

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

На правах рукописи  
экс. № \_\_\_\_\_  
УДК 621.14

ФЕДОРОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-РЕКУРСИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

05.13.18. Теория моделирования, численные методы и  
комплексы программ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев 1994

Диссертация является рукописью  
Работа выполнена в Институте проблем моделирования  
в энергетике АН Украины

Научный руководитель: доктор технических наук,  
Кондращенко В. Я.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Степанов А. Е.

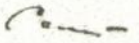
кандидат технических наук,  
Фуртат И. Э.

Ведущая организация: Киевский институт инженеров гражданской  
авиации

Защита состоится "19" 05 1994 г. в \_\_\_ часов  
на заседании специализированного совета К016.61.01 при  
Институте проблем моделирования в энергетике АН Украины  
по адресу: 252680, Киев-164, улица Генерала Наумова, 15

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
проблем моделирования в энергетике АН Украины

Автореферат разослан "15" 04 " 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук  Э. П. Семагина

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00801730 (J)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Научная разработка и практическая реализация проблемно-ориентированных программных средств является ключевым вопросом повышения эффективности и внедрения современной вычислительной техники в машиностроение (в частности, в авиационную промышленность), энергетику и другие отрасли.

#### Актуальность.

В авиационной технике важное место занимает проблема обеспечения в кабинах необходимых условий для жизнедеятельности людей и надежной работы различных приборов, аппаратов, агрегатов. Решение этой проблемы связано с созданием и функционированием специального бортового оборудования - систем кондиционирования воздуха (СКВ).

Основные свойства системы закладываются и отрабатываются на этапах исследования, разработки, испытаний, опытной эксплуатации и при модификациях. На каждом этапе производится корректировка и доработка систем на основе располагаемой информации, что определяет итерационный характер их развития.

Источником информации могут быть результаты испытаний и моделирования. Моделирование не требует настройки объекта, дешево и оперативней. Необходимость создания информационного обеспечения для всех этапов жизненного цикла, в котором доминирующее положение занимает методы моделирования объекта, очевидно.

#### Цель работы.

1) Разработать и обосновать новый проблемно-ориентированный метод моделирования стационарных тепловых и гидравлических режимов СКВ, обладающий следующей совокупностью свойств:

- адаптируемость модели к любым схемно-конструктивным решениям объекта анализа;
- адекватность результатов моделирования реальному поведению объекта анализа, что требует учета всех физических и технических деталей;
- гарантируемость получения результатов расчета.

2) Создать на его основе и внедрить в промышленность проблемно-ориентированный программный комплекс для исследования режимов функционирования систем и оперативного информационного обеспечения специалистов данными о параметрах систем во всем объеме задач исследования, разработки, испытаний и эксплуатации на всех этапах жизненного цикла.

Методы исследования. применяемые в работе, основаны на струк-

турно-декомпозиционных принципах построения модели СКВ, теории теплообмена и методах вычислительной математики.

### Научная новизна

Разработан подход, механизм и логика декомпозиционного метода моделирования, основанный на структуризации схемы (включая неплоские) с помощью унифицированных структурных композиций - гребенок, в том числе:

- а) На основе системной методологии разработана структурно-классификационная схема систем класса СКВ.
- б) Разработаны структура данных и эффективные рекурсивные алгоритмы Р-версии СД-метода моделирования СКВ.
- в) Разработаны методология, алгоритмы оценки и оптимальной настройки точности рекурсивных алгоритмов, обеспечивающие их сходимость, определения структурных производных.
- г) Разработаны алгоритмы моделирования СКВ с многочисленными критическими режимами на элементах системы.
- д) Разработан и реализован алгоритм получения многозначной внешней выходной характеристики системы, при наличии в ней нелинейных элементов типа вентиляторов, порождающих множество ее равновесных состояний.
- е) Разработан специализированный комплекс программ по исследованию систем класса СКВ.

### Практическая ценность

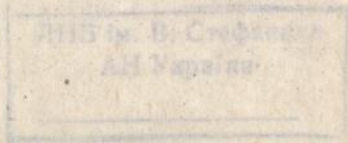
Разработан и доведен до уровня инженерного применения новый рекурсивный СД-метод моделирования теплоэнергетических систем авиационного оборудования - систем кондиционирования воздуха.

Разработан на его основе проблемно-ориентированный программный комплекс для исследования режимов функционирования различных вариантов СКВ в широком диапазоне граничных параметров (на всех этапах полета), оперативного информационного обеспечения исследователей, испытателей и эксплуатационников данными о параметрах систем на всех этапах их жизненного цикла.

