

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 629.78.086

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕАНСОВ СВЯЗИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

*Д.А. Калашиников¹, В.А. Соловьев¹, П.О. Скобелев^{3,5}, Е.В. Симонова²,
Д.И. Тихонов^{4,5}, В.Н. Ворожейкин⁵*

¹ ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»
Россия, 141070, Московская обл., Мытищинский р-н, г. Королёв, ул. Ленина, 4а

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

³ Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

⁴ Научно-производственная компания «Разумные решения»
Россия, 443013, г. Самара, Московское шоссе, 17 (ТОЦ «Вертикаль»), оф. 1201

⁵ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: esib@samgtu.ru

Рассматривается пример применения метода адаптивного планирования сеансов связи для выполнения коррекции орбиты международной космической станции (МКС). Предлагается описание сценария коррекции орбиты МКС и критериев его планирования. Строится концептуальная модель планирования полетных операций, описания критериев и ограничений выполнения задач в групповой полетной операции. Описываются входные и выходные данные. Моделируется сценарий коррекции орбиты МКС.

Дмитрий Алексеевич Калашиников, начальник отдела анализа работы и обеспечения эксплуатации бортовых радиотехнических систем и технических средств наземного комплекса управления космических аппаратов и средств выведения.

Владимир Алексеевич Соловьев (д.т.н., проф.), член-корр. РАН, первый заместитель генерального конструктора.

Петр Олегович Скобелев (д.т.н.), заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность» Самарского государственного технического университета, старший научный сотрудник Института управления сложными системами РАН.

Елена Витальевна Симонова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные системы и технологии».

Денис Игоревич Тихонов, аспирант.

Владимир Николаевич Ворожейкин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность».

Ключевые слова: космический аппарат (КА), отдельный командно-измерительный комплекс (ОКИК), оптимизация, надежность моделирования, экономичность, сеансы связи, группировка КА, ЦУП, МКС, мультиагентные технологии, онтология.

В настоящей статье рассматривается применение метода адаптивного планирования сеансов связи центра управления полетом (ЦУП) с космическим аппаратом (КА) [1], в постановке задачи, изложенной в работе [2], для выполнения модельного сценария коррекции орбиты международной космической станции (МКС).

Как отмечается в статьях [3-5], применение мультиагентного подхода позволяет строить оперативные расписания распределения задач и ресурсов, которые могут гибко в режиме реального времени перестраиваться при изменении критериев планирования или появлении непредвиденных событий. Под событиями в данном контексте понимается возникновение новой задачи, выход из строя ресурса, например отдельного командно-измерительного комплекса (ОКИК), сбой и невыполнение запланированного сеанса связи и т. п., т. е. такие события, которые приводят к изменению текущей ситуации, коррекции программ полета КА и необходимости перепланирования задействования технических средств ОКИК для построения расписаний сеансов связи и передачи данных при обеспечении контролируемой надежности и экономичности сеансов связи.

Под гибкостью и оперативностью реакции на событие понимается свойство мультиагентной системы, позволяющее на основе присущей ей самоорганизации инкрементально улучшать распределение задач по ресурсам, даже после таких разрушающих воздействий на построенное расписание, как выход из строя ресурса [6]. На рис. 1 приведен пример восстановления системы после выхода из строя ресурса.



Рис. 1. График состояний прототипа системы планирования при вводе события выхода из строя ресурса, участвующего в планировании (техническое средство ОКИК): 1 – ввод события о выходе из строя тех. средства; 2 – скачкообразное достижение локального минимума удовлетворенности агентов; 3 – восстановление расписания при новых условиях

Последнее свойство позволяет обоснованно применять мультиагентные самоорганизующиеся системы для решения задач, в которых требуется обеспечение заданного уровня надежности и экономичности при построении расписания сеансов связи.

Решение задачи планирования сеансов связи ЦУП с КА через наземные станции сети ОКИК относится к подобному классу задач. Далее рассмотрим

пример применения метода адаптивного планирования сеансов связи для выполнения коррекции орбиты международной космической станции (МКС) при выходе из строя технического средства ОКИК.

1. Сценарий коррекции орбиты МКС и критерии планирования

Поскольку выполнение маневра по коррекции орбиты МКС является сложной задачей, состоящей из нескольких последовательных полетных операций, существует разработанная практика, описывающая условия, критерии и ограничения по выполнению групповой полетной операции (ГПО) по коррекции орбиты МКС.

ГПО «Коррекция орбиты МКС» состоит из пяти последовательных основных полетных операций, каждая из которых выполняется по своему технологическому процессу и влияет на выполнение последующих полетных операций.

Важно отметить, что в любой ГПО существует определенная полетная операция, которая имеет первостепенную важность, от нее идет планирование; размещение остальных ПО начинается только после того, как наиболее важная операция заняла свое место в расписании. В сценарии коррекции орбиты МКС такой полетной операцией является «Импульс коррекции орбиты».

Первая полетная операция – «Уточнение параметров орбиты». Выполняется за 3 витка до импульса коррекции орбиты. Ограничение в 3 витка до импульса требуется по следующим причинам: для того чтобы узнать точные параметры орбиты МКС, необходимо получить шесть интервалов измерений радиоконтроля орбиты (РКО). Для этого применяются следующие два типовых варианта резервирования этих интервалов:

- 1) получение РКО с трех ОКИК в течение двух витков;
- 2) получение РКО с двух ОКИК в течение трех витков.

Вторая полетная операция – «Закладка командно-программной информации» (КПИ). Выполняется за 1 виток до импульса коррекции орбиты. Ограничение в 1 виток до импульса служит для создания возможности реализации резервирования по ОКИК и повышения надежности закладки КПИ на борт МКС.

За 1 виток до импульса коррекции орбиты возможны следующие варианты закладки КПИ на борт МКС (каждый последующий вариант резервирует предыдущий, при его невыполнении каждый вариант обеспечивает резервирование при выполнении операции закладки КПИ):

- 1) дублирование закладки КПИ на одном ОКИК в одном сеансе связи двумя последовательными одинаковыми массивами цифровой информации;
- 2) дублирование закладки КПИ на двух ОКИК на одном витке;
- 3) дублирование закладки КПИ на одном ОКИК в течение двух витков.

Третья полетная операция – «Выполнение импульса коррекции орбиты». Выдача импульса коррекции орбиты (включение двигателей) происходит в автоматическом режиме по полученной программе КПИ. Требования к данной полетной операции следующие:

- 1) выполнение на витке с максимальной зоной радиовидимости над территорией России;
- 2) выполнение в области витка, где выполнение импульса потребует наименьших затрат топлива (в данном примере в процессе моделирования не учитывается).

Четвертая полетная операция – «Получение телеметрии (ТМИ) о ходе

выполнения импульса» или о результатах выполнения, если импульс проходил вне зоны радиовидимости.

Получение ТМИ с результатами выполнения импульса должно происходить как можно раньше после выполнения импульса коррекции орбиты, как только МКС попадает в зону радиовидимости ближайшего ОКИК.

Пятая полетная операция – «Измерение параметров орбиты после импульса». Проводится начиная с первого витка, следующего за импульсом. Применяются следующие два типовых варианта получения этих интервалов:

- 1) получение РКО с трех ОКИК в течение двух витков;
- 2) получение РКО с двух ОКИК в течение трех витков.

