



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

АДАМЕНКО В.А., ТЕВЯШЕВА О.А.

Формулируется обобщенная постановка задач оценивания состояния и параметров газотранспортных систем (ГТС) в стационарном режиме, включающая в себя метод формирования системы уравнений и неравенств по заданной математической модели установившегося потокораспределения (УПР) в ГТС. Приводится методика решения сформулированной задачи. Исследуются статистические свойства полученных оценок.

1. Введение

Эффективная реализация автоматизированного управления функционированием ГТС тесно связана с необходимостью решения целого комплекса задач потокораспределения [1, 2], в основе решения которых лежат математические модели установившегося потокораспределения. В качестве основных можно выделить следующие задачи:

- оценивание состояния ГТС (режимных параметров потокораспределения — давления, температуры, расходов, состава природного газа и др.);
- оценивание параметров ГТС;
- формирование управляющих воздействий, обеспечивающих реализацию оптимального потокораспределения.

В последние десятилетия в связи с постоянным удорожанием энергоносителей и сохранением их устойчивого дефицита актуальными с практической точки зрения становятся проблемы, связанные с учетом фактических объемов потребления газа по каждому потребителю и оцениванием фактических режимов работы газотранспортных систем. Таким образом, задача оценивания состояния ГТС является наиболее важной для целей оперативного управления, а именно: для оценки степени адекватности модели УПР в ГТС, контроля выхода режимных параметров за допустимые границы, технической диагностики оборудования ГТС, оценивания запаса газа в ГТС, контроля баланса поступления и отбора

газа из ГТС, обнаружения утечек и аварийных ситуаций, поддержания оптимальных или запланированных режимов и т.д. Задачи оценивания параметров ГТС (например, коэффициентов эффективности участков трубопроводов, коэффициентов аппроксимации соответствующих функций в моделях газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и т.д.) также являются очень важными. Эти задачи связаны с тем, что характеристики оборудования ГТС в процессе их создания, развития и эксплуатации претерпевают изменения и в общем случае не совпадают с проектными, паспортными или нормативно-справочными данными. Поэтому в большинстве случаев задача оценивания параметров элементов ГТС является составной частью более общей задачи оценивания фактического состояния и параметров ГТС, характеризующегося как состоянием элементов, так и значениями режимных параметров потокораспределения. Таким образом, на практике в основном приходится решать задачи совместного оценивания состояния и параметров ГТС.

При решении перечисленных выше задач важным обстоятельством является то, что те или иные параметры в математических моделях могут переводиться из категории заданных в оцениваемые, и наоборот, кроме того, может изменяться объем и состав измеряемых данных. Хотя к настоящему времени накоплен большой научно-практический опыт в области решения задач оценивания состояния и параметров ГТС, однако следует отметить отсутствие общего формализованного подхода, инвариантного к тому, что конкретно выступает в качестве:

- объекта оценивания (отдельные элементы ГТС или вся ГТС);
- математической модели ГТС;
- известных, измеряемых и оцениваемых параметров модели ГТС;
- целей (оценивание состояния, параметров, структуры модели ГТС).

Это вызывает необходимость разработки обобщенной постановки задач оценивания состояния и параметров ГТС, включающей в себя метод формирования системы уравнений и неравенств по заданной математической модели УПР в ГТС и множествам известных, измеряемых и оцениваемых переменных и выражений модели. Такой подход применим для решения широкого класса задач потокораспределения. В данной работе была получена обобщенная постановка, из которой удалось выделить:

- решаемые ранее задачи оценивания состояния и параметров ГТС;
- решаемую авторами задачу оценивания давлений, температур, расходов и состава газа.

Из обобщенной постановки можно легко получить множество других задач, возникающих при оперативном управлении потокораспределением в газотранспортных системах, которые предстоит решить в будущем.

Из изложенного можно сделать вывод, что задачи, связанные с оцениванием состояния и параметров ГТС, следует рассматривать как достаточно сложную проблему, требующую комплексных и самостоятельных исследований и являющуюся **актуальной как в научном, так и практическом плане**.

Наиважнейшей составляющей повышения общей эффективности функционирования ГТС Украины является обеспечение соответствующего уровня оперативно-диспетчерского управления систем трубопроводного транспорта газа. В настоящее время в Украине, как и в других странах СНГ, трубопроводный транспорт достаточно полно оснащен комплексами оперативно-диспетчерского управления для систем трубопроводного транспорта газа. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) ГТС включает в себя три подсистемы:

- оперативно-диспетчерского управления основными ТП (транспортом и распределением природного газа);
- оперативно-диспетчерского управления вспомогательными ТП электрохимзащиты, электро-, водо- и теплоснабжения;
- организационного управления производственной деятельностью.

Каждая из этих подсистем, в свою очередь, включает в себя две подсистемы: геоинформационную и

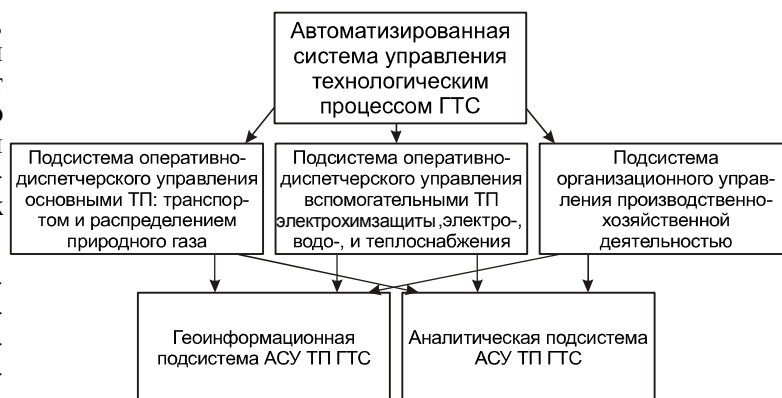


Рис. 1

аналитическую. Функциональная структура АСУ ТП ГТС приведена на рис. 1.

Аналитическая система реализует ресурсосберегающие и экологически безопасные технологии. Функциональные задачи, решаемые в рамках аналитической системы, разрабатываются как реализация некоторого алгоритма обработки типовых структур данных, не зависящего от объема обрабатываемой информации. Динамика развития аналитической системы заключается в расширении перечня или изменении характеристик решаемых задач и лишь косвенно учитывает объемы обрабатываемых данных [1, с.294]. Аналитическая система, как и геоинформационная, является открытой и в дальнейшем может развиваться. В рамках аналитической подсистемы решаются задачи, приведенные на рис. 2. Подробно показаны задачи стационарного режима. Задачи, решенные авторами, показаны жирными контурами.