Комплексы программ внедрены в следующих КБ авиационной промышленности: АНТК им. Сухого, АНТК им. Туполева, АНТК им. Антонова.

### Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинаре "Автоматизация построения моделирующих, тренажерных и



диагностических систем энергетики" (г. Киев, 1989г.), а также на трех конференциях ИПМЭ АН Украины в 1987, 1992-1994 г.г.

### Публикации

— Основные положения диссертации опубликованы в монографии [1] и четырех работах [2-5].

### Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, описки использованных источников и содержит 154 страниц машинописного текста, 33 рисунков и 5 таблиц.

Первая глава. "Класс систем кондиционирования воздуха и задачи их моделирования".

Описан класс теплоэнергетических систем — СКВ, где преобладают воздушные системы охлаждения открытого цикла, которые представляют собой совокупность теплообменных аппаратов (ТА), турбокомпрессорных агрегатов (ТКА), фильтров, ограничителей и регуляторов, смесителей, трубопроводов и других элементов, которые взаимодействуют между собой и окружающей средой путем обмена потоками рабочих тел, тепла и механической энергии в широком диапазоне граничных условий и режимов работы от "нулевых" до критических.

При критическом режиме, возникающем в потоках сжимаемой жидкости, расход не зависит от давления подпора и определяется только значениями входного давления, имеет место скачок поля давления.

При выполнении настоящей работы, посвященной системным вопросам, автор учитывает особенности, разработанных с его участием, на основе СД-метода моделей элементов.

При моделировании ТА используется модифицированный метод эффективности. Модели свойств веществ выполняют определение осредненных по температуре параметров влажного воздуха на основе программного аналога диаграммы влажного воздуха, коэффициентов теплоотдачи  $\bar{\alpha}(Re)$  и трения  $f(Re)$ .

При моделировании используются универсальные приведенные характеристики ступеней ТКА (турбинных и(ли) компрессорных), которые связывают между собой комплексом: расход  $G(\pi, \bar{p})$ , к.п.д.  $\eta(\bar{p}, \pi)$ , и описывают поведение семейства подобных ступеней. Мощность ступени определяется по аналитической функции  $L(\pi, \eta)$ .

Проанализированы элементы и агрегаты СКВ, которые в силу своих функциональных и физических особенностей обладают декомпозиционными свойствами, существенными для построения модели системы.

Такими свойствами являются:

- тепловой поток  $Q$  ( $Q$ -связь) [мощность  $N$  ( $N$ -связь)] - параметр, по которому осуществляется тепловой [кинематический] баланс между поверхностями ТА [ступенями ТКА], входящими в различные части системы и объединенные отношениями принадлежности конкретному ТА [ТКА];

- критический режим - возникает в моделях ТА и труб. Регулятор расхода по своим декомпозиционным свойствам аналогичен критическому режиму.

Характеристики и расчетные соотношения моделей элементов СКВ - нелинейные и могут порождать множественные решения. Например, каждый компрессор может вызвать до трех равновесных состояний системы, в которую он включен.

Анализируются этапы формирования и реализации характеристик теплоэнергетических установок: проектирование внешних характеристик, функциональное проектирование, конструирование, функциональные испытания, поддержание и модификация функциональных качеств системы на стадии эксплуатации. Делается вывод, что отработка каждого этапа жизненного цикла может сопровождаться повторением, частично или всех, предыдущих этапов. Развитие технических систем - процесс итерационный, следовательно средства моделирования должны позволять легко адаптироваться к любым схемно-конструктивным решениям на всех этапах развития и применения.

На основании анализа свойств элементов объекта моделирования сформулированы требования к разрабатываемому комплексу программ моделирования СКВ:

а) адекватность результатов моделирования реальному поведению объекта анализа, что требует учета всех физических и технических деталей и обуславливает нелинейность описаний и неизбежную итерационность алгоритмов;

б) гарантируемость получения результатов расчета, в том числе и при появлении многочисленных критических режимов в системе, информации об отсутствии или наличии нескольких решений, то есть полного решения алгебраической задачи;

в) оперативность получения информации при условии, что объект анализа заранее неизвестен, а вся предметная область этих объектов очень обширна и не сводится к конечному числу СКВ (обуславливает универсальность и адаптируемость модели к конкретной СКВ, то есть модель должна быть обобщена на весь класс систем и обладать воз-

возможность смены или вариации модели объекта средствами входного языка без изменения программы);

г) обеспечения прямого доступа к модели проектировщиков СКВ без посредников-программистов (это возможно лишь при наличии простого, построенного в терминах создаваемых объектов, непроцедурного входного языка общения с моделью, а также развитой системы внутри-программного контроля и диагностики данных);

д) требование высокой точности моделирования и оперативности обуславливает тщательную отработку итерационных процессов в моделях и поиск целесообразных сочетаний точности вычисления и затрат машинного времени;

е) расширяемость универсальной модели, связанную с непрерывным развитием самой предметной области можно обеспечить на основе структуризации предметной области и соответствующей модульной организации модели.