Особенностью технологического процесса выполнения ГПО является тот факт, что различные полетные операции не только предъявляют различные требования по резервированию (надежности выполнения) по числу ОКИК, но и обладают своим собственным технологическим процессом выполнения, отличающимся для каждой из полетных операций. Хорошим примером служит сравнение полетных операций получения ТМИ и закладки КПИ, когда первая полетная операция может быть выполнена вообще без резервирования, а вторая требует применения различных алгоритмов резервирования при выполнении. Данные характеристики полетных операций также задают дополнительные критерии, влияющие на планирование и перепланирование при построении расписания.

Планирование описанных полетных операций по коррекции орбиты МКС происходит следующим образом:

1) планируется время выполнения полетной операции импульса коррекции орбиты МКС (рассчитывается время начала работы двигателей и необходимое приращение скорости движения МКС для получения расчетной орбиты, а также длительность работы двигателей, учитывающая их тягу и массу МКС);

2) планируется первая полетная операция РКО по уточнению параметров орбиты за три витка до импульса коррекции. В зависимости от условий видимости применяется один из двух типовых вариантов выполнения;

3) планируется полетная операция закладки КПИ на борт МКС за один виток до импульса коррекции. При выполнении данной полетной операции существуют особые требования по резервированию ОКИК, передающих информацию, а также определенные временные критерии, влияющие на возможность резервирования ОКИК, о которых будет сказано далее;

4) планируется полетная операция получения ТМИ как можно раньше после импульса коррекции орбиты в зоне радиовидимости ближайшего ОКИК;

5) планируется полетная операция по измерению параметров орбиты после импульса. В зависимости от условий видимости применяется один из двух типовых вариантов резервирования.

2. Концептуальная модель планирования полетных операций

Для проведения моделирования была разработана концептуальная модель планирования полетных операций, описания различных критериев и ограничений, присущих техническому процессу выполнения различных ГПО, на основе онтологического подхода, изложенного в работах [7, 8].

Декомпозиция на части примера по коррекции орбиты МКС позволила сделать следующие важные выводы, выражающие общие концепции по описанию таких процессов с точки зрения надежности:

– для надежного выполнения одной полетной операции требуется выполнить

некоторое число операций резервирования ресурсов;

- резервирование ресурсов выполняется различными методами, варьирующимися в зависимости от конкретной полетной операции;
- для надежного выполнения ГПО существуют свои алгоритмы размещения отдельных полетных операций во времени;
- зависимости и ограничения размещения полетной операции во времени задаются для каждой полетной операции индивидуально;
- ограничения по времени начала и окончания полетной операции могут задаваться конкретным временным интервалом или не задаваться вообще.

3. Формальное описание модели

В общем случае модель задачи по выполнению некоторой групповой полетной операции представлена орграфом G с некоторым числом вершин N и ребер E , их соединяющих (рис. 2).

Каждая из вершин N орграфа G представляет собой определенную сущность в сцене мультиагентного мира, для которой описаны требования, критерии и ограничения, влияющие на ее расположение в конечном расписании планировщика, а также зависимости от других сущностей, выраженные набором ребер $E(N)$.

Каждое из ребер E орграфа G представляет собой определенный тип зависимости между двумя вершинами $N1$ и $N2$, которые оно соединяет.

Данная модель может быть расширена для описания ГПО любой длительности с учетом требований по резервированию и соблюдения зависимости между полетными операциями.

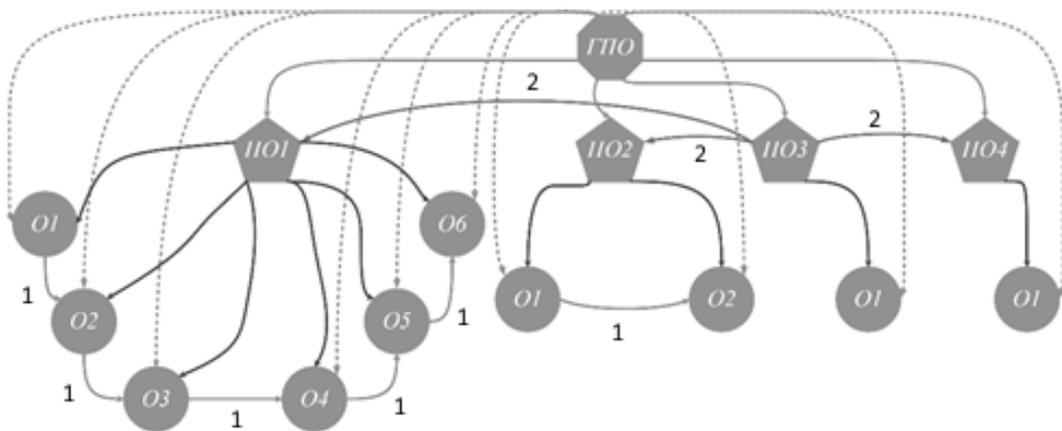


Рис. 2. Граф, отображающий основные связи между ГПО, полетными операциями и резервирующими операциями для примера «Коррекция орбиты МКС»

Рассмотрим математическое описание модели примера. В процессе моделирования примем, что мы имеем одну групповую полетную операцию P , которая представляется некоторым множеством полетных операций $\{J_i\}$:

$$P \mapsto \{J_i\}, i = 1, \dots, n; n \in N,$$

для каждой из которых существует два связанных с ней атрибута:

r_i – минимальное время начала полетной операции;

d_i – максимальное время окончания полетной операции.

Кроме этого, каждая полетная операция J_i представляется некоторым множе-

ством элементарных операций $\{o_{ij}\}$:

$$J_i \mapsto \{o_{ij}\}, j = 1, \dots, x; x \in N,$$

каждая из которых также обладает двумя атрибутами:

s_{ij} – фактическое время начала операции;

e_{ij} – фактическое время окончания операции.

Отметим, что с модельной точки зрения одной из наших задач является обеспечение достаточной гибкости расписания и восстановление его после сбоя ресурсов системы с сохранением заданных свойств технического процесса выполнения ГПО.

В данном контексте примем, что технологический процесс выполнения ГПО в ЦУП является эталонным для нашей модели.

С учетом этого мы можем выделить три критерия, с помощью которых в дальнейшем может быть получена оценка ключевого показателя эффективности (КРІ) системы:

- максимизация числа резервируемых операций в ПО;
- максимизация удовлетворенности взаимозависимостью операций в ПО;
- максимизация суммы расстояний всех ПО от центральной ПО.

Поясним прикладное назначение введенных выше критериев.

Максимизация числа резервируемых операций в ПО означает стремление агентов ПО максимально соответствовать требованиям технического процесса по резервированию ОКИК для выполнения ПО.

Компонент целевой функции агентов в этом случае будет линейно-возрастающим.

Такой компонент целевой функции будет мотивировать агентов в первую очередь восстанавливать число зарезервированных операций при возможных сбоях на ресурсах.

Математически это можно выразить как

$$U_1 = \frac{J_n}{N_i},$$

где J_n – число фактически запланированных операций в J_i ПО;

N_i – общее число операций в J_i ПО.

Общий вклад в КРІ системы от данного компонента описывается весовым коэффициентом α_1 .

Поскольку одной из важных задач является создание структуры расписания, которая способна гибко реагировать на изменения в окружающей среде, но при этом сохранять свои качественные свойства, – следующие два критерия позволяют сконструировать подобное поведение агентов с учетом требований технологического процесса.