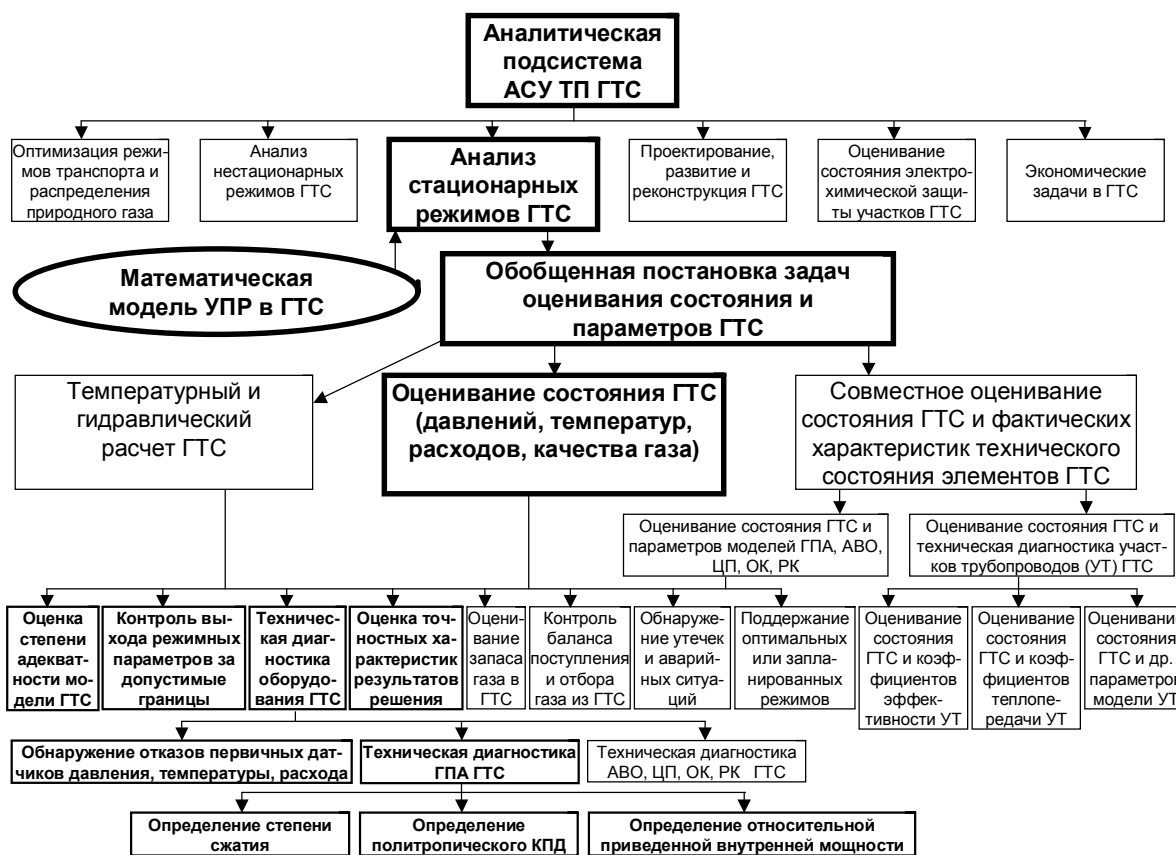


Рис. 2. Анализ стационарных режимов ГТС

2. Основные определения и множества

Рассмотрим ГТС в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n$, т.е. количество режимов работы ГТС равно n . В каждый момент времени t_i ГТС рассматривается в стационарном режиме, в котором ее состояние описывается математической моделью установившегося потокораспределения. Математическая модель УПР в ГТС представляет собой:

- множество переменных модели ГТС, характеризующих состояние и состав газа (давление, температура, расход газа и др.);

- множество переменных модели ГТС, характеризующих структуру и состояние самой ГТС (длина участка трубопровода, его внутренний диаметр, число оборотов привода на центробежном нагнетателе и др.);

- систему уравнений и неравенств, связывающих переменные модели ГТС между собой (первый закон Кирхгофа: сумма входящих расходов газа равна сумме выходящих);

- множество функций (коэффициент сжимаемости газа, относительная плотность газа по воздуху и др.).

Таким образом, в данной работе для стационарного режима транспорта газа в ГТС математическая модель УПР в ГТС и любого ее элемента относится к классу моделей следующего вида:

$$\text{Model} = (\text{Var}, \text{Eq}, \text{F}), \quad (1)$$

где $\text{Var} = \text{Vargas} \cup \text{Varel}$ — множество переменных модели ГТС (элемента ГТС); Vargas — множество переменных модели ГТС (элемента ГТС), характеризующих состояние и состав газа; Varel — множество переменных модели ГТС (элемента ГТС), характеризующих структуру и состояние самой ГТС (элемента ГТС);

$\text{Eq} = \{h_i(\text{Var}) = 0, i = 1, \dots, m; g_j(\text{Var}) \leq 0, j = 1, \dots, r\}$ — множество уравнений и неравенств, связывающих переменные модели ГТС (элемента ГТС) между собой; $\text{F} = \{\varphi_i: X_i \rightarrow Y_i, i = 1, \dots, s\}$ — множество функций, где X_i, Y_i — некоторые заданные множества.

Каждая математическая модель УПР в ГТС (элемента ГТС) имеет свое количество уравнений (m), неравенств (r) и функций (s).

Выражение математической модели УПР в ГТС — это переменные данной модели или любые математические выражения, содержащие переменные и функции модели с использованием операций $+$, $\times$, $/$ и элементарных функций.

Для некоторых физических величин, описывающих структуру и состояние ГТС, заданы предварительные оценки. Каждая из них связана со случайным событием, причем ошибки предварительных оценок физических величин являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и известными дисперсиями. Предварительные оцен-

ки физических величин, описывающих структуру и состояние ГТС, могут быть получены либо в результате прямого измерения (например, давления, температуры и расхода газа), либо быть паспортными характеристиками какого-нибудь прибора или установки (например, коэффициенты аппроксимации соответствующих функций в модели газоперекачивающего агрегата), либо являться оценками, полученными с помощью вычисления (например, расхода газа), или могут быть получены другим способом.

Каждой физической величине, для которой задана предварительная оценка, соответствует переменная или выражение математической модели УПР в ГТС. Пусть $\text{VarFApp}_i, i = 1, \dots, n$ — множества переменных и выражений математической модели УПР в ГТС на i -м режиме работы ГТС, для которых заданы предварительные оценки. Предварительную оценку $[v]_{mi}^{pe}$ переменной или выражения модели v на i -м режиме работы ГТС можно записать в следующем виде:

$$[v]_{mi}^{pe} = [v]_{mi}^t + [\xi_v]_{mi}, \quad \forall v \in \text{VarFApp}_i, i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где $[v]_{mi}^t$ — истинное значение физической величины, описывающей структуру и состояние ГТС, соответствующей переменной или выражению модели УПР в ГТС $v \in \text{VarFApp}_i$, в момент, когда произошло случайное событие предварительного оценивания; $[\xi_v]_{mi}$ — ошибка предварительной оценки переменной или выражения v на i -м режиме;

$$[\xi_v]_{mi} \sim N(0, [\sigma_v]_{mi}^2), \quad \forall v \in \text{VarFApp}_i, i = 1, \dots, n.$$

Для некоторых физических величин, описывающих структуру и состояние ГТС, заданы точные значения. Каждой физической величине, для которой задано точное значение $[v]_{mi}^{ev}$, соответствует переменная или выражение v математической модели УПР в ГТС на i -м режиме работы ГТС. Пусть $\text{VarFExact}_i, i = 1, \dots, n$ — множества переменных и выражений математической модели УПР в ГТС на i -м режиме работы ГТС, для которых заданы точные значения.

