

УДК 004.928

В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, А.В. Шутенков

Построение компьютерных моделей многофракционных физико-химических систем газопромысловых объектов в формате метода компонентных цепей

Рассматривается методика представления многофракционных физико-химических систем, к классу которых относится промышленное оборудование газопромысловых месторождений (ГПМ), в формате метода компонентных цепей. Она открывает возможности реализации в среде моделирования MAPS вычислительных экспериментов над объектами данного класса. Отличительной особенностью таких систем является сложное взаимодействие между их компонентами, заключающееся в передаче по векторным связям нескольких видов энергии и информации.

Ключевые слова: сложные технические объекты, вычислительный эксперимент, компьютерная модель, метод компонентных цепей, универсальное вычислительное ядро, векторные потоки, векторные связи.

Современные средства автоматизации моделирования (MultiSim, Simulink, AutoCAD, SolidWork) ориентированы на определенный физический класс систем и не позволяют или позволяют, но лишь с применением системы аналогий формировать и анализировать компьютерные модели объектов другого физического класса, а также исследовать модели физически неоднородных объектов и систем. Их ограниченность во множестве исследуемых объектов и систем обусловлена лежащими в основе их реализации методами. В настоящее время большинство исследуемых в науке и изучаемых в учебном процессе технических систем являются неоднородными и включают в себя взаимосвязанные компоненты, между которыми производится обмен многофракционными смесями веществ, энергией различной физической природы и разнообразными информационными сообщениями. К таким объектам и системам относятся многофракционные физико-химические системы, представителями которых являются технологические объекты газопромысловых месторождений (ГПМ).

Для компьютерного моделирования таких систем, по связям между компонентами которых циркулируют неоднородные векторные вещественные и энергоинформационные потоки, может быть применен универсальный метод компонентных цепей (МКЦ) [1]. Он позволяет, представив исследуемый физически неоднородный объект в виде набора взаимосвязанных компонентов, произвести его моделирование в статическом и динамическом режимах (во временной или частотной областях). Являясь программно-алгоритмической реализацией МКЦ, среда моделирования MAPS [2] представляет собой совокупность программных интерфейсов и алгоритмических инструментов для организации полнофункционального вычислительного эксперимента, состоящего из предварительного расчета значений параметров всех компонентов исследуемого технического объекта, непосредственно его моделирования, обработки и визуализации результатов компьютерного эксперимента. Для его приближения к натурному в рамках СМ MAPS реализован редактор виртуальных инструментов и приборов [3], позволяющий формировать и использовать блоки обработки результатов моделирования и виртуальные измерительные приборы. Математико-алгоритмической основой СМ MAPS является универсальное вычислительное ядро [4], реализованное на основе технологий объектно-ориентированного программирования. В нем реализуются алгоритмы формирования, линеаризации и вычисления системы алгебро-дифференциальных уравнений, составленной для исследуемого объекта.

Основные понятия метода компонентных цепей. В настоящее время метод компонентных цепей (МКЦ) [1] является универсальным методом компьютерного моделирования простых технических объектов и систем со скалярными энергетическими и информационными потоками в связях. Согласно ему любой технический объект (ТО) можно представить в виде совокупности взаимосвязанных между собой компонентов, между которыми производится обмен энергией и информацией.

Множество компонентов K совместно с множеством связей компонентов B и образованных при их соединении узлов множества N представляют собой компьютерную модель исследуемого объекта в формате МКЦ, называемую компонентной цепью (КЦ):

$$C = (K, B, N). \quad (1)$$

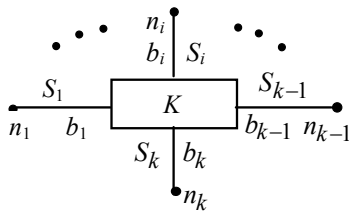


Рис. 1. Обобщенный вид компонента

Множество компонентов K включает в себя компоненты-источники, компоненты-преобразователи и компоненты-измерители вещественных потоков, энергии и сигналов.