Так как временные характеристики связей между операциями в ПО (показаны стрелочками с подписью «1» на рис. 2) могут быть продиктованы требованиями по гибкости конкретного технологического процесса выполнения ГПО и не могут быть жестко заданы, было принято решение описывать эти временные характеристики в виде временных интервалов, в рамках которых агенты могли бы получить некоторую «степень свободы» и принимать решения по оптимизации и перестройке расписания.

Поскольку данный компонент ЦФ отвечает за возможность растяжения или сокращения соответствующих временных связей между операциями, плоская область на графике означает временной интервал, в рамках которого агенты мо-

гут свободно изменять временные связи, не влияя на качество технологического процесса, а наклонные области означают интервалы времени, в рамках которых качество технологического процесса по сравнению с эталонным будет снижаться.

Такая форма графика позволяет обеспечить требуемую подвижность агентов операций в рамках определенной полетной операции. Под максимизацией в данном случае понимается увеличение суммарного показателя удовлетворенности агентов всех операций в ПО, что практически означало бы выполнение требований ПО и оптимальное расположение агентов операций в текущих условиях.

Данный критерий можно выразить математически следующим образом:

$$U_2 = \sum_{o_{ij}}^x (s_j - e_{j-1}).$$

Вклад в общий КРІ от этого компонента входит с весом α_2 .

Еще одним важным критерием планирования является наличие в каждой ГПО такой полетной операции, которая должна планироваться в первую очередь. Все остальные полетные операции планируются с учетом выполнения временных ограничений относительно нее (показано стрелочками с подписью «2» на рис. 2). В ГПО «Коррекция орбиты» такой операцией является выдача импульса коррекции.

Для описания данного критерия также выбраны временные интервалы, которые агенты ПО должны будут стремиться соблюдать во время планирования.

Однако, в отличие от критерия взаимозависимости операций в ПО, сами ПО зависят по времени как друг от друга (поскольку следующий технологический шаг не может начаться раньше предшествующего), так и от центральной ПО. Поэтому было принято решение сконструировать такое поведение агентов, при котором они бы стремились выполнять указанные требования по соблюдению временных ограничений относительно центральной ПО.

Такая форма графика ЦФ агента в данном случае означает, что есть некоторый временной отрезок, который агент может изменять (увеличивать или уменьшать), но лучше всего – когда требования выполняются точно в срок. Чрезмерное увеличение (т. е. отставание от центральной ПО) будет постепенно снижать качество получаемого результата (тем не менее создавая пространство для некоторой гибкости). Отметим, что существует некоторый ненулевой отрезок времени, когда качество планирования резко уменьшится до нуля из-за нарушения правил выполнения технологического процесса, заданного описанием ГПО (т. е. когда заданная ПО окажется к центральной *ближе*, чем это описано в технологическом процессе).

Под максимизацией в данном контексте понимается такое расположение агентов ПО, при котором сумма всех отрезков времени от каждой из ПО до центральной ПО стремится к наибольшему значению в текущих условиях (т. е. агенты стараются приблизиться к пику ЦФ), что соответствует наиболее точным выполнениям требований технологического процесса всеми агентами в ГПО.

Математически такая формулировка выражается следующим образом:

$$U_3 = \sum_{J_i} (r_i^* - d_i),$$

где r_i^* – временное ограничение по расстоянию J_i ПО от центральной ПО.

Вклад данного компонента определяется весом α_3 .

Общий КРІ системы по заданным выше критериям будет

$$KPI = \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \alpha_3 U_3;$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1.$$

Для моделирования выбраны следующие веса: $\alpha_1 = 0,5$; $\alpha_2 = 0,25$; $\alpha_3 = 0,25$.

4. Моделирование сценария коррекции орбиты МКС.

Входные и выходные данные

В качестве входных данных для работы системы используются:

- онтология ресурсов технических средств ОКИК, принимающих участие в моделировании;
- циклограмма зон радиовидимости МКС станциями ОКИК в течение 9 витков с зонами радиовидимости ОКИК длительностью 10–20 минут и периодом повторения 1,5 часа;
- онтология полетных операций, которая описывает ГПО «Коррекция орбиты» согласно разработанной нами модели.

Результатом работы системы является план полетных операций с зарезервированными техническими средствами ОКИК, удовлетворяющий имеющимся ограничениям и критериям и по качественным характеристикам сравнимый с результатом, получаемым специалистами-экспертами.

Шаг 1. Система считывает из онтологии полетных операций процесс выполнения задачи «Коррекция орбиты» и создает в сцене мира агентов полетных операций, которые стараются занять наиболее выгодное место в расписании согласно своим критериям и ограничениям по выполнению.

Для упрощения предположим, что агенты полетных операций уже нашли оптимальное размещение согласно условиям видимости и требованиям по выполнению технологического процесса. Их расположение на момент начала моделирования показано на рис. 3.

Шаг 2. В момент времени t_1 в систему вводится событие выхода из строя технического средства на 33-м ОКИК (рис. 4). Агент полетной операции «Передача КПИ» получает извещение об этом, и значение его функции удовлетворенности становится ниже в новых условиях, которые уже не удовлетворяют его требованиям выполнения технологического процесса по резервированию для обеспечения необходимой надежности.

Стараясь повысить свою функцию удовлетворенности, агент начнет проактивно рассматривать новые возможности размещения своих полетных операций на свободных ресурсах, удовлетворяющих заданным ограничениям и критериям.

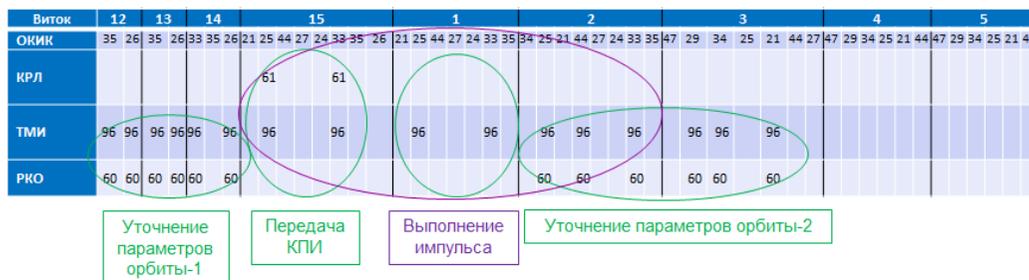


Рис. 3. Начальное размещение агентов полетных операций согласно установленным ограничениям. Ограничение по выполнению импульса коррекции в период с 15 по 2 виток показано большим горизонтальным эллипсом.

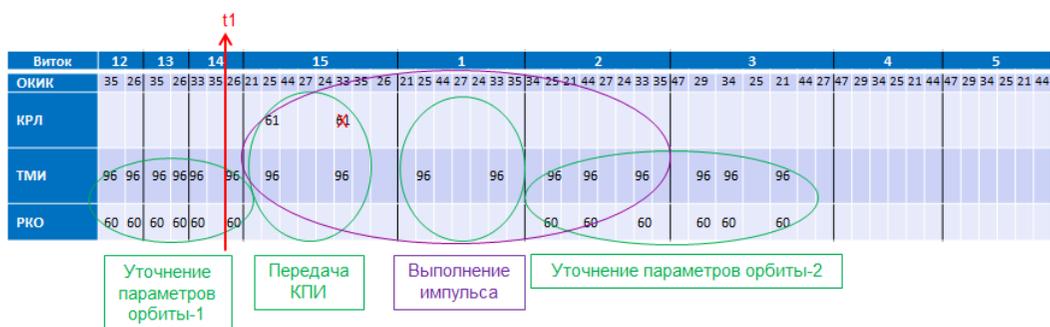


Рис. 4. Ввод в момент времени t_1 события о выходе из строя технического средства на 33-м ОКИК

Шаг 3. Агент полетной операции «Передача КПИ» сначала попытает зарезервировать ресурс 25 ОКИК на первом витке, но поскольку на первом витке уже размещен агент полетной операции «Выполнение импульса», он обратится к последнему с просьбой сдвинуться на более позднее время, на второй виток.