Пусть VarFnV — множество тех переменных и выражений математической модели УПР в ГТС, которые не меняются на промежутке времени $[t_1, t_n]$ (например, диаметр и длина участка трубопровода, коэффициенты аппроксимации соответствующих функций в модели газоперекачивающего агрегата), т.е.

$$\text{VarFnV} = \{v | v = [v]_{m1} = [v]_{m2} = \dots = [v]_{mn}\},$$

где v — переменная или выражение математической модели УПР в ГТС; $[v]_{mi}$ — переменная или выражение v математической модели УПР в ГТС на i -м режиме работы ГТС.

В работе используются два вида замены: 1) X Replace $s \in S$
R(s),

где X — любое математическое выражение; S — множество заменяемых элементов; $R(s)$ — выражение, на которое заменяется каждый элемент множества S . Эта операция находит в X подвыражения, совпадающие с элементами множества S и заменяет каждый элемент $s \in S$ на $R(s)$. Результатом является преобразованное выражение X .

2) $X \left| \begin{array}{l} \text{Replace} \\ a_1 = b_1, a_2 = b_2, \dots, a_n = b_n \end{array} \right. \text{ где } X \text{ — любое математическое выражение; } a_i \text{ — заменяемое выражение в } X; b_i \text{ — выражение, на которое заменяется } a_i.$

3. Обобщенная постановка задач оценивания состояния и параметров ГТС

Обобщенная постановка задач оценивания состояния и параметров ГТС состоит в следующем.

Дано:

— ГТС рассматривается в n стационарных режимах в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n$;

— математическая модель этой системы вида (1): $\text{Model} = (\text{Var}, \text{Eq}, F)$, или способ ее построения (при использовании базовой или модифицированной моделей, о которых речь шла в [3], задана структура ГТС);

— точно заданные значения $[v]_{mi}^{ev}$ для переменных и выражений математической модели УПР в ГТС $v \in \text{VarFExact}_i, i = 1, \dots, n$;

— предварительные оценки $[v]_{mi}^{pe}$ для переменных и выражений математической модели УПР в ГТС $v \in \text{VarFApp}_i, i = 1, \dots, n$;

— ошибки предварительных оценок на n режимах распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и известными дисперсиями, т.е.

$[\xi_v]_{mi} \sim N(0, [\sigma_v]_{mi}^2), \forall v \in \text{VarFApp}_i, i = 1, \dots, n$;

— множество переменных и выражений математической модели УПР в ГТС, которые не меняются при переходе от режима к режиму:

$$\text{VarFnV} = \{v | v = [v]_{m1} = [v]_{m2} = \dots = [v]_{mn}\},$$

где v — переменная или выражение математической модели УПР в ГТС; $[v]_{mi}$ — переменная или выражение v математической модели УПР в ГТС на i -м режиме работы ГТС.

Найти: оценки переменных и выражений математической модели УПР в ГТС из заданного множества переменных и выражений VarFTarget такие, чтобы соблюдались уравнения и неравенства математической модели УПР в ГТС в каждом режиме работы ГТС. При этом найденные оценки переменных и выражений, для которых заданы предварительные оценки, должны быть как можно ближе к этим предварительным оценкам. В качестве оценок переменных и выражений используется условное математическое ожидание $M\{\text{VarFTarget} | \text{EqTask}\}$,

РИ, 2003, № 1

где множество EqTask — система уравнений и неравенств, полученная путем повторения n раз уравнений и неравенств математической модели УПР в ГТС для каждого режима с учетом точно заданных значений переменных и выражений, а также переменных, которые не меняются при переходе от режима к режиму, и путем повторения $(n-1)$ раз уравнений для каждого режима, кроме первого, для всех выражений модели, которые не меняются при переходе от режима к режиму:

$$\text{EqTask} = \text{Eq1} \cup \text{Eq4}, \quad (3)$$

где $\text{Eq1} = \bigcup_{i=1, \dots, n} \text{Rm}(i, \text{Eq2}(i) \cup \text{Eq3}(i))$,

$$\text{Eq2}(i) = \left(\text{Eq} \left| \begin{array}{l} \text{Replace} \\ v \in \text{VarFExact}_i \cap \text{Var} \\ [v]_{mi}^{ev} \end{array} \right. \right),$$

$$\text{Eq3}(i) = \{v = [v]_{mi}^{ev} | \forall v \in \text{VarFExact}_i \setminus \text{Var}\},$$

$$\text{Rm}(i, X) = X \left| \begin{array}{l} \text{Replace} \\ v \in \text{Var} \setminus \text{VarFnV} \\ [v]_{mi} \end{array} \right.$$

$$\text{Eq4} = \bigcup_{i=2, \dots, n} \text{Eq5}(i),$$

$$\text{Eq5}(i) = \{\text{Rm}(i, v) = \text{Rm}(1, v) | \forall v \in \text{VarFnV} \setminus \text{Var}\}.$$

Словесное описание метода формирования системы уравнений и неравенств EqTask , определяемой выражением (3), состоит в следующем.

1. Для i -го режима работы ГТС, $i = 1, 2, \dots, n$, сформировать множества уравнений и неравенств:

1.1. $\text{Eq2}(i)$, включающее в себя уравнения и неравенства математической модели УПР в ГТС Eq , в которые вместо всех переменных из множества VarFExact_i подставляются заданные точные значения этих переменных;

1.2. $\text{Eq3}(i)$, которое включает в себя уравнения вида $v = [v]_{mi}^{ev}$ для всех выражений математической модели УПР в ГТС из множества VarFExact_i .

Для сформированного множества $\text{Eq2}(i) \cup \text{Eq3}(i)$ пристыковать индекс режима ко всем переменным модели УПР в ГТС, кроме тех, которые не меняются при переходе от режима к режиму.

2. Сформировать систему уравнений и неравенств Eq1 путем повторения n раз уравнений и неравенств математической модели УПР в ГТС для каждого режима с учетом точно заданных значений переменных и выражений, а также переменных, которые не меняются при переходе от режима к режиму: $\text{Eq1} = \bigcup_{i=1, \dots, n} \text{Rm}(i, \text{Eq2}(i) \cup \text{Eq3}(i))$.

3. Для i -го режима работы ГТС, $i = 2, \dots, n$, сформировать множество $\text{Eq5}(i)$, включающее в себя

уравнения вида $Rm(i, v) = Rm(1, v)$ для всех выражений модели УПР в ГТС v , которые не меняются при переходе от режима к режиму:

$$Eq5(i) = \{Rm(i, v) = Rm(1, v) \mid \forall v \in VarFnV \setminus Var\}.$$

4. Сформировать систему уравнений **Eq4** путем повторения $(n-1)$ раз уравнений для каждого режима, кроме первого, для всех выражений модели, которые не меняются при переходе от режима к режиму: $Eq4 = \bigcup_{i=2, \dots, n} Eq5(i)$.

5. Сформировать множество **EqTask** путем объединения множеств **Eq2** и **Eq4**: $EqTask = Eq1 \cup Eq4$.

