научных исследований для решения глобальных проблем, имеющих наиболее актуальные значения, и построение удобных для работы специалистов инструментария, работающих в данной предметной области. При решении практических задач во многих областях человеческой деятельности бывает затруднительно, а то и просто невозможно использовать формализованные и теоретически обоснованные методы. Так, например, при построении топологии трубопроводных систем, изменение гидравлических, экономических параметров, режимов работы и др.

При решении этих задач в целом необходимо использовать опыт и интуицию специалиста, работающего в данной предметной области. Опыт и интуиция специалиста при решении сложной задачи формируются в большинстве случаев в процессе многолетней интенсивной работы в данной предметной области и являются одним из основополагающих элементов как база знаний для формализации и математического моделирования сложных динамических процессов, происходящих в трубопроводных системах.

Предстоит решение непростых вопросов, на которые необходимо ответить сегодня, чтобы знать, по каким направлениям двигаться завтра. Для этого следует обосновать выбор адекватных моделей, математических методов, вычислительных алгоритмов и соответствующих программных средств, позволяющих анализировать сложные динамические процессы, происходящие в трубопроводных системах.

Наши исследования, проведённые в предыдущих годах, а также участие и публикации в трудах международных форумов убеждают нас в том, что современные требования к автоматизации научных исследований, проектирования, реконструкции, анализа и управления трубопроводных сетей определяют необходимость разработки нового подхода для решения актуальных проблем, возникающих при решении конкретных задач.

Развитие информационных технологий и различных сред программирования дают возможность создания компьютерных приложений на основе объектно-ориентированного программирования. Сущностью развиваемого подхода является разработка качественно нового подхода в рамках современных информационных технологий (база данных, сети, операционные системы).

Под **объектно-ориентированными программными комплексами** здесь понимаются программные комплексы, предназначенные для решения определенного класса прикладных задач конкретной предметной области и обеспечение пользователя максимально дружественным интерфейсом.

Такой подход, по нашему мнению, позволяет создать программные продукты, реализующие полученные математические модели, на современном технологическом

уровне, с удобным интерфейсом пользователя и возможностью стандартизации данных и успешной их пересылкой по компьютерным сетям.

Поэтому для специалистов в области трубопроводного транспорта целевого продукта необходимо создать удобный инструмент, с помощью которого можно будет проводить вычислительный эксперимент по анализу состояния функционирования, проектирования, реконструкции и управлению сложными процессами, происходящими в ТС включая технико-экономические показатели.

Одной из важнейших особенностей информационного обеспечения анализа функционирования, проектирования и реконструкции трубопроводных систем транспорта газа является сбор и подготовка информации и создание баз данных.

Ограничимся анализом особенностей типичного информационного поля на примере объектов городского газоснабжения.

Газопроводные сети (ГС) подземных и надземных коммуникаций городов представляют собой сложную систему, нормальное функционирование которой требует решения большого круга научно-технических задач. Это связано со спецификой планировочной структуры городов, их историческим развитием, уровнем инженерного обеспечения, наличием промышленных объектов, условиями рельефа местности, дефицитом топливно-энергетических ресурсов и другими факторами.

Оптимальное проектирование и управление трубопроводными сетями связано с необходимостью получения и обработки больших объёмов информации, которая должна быть представлена в распоряжение разработчиков в виде осмысленных и объективных данных, основанных на собранной и правильно истолкованной информации, которая характеризует всё многообразие факторов, условий, требований, норм и показателей.

Всю необходимую информацию можно классифицировать по следующим основным признакам: источники поступления, содержательный смысл, форма представления, степень стабильности, место в системе, методы сбора и хранения.

Основными источниками поступления информации, относящиеся к ГС, являются:

• генеральные планы застройки города и проекты размещения строительства на перспективу;

• комплексные схемы трубопроводных систем городов на уровне мощностей источников, предусмотренных перспективным развитием;

• материалы обследования эксплуатируемых трубопроводных сетей городов;

• схемы существующих трубопроводных сетей.

Содержательный смысл информации можно разделить по следующим признакам: натуральные данные, расчётные данные, нормативные данные. К натуральным данным относятся: конфигурация сети, диаметры, уклоны, трассы, расходы и т.д. К расчётным данным относятся: существующие расходы при заданной нагрузке и скорости, максимальная пропускная способность, коэффициент сезонной или часовой неравномерности и нагрузки при отказе определенных участков и другие. В число нормативных данных входит наименьшие нормативные давления в узле подключения потребителя, допустимые диаметры толщины ГС и другие, предусматриваемые СНиПом и т.д. По форме представления информации можно разделить на табличные и графические.

В табличной форме представляются, например основные потребители и объемы потребления, существующие и полагаемые мощности ГРП, ГРС и другие. Они являются необходимой частью графически заданной топологии сети, представляющей собой систему большого взаимодействующего количества двухполюсных элементов двух типов – активных элементов и линий связи. Входами сети являются все её узловые вершины, через которые в сеть поступает целевой продукт, а выходами – все узловые вершины, через которые осуществляется отбор целевого продукта. К активным элементам ТС следует отнести газораспределительные пункты и газораспределительные станции. Линии связи, представляющие собой участки трубопровода, являются пассивными элементами, кроме того к пассивным элементам следует также отнести, компенсаторы, различные регулируемые и нерегулируемые задвижки и другие. Общий поток целевого продукта, подаваемый в сеть, равен суммарному потоку, потребляемому из сети.

Граф сети содержит n вершин и m дуг. Каждой реальной дуге i поставлен в соответствие активный или пассивный элемент и переменная величина – расход q_i. Каждой

j-ой вершине графа ставится в соответствие другая переменная величина – давление P_j. Совокупность величин $q_i(i=1,m)$ и $P_j(j=\overline{1,n})$ образует два вектора

$$\vec{q} = \{q_1, q_2, ..., q_m\} \text{ и } \vec{P} = \{P_1, P_2, ..., P_n\}$$

которые полностью определяют потокораспределение в ТС.

По степени стабильности информация делится на два класса:

1) устойчивая по времени (диаметры, уклоны, материалы труб и т.д.);

2) переменная, изменяющаяся во времени (наполнение и расход, давление, напоры и т.д.).