Шаг 4. Агент полетной операции «Выполнение импульса» проанализирует возможность сдвинуться на более позднее время по критериям видимости и ограничениям выполнения импульса. Найдя условия на следующем витке не менее благоприятными для себя, он запросит у соответствующих агентов ресурсов на втором витке время на размещение.

Однако обнаружив, что на втором витке уже располагается агент полетной операции «Проверка параметров орбиты», агент полетной операции «Выполнение импульса» также обратится к нему с запросом сдвинуться на более позднее время, чтобы освободить второй виток.

Шаг 5. Агент полетной операции «Проверка параметров орбиты» проверит возможность передвинуться на более поздние витки и проанализирует видимость соответствующих ресурсов на них для соответствия критериям выполнения технологического процесса.

Найдя условия на более поздних витках благоприятными, он запросит у агентов соответствующих ресурсов временные интервалы для размещения своих полетных операций.

Шаг 6. Получив утвердительные ответы от ресурсов, агент полетной операции «Проверка параметров орбиты» ответит положительно агенту полетной операции «Выполнение импульса» и перейдет на новую позицию.

Шаг 7. Получив положительный ответ, агент полетной операции «Выполнение импульса» также ответит положительно агенту полетной операции «Передача КПИ» и агентам ресурсов, у которых он запрашивал размещение, а затем перейдет на новую позицию в расписании.

Шаг 8. Получив положительный ответ, агент полетной операции «Передача КПИ» запросит разрешение у ресурсов для размещения своих полетных операций и, получив утвердительный ответ от агентов ресурсов, перейдет на новую позицию в расписании.

Расписание, перестроенное после нештатной ситуации и сбоя ресурса, показано на рис. 5.

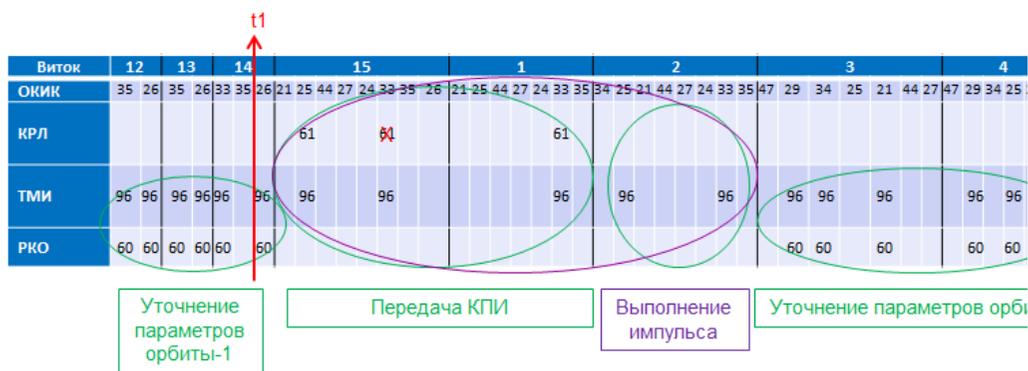


Рис. 5. Новый вариант расписания, полученный после ввода в систему события о выходе из строя ресурса на 33-м ОКИК. Агенты готовы сотрудничать для улучшения состояния системы только в случае нарушения своих собственных критериев и ограничений

Заключение

Изложенный в работе процесс моделирования сценария коррекции орбиты МКС, при выполнении которого в систему вводится событие о выходе из строя ресурса, отражает основную концепцию применения мультиагентных самоорганизующихся систем для обеспечения заданной надежности выходного расписания.

Под заданным уровнем надежности понимается формализованный и описанный в терминах критериев и ограничений агентов технологический процесс выполнения некоторой групповой полетной операции.

Агенты сотрудничают друг с другом в том случае, когда это необходимо для разрешения возникающих конфликтов. В то же время каждый из агентов старается удовлетворить своим критериям в рамках имеющихся ограничений. Постановка агентов в такие условия помогает решать проблему устойчивости определенной структуры во времени и восстановления ее после возникающих в системе «катастроф».

Важно отметить, что при этом заданная структура (в нашем случае – групповая полетная операция) не является жесткой и монолитной, а обладает свойствами «тягучести» и самоорганизации с сохранением своих качественных свойств.

Этот интересный аспект и является главным обоснованием применения свойств самоорганизации агентных систем для решения задач обеспечения надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашиников Д.А., Соловьев В.А., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Майоров И.В., Ляхин О.И., Тихонов Д.И., Ворожейкин В.Н. Метод адаптивного планирования сеансов связи ЦУП с группировкой КА по критериям надежности и экономичности связи // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1(45). – С. 58–70.
2. Калашиников Д.А., Соловьев В.А., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Майоров И.В., Грачев С.П., Тихонов Д.И., Ворожейкин В.Н. Особенности постановки задачи оптимизации показателей надежности и экономичности сеансов для передачи разнородных данных группировки КА и ЦУП через сеть наземных станций // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 4 (44). – С. 52–61.
3. Скобелев П.О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. – 2002. – № 6. – С. 45–61.

4. Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 12. – С. 33–46.
5. Скобелев П.О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. – № 1. – С. 1–32.
6. Матюшин М.М., Потоцкий С.И., Скобелев П.О., Потапов В.И., Лахин О.И. Автоматизированная система поддержки принятия решений в аварийных ситуациях // Программные продукты и системы. – 2013. – № 3. – С. 62–69.
7. Матюшин М.М., Вакурина Т.Г., Котеля В.В., Скобелев П.О., Лахин О.И., Кожевников С.С., Симонова Е.В., Носкова А.И. Методы и средства построения онтологий для визуализации связанных информационных объектов произвольной природы в сложных информационно-аналитических системах // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 2(69). – С. 9–17.
8. Коршиков Д.Н., Лахин О.И., Носкова А.И., Юрыгина Ю.С. Методы представления знаний для решения задач моделирования // Мат-лы V Междунар. науч.-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» – Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2015), 19–21 февраля 2015 г. – Минск: БГУИР, 2015. – С. 425–428.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2015 г.

METHOD OF ADAPTIVE PLANNING OF COMMUNICATION SESSIONS FOR THE ISS ORBIT CORRECTION

***D. A. Kalashnikov¹, V.A. Solovyov¹, P.O. Skobelev^{3,5}, E.V. Simonova²,
D.I. Tikhonov^{4,5}, V.N. Vorozheikin⁵***

¹ OJSC “Rocket and Space Corporation “Energia”
4a Lenina St., Korolev, 141070, Moscow region, Russia

² Samara State Aerospace University
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

³ Institute for the Control of Complex Systems of the Russian Academy of Sciences
61 Sadovaya, Samara, 443020, Russia

⁴ Software Engineering Company “Smart Solutions”
17 Moskovskoe shosse, office 1201 (Business Center “Vertical”), Samara, 443013, Russia

⁵ Samara State Technical University
244 Molodogvardeiskaya St., Samara, 443100, Russia

The paper presents a detailed example of adaptive planning of communication sessions for the International Space Station (ISS) orbit correction. The description of both the ISS orbit correction scenario and the criteria of its planning are provided. A conceptual model of flight operations planning is designed, as well as the description of the criteria and constraints of task execution in a group flight operation. The input and output data are described. The ISS orbit correction scenario is modelled.