Метод формирования системы уравнений и неравенств **EqTask** приведено в таблице:

4. Методика решения задач оценивания состояния и параметров ГТС

Решение поставленной в п.3 задачи оценивания состояния и параметров ГТС осуществляется следующим образом. Поскольку найденные оценки переменных и выражений, для которых заданы предварительные оценки, должны быть как можно ближе к ним, то наилучшим вариантом будет тот, когда найденные оценки совпадут с предварительными. Это может иметь место лишь тогда, когда система уравнений и неравенств **EqTask**, если в нее

вместо всех переменных и выражений, для которых заданы предварительные оценки, подставить эти предварительные оценки, является определенной относительно переменных модели из множества **VarFTarget**. Поэтому решение задачи оценивания осуществляется следующим образом:

1) в множестве **EqTask** вместо всех переменных и выражений, для которых заданы предварительные оценки, подставить эти предварительные оценки; в результате получится множество **EqTaskPE**, определяемое выражением:

$$EqTaskPE = EqTask \cup Eq6, \quad (4)$$

где $Eq6 = \bigcup_{i=1, \dots, n} Rm(i, Eq7(i))$,

$$Eq7(i) = \left(Eq \left| \begin{array}{l} \text{Replace} \\ v \in VarFApp_i \cap Var \\ [v]_{mi}^{pe} \end{array} \right. \right) \cup \{v = [v]_{mi}^{pe} \mid \forall v \in VarFApp_i \setminus Var\};$$

2) проверить необходимое и достаточное условия разрешимости системы уравнений и неравенств **EqTaskPE**. Если эта система является определенной, то решить ее и полученное решение принять

$Eq2(i) = \left(Eq \left \begin{array}{l} \text{Replace} \\ v \in VarFExact_i \cap Var \\ [v]_{mi}^{ev} \end{array} \right. \right)$	Для i -го режима работы ГТС, $i = 1, 2, \dots, n$, сформировать множество уравнений и неравенств Eq2(i) , которое включает в себя уравнения и неравенства математической модели УПР в ГТС Eq , в которые вместо всех переменных из множества VarFExact_i подставляются заданные точные значения этих переменных
$Eq3(i) = \{v = [v]_{mi}^{ev} \mid \forall v \in VarFExact_i \setminus Var\}$	Для i -го режима работы ГТС, $i = 1, 2, \dots, n$, сформировать множество уравнений и неравенств Eq3(i) , которое включает в себя уравнения вида $v = [v]_{mi}^{ev}$ для всех выражений математической модели УПР в ГТС из множества VarFExact_i
$Rm(i, Eq2(i) \cup Eq3(i))$, где $Rm(i, X) = X \left \begin{array}{l} \text{Replace} \\ v \in Var \setminus VarFnV \\ [v]_{mi} \end{array} \right.$	Для сформированного множества Eq2(i) ∪ Eq3(i) присоединить индекс режима ко всем переменным модели УПР в ГТС, кроме тех, которые не меняются при переходе от режима к режиму
$Eq1 = \bigcup_{i=1, \dots, n} Rm(i, Eq2(i) \cup Eq3(i))$	Сформировать систему уравнений и неравенств Eq1 путем повторения n раз уравнений и неравенств математической модели УПР в ГТС для каждого режима с учетом точно заданных значений переменных и выражений, а также переменных, которые не меняются при переходе от режима к режиму
$Eq5(i) = \{Rm(i, v) = Rm(1, v) \mid \forall v \in VarFnV \setminus Var\}$	Для i -го режима работы ГТС, $i = 2, \dots, n$, сформировать множество Eq5(i) , которое включает в себя уравнения вида $Rm(i, v) = Rm(1, v)$ для всех выражений модели УПР в ГТС v , которые не меняются при переходе от режима к режиму
$Eq4 = \bigcup_{i=2, \dots, n} Eq5(i)$	Сформировать систему уравнений Eq4 путем повторения $(n-1)$ раз уравнений для каждого режима, кроме первого, для всех выражений модели, которые не меняются при переходе от режима к режиму
$EqTask = Eq1 \cup Eq4$	Сформировать окончательную систему уравнений и неравенств EqTask путем объединения множеств Eq2 и Eq4

за решение поставленной задачи; если система **EqTaskPE** является недоопределенной, то доопределить ее, затем решить полученную систему и ее решение принять за решение задачи оценивания; если же полученная система уравнений и неравенств **EqTaskPE** является переопределенной, то она не имеет решений. В этом случае задача оценивания состояния и параметров ГТС допускает решение в статистическом смысле, которое состоит в следующем.

Предположить, что ошибки предварительных оценок переменных и выражений математической модели УПР в ГТС статистически независимы друг от друга. В этом случае совместная функция плотности распределения ошибок предварительных оценок переменных и выражений модели будет равна произведению функций плотности распределения ошибок предварительных оценок переменных и выражений. Функция максимального правдоподобия с учетом статистических свойств ошибок предварительных оценок переменных и выражений модели УПР в ГТС примет вид:

$$F = (2\pi)^{-\frac{\sum_{i=1}^n |\mathbf{VarFApp}_i|}{2}} \cdot \prod_{v \in \mathbf{VarFApp}_i, i=1, \dots, n} [\sigma_v]_{mi}^{-1} \times \exp \left(-\frac{1}{2} \cdot \sum_{v \in \mathbf{VarFApp}_i, i=1, \dots, n} \frac{[\xi_v]_{mi}^2}{[\sigma_v]_{mi}^2} \right),$$

где $|\mathbf{VarFApp}_i|$ — размерность множества $\mathbf{VarFApp}_i$.

С учетом выражения (2) функция максимального правдоподобия примет вид:

$$F = (2\pi)^{-\frac{\sum_{i=1}^n |\mathbf{VarFApp}_i|}{2}} \cdot \prod_{v \in \mathbf{VarFApp}_i, i=1, \dots, n} [\sigma_v]_{mi}^{-1} \times \exp \left(-\frac{1}{2} \cdot \sum_{v \in \mathbf{VarFApp}_i, i=1, \dots, n} \frac{([v]_{mi}^t - [v]_{mi}^{pe})^2}{[\sigma_v]_{mi}^2} \right).$$

Прологарифмируем выражение для функции максимального правдоподобия:

$$\ln F = -\frac{\sum_{i=1}^n |\mathbf{VarFApp}_i|}{2} \ln(2\pi) - \prod_{v \in \mathbf{VarFApp}_i, i=1, \dots, n} \ln[\sigma_v]_{mi} - \frac{1}{2} \cdot \sum_{v \in \mathbf{VarFApp}_i, i=1, \dots, n} \frac{([v]_{mi}^t - [v]_{mi}^{pe})^2}{[\sigma_v]_{mi}^2}.$$

Функции F и $\ln F$ имеют оптимальные значения при одних и тех же значениях аргументов (следствие монотонно возрастающего характера функции $\ln F$), что позволяет формулировать исходную задачу как задачу максимизации функции $\ln F$.