Каждый компонент множества K (рис. 1) имеет множество связей S_j ($j = 1, \dots, k$). Для описания простых ТО введены два типа скалярных связей:

– *элементарный (энергетический) тип*, согласно которому каждой скалярной связи S_i ставится в соответствие пара топологических координат – узел n_i и ветвь b_i с переменными V_{n_i} и V_{b_i} , где V_{n_i} – потенциальная, а V_{b_i} – потоковая переменные, называемые переменными связей. Такую связь S_i будем называть элементарной

$$S_i = S_E. \quad (2)$$

– *информационный тип*, согласно которому каждой связи S_j ставится в соответствие пара топологических координат (n_j, b_j) с одной потенциальной переменной V_{n_j} . Такую связь будем называть информационной:

$$S_j = S_{Ij}. \quad (3)$$

– *однородный векторный тип связи*, согласно которому каждой связи ставится в соответствие пара топологических координат с вектором потенциальных переменных, например, координат точек кинематической системы. Связь данного типа называется однородной векторной связью:

$$S_j = S_{Vj}. \quad (4)$$

Формирование компьютерной модели компонента производится с учетом четырех основных аспектов: геометрического, топологического, физического и математического, каждый из которых характеризуется набором определенных предикатов.

Геометрический аспект предписывает каждому компоненту свое условное графическое и буквенное изображение в графическом редакторе компонентных цепей, а также правила визуализации протекающих в нем процессов.

Топологический аспект накладывает ограничения на типы всех связей компонента, каждой из которых ставит в соответствие определенное число переменных связей. Каждая переменная (потенциальная и потоковая) характеризуется определенным порядковым номером в локальном координатном базисе (ЛКБ) компонента. Для каждой элементарной связи S_i задается направление ее потока парой значений: от узла к компоненту $(-b_j, n_j)$ и (b_j, n_j) в обратном направлении.

Согласно топологическому аспекту соединение допустимо между связями компонентов, имеющими один тип примыкающих связей.

Физический аспект позволяет рассмотреть физические эффекты, протекающие в компоненте, с различной степенью их детализации. Он накладывает физический смысл на переменные топологических координат каждой связи в виде определенного субаспекта. Каждый энергетических субаспект F_E физического аспекта для каждой элементарной связи компонента представляется в виде множества свойств:

$$FE = \{N_A, Name_nVar, Symbol_nVar, Value_nVar, SI_nVar, Name_bVar, Symbol_bVar, Value_bVar, SI_bVar\}. \quad (5)$$

N_A – наименование физического субаспекта физического аспекта (например, *динамика*);

$Name_nVar$ – имя потенциальной переменной данного субаспекта (например, *скорость*);

$Symbol_nVar$ – символ, которым данная переменная выражается в уравнениях, определяющих математическую модель компонента;

$Value_nVar$ – значение потенциальной переменной, полученное при анализе модели на конкретном шаге моделирования;

SI_nVar – единица измерения потенциальной переменной (например м/с);

$Name_bVar$ – имя потоковой переменной данного субаспекта (например *сила*);

$Symbol_bVar$ – символ, которым данная переменная выражается в уравнениях, определяющих математическую модель компонента;

$Value_bVar$ – значение потенциальной переменной, полученное при анализе модели на конкретном шаге моделирования;

SI_bVar – единица измерения значения потоковой переменной (например, H).

Такой субаспект $F = F_E$ будем называть энергетическим субаспектом физического аспекта. Субаспектами физического аспекта являются механический, гидравлический, термодинамический, электрический, магнитный и другие, мощность которых равна произведению потенциальной и потоковой переменных.

Информационный субаспект F_I физического аспекта для каждой информационной связи компонента представляется в виде

$$F_I = \{N_A, Name_nVar, Symbol_nVar, Value_nVar, SI_nVar\}. \quad (6)$$

N_A – наименование физического субаспекта физического аспекта (например, *финансы*);

$Name_nVar$ – имя потенциальной переменной данного субаспекта (например, *цена*);

$Symbol_nVar$ – символ, которым данная переменная выражается в уравнениях, определяющих математическую модель компонента;

$Value_nVar$ – значение потенциальной переменной, полученное при анализе модели на конкретном шаге моделирования;

SI_nVar – единица измерения значения потенциальной переменной (например, *рубли*).

Такой субаспект $F = F_I$ будем называть информационным субаспектом физического аспекта. Субаспектами информационного аспекта являются математический, выражающий результат выполнения каждой операции в рассматриваемом сложном математическом выражении [5], фракционный, выражающий занимаемую веществом часть многофракционного вещественного потока [6], экономический, позволяющий рассматривать стоимостные характеристики энергетических и информационных потоков [7].