В практических расчетах переменную информацию в определенных условиях можно заменить среднестатистическими показателями. Эти условия в работе Р.И. Хуррамовой [5] оцениваются через меры стабильности. Иначе объект рассматривается как динамически функционирующий, а математическая модель характеризуется как модель с распределенными параметрами. В этом случае можно отличить периодичность и переходность процессов.

Информацию по месту в системе можно представить как входную, промежуточную и выходную. Так, например, для решения задач анализа работы эксплуатируемых трубопроводных сетей входной информацией являются: конфигурация сети, диаметры, расходы, длины труб, материал труб и т.д. Выходной информацией являются гидравлические характеристики при различных режимах работы ТС.

Сбор данных о реальном состоянии трубопроводных сетей производится эксплуатационными организациями на основании дежурных планов инвентаризации сетей, проведения замеров, сбор и обработка статистических данных.

Информация о перспективных проработках берётся из генеральных планов развития жилищного строительства городов, комплексных схем развития трубопроводных сетей и планов социально-экономического развития.

Интенсивно меняются методы хранения информации: бумажные носители, перфокарты, магнитные и телеграфные ленты, магнитные барабаны, носители на основе полупроводников. Разнородность информации порождает определенные неудобства, которые сегодня не являются проблемой при разработке и реализации объектно-ориентированных программ и компьютерных моделей.

Общая структура систем проектирования и реконструкции ТС и подготовка базы данных как это мы, представляем на рис. 1. Здесь же выделены структурные единицы, охватываемые программой «Конструктор».

Составляющие жизненного цикла газоснабжения, как объекты математического моделирования газодинамического состояния газопровода

Эксплуатацию современных трубопроводных систем нельзя представить без помощи современной компьютерной техники и информационных технологий [6], поскольку магистральные ТП имеют большую масштабность, динамично развиваются, концентрируются по мощности, повышается уровень централизации.

Годовая добыча природного газа в мире составляет более 2 трлн. нм^3. Из них было 70 млрд. нм^3 добывается в Республике Узбекистан.

Природные газы можно разделить на 3 группы: тощие (или сухие, метановые; более тяжелые углеводороды содержатся менее 50 г/м^3), жирные (попутные; тяжелые углеводороды содержатся выше 150 г/м^3) газы и газоконденсаты (состоят из тощего газа и паров конденсата с C_5 – бензина, легроина, керосина) [7].

Наряду с природным газом в энергетики и в быту используют продукты сухой перегонки (например, коксовый газ) и генераторные газы (продукты мокрой перегонки) местного назначения. Данный способ использовали еще в конце XIX века и до сих пор используют в регионах, где добывается уголь.

Технологическая линия газоснабжения начинается из бурения скважины, стенки которой укрепляют стальными обсадными трубами кольцевой просвет, между которыми заливается бетоном. Газ из забоя к устью скважины движется по фонтанной трубе, где впервые ставится газодинамическая задача о гидравлическом расчете движения газа по фонтанной трубе. В инженерной практике расчет производится по формуле Адамова [8].

В работе Хужаева [9] предложено обобщение формулы Адамова с учетом постоянного температурного градиента Земли.