Keywords: *spacecraft, Independent Command and Measurement Complex, optimization, modelling reliability, feasibility, communication sessions, spacecraft group, Mission Control Centre, the ISS, multi-agent technology, ontology.*

*Dmitry A. Kalashnikov, Head of Department.
Vladimir A. Solovyov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, First Deputy General Designer.
Petr O. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Elena V. Simonova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Denis I. Tikhonov, Postgraduate Student.
Vladimir N. Vorozheikin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 681.3

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА В ЗАДАЧАХ АСУ ТП: ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

А.А. Китов¹, В.К. Тянь²

¹ АО «Транснефть – Прикамье»
420061, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Н. Ершова, 26а

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: V_K_Tyan@mail.ru.

Приводится методика практического применения теории графов при структурном математическом моделировании сложных технологических объектов магистрального трубопроводного транспорта. Необходимость применения теории графов обусловлена большим количеством возможных подключений трубопроводов между его субъектами (заводы, насосные агрегаты, резервуары), что усложняет оперативное решение актуальной задачи определения угрозы перекрытия потоков. Применение математических моделей позволит реализовывать алгоритмическую обработку информационных потоков и управление технологическими процессами.

Ключевые слова: теория графов, автоматические системы, автоматизированные системы, базы данных, дискретная математика, структурное математическое моделирование, технологические объекты трубопроводного транспорта.

Предупреждение аварийных ситуаций возможно при своевременном реагировании и принятии адекватных решений оперативным персоналом. Качество работы операторов НППС, операторов товарных, диспетчеров РДП во многом определяется оснащенностью рабочего места правильно подобранным комплексом программного обеспечения.

В соответствии с требованиями компании АК «Транснефть» [1] система автоматизации нефтеперекачивающей станции (НПС) должна контролировать наличие открытого пути для прокачки нефти/нефтепродукта на работающей НПС.

На данный момент существуют сложные технологии перекачки с возможностью многовариантных подключений входящих и выходящих магистральных трубопроводов между резервуарными парками, НПС, расположенных на одной технологической площадке. На таких объектах оперативно детерминировать все возможные подключения между источниками и приемниками потоков в зависимости от состояния запорной арматуры является сложной и актуальной задачей.

Ранее программное обеспечение разрабатывалось по принципу «код управляет данными». Со временем данные усложнялись все больше и больше, появились структуры данных, базы данных, базы знаний и семантические сети.

Создание алгоритмов, управляющих такими данными, потребовало изменить

Антон Александрович Китов, аспирант.

Владимир Константинович Тянь (д.т.н.), заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт».

принцип «код управляет данными». Современное программное обеспечение ориентируется на принцип «данные управляют кодом». Таким образом, для решения ряда важных задач трубопроводного транспорта, связанных с безопасной их эксплуатацией, необходимо представить технологический процесс перекачки в виде данных, удобных для их алгоритмической обработки.

1. Моделирование технологических трубопроводов для обработки в промышленных контроллерах

В представленной работе рассмотрены вопросы моделирования сложных технологических структур трубопроводного транспорта с целью последующей алгоритмической обработки информационных потоков и управления технологическими процессами. Адекватным аппаратом моделирования структуры технологических трубопроводов (гидравлической сети) и его объектов является теория графов [2].

С помощью ориентированного графа [3] можно ограниченным количеством правил описать модель субъектов трубопроводного транспорта, которыми являются задвижка, насосный агрегат, резервуар, приборы измерения физических величин. Каждый из перечисленных субъектов управления определяет тип вершины и специфичные данному типу свойства: положение штока задвижки, уровень жидкости в резервуаре, показания средств измерения, состояние агрегата.

Дугами графа адекватно представимы трубопроводы с характерными им свойствами (параметрами) – допустимым давлением, диаметром трубы, длиной.

Так как граф полностью определяется его смежностями или его инцидентиями, информацию о графе для обработки в ЭВМ удобно представлять в матричной форме [3].

Такой подход к организации данных дает довольно гибкий инструментарий для реализации следующих алгоритмов:

- визуализация потоков нефти;
- определение угрозы перекрытия потоков, определение подключенных входных коллекторов к резервуарам, резервуаров к подпорным насосным агрегатам, подпорных насосных агрегатов к магистральным насосным станциям, магистральных насосных станций к узлу подключения станции к магистральному трубопроводу;
- оперативное определение запертых участков трубопроводов.

Рассмотрим фрагмент следующей технологической схемы (рис. 1).

Применив правила описания технологической схемы в виде графа, получаем следующий граф объекта (рис. 2).

На этом рисунке вершины с наименованиями R34, R35, R36 представляют собой резервуары РВСП-20000 с номерами 34, 35, 36 на технологической схеме объекта (см. рис. 1) соответственно. Свойствами данных вершин являются: тип вершины (резервуар), привязка к реальному резервуару и уровень взлива в данном резервуаре.

Номера вершин с литерой Z представляют собой задвижки с их соответствующими номерами (см. рис. 1). Свойствами данных вершин являются тип вершины (задвижка), соответствие реальной задвижке, а также положение данной задвижки (открыта, закрыта, открывается, закрывается, промежуточное положение) и ее состояние (рабочее или аварийное).