С учетом сказанного выше можно сформулировать следующую задачу:

$$\sum_{v \in \mathbf{VarFApp}_i, i=1, \dots, n} \frac{(\mathbf{Rm}(i, v) - [v]_{mi}^{pe})^2}{[\sigma_v]_{mi}^2} \rightarrow \min_{\mathbf{VarTarget} \in \Omega}, \quad (5)$$

где $\mathbf{VarTarget}$ — множество переменных математической модели УПР в ГТС, оценки которых необходимо найти; множество Ω определяется следующим образом:

$$\Omega = \{ \mathbf{VarTarget} \in \Xi \mid \mathbf{EqTask} \}, \quad (6)$$

здесь $\Xi = \Xi_1 \times \Xi_2 \times \dots \times \Xi_{|\mathbf{VarTarget}|}$, где Ξ_i — множество значений, которые может принимать i -я переменная, принадлежащая множеству $\mathbf{VarTarget}$.

Задача (5), (6) является задачей условной оптимизации. При определенных условиях (например, если задача (5), (6) является задачей математического программирования) ее можно решать методами модифицированных функций Лагранжа (множителей), штрафных функций и двойственными методами.

Изложенная выше методика решения задачи оценивания состояния и параметров ГТС в стационарном режиме представлена на рис.3. Эта методика не является новой, она применялась ранее для решения многих конкретных задач. Здесь она приведена для общего случая в терминах обобщенной постановки задач оценивания.

В зависимости от множеств точно заданных значений переменных и выражений математической модели УПР в ГТС, заданных предварительных оценок переменных и выражений модели, множества переменных и выражений модели УПР в ГТС, которые не меняются при переходе от режима к режиму, и того, какая именно модель УПР в ГТС используется, из полученной обобщенной постановки задачи оценивания состояния и параметров ГТС можно получить целый ряд задач стационарного режима. Таким образом, из обобщенной постановки задач оценивания состояния и параметров ГТС можно легко получить:



Рис. 3

— решаемые ранее задачи оценивания состояния и параметров ГТС (например, температурный и гидравлический расчет ГТС, оценивание состояния ГТС и коэффициентов эффективности участков трубопроводов ГТС);

— решаемую в данной работе задачу оценивания давлений, температур, расходов и состава газа (раздел 4);

— множество других задач, возникающих при оперативном управлении потокораспределением в ГТС, которые предстоит решить в будущем (например, оценивание состояния ГТС и коэффициентов теплопередачи участков трубопроводов ГТС).

Следовательно, все основные вычислительные задачи стационарного режима ГТС (см. рис.2) можно легко получить из разработанной обобщенной постановки. Однако для каждой конкретной задачи, получаемой из обобщенной постановки, необходимо формулировать условия разрешимости системы уравнений и неравенств $E_{qTaskPE}$, которые характерны именно для этой задачи. Частный случай, полученный из обобщенной постановки, который наиболее часто встречается на практике, решается в п.5.

5. Задача оценивания давления, температуры, расходов и состава газа в случае использования модифицированной математической модели УПР в ГТС

Задача оценивания давления, температуры, расходов и состава газа рассматривается на одном режиме и предполагает использование модифицированной математической модели УПР в ГТС [3]. Поскольку рассматривается один режим работы ГТС, то его номер не пишется.

Переменными и выражениями, для которых заданы точные значения, в этой задаче являются: все переменные модифицированной модели УПР в ГТС, характеризующие структуру и состояние ГТС (переменные из множества V_{rel} модифицированной модели), т.е. $VarF_{Exact} = V_{rel}$.

Переменными и выражениями, для которых заданы предварительные оценки, в этой задаче являются:

— все входные температуры T_{ki} и компонентные составы газа $N_{комп_i}$, $i \in M1_{Tист1}$, где $M1_{Tист1}$ — множество дуг графа сети, соответствующих источникам;

— все или часть температур газа в узлах T_j , $j \in VT$; компонентных составов газа в узлах $N_{комп_j}$, $j \in VN$; давлений в узлах P_j , $j \in VP$, где VT (VN , VP) — множество узлов графа сети, в которых заданы предварительные оценки для температур газа (компонентного состава газа, давлений газа);

— все или часть температур газа в дугах, соответствующих двухточечным и трехточечным элементам, т.е. T_{hi} , $i \in MT_{II}$; T_{ki} , $i \in MT_K$, где MT_{II} — множество дуг графа сети, в которых заданы предварительные оценки для температур газа на

входе; MT_K — множество дуг графа сети, в которых заданы предварительные оценки для температур газа на выходе, причем

$$i \in M2T \setminus (M2T_{Tpas} \cup M2T_{Tconst}) \cup M3T_{TГ1};$$

— все или часть расходов газа в дугах, т.е. q_i , $i \in Mq$, где Mq — множество дуг графа сети, в которых заданы предварительные оценки для расходов газа:

$$VarF_{App} = \{T_{ki}, N_{комп_i}, i \in M1_{Tист1}; T_j, j \in VT;$$

$$T_{hi}, i \in MT_{II}; T_{ki}, i \in MT_K; N_{комп_j}, j \in VN,$$

$$P_j, j \in VP, q_i, i \in Mq\}.$$

Поскольку рассматривается один режим работы ГТС, то множество переменных и выражений модифицированной математической модели УПР в ГТС, которые не меняются при переходе от режима к режиму $VarF_{nV}$, не задается.

Необходимо найти оценки переменных и выражений модифицированной модели УПР в ГТС из заданного множества переменных и выражений $VarF_{Target}$:

$$VarF_{Target} = \{T_{ki}, N_{комп_i}, i \in M1_{Tист1};$$

$$P_j, T_j, N_{комп_j}, j \in V; q_i, i \in E;$$

$$T_{hi}, T_{ki}, i \in M2T \setminus (M2T_{Tpas} \cup M2T_{Tact}) \cup M3T_{TГ1}\},$$

где E — множество дуг графа сети; $M2T$ — множество дуг графа сети, соответствующих двухточечным элементам ГТС; $M2T_{Tpas}$ ($M2T_{Tact}$) — множество дуг графа сети, соответствующих пассивным (активным) двухточечным элементам с выраженной температурой газа; $M3T_{TГ1}$ — множество дуг графа сети, соответствующих основному потоку газа, который течет через трехточечные элементы ГТС [3].

Выделим из множества $VarF_{Target}$ множество переменных модифицированной математической модели УПР в ГТС:

$$Var_{Target} = \{q_i, i \in E_{tree2}; P_j, j \in V1;$$

$$T_{ki}, N_{комп_i}, i \in M1_{Tист1};$$

$$T_{hi}, T_{ki}, i \in M2T \setminus (M2T_{Tpas} \cup M2T_{Tact}) \cup M3T_{TГ1}\},$$

где E_{tree2} — множество дуг графа сети, которые являются хордами дерева; $V1$ — множество узлов графа сети, которые являются точками затравки для расчета давлений [3].

Решение данной задачи осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в п.4. Для того чтобы система уравнений и неравенств $E_{qTaskPE}$ (4) была определенной относительно переменных модели из множества Var_{Target} , должны выполняться необходимое и достаточное условия разрешимости [4].