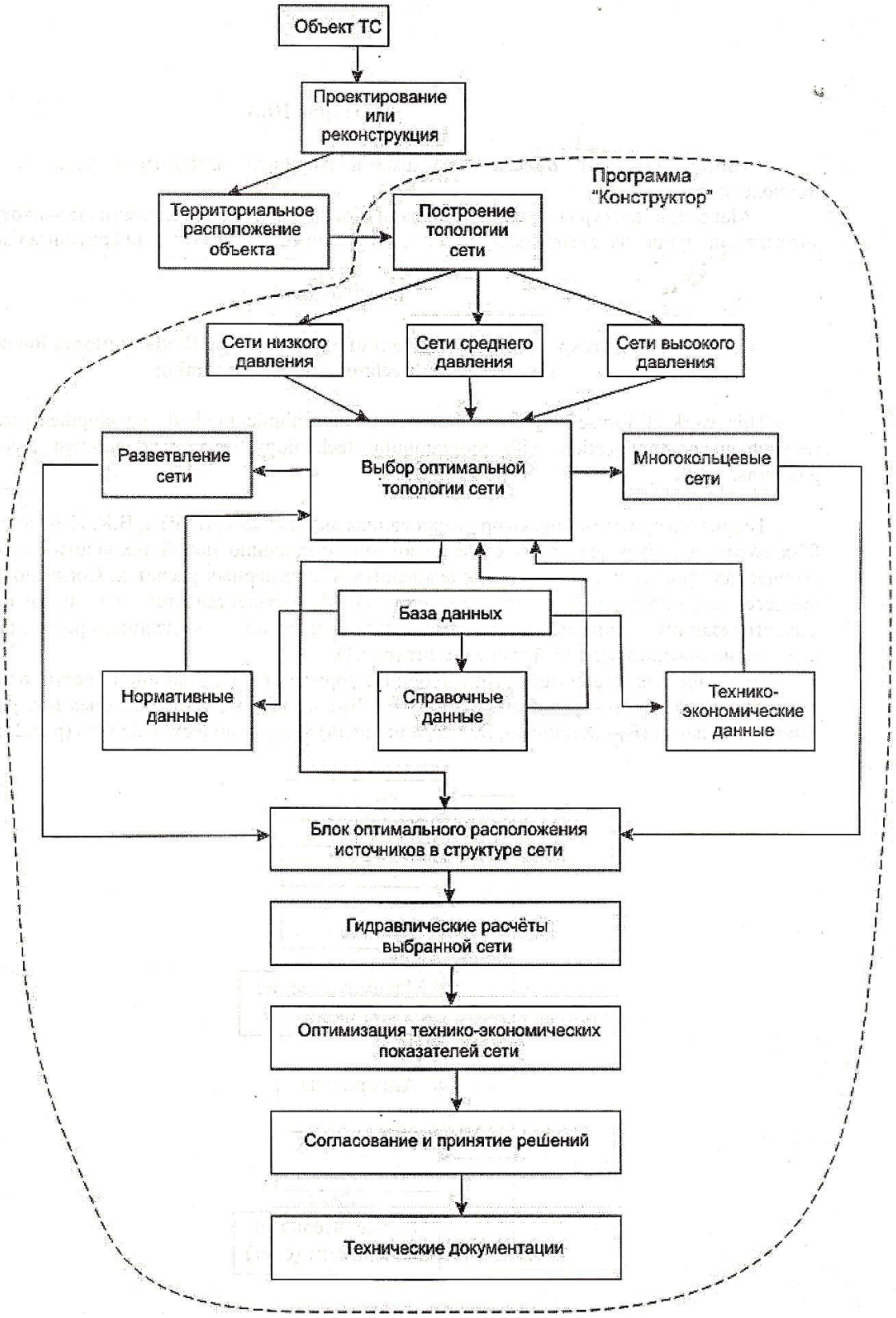

Рис. 1. Общая структура систем проектирования и реконструкции ТС

В работе Коротаева [8] расположение скважин характеризуется как батарейное (по рядам), равномерное (по какой-либо правильной геометрической схеме), осевое или смешанное. Выбор расположения скважин осуществляется на основе технологических, технических, экономических и природных, геологических условий обеспечивающие равномерное падение давления в пластах долгое время, например без обводнений.

В ходе эксплуатации скважин придерживаются определенные режимы с постоянной депрессией, забойного давления, дебита скважины, скорости фильтрации на забое скважины. В зависимости от этих режимов формируется схема трубопроводной транспортировки газа до пункта переработки газа. По топологии внутри промысла схемы могут иметь линейную, лучевую, кольцевую и смешанную структуры. Сбор газа из промыслов осуществляется через газосборочные коллекторы. Расчет сети сбора газа проводится как с точки зрения гидравлики, так и по экономии приведенных затрат.

В ходе эксплуатации месторождений наблюдаются своеобразные изменения показателей. Пластовое давление и дебит постепенно падают, состав добываемых нефти, газа или газоконденсата смещается в сторону легких углеводородов.

При составлении плана размещения скважин и выбора оборудования, в основном, опираются на показатели начального периода эксплуатации промысла. Возможны варианты поэтапной обработки месторождения, когда сначала осваиваются верхние, а в дальнейшем нижние пласты. В этом случае в процессе проектирования учитываются изменения технологического процесса в перспективе, в частности, установки дожимных компрессорных станций (ДКС).

Целью использования ДКС являются: обеспечить рабочее давление, необходимое для доставки по магистрали до точки назначения; увеличение газоотдачи пласта путем понижения давления на всем пути движения газа; увеличение дебитов добывающих скважин (или депрессии) и увеличение технико-экономических показателей магистрального газопровода (МГ).

Выбор мощности КС, в том числе дожимных, осуществляется исходя их предполагаемого расхода газа: с увеличением объема транспортируемого газа общая потеря давления в сети увеличивается, а степень сжатия газа в КС уменьшается. Пересечение этих двух кривых изменения давления определяет необходимые параметры устанавливаемого КС.

Чтобы выделить тяжелые углеводороды, входящие в состав бензина, керосина и других, природный газ подвергается низкотемпературной сепарации (в условиях Республики Узбекистан 1-й, 2-й и 3-й ступени – до -160^0 С и ниже). В результате этого товарный газ становится сухим (тощий газ).

На дальние расстояния товарный газ транспортируется магистральным газопроводом, который, обычно, начинается из головной компрессорной станции.

Головная КС, а также дожимные КС представляют силовыми установками всей сети газопроводов с высоким, средним и низким рабочим давлением. КС состоит из нагнетателей газа с определенной компоновкой. Для изменения давления газа с массовым расходом М при компримировании отдельным нагнетателем используется формула:

$$P^2_{вых} = aP^2_{вх} + bM^2,$$

где $P_{вых}$, $P_{вх}$ – давление в подпоре и на выкиде; a, b – эмпирические постоянные данного нагнетателя.

В работе [8] система уравнений установившегося режима течения в линейном участке газопровода принимается в виде

$$\begin{cases} \dfrac{dp}{dx} = \lambda \dfrac{\rho w^2}{2D} + \rho g \dfrac{dz}{dx} + \dfrac{d(\rho w^2)}{dx}, \\ \dfrac{d(\rho w)}{dx} = 0, \; p = \rho ZRT. \end{cases}$$

Производительность линейного участка с длинной L через массовый расход газа определена формулой

$$M = \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{(P_н^2 - P_к^2)D^4}{ZRT(\lambda \frac{L}{D} + 2\ln\frac{P_н}{P_к})}}.$$

Она входит в серию формул [3, 11, 22], учитывающая возрастание кинетической энергии газа через слагаемое $2\ln(P_н/P_к)$. Данный фактор значителен для малой протяженности L и со значительным изменением давления по длине участка. В остальных случаях можно использовать для коммерческого расхода формулу [6, 8]:

$$Q = K\sqrt{\frac{(P_н^2 - P_к^2)D^5}{ZT\lambda L\overline{\rho}}} \ ,$$

где $\overline{\rho} = \rho_{газ} / \rho_{возд}$; K – коэффициент, учитывающий размерность единиц изменения показателей.

В литературе принято, что однониточный с постоянным диаметром газопровод считается простым, иначе он является сложным.

Гидравлический расчет сложного газопровода является предметом исследования многочисленных работ.

В работах [6], [10] ограничились приведением описания метода коэффициента расхода и способов реализации его при расчете параллельных и последовательных подключений газопроводов.

В работе [8] приведены упрощенные формулы для совместного расчета КС (с одно-, двух – и трехступенчатым сжатием) и МГ, позволяющие определить фактическую пропускную способность сети газопровода.

При разности геодезических отметок профиля трассы газопровода $\Delta z > 200$ м при гидравлическом расчете следует учитывать рельефность трассы. В работе [8] предлагается следующая формула для производительности к многозвенного перегона

$$\mathrm{M} = \left(\frac{P_н^2 - P_к^2(1 + aZ_к}{\mathrm{bL}(1 + \frac{\mathrm{a}}{2\mathrm{L}}\sum_{i=1}^{k}(z_i - z_{i-1})l_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

где $b = \dfrac{16ZRT}{\pi^2 D^5}\lambda$, $a = \dfrac{2g}{ZRT}$.

В работе [16] данная формула обобщена с учетом телескопичности многониточного газопровода и конечным числом узлов концентрированного отбора/подкачек газа.