Согласно физическому аспекту соединение допустимо между связями компонентов, имеющих одинаковый субаспект F физического аспекта. Проверка их соответствия производится на этапе построения компьютерной модели исследуемого объекта.

Математический аспект представляет собой математическое описание протекающих в компоненте процессов в виде системы алгебро-дифференциальных уравнений, составленной относительно его переменных связей в физическом координатном базисе. Им допускаются следующие типы компонентных уравнений, составленные относительно переменных связей компонента: линейные, нелинейные алгебраические уравнения и обыкновенные дифференциальные уравнения с линейной и нелинейной правой частью. На ее основе формируется вычислительная модель компонента, представленная в формате метода компонентных цепей в локальном координатном базисе компонента (ЛКБ).

Формализованное представление физико-химических систем в формате метода компонентных цепей. Многофракционные физико-химические системы (ФХС) [6] газопромысловых месторождений, между компонентами которых циркулируют одно- и многофракционные вещественные потоки, относятся к классу объектов с неоднородными векторными связями. Для их моделирования в СМ МАРС они должны быть представлены компонентными цепями S (1) с неоднородными векторными связями.

Каждая *неоднородная векторная связь* S_V представляет собой совокупность энергетических и информационных связей, характеризующих распределенный по координатам или фазам энергетический или многофракционный вещественный поток. Формально неоднородную векторную связь S_V (рис. 2) можно представить в виде:

$$S_V = [S_{E_1}, S_{E_2}, \dots, S_{E_{C_e}}, S_{I_1}, S_{I_2}, \dots, S_{I_{C_i}}], \quad (7)$$

где $S_{E_1}, S_{E_2}, \dots, S_{E_{C_e}}$ – совокупность энергетических связей, каждая из которых принадлежит определенному энергетическому субаспекту физического аспекта F_E (5):

$$S_{E_i} \in F_E; \quad (8)$$

$S_{I_1}, S_{I_2}, \dots, S_{I_{C_i}}$ – совокупность информационных связей, каждая из которых принадлежит определенному информационному субаспекту физического аспекта F_I (6):

$$S_{I_i} \in F_I; \quad (9)$$

C_e – количество энергетических связей в составе векторной связи S_V ; C_i – количество информационных связей в составе векторной связи S_V .

S_V	
S_{E_1}	S_{I_1}
S_{E_2}	S_{I_2}
\dots	\dots
$S_{E_{C_e}}$	$S_{I_{C_i}}$

Рис. 2. Структура неоднородной векторной связи

Физико-химические системы (ФХС) представляют собой совокупность аппаратов химической промышленности, в которых производятся разнообразные физические и химические процессы, направленные на получение конкретной продукции с конкретными характеристиками. Циркулирующие между аппаратами вещественные потоки представляют собой многофракционные смеси веществ, обладающие различными видами энергии. Определенный вид энергии в каждой точке ФХС, образованной соединением двух и более компонентов (аппаратов), характеризуется парой дуальных переменных – потенциальной V_{ni} и потоковой V_{bi} , произведение текущих значений которых в любой момент времени определяет мгновенную мощность конкретной физической природы.

Вещественный поток может быть образован одним веществом или смесью веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях. Образованный одним веществом в жидком и газообразном состоянии поток будем называть *однофракционным*. При этом концентрацию вещества, образующего данный поток, примем равной 1, концентрация других веществ в данном потоке будет равна 0.

Когда вещественный поток образован несколькими веществами, он будет считаться *многофракционным* [5]. Конкретное вещество, находящееся в потоке, будет являться фракцией. Каждая фракция будет характеризоваться своей концентрацией, определяющей массовую или объемную долю вещества в многофракционном потоке.

Протекающие в аппаратах химической промышленности процессы, направленные на изменение физических характеристик циркулирующих потоков и на изменение их фракционных составов, зависят:

- 1) от фракционного состава многофракционных вещественных потоков и от запасенной в них энергии различной физической природы;
- 2) от физических и химических свойств веществ, составляющих многофракционный поток и определяющих его агрегатное состояние, называемое *фазой потока*;
- 3) от количества подводимой и отводимой энергии различной физической природы без изменения фракционного состава потока;
- 4) от геометрических форм, размеров и других параметров конкретного химического аппарата.