Необходимое условие разрешимости. Количество давлений газа в узлах, для которых заданы предварительные оценки, плюс количество расходов газа

в дугах, для которых заданы предварительные оценки, должно равняться сумме числа источников и потребителей, т.е. должно выполняться условие

$$|VP| + |Mq| = |M1Tист1| + |M1Tпот1|,$$

причем хотя бы для одного давления должна быть задана предварительная оценка.

Достаточное условие разрешимости для случая, когда предварительные оценки давлений и расходов заданы только в фиктивных дугах (т.е. в дугах, соответствующих источникам и потребителям): для каждой фиктивной дуги должна быть задана предварительная оценка либо для расхода газа, либо для давления в узле, в который она входит (если эта дуга принадлежит множеству $M1Tист1$) или выходит (если эта дуга принадлежит множеству $M1Tпот1$).

Сформулированные условия разрешимости следуют из структуры уравнений модели элементов ГТС [3].

Если система уравнений и неравенств $EqTaskPE$ (4) является переопределенной, то тогда задача условной минимизации (5) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in M1Tист1} \frac{(T_{ki} - T_{ki}^{pe})^2}{\sigma_{T_{ki}}^2} + \sum_{i \in M1Tист1} \frac{(N_{комп_i} - N_{комп_i}^{pe})^2}{\sigma_{N_{комп_i}}^2} + \\ & + \sum_{j \in VT} \frac{(T_j - T_j^{pe})^2}{\sigma_{T_j}^2} + \sum_{i \in MT_{н}} \frac{(T_{hi} - T_{hi}^{pe})^2}{\sigma_{T_{hi}}^2} + \\ & + \sum_{i \in MT_k} \frac{(T_{ki} - T_{ki}^{pe})^2}{\sigma_{T_{ki}}^2} + \\ & + \sum_{j \in VN} \frac{(N_{комп_j} - N_{комп_j}^{pe})^2}{\sigma_{N_{комп_j}}^2} + \sum_{j \in VP} \frac{(P_j - P_j^{pe})^2}{\sigma_{P_j}^2} + \\ & + \sum_{i \in Mq} \frac{(q_i - q_i^{pe})^2}{\sigma_{q_i}^2} \rightarrow \min_{VarTarget \in \Omega}, \quad (7) \end{aligned}$$

где множество ограничений Ω определяется в соответствии с выражением (6):

$$\Omega = \{VarTarget \in \Xi | EqTask\}, \quad (8)$$

здесь $\Xi = \Xi_1 \times \Xi_2 \times \dots \times \Xi_{|VarTarget|}$, Ξ_i — множество значений, которые может принимать i -я переменная, принадлежащая множеству $VarTarget$; $EqTask$ — система уравнений и неравенств модифицированной модели УПР в ГТС с учетом точно заданных значений переменных и выражений модели [3]:

$$EqTask = \left\{ \varepsilon_i = \left[1 + \left(\frac{nr}{n0} \right)_{пр i}^2 \left(\varepsilon_0^{\frac{m_i-1}{m_i}} - 1 \right) \right]^{\frac{m_i}{m_i-1}}, \right. \\ \left. T_{ki} = T_{hi} \varepsilon^{\frac{m_i-1}{m_i}}, \right.$$

$$q_{тг(i)} = q_{тг.i}^H \cdot Kq_i \times \\ \times \left(0.75 \frac{Ne_i}{N_{ei}^H} + 0.25 \sqrt{\frac{t3_i + 273}{t3_i^0 + 273}} \cdot \frac{Pa_i}{1.033} \right),$$

$$Q_{пр.min_i} \leq Q_{пр_i} \leq Q_{пр.max_i},$$

$$n_{min_i} \leq nr_i \leq n_{max_i}, \quad P_{k(i)} \leq \hat{P}_{max_i},$$

$$T_{ki} \leq \hat{T}_{max_i}, \quad q_{тг(i)} \geq 0, \quad i \in M3TTГ1,$$

$$Eq_i \setminus \{h_{pi}(\dots) = 0, h_{ti}(\dots) = 0\},$$

$$i \in Efor1 \cap (M2TTpas \cup M2TTact),$$

$$Eq_i \setminus \{h_{pi}(\dots) = 0\},$$

$$(i \in Efor1) \wedge (i \notin M2TTpas \cup M2TTact),$$

$$Eq_i \setminus \{h_{ti}(\dots) = 0\},$$

$$i \in Efor2 \cap (M2TTpas \cup M2TTact),$$

$$Eq_i, (i \in M2T \cap Efor2) \wedge (i \notin M2TTpas \cup M2TTact),$$

где $h_{pi}(\dots) = 0$ ($h_{ti}(\dots) = 0$) — уравнения, связывающее давление (температуру) газа на входе и выходе i -го элемента [3].

Поскольку задача (7) предполагает использование модифицированной математической модели УПР в ГТС, а в [3] говорилось о том, что эта модель требует выбора дерева и леса графа сети, приведем процедуры выбора оптимальных дерева и леса.

6. Выбор дерева графа сети

Дерево графа сети выбирается следующим образом: одна дуга из множества $M1Tист1$ делается ветвью дерева, тогда все остальные дуги, принадлежащие множествам $M1Tист1$ и $M1Tпот1$, будут хордами. Если не получается таким способом выбрать дерево, то тогда две дуги из множества $M1Tист1$ необходимо сделать ветвями дерева, а остальные дуги, принадлежащие множествам $M1Tист1$ и $M1Tпот1$, — хордами и т.д. Рассмотрим алгоритм построения дерева графа сети. Этот алгоритм является оптимальным для задачи (7) и состоит в следующем.

1. Фиктивный нулевой узел пометить как включенный в дерево.

2. Выбрать любую дугу из множества $M1Tист1$ и пометить ее как ветвь дерева. Узел, в который она входит, включить в дерево и поместить этот узел в очередь.

3. Пока очередь не пуста, делать следующее. Извлечь из очереди узел. Просмотреть все дуги, входящие и выходящие из этого узла. Дуги, которые ведут к еще не включенным в дерево узлам, пометить как ветви дерева, а соответствующие узлы включить в дерево и поместить в очередь.

4. Если все узлы графа сети включены в дерево и число ветвей равно числу узлов графа минус 1, то построение дерева успешно завершено, иначе — структура графа неправильная, поэтому не удалось построить дерево.

7. Выбор леса графа сети

Пусть выбрано множество $V1$. Узлы $j \in V1$ имеют уровень 1. Узел имеет уровень $(i+1)$, если он соединен ветвью леса с узлом уровня i . Рассмотрим

ситель надежность. Подбор значений был проведен экспериментально.

9. Программная реализация разработанных моделей и методов

Полученные теоретические и практические результаты реализованы в виде комплекса программ “Оценивание состояния газотранспортных систем” (ОСГТС). Разработанная автоматизированная система ОСГТС используется для оценивания параметров газовых потоков (давлений, температур, расходов, показателей качества природного газа), т.е. решает задачи вида (7), (8). ОСГТС осуществляет:

- построение математических моделей всей ГТС и отдельных ее элементов;
- контроль на достоверность входных данных;
- оценивание давлений, температур, расходов и состава природного газа.