Значение коэффициента сверхжимаемости Z для линейного участка газопровода определяется по среднему значению давления на участке

$$P_{ср} = \frac{2}{3}\left(P_н + \frac{P_к^2}{P_н + P_к} \right).$$

Следует отметить, что в нашей работе Z имеет значение равной 1, если рассматривается газораспределительная сеть ($P_{ср}$<1,2 МПа). При расчетах коллекторов сбора газа, кольцевых структур среднего и высокого давления ($P_{ср} \geq 1{,}2$ МПа) можно использовать уравнение Редлиха-Квонга, решение которого адекватно при большом интервале изменения статистического давления и температуры газа.

В работе [8] для определения коэффициента сопротивления предлагается пользоваться эмпирической формулой

$$\lambda_T = 0{,}067(\frac{158}{\mathrm{Re}} + \frac{2k}{D})^{0,2} \ ,$$

которая уместна только в трех турбулентных режимах течения газа.

Здесь

$\mathrm{Re} = \dfrac{wD}{\nu} = \dfrac{wD\rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса;

ν, μ – коэффициенты кинематической и динамической вязкости газа; k – эквивалентная шероховатость живого сечения трубопровода.

Для расчета коэффициента сопротивления в работе [7], придерживаясь в рамках СНиП II-37-67, предлагается использовать формулы Стокса λ = 64 / Re при Re<2000, формулы $\lambda = 0{,}0025\mathrm{Re}^{1/3}$ при 2000<Re<4000 и формулы ВНИИГаз $\lambda = 0{,}11\left(\dfrac{k_э}{\mathrm{d}} + \dfrac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0,25}$ при турбулентных режимах течения.

В работе [11] использован обобщенный коэффициент сопротивления Лейбензона в виде кусочно-аппроксимационного одночлена.

Учет местного сопротивления арматуры при расчете МГ осуществляется использованием формулы $\lambda_{расч} = 1{,}05\lambda_T$ при квадратичном законе сопротивления. При остальных режимах течения местное сопротивление учитывается с добавлением эквивалентной длины, соответствующей данной арматуре.

Для лучистой структуры сети газопроводов обсуждается метод путевого отбора газа, согласно которому общий объем отборов в узлах ГП распределяется по всему пути равномерно, вследствие чего перепад давления в сети низкого давления описывается формулой

$$\Delta p = aQ^2L(1 - x + \frac{2n+1}{6n}x^2) \ ,$$

где $x = Q_{пут} / Q$; n – количество подключений потребителя; Q – общий расход; $Q_{пут}$ – интенсивность путевого отбора.

В целом, когда расход газа распределяется на транзитный $Q_Т$ и путевой отбор $Q_{пут}$, то расчетный расход определяется как

$$\Delta\rho = a(Q_Т + \alpha Q_П)^2 L = aQ^2 L(1 - x + \alpha x^2)^2.$$

В этой расчетной формуле при полном распределении газа по пути (x=1) или при n=∞ следует принимать

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0{,}577.$$

Так как в распределительных ГП n>5, то в среднем можно принимать α=0,55:

$$Q_p = Q_Т + 0{,}55 Q_П.$$

Такое сравнение позволяет заменить путевой отбор эквивалентным ему единственным узлом отбора и транзитный расход заменить узловым для конечной точки ГП.

Одним из решающих факторов, обеспечивающих надежность сети газопроводов под нагрузкой и воздействиями, является выбор толщины стенки трубопровода в зависимости от материала его изготовления. В работе [8] перечислены постоянные (под внутреннем давлением, под собственным весом, температурные) и кратковременные (снеговая, от обледенения и ветровая) нагрузки, учитываемые через поправочный коэффициент. В зависимости от этих факторов выбирается толщина трубопровода, сохраняя внешний диаметр в рамках сортамента по ГОСТу. Соответственно этому живое сечение (пропускная способность тоже) уменьшается, но обеспечивается надежность сети.

Из более поздних работ [12] известно, что разработаны электромагнитные дефектоскопы. В зависимости от характеристик отраженных от стенки электромагнитных волн определяются наличие отверстия (или отверстий), свищей, щелей и других дефектов трубопровода.

Многочисленные работы [6, 8, 10] имеют материал о подземных газохранилищах, о режимах их эксплуатации в зависимости от различных внутренних и внешних факторов.

Для освещения особенностей расчета закольцованной сети газораспределения и коллектора сбора газа из промысла обратимся далее к другим источникам.

Аналитический обзор информатизации систем газоснабжения

Информатизация газотранспортной отрасли началась в конце 60-х – начале 70-х годов. К этому времени относятся первые работы, посвященные моделированию и оптимизации режимов работы газотранспортных объектов, с использованием электронных вычислительных машин. В этих работах публикуются алгоритмы расчета газосборных, водопроводных, тепловых сетей, магистральных газопроводов и компрессорных и насосных станций.

В рамках Концепции «Развитие научных исследований по информационно-коммуникационным технологиям в Узбекистане на 2008-2015 годы» намечены разработки соответствующих информационных и объектно-ориентированных программных продуктов для анализа статических и динамических режимов функционирования, оперативного управления и принятия решений в сложных технологических системах, в том числе и в системах газоснабжения городов.

С распространением ЭВМ в научных подразделениях газовой отрасли появляются работы, где совершенствуются методы численного моделирования и оптимизации эксплуатационных режимов, закольцованных магистральных газопроводов совместно с компрессорными станциями, алгоритмы поиска максимальной производительности газопровода и ряд других работ.

Задача потокораспределения в газопроводных сетях является центральной задачей проектирования и управления системы газоснабжения. Усовершенствованию методов решения этой задачи посвящено множество работ [13]. Особенностями предлагаемых алгоритмов являются возможность расчета сетей произвольной конфигурации и отсутствие специальных требований к разбиению сетей на части. Дальнейшее развитие решения этой задачи можно найти в работе А.А. Бондаренко [14]. В ней описываются методы и алгоритмы декомпозиционного и агрегативного моделирования сложных газопроводных сетей больших размеров. Применены теория графов, численные методы решения системы нелинейных алгебраических уравнений, общая теория систем, методы нелинейного математического программирования. Предлагаемые методы и алгоритмы могут быть использованы в качестве алгоритмического обеспечения автоматизированной системы моделирования систем газоснабжения.