*Вторая глава. "Методы моделирования теплоэнергетического оборудования".*

Выполнен анализ работ, посвященных моделированию теплоэнергетических систем, который характеризует в целом состояние достижений в этой области. Несмотря на актуальность проблем, в проектных организациях авиационной промышленности используются и разрабатываются расчетные методики, служащие цели механизации вычислительных операций, которые, по существу, копируют ручные методики (сильное упрощение процессов и схем, огрубление задачи, количественная и качественная ограниченность получаемой информации, высокая квалификация расчетчиков), строятся на интуитивной основе без анализа и попыток реализации возможностей, открывающихся с применением современных компьютерных технологий.

В известных методах моделирования гидравлических цепей, инженерных сетей, основу которых составляет метод Ньютона и градиентные методы, теплоэнергетических установок, химико-технологических установок (имеющие особенности не свойственные авиационным тепловым системам) не рассматривались вопросы моделирования систем с неединственным равновесным состоянием, критическими режимами, процессы обмена механической и тепловой энергией между ее частями.

В рассмотренных работах по моделированию, являющихся собирательными для соответствующих отраслей и научных направлений, каждая система анализируется и моделируется отдельно, не как представитель некоторого класса объектов. Этот аспект системного подхода,

важный для построения универсальных адаптивных моделирующих алгоритмов, в указанных работах упущен.

Значительные результаты при моделировании систем класса СКВ получены на основе структурно-декомпозиционного (СД) метода, основным принципом которого является структурно-функциональная и математическая декомпозиция общей задачи на минимально простые подзадачи, которые формируются непосредственно по расчетной схеме объекта, минуя этап представления задачи в виде единой системы уравнений.

Развитие деформационной версии (версии Д) СД-метода и развитие программного комплекса, основанного на этом методе, осуществляемого автором данной работы, привело к необходимости снять ограничение данной версии, обусловленное отсутствием топологической идентичности структурных композиций разных уровней, что создавало проблемы при развитии программного комплекса.

Следовательно актуальным является разработка специализированных на определенный класс систем программных комплексов, дающие возможность на основе ограниченного класса нелинейных элементов, присущих данному классу систем, получать все равновесные решения моделируемого, с развитой сетевой топологией, объекта при возможном возникновении многочисленных критических режимов на его элементах.

*Третья глава "Рекурсивный структурно-декомпозиционный метод и его универсальность на данном классе систем".*

Рассматривается Р-версия СД-метода. Модель автоматически формируется из нелинейных описаний простейших элементов и иерархической структуры их связей путем их постепенного объединения в описание все более сложных структур. Решение получается за счет специальной организации вычислительного процесса на основе систематического применения операций декомпозиции и эквивалентирования, выполняемых автоматически, исходя из структурно-функциональных свойств объекта и физических механизмов его работы. СД-метод - проблемно-ориентированный и излагается на неформальном уровне в терминах прикладной области.

В основе Р-версии СД-метода лежит многоуровневое иерархическое представление объекта, структуры каждого уровня которого являются топологически простыми композициями элементов ближайшего низшего уровня, связанных между собой и внешней средой потоками рабочих тел, тепла и механической энергии.

Структуризацию объекта можно выполнить таким образом, что для каждой структурной композиции из совокупности неизвестных можно выделить главную режимную переменную (ГРП), при фиксации которой и последовательном просчете элементов определяются остальные режимные переменные. Находя величины ГРП одномерными итерациями, можно определить все переменные структурной композиции. Таким образом, моделирование сложной схемы, описываемой существенно нелинейной системой уравнений большого (сотни и тысячи) порядка, сводится к решению малого числа взаимосвязанных однопараметрических итерационных подзадач.