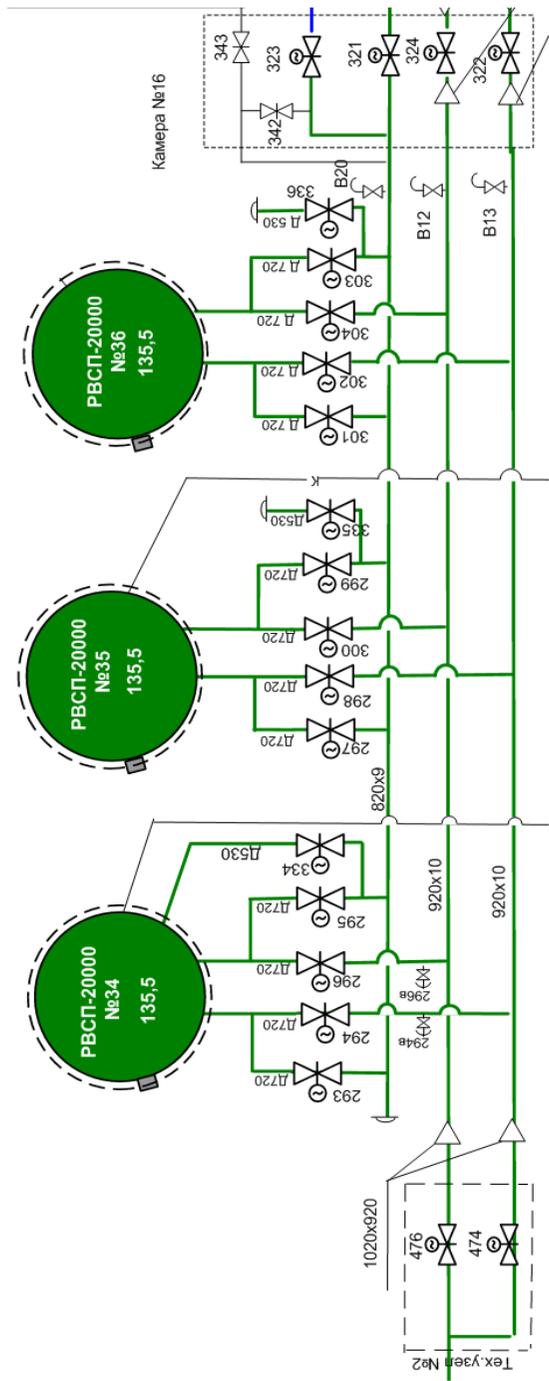


Рис. 1. Фрагмент технологической схемы резервуарного парка

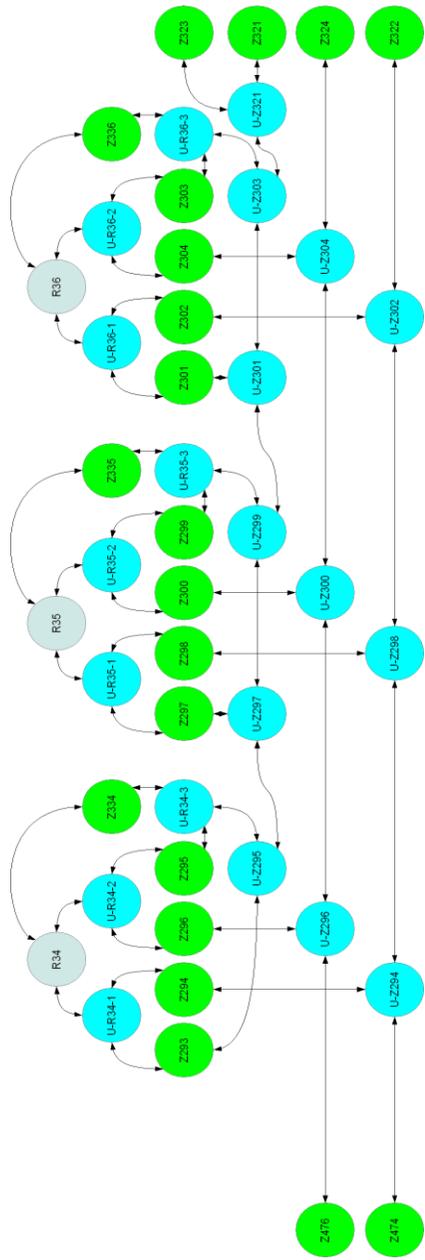


Рис. 2. Граф фрагмента технологической схемы резервуарного парка

Свойства вершины типа «задвигка» (положение и состояние) в зависимости от задач определяют процесс инициализации матрицы смежности для последующих вычислений (синтез матрицы смежности см. ниже).

Данный граф является ориентированным, что дает возможность представления обратных клапанов технологических трубопроводов.

Вершины, начинающиеся с литеры U, представляют собой технологические трубопроводы, не имеют привязки к субъектам управления, выступают в качестве элементов связи вершин графа в соответствии с технологической схемой объекта. Данный граф может служить для обработки информации на автоматизированном рабочем месте оператора или диспетчера, улучшив восприятие информации с помощью визуализации потоков нефти (путем нахождения маршрута от источника нефти до места откачки) и определения запертых участков нефтепровода (путем определения стека досягаемости от вершин, начинающихся с литеры U, и поиска по стеку вершин типа источников или стоков нефти).

Для решения других задач необходимо реализовывать обработку графа в программируемых логических контроллерах (ПЛК). Ввиду того, что у ПЛК ограниченный объем ресурсов – оперативная память и процессорное время, то основными требованиями, предъявляемыми к алгоритму поиска связности вершин в программируемых логических контроллерах, являются максимальная скорость поиска связи между вершинами и минимальный объем используемой оперативной памяти.

Для минимизации использования объема оперативной памяти необходимо минимизировать граф, сократив вершины, начинающиеся с литеры U, и оставив связность субъектов управления без изменения. Это уменьшит размер хранимой в оперативной памяти матрицы смежности графа и сократит количество итераций при прохождении цикла поиска стека досягаемости.

С учетом этого граф приобретает следующий вид (рис. 3).

Так как процессорное время программируемых логических контроллеров критично к использованию циклов, был модифицирован алгоритм поиска [4], максимально эффективно использующий каждую итерацию программного цикла и обеспечивающий максимизацию скорости поиска стека досягаемости. Для этого используется стек достижимых вершин с двумя указателями: указатель на последний элемент, занесенный в стек (S), и указатель на вершину из стека (AP), которая анализируется на данном шаге итерации. На каждом шаге итерации происходит занесение в стек вершин, смежных с исследуемой вершиной (по матрице смежности ориентированного графа), но не занесенных ранее. Далее выбирается следующая вершина из стека достижимых вершин. Если указатель AP становится больше, чем указатель S, то происходит выход из функции. На выходе функции будет получен стек, содержащий все достижимые вершины от заданной. Максимально возможное количество шагов для нахождения наибольшего стека достижимости от вершины в данном случае не будет превышать алгебраическую последовательность количества вершин графа $(1+n)*n/2$. Это существенно меньше, чем расчет матрицы достижимости по алгоритму Флойда – Уоршела, количество шагов которого равно $2n^3$ [5].

Алгоритм поиска и удаления вершин, начинающихся с литеры U: из списка вершин выбирается по порядку вершина, начинающаяся с литеры U. Далее данная вершина удаляется из списка вершин. Находится список дуг, начинающихся с идентификатора (первый список) удаленной вершины, и находится список дуг, заканчивающийся на идентификатор (второй список) удаленной вершины.