Работа [15] содержит богатую информацию о существующих методах гидравличе-

ского расчета кольцевых газораспределительных сетей и их анализ. На основе проведенного анализа даются рекомендации по выбору методов расчета на ЭВМ газораспределительных сетей, состоящих из газопроводов с одинаковым и различными коэффициентами гидравлического сопротивления.

В работе [16] рассмотрена задача оптимизации диаметров газопроводов по критерию минимума металловложений. Однако математическая модель задачи и метод ее реализации в данной работе совершенно другие. Газопроводная часть произвольной топологии преобразуется в древовидную структуру, вершины которой определенным образом классифицируются. В соответствии с классификацией вершин формируются цели, для каждой из которых последовательно решается задача оптимизации диаметров. Решаемая задача является задачей целочисленного линейного программирования, поскольку в постановке задачи учитывается требование дискретности стандартных значений диаметров труб. При решении задачи используется метод «ветвей и границ».

Работы М.Г. Сухарева и Е.Р. Ставровского [17] по праву можно считать основой информатизации газотранспортной отрасли. В их работах рассмотрены такие важнейшие методические вопросы, как моделирование стационарных и нестационарных течений природного газа в магистральных газопроводах и их системах, моделирование работы компрессорного оборудования, модели оптимизации и оптимального развития газотранспортных систем и др. Впервые в мировой практике к решению приведенных задач были применены цифровые вычислительные машины. Наряду с теоретическими положениями приводятся примеры расчетов реальных объектов на ЭВМ.

Неотъемлемой частью информатизации являются методические аспекты моделирования. В перечисленных выше работах заложены основы методического аппарата для решения многих важнейших вопросов для отрасли. Результаты этих работ получены благодаря экспериментальным и теоретическим исследованиям многих ученых в области трубопроводной гидравлики.

Отмечая этапы развития информатизации газотранспортной отрасли, следует упомянуть о разработке алгоритмов решения ресурсоемких задач, к которым, например, относятся задачи, связанные с исследованием нестационарных течений в газопроводах. В работах, посвященных обоснованию расчетных формул для газопроводов и их систем, разработке методов оптимизации стационарных режимов магистральных газопроводов и их систем. Часть работ посвящена распределительным сетям газоснабжения. Приняты нормативные документы, регламентирующие процедуры проектирования и эксплуатации газопроводных систем.

К началу 90-х годов следует отнести этап массовой компьютеризации газотранспортной отрасли. Диспетчерские службы, проектные и научно-исследовательские институты оснащаются персональными компьютерами, средствами мониторинга режимов работы газопроводов и компрессорных станций. С этого времени начинается интенсивное развитие информационных технологий в газотранспортной отрасли. Широко внедряются автоматизированные системы управления технологическими процессами транспорта газа. Разрабатываются информационные базы данных газотранспортных предприятий, широко применяются геоинформационные технологии. Для диспетчерских служб разрабатывается программное обеспечение моделирования, прогнозирования и оптимизации режимов работы магистральных газопроводов. Методическое обеспечение программных комплексов в основном базируется на перечисленных выше работах. По сути дела на этапе компьютеризации появляется возможность внедрить большинство математических и алгоритмических моделей функционирования и управления объектами транспорта газа, разработанных на протяжении последних десятилетий. Эффективная информатизация привела к качественным изменениям диспетчерского управления технологическими процессами в газовой отрасли, особенно в транспорте газа.

Но до сих пор решение ряда проблем, поставленных еще на первых этапах информатизации, остается открытым. Так, в последнее десятилетие возник интерес к поиску оптимальных режимов магистральных газопроводов при нестационарных режимах течения газа.

Интенсивное развитие компьютерных технологий заставляет по-новому подойти к некоторым проблемам. Так, созданные еще в середине 80-х, в начале 90-х годов про-

граммы анализа и оптимального синтеза систем газораспределения при современном уровне развития информационных технологий уже не отвечают требованиям, предъявляемым к ним.

В то же время, остаются вопросы, связанные с обоснованностью применения моделей для гидравлического расчета газопроводов. До сих пор для гидравлических расчетов стальных и полиэтиленовых трубопроводов используются одни и те же формулы. Отличаются лишь численные значения коэффициента шероховатости. Такая экстраполяция гидравлических моделей течения, как выясняется, сделана без достаточного обоснования.

Единая система газоснабжения Республики Узбекистан обеспечивает более чем на половину внутренние потребности страны в энергоносителях и имеет первостепенное значение в пополнении бюджета за счет экспорта газа. Большинство объектов системы, находящиеся главным образом вблизи крупных агломераций, из-за неравномерности потребления газа в суточном и недельном циклах, работает в нестационарном режиме. Кроме того, нестационарность обуславливается аварийными ситуациями, переключением компрессорных мощностей и увеличением спроса на газ при резких похолоданиях. Изменение параметров газового потока вдоль трассы происходит достаточно медленно, поэтому управляющие воздействия следует проводить заблаговременно, например «набивая трубу» в нерабочие дни, чтобы обеспечить покрытие возрастающего спроса в будни.

Нестационарные режимы характерны для многих газотранспортных предприятий. Оптимальная эксплуатация технологических объектов является одним из мероприятий, способствующих энергосбережению в газовой отрасли. Поэтому одной из важнейших задач оперативного управления газотранспортными системами является выбор оптимальных режимов эксплуатации при нестационарных течениях. Разработка математических методов решения этой задачи позволяет увеличить функциональные возможности автоматизированных систем управления газотранспортными предприятиями (АСУ ГТП).

Изучение нестационарных течений в длинных газопроводах началось в 30-х годах XX века. Классическими исследованиями в этом направлении следует считать работы И.А. Чарного [22], в которых дан вывод уравнений движения и предложены методы их интегрирования.

С развитием информатизации и компьютеризации газовой отрасли возник интерес к поиску оптимальных режимов магистральных газопроводов. С учетом нестационарности течения в точной (наиболее адекватной) постановке задача сводится к оптимизации системы с распределенными параметрами. Критерием оптимизации служит минимум энергетических затрат. Математические сложности и нетехнологичность формально оптимального решения заставляли до сих пор довольствоваться подходами с эвристической составляющей.

В некоторых зарубежных комплексах, предназначенных для диспетчерского управления газотранспортными системами, например SIMONE, оптимальный нестационарный режим ищется при ограничивающих предположениях. Методической базой для SIMONE послужили результаты исследования ряда ученых (Kralik J., Stiegler P. и др.). Разработанные ими расчетные процедуры исходят из того условия, что на выходе компрессорных станций поддерживается постоянное максимально возможное давление. Это предположение не приемлемо для отечественных газопроводов.