Согласно Р-версии СД-метода моделирование древовидной структуры ("дерева") является одной из главных подзадач, на многократном во влсных итерационных циклах решении которой строится моделирование различных кольцевых систем, а также механических и тепловых связей в системе. От универсальности подмодель дерева во многом зависит универсальность модели в целом. Существенно нелинейный характер описания всех элементов (ветвей) сильно усложняет задачу моделирования произвольного дерева. Именно на развитие гибкости универсальной модели дерева ориентирована Р-версия СД-метода, исходным моментом которой является возможность конструирования дерева из унифицированных типовых структур (УТС) без ограничения глубины их вложенности.

УТС описывается одним обобщенным алгоритмическим (программным) модулем, который при моделировании структур последовательно настраивается на каждую из них. Моделирование вложенных структур требует вызова модуля модели ТС, настроенного на внутреннюю структуру, во время работы этого же модуля, настроенного на внешнюю структуру, то есть необходима рекурсивная организация работы модели УТС.

На примере простейшей древовидной гидравлической схемы - "гребенки" (рис.1), рассмотрим ее моделирование по Р-версии СД-метода.

Рассчитываются  $P_{i+1}^y$  и  $G_{i,i+1}$  непосредственно по схеме, "из физических соображений". Пусть базовый программно-алгоритмический модуль VET соответствует задаче расчета ветви и определяет давление  $P_i^y$  на ее конце при известном расходе  $G_{0,1}$  и давлении  $P_0^F$  в ее начале, то есть реализует базовую функцию модели  $P_i^y = P_i(G_{0,1}, P_0^F)$ .



Рис. 1

Для решения обратной задачи  $G_1 = G(P_1^Y, P_1^G)$  потребуется обращение базового модуля путем итерационного решения уравнения

$$G = \frac{P_1^G - P_1(G_1, P_1^Y)}{P_1^G} G_0 \cdot G_1 \quad (1)$$

где  $P_1^G$  - граничное давление на край ветви;  $G_0$  - некоторый постоянный расход;

Уравнение (1) получено простым преобразованием очевидного условия  $P_1(G_1, P_1^Y) = P_1^G$  к виду  $x = f(x)$ . Итерационное определение расхода  $G_1$  решает задачу обращения модуля  $VET(G_0, P_0^G, P_1^Y)$ . Назовем модуль обращения  $VETB(G_1, P_1^G, P_1^Y)$ . При использовании модулей  $VET$  и  $VETB$  построим алгоритм расчета гребенки:

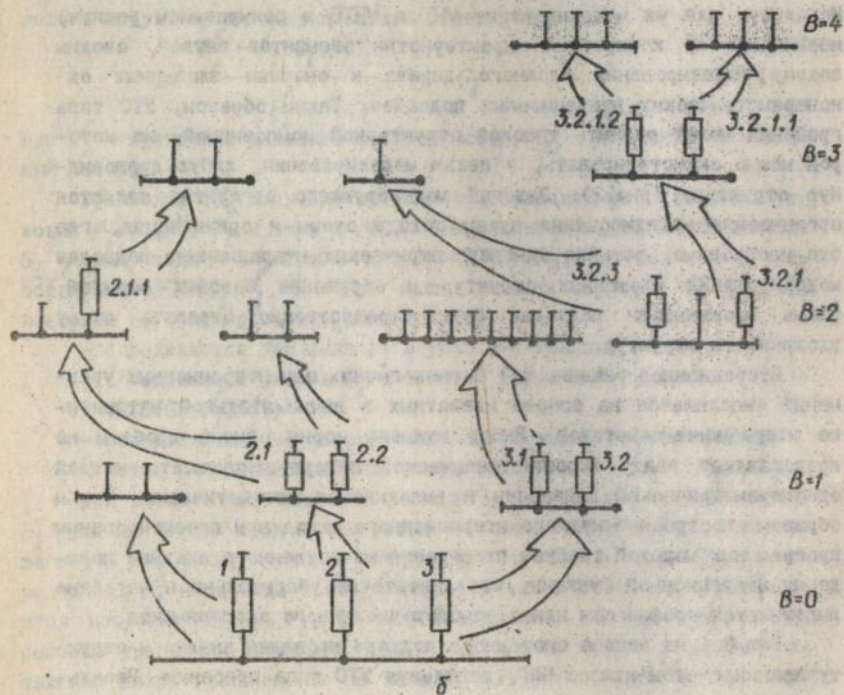
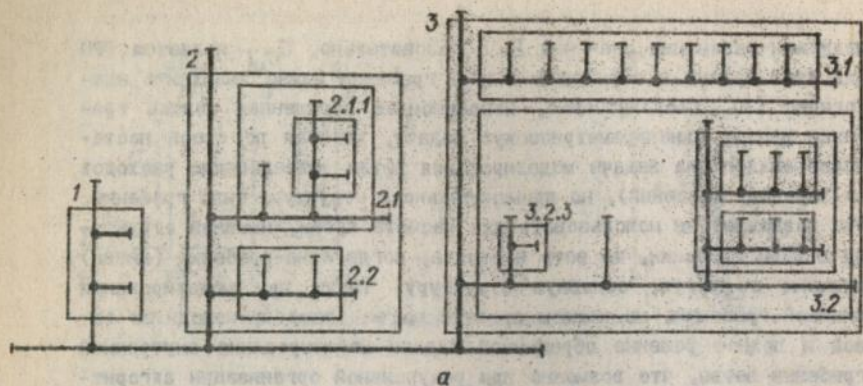
- определяется давление  $P_1^Y$  в узле  $i-1$  модулем  $VET(G_0, P_0, P_1^Y)$ ;
- определяется расход  $G_1$  в боковой ветви  $i-1$  модулем  $VETB(G_1, P_1^G, P_1^Y)$ ;
- определяется, из условия баланса расходов в узле, расход в ветви ОМП, расположенной между узлами 1 и 2,  $G_{1,2} = G_{0,1} + G_1$ .