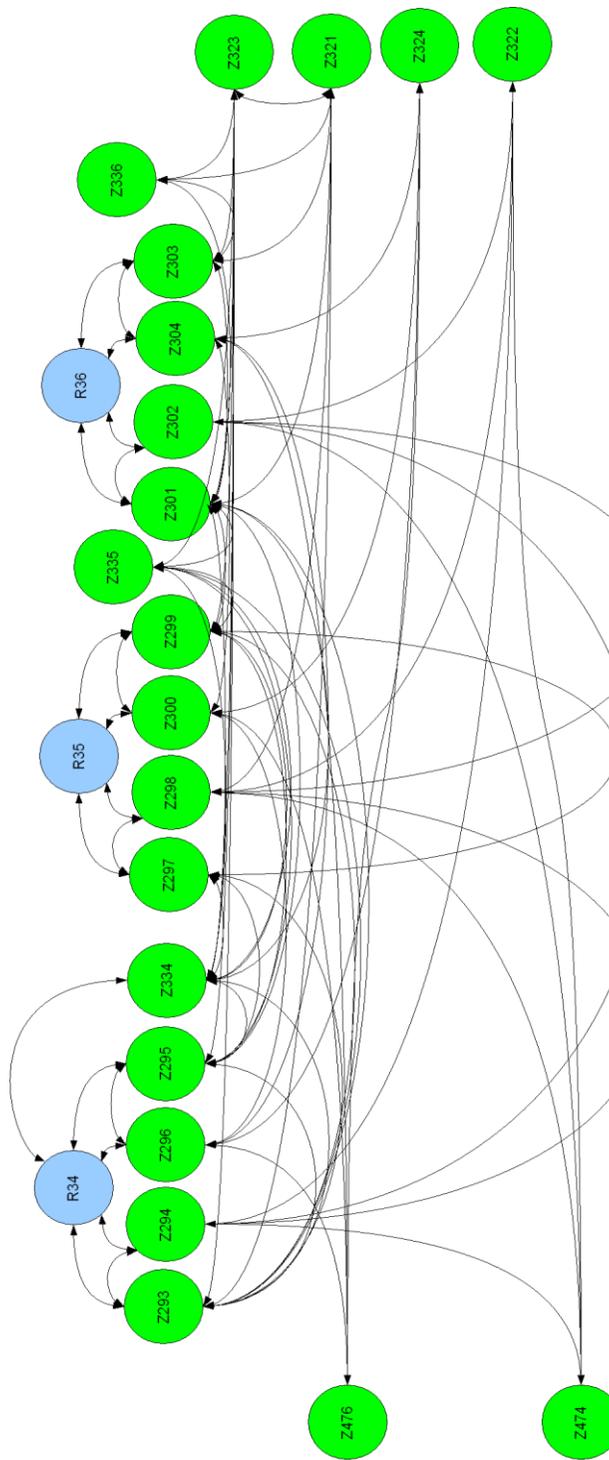


Рис. 3. Представление графа, подготовленного для загрузки в ПЛК

Далее в общий массив дуг добавляются новые дуги таким образом, что каждой дуге из первого списка создаются дуги, начальными вершинами которых являются начальные вершины из второго списка дуг, а конечной вершиной является конечная вершина дуги, обрабатываемой на данный момент.

Далее из общего массива дуг удаляются все дуги, начинающиеся или заканчивающиеся на вершине с идентификатором удаленной вершины.

Как отмечалось выше, каждая вершина имеет свою конкретную привязку к физическому субъекту управления, следовательно, имеет соответствующие характеристики. Такой тип вершин, как задвижка, может иметь следующие два состояния в зависимости от физического положения штока: либо данная вершина имеет связь с другими вершинами (задвижка открыта), либо данная вершина не имеет связей (задвижка закрыта), т. е. состояние задвижки описывается булевой переменной. Инициализация матрицы смежности может быть организована следующим образом.

Дан ориентированный граф объекта G , $G: = (V, A)$, где V – непустое множество вершин, A – множество пар различных вершин, дуги графа.

Для того чтобы привязать свойство к каждой вершине множества V , представим ее элементы в виде структуры данных:

$$V_n \{ \text{Идентификатор, Тип, Состояние} \}.$$

Если $V_n. \{ \text{Тип} \} = \text{«Задвижка»}$, $V_n. \{ \text{Идентификатор} \} = \text{«Закрыта»}$, то $V_n. \{ \text{Состояние} \} := 0$.

Если задвижка с идентификатором $V_n. \{ \text{Идентификатор} \} = \text{«Открыта»}$, то $V_n. \{ \text{Состояние} \} := 1$.

Если задвижка находится в промежуточном состоянии, то можно присвоить $V_n. \{ \text{Состояние} \}$ как 0, так и 1, в зависимости от требований решаемых задач.

Из массива A строится матрица смежности, значения элементов которой вычисляются по выражению

$$M_{ij} = V_i. \{ \text{Состояние} \} \cdot V_j. \{ \text{Состояние} \}.$$

2. Методики решения задач трубопроводного транспорта

Рассмотрим реализацию задач определения угрозы перекрытия потоков, определения подключенных входных коллекторов к резервуарам, резервуаров к подпорным насосным агрегатам, подпорных насосных агрегатов к магистральным насосным станциям, магистральных насосных станций к узлу подключения станции к магистральному трубопроводу.

Для определения подключенных входных коллекторов к резервуарам необходимо получить стек достигаемых вершин от каждой вершины типа «Входной коллектор», далее проанализировать стек, выбрав вершины типа «Резервуар», и по идентификатору данной вершины определить конкретные резервуары, подключенные к входному коллектору.

Для определения подключенных резервуаров к подпорным насосным агрегатам необходимо получить стек достигаемых вершин от каждой вершины типа «Резервуар», далее проанализировать стек, выбрав вершины типа «Подпорный насосный агрегат» и по идентификатору данной вершины определить подпорные агрегаты, подключенные к резервуару.

Для определения подпорных насосных агрегатов, подключенных к маги-

стральной насосной станции, необходимо получить стек достигаемых вершин от каждой вершины типа «Подпорный насосный агрегат», далее проанализировать стек, выбрав вершины типа «Входной коллектор магистральной насосной станции», и по идентификатору данной вершины определить конкретные магистральные насосные станции, подключенные к подпорному насосу агрегату.

Для определения магистральной насосной станции, подключенной к магистральному трубопроводу, необходимо получить стек достигаемых вершин от каждой вершины типа «Выходной коллектор магистральной насосной станции». Выбрав из стека вершины типа «Узел подключения станции к магистральному трубопроводу» по идентификатору данной вершины, определить конкретные магистральные трубопроводы, подключенные к магистральной насосной станции.

Задачи определения угрозы перекрытия потоков, готовности входных и выходных коллекторов решаются на основании вышеописанных методик идентификации подключений путем определения наличия требуемого типа вершин.

В работе также разработано вспомогательное программное обеспечение, которое позволяет автоматически сформировать из векторного графического файла объекта базу данных вершин и ребер графа, произвести операцию сокращения незначимых вершин в целях подготовки данных для загрузки в ПЛК с сохранением связи значимых вершин, а также загрузить граф в ПЛК по протоколу Modbus TCP.

Выводы

Применение приведенной методики описания модели технологических объектов для автоматизированных систем управления технологическими процессами и приведенные алгоритмы обработки данных решают задачу определения наличия угрозы перекрытия потока и существенно упрощают реализацию контроля перекачки нефти на сложных технологических объектах магистрального трубопроводного транспорта, имеющих множество различных вариантов подключений источников и стоков нефти.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РД-35.240.50-КТН-109-13 Автоматизация и телемеханизация технологического оборудования площадочных и линейных объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Основные положения (с изменением 1).
2. *Меренков А.П., Хасилев В.А.* Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985.
3. *Харари Ф.* Теория графов. – М.: Едиториал УРСС, 2003.
4. *Степанов В.Н.* Дискретная математика: графы и алгоритмы на графах. – Омск, 2010.
5. *Ананий В., Левитин.* Динамическое программирование: Алгоритм Флойда поиска кратчайших путей между всеми парами вершин // Алгоритмы: введение в разработку и анализ. Гл. 8. – М.: Вильямс, 2006.

Статья поступила в редакцию 31 августа 2015 г.

STRUCTURAL MODELLING OF TRUNK PIPELINE TECHNOLOGY FOR SCADA PROCESSING. THE OPTIMIZATION OF CALCULATION TASKS FOR PLC

A.A. Kitov, V.K. Tyan

JSC Transneft Kama
26a, N. Ershova st., Kazan, 420061, Russian Federation
Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper gives examples of the graph theory practical application in structural mathematical modeling of complex units of trunk pipeline transport. The necessity to use the graph theory is due to the large number of possible pipeline connections between its units (valves, pumps, tanks), which complicates solving actual problem of the determination of threats to shut off the flow in real time. The use of mathematical models will allow implementing the algorithmic processing of data flows and technological processes control.