Методы определения оптимальных режимов магистральных газопроводов при стационарном течении газа хорошо известны и проверены практикой, соответствующие исследования представлены работами М.Г. Сухарева, Е.Р. Ставровского и др. Эти методы пригодны также в условиях медленно меняющихся – квазистационарных -режимов процесса транспорта газа по трубопроводу. Но для тех случаев, когда расход и давления газа претерпевают существенные изменения в суточном и/или недельном циклах, целесообразно разработать модели, более адекватно отражающие условия функционирования. Чтобы покрыть пиковые потребности в газе, необходимо заблаговременно «набить трубу». Управляющие воздействия, выбранные оператором интуитивно, могут быть далеко не оптимальными.

В заключении хотелось остановиться на монографии В.Е. Селезнева и др. [18]. Причиной тому является то, что в этой работе воплощены, по крайней мере, две положительные черты современной информатизации. Во-первых, датируемая 2007 годом

монография выставлена в Интернет и регулярно сопровождается авторским коллективом. Во-вторых, приведенные в монографии «методы позволяют проводить обучение специалистов трубопроводного транспорта эффективной работе при штатном и нештатном функционировании сетей трубопроводов, включая аварийные ситуации». Эти тренажеры созданы на базе высокоточных газодинамических и прочностных симуляторов трубопроводных систем.

По мнению авторов монографии, создание аналогичных компьютерных тренажеров, демонстрирующих состояние и функционирование трубопроводных сетей, полезно для газовой, нефтяной, химической и нефтехимической отраслей промышленности, а также энергетики.

Методы расчета закольцованной сети газопровода

Из курса физики известно, что при расчете электрической цепи постоянного тока производится анализ структуры (декомпозиция) цепи, выискивая симметричность, параллельность и последовательность соединений. При положительном решении этой задачи возникает возможность реализовать законы Ома для расчета отдельных частей цепи и/или цепи в целом.

К сожалению, не всегда удается определить такие облегчающие особенности расчета электрической цепи. В таких случаях обращаются к способу, который был разработан Г. Кирхгофом (1847 г.). Данный способ позволяет рассчитывать произвольную цепь гальванического тока с ограниченным количеством контуров.

В статье Г. Кирхгофа впервые были сформированы 1-я и 2-я гипотезы автора, которые как 2-й и 1-й законы Кирхгофа поныне используются при моделировании электрических цепей, сети трубопроводного транспорта нефти, газа, нефтепродуктов, холодной и горячей воды и т.д.

Отсутствие единой теоретической базы для гидравлического расчета с точки зрения сопротивления трения – аналога закона Ома для электрического участка сети – явилось причиной более позднего применения аналогов законов Кирхгофа при расчете гидравлических цепей.

30-е годы прошлого века были продуктивными в этом смысле, т.к. начали реализовать закон Дарси при расчете гидравлических цепей и вышли в свет работы М.М. Андрияшева (1932 г.), В.Г. Лобачева (1934 г.) и Х. Кросса (1936 г.). Успехи в этом направлении более подробно описаны в монографиях А.П. Меренкова и В.Я. Хасилева [1] и Е.В. Сенновой и В.Г. Сидлера [2].

Для замыкания законов Кирхгофа служит закон Ома для части электрической цепи в виде линейной зависимости между падением напряжения U и силой тока I

$$U = \frac{\rho_t l}{F} I = R \quad ,$$

где R, l, F, ρ_t – сопротивление, длина, площадь поперечного сечения проводника и удельное сопротивление материала проводника. Направление тока берется согласно направлению падения напряжения.

Для сети трубопроводного транспорта несжимаемой жидкости ($\rho \approx const$) использование формулы Дарси приводит к замыкающей законов Кирхгофа формуле [1, 2]

$$P_н - P_к = \frac{\lambda l}{2DF^2 \rho} M|M| + \rho g \Delta z \ ,$$

где $\lambda, D, \Delta z$ – коэффициент сопротивления, диаметр и изменение нивелирной высоты трубопровода; $P_н$, $P_к$ – значения статистического давления в начале и конце участка; g – ускорение силы гравитации; Q – массовый расход жидкости на участке.

Так как зависимость между падением давления и расходом жидкости реализуется для каждого из участков сети, то образуется матрица больших размеров. Если через m, n и c обозначим соответственно количество вершин, узлов и базисных контуров, то будем иметь дело с основной матрицей инциденций A с размерностью $m x n$ и матрицей B базисных контуров с размерностью *mxc*. Решение задач с такими большими размерами проблематично даже в случае линейной зависимости между искомыми, как это описывается законом Ома для части электрической цепи. В этом смысле задачу можно облегчить с применением положений теории графов.

То пришли к совокупности уравнений [2]

$$\begin{cases} Ax = Q, \\ By = 0, \\ y + H = SXx \end{cases}$$

для описания состояния многоконтурной сети трубопроводов.

Векторы – столбцы

$$x = (x_1, x_2, ..., x_n)^T,$$

$$y = (y_1, y_2, ..., y_n)^T,$$

$$Q = (Q_1, Q_2, ..., Q_m)^T$$

и $H = (h_1, h_2, ..., h_m)^T$

представляют расходы и перепады давления в дугах (ветвях и хордах), интенсивностей отбора и напоры в вершинах. (Для удобства векторы-столбцы обозначены знаком транспонирования). Вектор-столбец H учитывает изменение нивелирной высоты и мощность нагнетателя.

Первая группа уравнений в системе называют представлением 1-го закона Кирхгофа, вторая группа – представлением 2-го закона Кирхгофа, а третья группа – замыкающие соотношения в матричной форме. Замыкающие соотношения записаны для несжимаемой жидкости, когда реализуется квадратичным законом сопротивления [2].

Диагональные матрицы сопротивлений и модулей расходов имеют вид

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & s_2 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & ... & s_n \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} |x_1| & 0 & ... & 0 \\ 0 & |x_2| & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & ... & |x_n| \end{bmatrix}.$$

Использование термина «совокупность» к последним двум представлениям состояния сети обусловлено тем, что количество уравнений превышает количество неизвестных. Соответственно, «совокупность» содержит линейно-зависимые уравнения. В связи с этим из группы уравнений Ax = Q совокупности удаляются лишние уравнения, чтобы обеспечить однозначность решения уже системы (обычно убираются уравнения относительно тех вершин-источников, значения, давления которых заданы).