Для ветви (1,2) известен расход  $G_{1,2}$  и давление в ее начале  $P_1^Y$ . Расчет можно продолжить далее по схеме аналогично, повторяя шаги 1-3 для каждого узла с прилегающими к нему ветвями. После определения  $P_i^Y$  и расхода в ветви  $IA$ , давление в точке  $A$  рассчитывается модулем  $VET(G_{IA}, P_1^Y, P_A)$ . Таким образом, не записывая общей системы уравнений, опираясь только на модели ветвей и последовательный обход гребенки от ее начала, алгоритмическим путем получаем значения  $P_A(G_0, P_0)$  и  $G_A(G_0, P_0)$ . Меняя значения расхода  $G_{0,1}$ .

получаем различные значения  $P_A$ . Следовательно,  $G_{0,1}$  является ГРП для этой задачи и обращение модели гребенки можно выполнить аналогично (1). Следовательно, итерационная обращенная модель гребенки решает однопараметрическую задачу, которая по своей постановке аналогична задаче моделирования ветви (определение расходов по перепаду давлений), но применительно к структуре типа гребенки. Это позволяет ее использовать для расчета ветви, имеющей структуру в виде гребенки, то есть в случае, когда одна гребенка (ветвь) вложена в другую, основную структуру. Тогда при моделировании внешней гребенки, на каждом проходе по ее схеме производится вызов и полное решение обращенной задачи моделирования внутренней гребенки ветви, что возможно при рекурсивной организации алгоритма модели. Очевидно, что ветвь-гребенка может сама содержать ветви-гребенки, которые образуют следующие уровни вложенности и т.д. Используя для их моделирования VET и VETB в рекурсивном режиме, независимо от конкретных характеристик элементов ветвей, сводим задачу моделирования сложного дерева к системе вложенных однопараметрических итерационных подзадач. Таким образом, УТС типа гребенки может служить типовой структурной композицией, из которой можно сконструировать, с целью моделирования, любую древовидную структуру (рис. 2). Задачей моделирующего алгоритма являются организация моделирования путем обхода схемы и организация, где это необходимо, решения однопараметрических итерационных подзадач моделирования вложенных структур и обращение базовых модулей. Схема вложенности подзадач будет тождественно отражать схему вложенности структур.

Итерационное решение (1) и аналогичных ему итерационных уравнений выполняется на основе известных в вычислительной математике итерационных методов. Выбор нужного корня обычно проблем не представляет ввиду хорошей физической интерпретируемости каждой однопараметрической подзадачи и выполняется автоматически. Таким образом, построение каждого итерационного цикла при проектировании программных моделей требует проведения качественного анализа поведения итерационной функции, что достаточно убедительно и наглядно выполняется графически или с помощью численного эксперимента.

В п. 3.1 на основе системного подхода проведен анализ и структуризация систем класса СКВ, используя УТС типа гребенки. Результаты этого анализа представлены структурно-классификационной схемой (СКС) - графом, вершины которого, согласно иерархии, указывают



"борка" схемы из совокупности УТС - "гребенок".

элементы и связи, а дуги направление их подчиненности. Иерархические отношения, зафиксированные СКС, составляют обобщенную структурную модель предметной области.