Основными уравнениями, которыми описываются процессы в компонентах ФХС, являются уравнения материального и теплового баланса протекающих процессов, а также уравнения тепло- и массообмена [8].

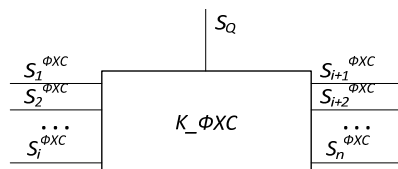


Рис. 3. Обобщенный компонент физико-химических систем

Для описания многофракционных ФХС в формате компонентных цепей вводится обобщенный компонент ФХС (рис. 3). Он включает в себя n физико-химических связей $S_1^{\text{ФХС}}$, $S_2^{\text{ФХС}}$, ..., $S_n^{\text{ФХС}}$, по которым осуществляется подача в компонент и вывод из него многофракционных смесей веществ, а также может присутствовать одна термодинамическая связь $S_Q \in F_T$ (где F_T – термодинамический субаспект физического аспекта). С ее помощью производится термодинамическое воздействие на смесь веществ в компоненте со стороны других аппаратов и окружающей среды.

Каждая физико-химическая связь $S_i^{\text{ФХС}}$ состоит из следующего набора связей элементарного и информационного типа:

$$S_i^{\text{ФХС}} = [S_i^G, S_i^Q, S_i^C], \quad (10)$$

где $S_i^G = (V_{ni}^G, V_{bi}^G)$ – элементарная связь, принадлежащая гидравлическому субаспекту физического аспекта, характеризуется переменными $V_{ni}^G = P_{ni}$ – давление, $V_{bi}^G = Q$ – объемный расход вещества; $S_i^T = (V_{ni}^T, V_{bi}^T)$ – элементарная связь, принадлежащая термодинамическому субаспекту физического аспекта, характеризуется переменными $V_{ni}^T = T_{ni}$ – температура, $V_{bi}^T = \Theta$ – поток теплоты.

$S_i^C = S_{iV}$ – однородная векторная связь, характеризующая фракционный состав смеси веществ в рассматриваемом узле. Размерность вектора связи соответствует количеству фракций веществ, циркулирующих во всех компонентах рассматриваемой системы или количеству рассматриваемых фракций.

Допускается два режима моделирования ФХС методом компонентных цепей:

- 1) режим с полным фракционным составом, когда рассматриваются все вещества, действующие в любом потоке рассматриваемой системы. В этом случае сумма концентраций всех веществ в каждом из узлов в любой момент времени должна равняться 1. Если вещество не попадает в данную связь, то его концентрация принимается равной 0.

2) режим с частным фракционным составом. В этом случае рассматриваются отдельные вещества, и в векторе концентраций находятся лишь абсолютные концентрации рассматриваемых веществ, имеющие единицы измерения гр/м³. Такой режим может быть применен для исследования биотехнологических и эколого-экономических систем, когда определенное количество вещества, введенное в ФХС, оказывает воздействие на ее параметры и характеристики (например, увеличивается пропускная способность сердечно-сосудистой системы человека за счет изменения вязкости циркулирующей жидкости, либо в случае эколого-экономических систем увеличивается число погибших определенных видов растительного и животного мира вследствие воздействия загрязняющего вещества).

В качестве примера ФХС рассмотрим модель абсорбера (рис. 4), которая является детерминированной моделью абсорбционного процесса осушки природного газа, являющегося одним из основных процессов в объектах добычи и подготовки газа транспорту. Данный процесс связан с переходом выбранных веществ из газовой фазы, образованной связями S_1 и S_3 , в жидкую, образованную связями S_2 – S_4 . Все связи S_i ($i = 1...4$) являются физико-химическими (10) и учитывают гидравлические и термодинамические характеристики входных и выходных потоков, а также вектор концентраций содержащихся в них веществ.