При рассмотрении электрической цепи диагональная матрица X превращается в единичную матрицу, а система – в линейную.

Для решения полученной нами смешанной системы, состоящей из линейных и нелинейных уравнений, можно использовать метод Ньютона, разработанный для приближенного решения системы нелинейных уравнений.

Для реализации этого метода система представляется в виде $f(x) = 0$, где использовали векторную функцию

$$f(x) = \begin{cases} U(x) = Ax - Q, \\ V(x) = By + BH - BSXx. \end{cases}$$

Если известно нулевое приближение x^0 к решению, то $f(x)$ можно разложить в ряд Тейлора вокруг точки x^0 и ограничить первыми двумя членами:

$$f(x^0 + \Delta x) \approx f(x^0) + f'(x^0)\Delta x.$$

Т.к. $x^0 + \Delta x$ является решением системы, то для нахождения приращений Δx_k имеем систему линейных уравнений

$$f_i(x^0) + \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial f_i(x^0)}{\partial x_k}.$$

$$\Delta x_k = 0.\ i = (1,2,...,n) \qquad (*)$$

Решение данной линейной системы используется для следующего приближения $x^1 = x^0 + \Delta x$ к решению системы.

В работе [2] предложено использовать из решения U(x) в части V(x) и тем часть, соответствующая V(x), заменить системой

$$V(x^0_{(x)}) = 2BSXB^{\mathrm{T}}\Delta x_{(B)}.$$

В обоих случаях процесс приближения продолжается до необходимой точности.

К сожалению, с увеличением элементов графа (узлов, ветвей, хорд, фундаментальных контуров) этот метод становится «капризным». Изменение расхода на одной из контуров может вызвать перемены направления обхода других контуров. Чтобы избежать этого разработан метод Лобачева-Кросса, когда в (*) оставляются только диагональные элементы, а члены с коэффициентами

$$\frac{\partial f_i(x^0)}{\partial x_k}, \text{ при } i \neq k$$

отбрасываются.

Проблема сходимости процесса остается открытой, хотя предложены различные способы улучшения сходимости. Напри-

мер, в модификации Л. Выханду [2] метода Лобачева-Кросса предлагается заменить производные $\partial f_i / \partial x_k$ на выражения

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_k} - f_i(x^0)\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_k^2}(2\frac{\partial f_i}{\partial x_k}) \cdot$$

Или предложено использовать групповую релаксацию или комбинацию разных методов.

Приведем другие способы расчета закольцованных сетей.

В монографии В.В. Грачева, С.Г. Щербакова и Е.Е. Яковлева [19] решены линеаризованные задачи с одним и двумя кольцами в нестационарной постановке. Топология сети учитывалась в плоскости изображения операционного исчисления. Стационарное решение получили при $t \to \infty$. Но, в силу линейности исходной системы уравнений, решение относилось к классу линеаризированных решений.

В работе [18] предложены математические модели потокораспределения в разветвляющихся сетях с учетом разделения импульса, общей массы, масс отдельных компонентов и энергии смеси газов, а вопросы расчета закольцованных сетей затрагивались в части литературного обзора.

В ранее цитированной уже работе [16] разработана формула гидравлического расчета рельефного многозвенного участка с концентрированными отборами и подкачками газа, где многониточность газопровода учитывали в рамках вновь разработанного обобщенного метода коэффициента расхода.

В работе [23] предложен способ расчета распределения сжимаемых и несжимаемых жидкостей в узлах разветвления в параллельные нити газопровода при различных режимах течения.

Следует отметить, что в двух последующих работах решение задачи получается точное.

Использование кольцевой сети направлено на увеличение надежности газоснабжения [7]. Резервирование пути газа до потребителя является половинчатым решением задачи надежности. В дополнении к этому структурное резервирование должно обеспечить резервной мощностью, выражающейся в запасах диаметрах и входных давлениях. Такие требования обусловлены удлинением пути транспортировки и расхода газа по обходной линии.

Кольцевые сети используются не только в системе городского газораспределения. Они применяются также при высоких давлениях, например, при сборе газа в коллектор, в магистральных газопроводах (путем соединения параллельных нитей).

Особые требования к городским сетям высокого давления связано тем, что они представляют верхний уровень городской сети газоснабжения, надежность которых определяет надежность всей сети. Надежность городской сети высокого давления обеспечивается путем кольцевания и дублирования отдельных участков. При этом предлагается использовать трубы с одинаковым диаметром, в крайнем случае – с разностью, не превышающей 15-20% от основного диаметра. Особенностью кольцевой сети является также то, что при увеличении количества колец уменьшается резерв давления.

Сети низкого давления представляют низкий уровень иерархии, поэтому к резервированию по этим трем показателям не очень строгое. К тому же эти сети в зависимости от количества ГРП имеют больше узлов питания, а протяженность ветвей будет меньше, но с возможностью подключения питания в середине ветвей.

Согласно [7] гидравлический расчет кольцевой сети начинается с первого этапа – предварительного распределения потоков с соблюдением первого закона Кирхгофа во всех узлах сети и согласно этому осуществить подбор диаметров всех участков газопроводов. По участковым расходам и ограничений на градиенте давления вычисляются участковые диаметры, а далее диаметры, как уже отметили выше, подбираются согласно ГОСТу.

Это недостаточно, т.к. должны выбрать наименьшие диаметр и толщины труб, чтобы сократить капитальные вложения, должны учитывать прогнозный рост газовых нагрузок и обеспечить надежность газоснабжения (резервировать пути, диаметры и давления).

При этом возможно, что по замкнутым контурам потеряется баланс давления. Восстановление баланса давления во всех замкнутых контурах составляет второй этап решения задачи потокораспределения сети (увязка сети).

По мнению автора [24] методы расчета потокораспределения, в основном, можно разделить на алгебраические и экстремаль-

ные. Метод Лобачева-Кросса, его модификации и другие увязочные методы относятся к алгебраическим методам.