Структуризация систем класса СКВ и организация ее моделирования основывается на методологии системного подхода, используя УТС, декомпозиционные функциональные ( $Q, N$ ) и физические (регулятор расхода, критический режим) свойства элементов, и базируется на ряде принципов, основные из которых следующие:

1. Выделяется линия основных массовых потоков (ОМП) - координатная (основная) линия, путь которой на графе системы не проходит дважды по одним и тем же дугам.

2. Условно разрываются кольцевые гидравлические структуры, разделиваются теплообменные поверхности и валы турбомашин, образуя условно разомкнутые гидравлические ( $N$ ), тепловые ( $Q$ ) и механические связи. Полученный расчетный аналог системы имеет структуру типа дерево и может, по  $Q$  и  $N$  связям, распасться на гидравлически несвязанные подокемы. Такие  $Q$  и  $N$  связи назовем внешними, остальные внутренними.

3. Зональная организация моделирования связана с возможностью существования в тепловых системах зон с ограниченным влиянием, связанных с включением в схемы сверхкритических и регулирующих расход элементов.

Реализация метода выявила его чувствительность к собственной методической погрешности, что проявлялось через закливание задачи в области малых отклонений от предполагаемого решения. Численные эксперименты показали, что погрешность решения на выходе гребенки является "кумулятивной" погрешностей всех внутренних итерационных подзадач в боковых ветвях, которой можно управлять путем изменения значений погрешностей настроек итерационных алгоритмов.

В связи с этим поставлена задача, разработана методика и алгоритмы оценки погрешности Р-версии СД-метода. Формализованный вид этой методики представлен обобщенными зависимостями:

- баланса погрешностей расходов в узле

$$\delta G_{\text{ОМП}_{i+1}} = \delta G_{\text{ОМП}_i} - \delta G \delta_i$$
, где индекс  $\delta_i$  относится к боковым ветвям гребенки, индекс  $\text{ОМП}_i$  к входным (выходным) ветвям;

- определения погрешности по давлению на выходе ветви по известным значениям погрешностей по давлению и расходу на ее входе, выражение в скобках - производная выходного давления по расходу в

простой ветви гребенки

$$\delta_{\text{вых}}^i = \delta P_{\text{вх}}^i + \left[ \frac{dP_{\text{вых}}}{dG_{\text{вх}}} \right]_i \delta G_{\text{омт}}^i ;$$

- определения погрешности по расходу в боковой ветви. Первое слагаемое - погрешность по расходу обусловленная погрешностью по давлению на входе боковой ветви, второе - погрешность внутренних итерационных задач, если боковая ветвь сложная, третье - погрешность настройки итерационного цикла боковой ветви; выражения в скобках

$$\delta G_{\text{вх}}^i = \frac{\delta P_{\text{вх}}}{\left[ \frac{dP_y}{dG_2} \right]} \left[ \frac{\alpha_{G_1}^y}{dG_2} \right] + \frac{\delta P_{\text{вн}}}{\left[ \frac{dP_y}{dG_2} \right]} + \frac{\delta P_{\text{ум}}}{\left[ \frac{dP_y}{dG_2} \right]}$$

- производные, значения которых определяется зависимостью

$$\left[ \frac{dP_y}{dG_H} \right]^{s+1} = \left[ \frac{dP_y}{dG_H} \right]^s + \left[ \left[ \frac{\alpha_{G_1}^y}{dG_H} \right] - \frac{\left[ \frac{dP_y}{dG_H} \right]^s}{\left[ \frac{dP_y}{dG_2} \right]} \left[ \frac{\alpha_{G_3}^y}{dG_2} \right] \right]$$

и состоят из производных гребенок низших уровней - производных ветвей. Назовем такие производные структурными. Разработаны методика и алгоритм определения значений структурных производных.

На основе методики оценки погрешности разработана методика и алгоритмы оптимальной настройки итерационных алгоритмов, обеспечивающие сходимость данного метода. Получена зависимость, устанавливающая связь, причем линейную, через погрешности настроек итерационных циклов  $\delta P_{\text{ум}}^i$  гребенки с произвольным количеством боковых ветвей  $N$

$$\delta P_{\text{вых}}^i = N_1 + N_2 \delta P_{\text{ум}}^1 + N_3 \delta P_{\text{ум}}^2 + \dots + N_{N+1} \delta P_{\text{ум}}^N, \quad (2)$$

показывается, что

$$N_2 > N_3 > N_4 > \dots > N_{N+1}.$$

Выражение для  $N_i$  состоит из производных всех ветвей, составляющих часть схемы, начиная с  $i$ -той. Слагаемые  $N_i \delta P_{\text{ум}}^{i-1}$  представляют собой собственный вклад в суммарную погрешность по давлению