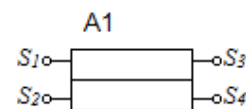


Рис. 4. Модель абсорбера

Математическая модель абсорбера в физическом координатном базисе имеет вид

$$\begin{aligned} Q_1 - Q_3 &= G \\ Q_4 - Q_2 &= G \\ P_1 + P_2 - P_3 - P_4 &= 0, \\ P_1 Q_1 + P_2 Q_2 - P_3 Q_3 - P_4 Q_4 &= 0, \\ G &= \sum G^{(i)}, \\ G_{\text{отд}}^{(i)} &= \beta_{\text{отд}} \cdot (C_1^{(i)} - C_1^\Gamma) \cdot S, \\ G_{\text{прим}}^{(i)} &= \beta_{\text{прим}} \cdot (C_2^{(i)} - C_2^\Gamma) \cdot S, \end{aligned}$$

где G – количество вещества, переходящего из газовой фазы в жидкую; S – площадь поверхности контакта фаз; $\beta_{\text{отд}}$, $\beta_{\text{прим}}$ – коэффициенты массопередачи в отдающей (газовой) и принимающей (жидкой) фазе соответственно; $C_1^{(i)}$ – концентрация рассматриваемого вещества (фракция i) во входном потоке отдающей фазы, образованном связью S_1 ; $C_2^{(i)}$ – концентрация рассматриваемого вещества (фракция i) во входном потоке фазы, образованном связью S_1 ; C_1^Γ , C_2^Γ – предельно-допустимые концентрации фракции i в отдающей и принимающей фазе соответственно.

Заключение. В настоящее время в промышленности стали широко использоваться сложные технические объекты с неоднородными векторными потоками в связях. К ним относятся многофракционные физико-химические системы промышленных объектов добычи и первичной подготовки нефти и газа. Рассмотрена методика формирования вычислительной модели таких объектов. Она включает в себя технологию формирования структуры неоднородной векторной связи, с помощью которой производится обмен векторными потоками энергии и многофракционных смесей веществ, правила образования узлов при соединении связей данного класса.

Реализованный на основе методики алгоритм построения компьютерной модели позволяет в рамках среды MAPS исследовать технически сложные объекты с неоднородными векторными потоками в связях, к классу которых относятся физико-химические системы добычи и первичной переработки нефти и газа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 11-07-00384.

Литература

1. Дмитриев В.М. Автоматизация моделирования промышленных роботов / В.М. Дмитриев, Л.А. Арайс, А.В. Шутенков. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
2. MAPS – среда моделирования технических устройств и систем // В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, Т.В. Ганджа. – Томск: В-Спектр, 2011. – 278 с.
3. Дмитриев В.М. Редактор виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, Т.Ю. Коротина // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика (Москва). – 2009. – № 6. – С. 19–24.
4. Дмитриев В.М. Универсальное вычислительное ядро для создания виртуальных лабораторий / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.В. Ганджа // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2004. – № 2. – С. 24–28.

5. Дмитриев В.М. Алгоритм формирования и вычисления математических выражений методом компонентных цепей / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа // Математические машины и системы. – 2010. – № 3. – С. 9–21.
6. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1979. – 394 с.
7. Цисарь И.Ф. Моделирование экономики в iThink_STELLA. – М.: Диалог-МИФИ, 2004. – 224 с.
8. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов: в 2 кн. – Кн. 2: Массообменные процессы и аппараты. – 2-е изд. – М.: Химия, 1995. – 368 с.

Дмитриев Вячеслав Михайлович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. моделирования и основ теории цепей (МОТЦ) ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-39-15

Эл. почта: dmitriewvm@gmail.com

Ганджа Тарас Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. системного анализа ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-39-15

Эл. почта: gandgatv@gmail.com

Шутенков Александр Васильевич

Канд. техн. наук, доцент каф. МОТЦ ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-39-15

Dmitriev V.M., Gandsha T.V., Shutenkov A.V.

Construction of computer models of industrial production facilities oil and gas

The methodic of representation multifractional physical-chemical system, which are a class of industrial equipment extraction and primary processing of oil and gas in the format method of components circuit are decided. It opens realization possibilities in the environment of modeling MARS of computing experiments with objects of this class. Distinctive feature of such systems is difficult interaction between their components, consisting in transfer on vector communications of several types of energy and information.

Keywords: complex technical objects, computational experiment, computer model, component circuit method, vector flux, vector coupling.