Разработанный комплекс программ ОСГТС является составной частью автоматизированной системы технической диагностики и геоинформационной системы ГТС (рис. 5). Работа ОСГТС возможна в рамках геоинформационной системы, поскольку для того, чтобы оценить давление, температуру, расходы и качество поставляемого газа, необходимо учитывать сложную пространственную топологию ГТС, т.е. на вход ОСГТС поступает информация о топологии, структуре ГТС и параметрах моделей ее элементов из базы данных геоинформационной системы. Результаты решения задач оценивания состояния ГТС (оценки давлений, температур, расходов и качества газа) заносятся в базу данных и являются исходными данными для множества других задач АСУ ТП ГТС:

- оценки степени адекватности модели УПР в ГТС;
- контроля выхода режимных параметров за допустимые границы;
- технической диагностики оборудования ГТС (обнаружения отказов первичных датчиков давления, температуры, расхода; технической диагностики ГПА, аппаратов воздушного охлаждения, циклонных пылеулавливателей, отсекающих и регулируемых кранов);
- оценки точностных характеристик результатов решения;
- оценивания запаса газа в ГТС;
- контроля баланса поступления и отбора газа из ГТС;

- обнаружения утечек и аварийных ситуаций;
- поддержания оптимальных или запланированных режимов и т.д.

Разработанный комплекс программ обеспечивает решение первых четырех перечисленных задач и более точное оценивание параметров газовых потоков по сравнению с ранее используемыми методами.

10. Исследование статистических свойств оценок, полученных в результате решения задач оценивания состояния

Рассмотрим задачу оценивания состояния, приведенную в п.5. Пусть в результате решения этой задачи найдены оценки переменных и выражений модифицированной математической модели УПР в ГТС из заданного множества переменных и выражений **VarFTarget**. Проведем исследование статистических свойств полученных оценок. Логично предположить, что чем больше будет переменных и выражений модели, для которых заданы предварительные оценки (т.е. чем больше степень переопределенности системы (4) **EqTaskPE**), тем меньше будут дисперсии полученных оценок, поскольку при статистическом оценивании будет использоваться больше данных. Этот факт был подтвержден экспериментально.

Исследование зависимости дисперсий полученных оценок от степени переопределенности системы (4) **EqTaskPE** проводилось с помощью имитационного моделирования с применением пакета Mathematica 4.0.

Объектом имитационного моделирования является газотранспортная система в различных состояниях, т.е. моделируются статистические свойства ошибок предварительных оценок переменных и выражений математической модели УПР в ГТС.

Целью имитационного моделирования является исследование зависимости дисперсий полученных оценок от степени переопределенности системы уравнений и неравенств математической модели УПР в ГТС.

Алгоритм имитационного моделирования состоит в следующем:

1. Для графа сети задаться “увязанными данными”, т.е. такими значениями переменных математической модели УПР в ГТС, которые удовлетворяют уравнениям и неравенствам этой модели. Назовем эти “увязанные данные” истинными значениями переменных и выражений модели УПР в ГТС. В результате получим таблицу истинных значений переменных и выражений математической модели УПР в ГТС **Table^t**.

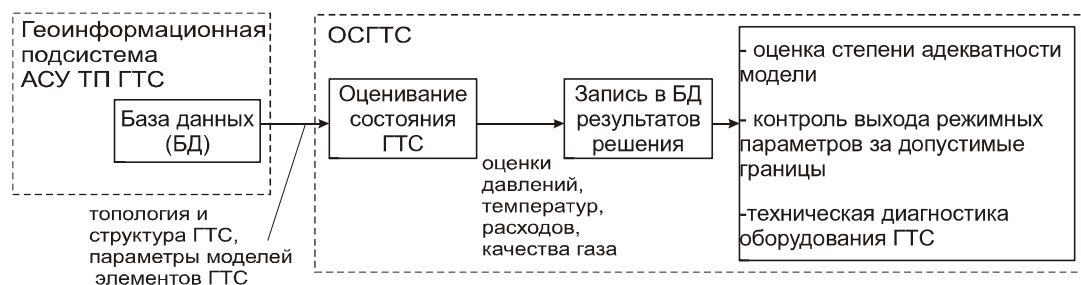


Рис. 5

2. Задать множество **VarFTarget**, т.е. множество переменных и выражений модели ГТС, оценки которых необходимо найти.
3. Для каждой i -й переменной (выражения) из множества **VarFTarget** создать таблицу **Tableos_i**, в которую будут заноситься значения дисперсии этой переменной (выражения) в зависимости от степени переопределенности системы уравнений и неравенств модели УПР в ГТС, где $m_{\max}$ — максимально возможная степень переопределенности системы.
4. Пусть степень переопределенности системы $m = 0$, т.е. система уравнений и неравенств **EqTaskPE** является определенной.
5. Задать множество переменных и выражений модели ГТС, для которых заданы точные значения (**VarFExact**), и множество переменных и выражений модели, для которых заданы предварительные оценки (**VarFApp**). Точные значения для переменных и выражений из множества **VarFExact** взять из таблицы **Table^t**.
6. Установить счетчик итераций Count в ноль, т.е. Count = 0. Далее для каждой i -й переменной (выражения) из множества **VarFTarget** создать таблицу **Tablev_i**, в которую будут заноситься значения этой переменной (выражения), полученные в результате решения задач оценивания.
7. Для каждой предварительной оценки переменной и выражения из множества **VarFApp** сгенерировать ошибку по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и некоторым заданным значением дисперсии. Далее для каждой переменной и выражения из множества **VarFApp** вычислить предварительную оценку в соответствии с выражением (2), т.е. предварительная оценка переменной (выражения) модели равна сумме ее (его) истинного значения, взятого из таблицы **Table^t**, плюс сгенерированное значение ошибки.
8. Решить задачу оценивания состояния в соответствии с методикой, изложенной в п.4.
9. Для каждой i -й переменной (выражения) из множества **VarFTarget** в таблицу **Tablev_i** добавить ее (его) значение, полученное в результате решения задачи оценивания.
10. Увеличить Count на единицу. Если Count < N (где N — некоторое заданное максимальное число итераций), то перейти к п.7, иначе — к п.11.
11. В результате для каждой i -й переменной (выражения) из множества **VarFTarget** получится таблица **Tablev_i**, состоящая из N значений. Каждая такая **Tablev_i** и будет выборкой для соответствующей переменной (выражения) модели. Далее по этим выборкам найти дисперсии соответствующих переменных (выражений).

12. Для каждой i -й переменной (выражения) из множества **VarFTarget** в таблицу **Tableos_i** занести значение дисперсии этой переменной (выражения) в зависимости от текущего значения степени переопределенности m .

13. Увеличить степень переопределенности m системы уравнений и неравенств модели на единицу. Если $m < m_{\max}$, то перейти к п.5., иначе — к п.14.

14. Для всех переменных и выражений из множества **VarFTarget** по данным таблиц **Tableos_i** построить графики зависимостей “степень переопределенности системы — дисперсия переменной (выражения)”.