на выходе гребенки, обусловленную неточностью (конечностью) итерационного алгоритма определения расхода в  $l$ -той боковой ветви. Принимая  $\delta P_{\text{вых}} = R$ , где  $R$  - заданная величина настройки внешнего итерационного цикла, зависимость (2) можно рассматривать как ограничение

$$N_1 + N_2 \delta P_{\text{ум}1} + N_3 \delta P_{\text{ум}2} + \dots + N_{N+1} \delta P_{\text{ум}N} = R,$$

а оптимизационная задача должна состоять в минимизации квадратов отклонений составляющих ее слагаемых

$$\text{MIN} \left[ (N_2 \delta P_{\text{ум}1})^2 + (N_3 \delta P_{\text{ум}2})^2 + \dots + (N_{N+1} \delta P_{\text{ум}N})^2 \right]$$

Для определения оптимальных  $\delta P_{\text{ум}l}$  задача условной оптимизации приводилась к задаче безусловной оптимизации подстановкой ограничения в функцию цели. При этом количество неизвестных в целевой функции и количество уравнений в системе  $N \delta P = R$  уменьшалось на единицу, матрица Гессе функции - положительно определенная (имеет глобальный минимум). В такой постановке система уравнений  $N \delta P = ?$  допускает простое обобщенное аналитическое решение по определению настроек итерационных циклов для гребенок произвольной длины в виде:

$$\delta P_{\text{ум}l} = \frac{R - N_l}{N N_{l+1}}.$$

Нет необходимости решать на каждом шаге систему линейных алгебраических уравнений, что экономит память и время счета ЭВМ.

Четвертая глава "Алгоритмы и организация данных структурно-рекурсивных моделей теплоэнергетических систем".

Разработана система классификаторов (признаков), образующая семантическую модель предметной области, на ее основе сформулированы правила составления данных (язык) по описанию системы. Классификатор элементов состоит из следующих признаков: тип элемента, класс элемента, порядковый номер связи, номер гидравлической подсхемы. Тип элемента определяет конструктивное решение элемента из данного класса. При обработке признака класса (ТА, ТКА и т.д.) элемента задача вызывает программный модуль, соответствующий элементу данного класса. Третий и четвертый признаки служат информационной основой для автоматического управления вычислительным процессом. Отсутствие последнего признака означает, что элемент образует связь внутри текущей гидравлической подсхемы - внутреннюю связь, в противном случае - элемент связывает текущую гидравличес-

кую подохему с номером гидравлической подохемы, указанной в при-  
знаке "номер гидравлической подохемы". Класс элемента характеризует  
тип связи: *N*-связь, *Q*-связь, *H*-связь. На основе типа связи выбира-  
ется тип уравнения баланса схемы. При итерационном согласовании  
внутренних связей приоритет по типам и номерам не устанавливается  
и осуществляется по принципу: прошел все элементы связи - согласо-  
вывай ее. Разработан и приведен в диссертации алгоритм итерацион-  
ного согласования внешних связей. Условия их баланса аналогичны  
внутренним и осуществляется, когда закончен расчет гидравлических  
подохем. Отсутствие порядкового номера связи соответствует рекур-  
сивному определению структуры более высокого уровня вложенности.  
Такая рекурсивная структура данных адекватно отражает структуру  
схемы. Недостатком использования рекурсивных алгоритмов для обра-  
ботки рекурсивных структур данных при расчете схемы является не-  
экономное расходование памяти. В работе на основе предложенной  
структуры информационного массива создан специальный квазирекур-  
сивный алгоритм, позволяющий объединить достоинства рекурсивности  
и экономного расходования памяти.

В п. 4.4 описывается декомпозиционный алгоритм моделирования  
многочисленных критических режимов в проточной части СКВ, основу  
которого составляет имитация физических механизмов этого явления.  
Зона первого типа полностью определена значениями давления на вхо-  
де и критического расхода. Часть системы, расположенная ниже по  
потoku от критического элемента, рассматривается как зона с задан-  
ным расходом, приходящим из первой зоны и неопределенным давлением  
за критическим элементом (зона системы второго типа). Количество  
зон второго типа в системе может быть произвольным. Решена задача  
согласования произвольного количества зон при появлении критичес-  
кого режима в элементах СКВ.