Экстремальным методам решения задач потокораспределения относятся:

1) условная минимизация специальной функции с учетом только одного из законов Кирхгофа, отвечающей какому-либо вариационному принципу;

2) метод построения функции для последующего решения задачи безусловной минимизации;

3) переход к задачам нелинейного программирования.

Экстремальные методы, независимо от того, что задачи линейные и нелинейные, достаточно медленные и обладают большой размерностью.

В работе Акбасова сформирован и доказан ряд утверждений о необходимости, достаточности и недостаточности информации для гидравлического расчета и управления закольцованной сети с активным и пассивным элементами, а также для решения задач идентификации сети по структуре, параметрам и состоянию. Представлены графы сетей теплоснабжения городов Казахстана, в частности, гг. Алма-Аты, Лениногорска, Уральска, Караганды и др., которые проанализированы с точки зрения связности и избыточности структур; по последовательности, радиальности и древовидности структуры; по степени централизации, компактности. Разработаны рекомендации отдельных действующих сетей.

Обращение к истории разработки методов расчета закольцованных сетей позволяет выработать концепцию дальнейшего развития методов математического моделирования подобных сложных объектов.

Работы, посвященные исследованию методов расчета трубопроводных сетей, начаты в довоенные годы М.М. Андрияшевым, В.Г. Лобачевым и Х. Кроссом.

Математическое обеспечение для анализа трубопроводных систем в межотраслевом аспекте представлено монографией Меренкова А.П. и Хасилева В.Я. «Теория гидравлических цепей».

Работы московской школы (Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. и др.), иркутской школы (Меренков А.П., Новицкий Н.Н., Сеннова Е.В., Сидлер В.Г., Сумароков СВ. и др.), харьковской школы (Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. и др.), воронежской школы (Квасов И.С., Панов М.Я., Щербаков В.И. и др.) и ташкентской школы (Садуллаев Р.) продолжают это направление, развивают методы теории гидравлических цепей и служат базой для математического моделирования и оптимизации газопроводных сетей.

Представленный материал, конечно же, не претендует на полноту отражения результатов. За рамкой анализа остались неизотермичность процесса транспортировки по трубопроводам (формулы В.А. Шухова, эффект Джоуля-Томсона), численные методы решения задач газодинамического состояния газопроводов, динамические процессы и другие. Тем не менее, можно сделать вывод о том, что закольцованная сеть газопроводов пользуется не только в городском газораспределении, но и при сборе газа из месторождений.

Не разработан ряд вопросов, в том числе вопросы нештатных ситуаций в сетях различной структуры. Поэтому данное исследование направлено на решение данных задач, **целью**, которой является: усовершенствование моделей и алгоритмов расчета теории гидравлических цепей применительно к многоконтурным сетям газопроводов.

Список литературы

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 278 с.

2. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. – 222 с.

3. Трубопроводный транспорт нефти и газа / под общ. ред. В.А. Юфина. – М.: Недра, 1988. – 368 с.

4. Садуллаев Р., Вагапов И.Х., Зайниев Н.З., Хужаев И.К., Хуррамова Р.И. Расчёт магистрального газопровода с учётом рельефа местности // Газовая промышленность. – М., 2003. – №8. – С. 58-59.

5. Хуррамова Р.И. Развитие моделей, методов и алгоритмов функционирования и управления режимами работы системы магистральных газопроводов: автореф. … канд. техн. наук. – Т., 2005. – 22 с.

6. Трубопроводный транспорт нефти и газа / под общ. ред. В.А. Юфина. – М.: Недра, 1978. – 407 с.

7. Ионин А.А. Газоснабжение: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 438 с.

8. Коротаев Ю.П., Ширковский А.И. Добыча, транспорт и подземное хранение газа. – М.: Недра, 1997. – 487 с.

9. Рахимов А.Х., Хужаев И.К. Уточнение формул Шухова и Адамова для закачивающей скважины // Вестник ТашГТУ. – 2006. – № 2. – С. 9-15.

10. Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газопроводов. – М.: Недра, 1982. – 136 с.

11. Хужаев И.К. Развитие математических моделей диффузионного горения и транспортировки газа по трубопроводу: автореф. дис. … д-ра техн. наук. – Ташкент, 2009. – 47 с.

12. Селезнёв В.Е., Алёшин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов. Методы, модели и алгоритмы. – М., 2007. – 695 с.

13. Тевяшев А.Д., Федоров Н.В. и др. Расчет сетей большой размерности с использованием метода декомпозиции. Харьк. ин-т инж. коммун. стр-ва. – Харьков, 1984. – 11 с.

14. Бондаренко А.А. Математическое моделирование сложных газопроводных сетей для решения задач оперативно-технологического управления: дис. ... канд. техн. наук. / Харьковский политехн. ин-т, № ГР 01780021474: 214 с.

15. Comparison of methods flow computation in pipe networks, Tingsanchali T.,Chup.C, "Appl, Simul and Madell, Prog, IASTED Int Sump Francisco, May 16-18, 1983 "Aucheim e.a., 5, a.51-54.

16. Садуллаев Р. и др. Оптимизация параметров при проектировании городских газопроводных сетей // Материалы II Республиканской конференции «Методологические и прикладные аспекты САПР и АСУ в отраслях народного хозяйства». – Т., 1985. – С. 24-27.

17. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Расчеты систем транспорта газа с помощью вычислительных машин. – М.: Недра, 1971. – 206 с.

18. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Современные компьютерные тренажеры в трубопроводном транспорте: математические методы моделирования и практическое применение / под ред. В.Е. Селезнева. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 200 с.

19. Грачев В.В., Щербаков С.Г., Яковлев Е.Е. Динамика трубопроводных систем. – М.: Наука, 1987. – 438 с.

20. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование магистральных трубопроводных систем: дополнительные главы. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 356 с.

21. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика.– М.: Наука, 1976. – 888 с.

22. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296 с.

23. Хужаев И.К., Садуллаев Р., Арифжанов А.Ш. Об управлении процессами транспортировки сжимаемых и несжимаемых сред по параллельным трубопроводам // Автоматизация в промышленности. – М., 2008. – № 6. – С. 19-20.

24. Акбасов А.Р. Разработка интеллектуальной системы управления тепловыми сетями города: дис. … д-ра техн. наук / Казахский нац. тех. универ. им. К.И. Сатпаева. – Алма-аты, 2011. – 110 с.