Имитационное моделирование было проведено для нескольких графов сети. На рис. 6(а,б) даны результаты моделирования (для трех переменных) для графа сети, приведенного в [3]. Эти результаты аппроксимированы полиномом вида $a + b x + c x^{-1}$. На рис.6 приведено два графика: один из них получен в результате имитационного моделирования (а), а второй является результатом аппроксимации первого (б). При этом дисперсии ошибок предварительных оценок давлений были приняты равными 0.16, а дисперсии ошибок предварительных оценок расходов 0.0256.

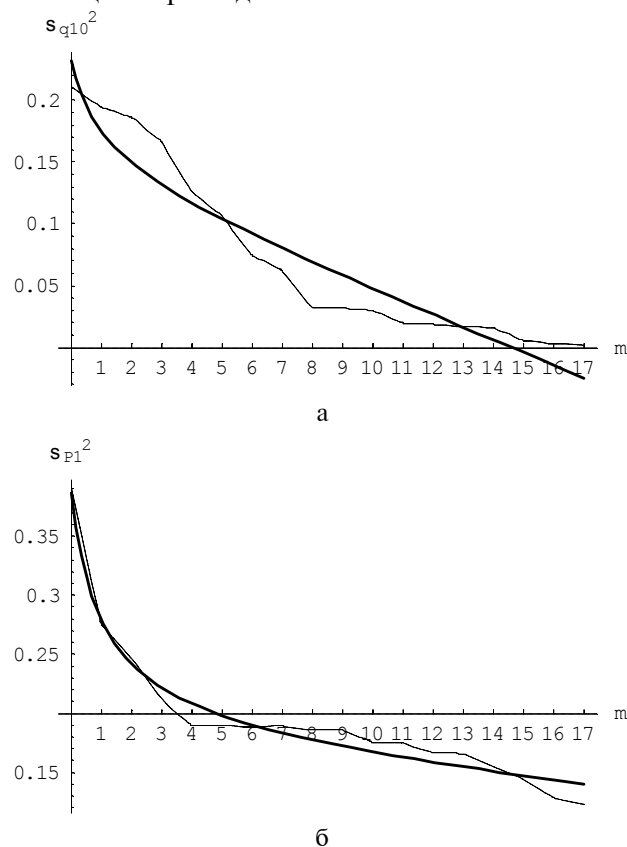


Рис. 6

Проведенные исследования подтвердили предположение о том, что дисперсии оценок, полученных в результате решения задач оценивания состояния, уменьшаются при увеличении степени переопределенности системы уравнений математической модели УПР в ГТС.

11. Заключение

Сформулирована обобщенная постановка задач оценивания состояния и параметров ГТС в стационарном режиме, включающая в себя метод формирования системы уравнений и неравенств по заданной математической модели УПР в ГТС и множествам известных, измеряемых и оцениваемых переменных и выражений модели. Метод применим для решения широкого класса задач потокораспределения. Приведена методика решения сформулированной задачи оценивания состояния и параметров ГТС. Все основные вычислительные задачи стационарного режима ГТС можно легко получить из разработанной обобщенной постановки, однако для каждой конкретной задачи, получаемой из обобщенной постановки, необходимо формулировать условия разрешимости системы уравнений и неравенств модели УПР в ГТС, которые характерны именно для этой задачи. Решена задача оценивания состояния ГТС в стационарном режиме, полученная из обобщенной постановки (задача оценивания давлений, температур, расходов и состава газа), алгоритмы выбора дерева и леса графа сети для этой задачи. С помощью имитационного моделирования проведены исследования статистических свойств оценок, полученных в результате решения задач оценивания состояния ГТС, в зависимости от статистических свойств исходных данных. Проведенные исследова-

ния подтвердили предположение о том, что дисперсии оценок, полученных в результате решения задач оценивания состояния, уменьшаются при увеличении степени переопределенности системы уравнений математической модели УПР в ГТС.

Литература: 1. *Трубопроводные системы энергетики: модели, приложения, информационные технологии / Атавин А.А., Карасевич А.М., Сухарев М.Г., Адаменко В.А. и др. М.: ГУП Изд-во "Нефть и газ" РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. 320с.* 2. *Новицкий Н.Н.* Оценивание параметров гидравлических цепей. Новосибирск: Наука, 1998. 214с. 3. *Адаменко В.А., Адаменко А.В., Тевяшева О.А.* Объектно-ориентированный подход к построению математических моделей газотранспортных систем // Радиоэлектроника и информатика. 2002. №1. С. 58-71. 4. *Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д.* Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. Харьков: Изд-во при Харьк. ун-те издательского объединения "Вища школа", 1980. 144с.

Поступила в редколлегию 02.07.2002

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Евдокимов А.Г.

Адаменко Вера Анатольевна, канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики ХНУРЭ. Научные интересы: системный анализ, оптимальное стохастическое управление, условная оптимизация. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380572-40-94-36.

Тевяшева Ольга Андреевна, аспирантка НТУ "ХПИ". Научные интересы: системный анализ, теория оптимальных решений. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пр. Фрунзе, 21, тел. +380572-20-57-74.

УДК 658.012.011.56

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

ЛЕВЫКИН В.М., ЕВЛАНОВ М.В., ПУШКАРЕВ А.Н.

Описываются основные недостатки существующей технологии разработки функциональной и обеспечивающей части информационных систем. Дается определение функционального и обеспечивающих комплексов как конкретных проектных решений на области, заданной требованиями к функциям и видам обеспечений системы.

В настоящее время практически все современные информационные управляющие системы (ИУС) создаются и эксплуатируются на конкретных предприятиях и организациях, которые именуются объектами автоматизации. При этом подавляющее большинство методик и технологий направлено на создание таких ИУС, которые должны быть экономически целесообразными для данного предприятия. Из этого следует необходимость использования при разработке ИУС методов построения и анализа экономико-математических моделей бизнес-процессов объекта автоматизации и формирования бизнес-планов проектируемых ИУС и информационных технологий (ИТ).

Поэтому проектирование функциональной структуры ИУС, при котором учитываются особенности объекта автоматизации и экономические условия реализации проекта, осуществляется, как правило, стандартным образом [1, 2]. На основании существующих описаний и моделей объекта автоматизации специальной группой предлагается набор вариантов функциональной структуры, которые оцениваются по экономическим и технико-экономическим критериям эффективности. В результате оценивания выбирается единственный вариант функциональной структуры, реализация которого удовлетворяла бы автоматизируемое предприятие по большинству критериев. Затем на основании выбранного варианта функциональной структуры ИУС проводится определение требований к видам обеспечений и разработка обеспечивающей части системы. Следует также отметить, что функциональная структура ИУС может разрабатываться для конкретного предприятия или быть представлена существующими лицензионными решениями, общепринятыми в данной области.

Однако такой подход к проектированию ИУС имеет ряд недостатков. Во-первых, переход от моделирования бизнес-процессов предприятия к проектированию функциональной структуры, а тем более к обеспечивающей части ИУС слабо формализован и не позволяет учесть все экономические и организационные особенности данного предприятия, отрасли, региона. Кроме того, требования, выдвигаемые на основе результатов анализа бизнес-процессов к функциональной структуре и обеспечивающей части ИУС, часто меняются и дополняются в процессе