СКВ может иметь не одно равновесное состояние. Примером может  
служить СКВ, имеющая в своем составе вентиляторы, каждый из кото-  
рых может порождать до трех устойчивых состояний системы. Отсюда,  
актуальным для метода является возможность получать полное решение  
(расходы и давления в ветвях) для каждого такого состояния систе-  
мы. Получение всех равновесных состояний системы структурно-рекур-  
сивными алгоритмами достигается установлением иерархии элементов,  
порождающих различные равновесные состояния (вентиляторов), когда  
для каждого решения на верхнем уровне может следовать три решения  
на нижнем (система с тремя вентиляторами может иметь до 27 реше-

ний). Получение всех решений при моделировании вентилятора адекватно выбору значений начальных приближений из любой точки в области "притяжения" каждого отделенного корня. Отделение корней осуществляется на предварительном этапе формирования модели нового элемента при включении его в состав обобщенной модели.

На примере конкретной схемы в работе дается математическая интерпретация метода. На точечной матрице ее нелинейной математической модели показывается последовательность процесса моделирования по СД-методу, которая строится автоматически по схеме объекта и отражает ее структурно-функциональную особенность. Число и вложенность итерационных задач, трудоемкость решения определяются топологией схемы, ее объективной сложностью, а не общим числом неизвестных.

#### Заключение

Разработан подход, механизм и логика декомпозиционного метода моделирования, основанного на структуризации схемы с помощью унифицированных структурных композиций - гребенок.

На основе структурной методологии разработана СКС систем класса СКВ.

Разработаны структура данных и эффективные рекурсивные алгоритмы Р-версии СД-метода моделирования СКВ.

Разработаны методология, алгоритмы оценки и оптимальной настройки точности рекурсивных алгоритмов, обеспечивающие их сходимость, определения структурных производных.

Разработаны алгоритмы моделирования СКВ с многочисленными критическими режимами на элементах системы.

Разработан и реализован алгоритм получения многозначной внешней выходной характеристики системы, при наличии в ней нелинейных элементов - вентиляторов, порождающих множество ее равновесных состояний.

Разработан алгоритм моделирования любого статически устойчивого состояния СКВ при наличии в ней нелинейных элементов вентиляторов.

Разработан специализированный комплекс программ по исследованию систем класса СКВ, граф которой может быть неплоским.

Разработанный рекурсивный СД-метод моделирования СКВ доведен до уровня инженерного применения.



Разработан на его основе проблемно-ориентированный программный комплекс для проектного исследования режимов функционирования альтернативных вариантов проекта СКВ, оперативного информационного обеспечения разработчиков данными о параметрах систем во всем спектре задач проектирования и разработки, на всех этапах их жизненного цикла.

Комплексы программ внедрены в следующих КБ авиационной промышленности АНТК им. Сухого, АНТК им. А. Н. Туполева, АНТК им. О. К. Антонова.

## ЛИТЕРАТУРА

1) В. Я. Кондращенко, С. Д. Винничук, М. Ю. Федоров. Моделирование газовых и жидкостных распределительных систем. Киев. "Наукова думка", 1990, 180 стр.

2) В. Я. Кондращенко, М. Ю. Федоров. Согласование режимов работы воздухозаборной, теплообменной и распределительной подсистемы автономной бестурбинной системы кондиционирования. В кн. "Системы обеспечения жизнедеятельности экипажей ПА" ВВИА им. Жуковского, г. Москва, 1988г., стр. 42-45.

3) М. Ю. Федоров. Рекурсивный метод моделирования трубопроводных систем энергетических установок. Моделирование режимов трубопроводных систем. Наукова думка, (в печати).

4) М. Ю. Федоров, О. Я. Стеценко. Автоматизация моделирования энергетического оборудования и человеко-машинных систем энергетики. Общество "Знание" Украинской ССР, Киев, 1989, 16 стр.

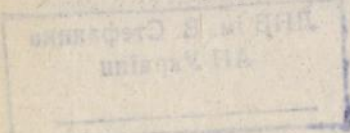
5) А. А. Каленик, М. Ю. Федоров. Экспериментальное исследование акустических характеристик систем кондиционирования воздуха в гермокабинах самолетов гражданской авиации. Сб. "Проблемы полета самолета гражданской авиации при заходе на посадку в сложных метеорологических", 1984, Киев, КИИГА, стр. 81-88.

---

Подписано в печать 08.04.94. Формат 60x84/16. Бумага типографская. Offsetная печать. Усл.кр.-отт.5. Усл.печ.л.0,93. Уч.-изд.л.1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 74-1. Цена . Изд. № 204/Ш.

Издательство КИИГА.

252058. Киев-58, проспект Космонавта Комарова, 1.





AB 29.575

**AB 29.575**