Keywords: *graph theory, automatic systems, automated systems, databases, discrete mathematics, mathematical modeling of structural, technological objects free transport pipeline.*

*Anton A. Kitov, Postgraduate Student.
Vladimir K. Tyan (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

УДК 004.415.28

АРХИТЕКТУРА ИНТЕРНЕТ-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ МЕДИЦИНЫ

С.П. Орлов¹, В.П. Золотов¹, А.В. Якимов²

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² НКО «Фонд содействия модернизации здравоохранения»
Россия, 121099, г. Москва, Новый Арбат, 21

Рассматривается проблема обеспечения современными информационными технологиями системы здравоохранения населения. Показано, что данные генома человека должны быть в основе современной информационной системы, построенной на базе интернет-платформы персонализированной медицины. Сформулированы требования к инструментам интернет-платформы. Выделены основные модули, из которых строится функционал интернет-платформы. Предложена архитектура платформы, описаны принципы масштабирования проекта. На основе анализа трехзвенной клиент-серверной архитектуры выбран стек технологий, необходимых для реализации проекта. Решены вопросы горизонтального масштабирования и масштабирования системы во времени. Рассмотрены принципы построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений в составе интернет-платформы.

Ключевые слова: *информационные технологии, персонализированная медицина, архитектура интернет-платформы, сервисно-ориентированная архитектура, система поддержки принятия решений*

Персонализированная медицина – это оказание комплексной медицинской помощи, осуществляемой в соответствии с характеристиками конкретного пациента. Этот термин учитывает не только используемые уже в течение долгого времени клинические признаки, такие как возраст, пол, телосложение, индекс массы тела, сопутствующие заболевания, биохимические показатели, семейный анамнез, позволяющий оценить риск наследственной заболеваемости, и проч., но и в первую очередь молекулярные характеристики организма пациента. Последние включают данные геномных и постгеномных исследований, в том числе протеомики и метаболомики, выполненные при помощи современных высокотехнологичных методов молекулярной биологии и медицины.

Основной целью персонализированной медицины является разделение популяции здоровых и больных людей на индивидуумов, отличающихся по вероятности возникновения заболевания и по способности реагировать на различные виды терапии. Такая классификация позволит рационально и целенаправленно применять терапевтические воздействия с максимальной пользой и минимумом неблагоприятных эффектов для отдельного человека.

Значительный прогресс в развитии персонализированной медицины про-

Сергей Павлович Орлов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Вычислительная техника».

Владимир Петрович Золотов (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Вычислительная техника».

Андрей Владимирович Якимов, инженер-программист.

изошел благодаря декодированию генома человека, который, по сути, является генетической картой всего организма. Ученым удалось определить 20–25 тысяч человеческих генов и последовательности миллиардов конъюгаций хромосом внутри ДНК, что составляет элементарную структуру набора генов человека.

У любого пациента с течением времени возрастает объем персональных данных о личном здоровье. Как следствие, возникает необходимость их хранения, систематизации и обработки. По мере роста объема этих данных увеличивается и сложность их анализа врачом для постановки правильного диагноза. В то же время возрастает значимость и интенсивность использования информационных технологий в современной системе здравоохранения и персонализированной медицине в частности.

Обозначенные проблемы могут быть решены с помощью предлагаемой интернет-платформы, запуск которой позволяет повысить эффективность за счет оптимизации доступа пользователей и докторов к данным о здоровье пациента. В статье ставится задача разработки интернет-платформы персонализированной медицины как сервиса для централизованного хранения, систематизации, анализа и управления медицинской информацией с доступом к ней через Интернет. Стоит отметить, что функционал платформы должен содержать как возможности для персонального использования, так и функционал для врачебных заведений с целью организации их работы.

Требования и функционал платформы

Анализ проблемы позволил сформулировать основные требования к платформе в целом.

1. Взаимодействие с сервером платформы должно осуществляться по принципу «клиент – сервер» с использованием RESTfulAPI. Это позволит без проблем масштабировать возможность доступа к данным с различных устройств – к примеру, доступа с помощью обычного браузера и с помощью мобильного приложения со смартфона.

2. Доступ к функционалу платформы должен осуществляться через Интернет только по защищенному протоколу (HTTPS). Главное преимущество зашифрованного соединения (HTTPS) в том, что данные между сервером и клиентом нельзя прочесть.

3. Платформа должна являться многопользовательским приложением, распределенной системой, работающей более чем на одном сервере. По умолчанию предполагается, что в данный момент платформой могут пользоваться несколько пользователей. Операции над данными могут производиться несколькими пользователями одновременно.

4. Пользователем платформы по умолчанию является пациент, но дополнительно пользователь может принадлежать к группам «Эксперт» или «Доктор». В свою очередь, группы «Эксперт» и «Доктор» могут быть объединены в отдельную группу «Медицинское учреждение».

5. Доступный пользователю функционал платформы должен определяться группами, к которым принадлежит данный пользователь.

6. Архитектура приложения сервера должна быть выполнена по модульному принципу. Это позволит добавлять новые функции по мере необходимости без кардинального изменения ядра платформы.

7. Платформа должна поддерживать мультиязычный интерфейс.

8. Обязательна поддержка Open API – системы для сторонних разработчи-

ков, которая предоставляет возможность легко с согласия пользователей получить доступ к их информации для создания на ее базе новых приложений.

На основании этих требований предлагается разработать следующий функционал интернет-платформы персонализированной медицины.

1. Доступ к функционалу платформ возможен только зарегистрированным и авторизованным в системе пользователям. Авторизация осуществляется проверкой правильности ввода логина и пароля посетителя.

2. Авторизованный пользователь-пациент получает доступ к основному элементу системы – электронной медицинской карте (ЭМК), хранилищу личных медицинских данных. В основе создания ЭМК – международные стандарты организации, хранения и обмена медицинскими данными HL7 и OpenEHR. Пациенты – пользователи системы смогут хранить все сведения о своем здоровье в одном месте и иметь к ним доступ в любое удобное время через аккаунт на сайте. ЭМК интегрируется с любыми медицинскими информационными системами. Данные попадают в ЭМК из этих систем, от пациентов, добавляющих свои сканированные медицинские документы или загружающих по Bluetooth данные весов, тонометров, глюкометров и других домашних приборов, и от врачей, которые вносят свои заключения по результатам телемедицинских консультаций. Пациент самостоятельно управляет собственной ЭМК и по своему желанию предоставляет к ней доступ врачам или медицинским учреждениям, с которыми он взаимодействует.

3. Обеспечивается использование телемедицины и удаленных консультаций с любым доктором в системе независимо от текущего геоположения.

4. Консультация должна включать в себя несколько типов:

- видеочат;
- текстовый чат;
- вопрос-ответ с возможностью массового обсуждения.

5. Предусмотрен автоматический анализ параметров организма и мутаций в геноме, которые добавлены пользователем-пациентом.

6. Предусмотрена автоматическая расшифровка анализов пациента, которые добавлены в систему.

7. Структурирована информация справочного характера.

Анализ сформулированных требований и функционала интернет-платформы показывает, что проект будет высоконагруженным по данным. Высоконагруженными ресурсами в первую очередь являются многопользовательские приложения, многие из которых представляют собой распределенные информационные системы, работающие на нескольких серверах. Такая конфигурация необходима для обеспечения обработки больших объемов данных, возникающих при пиковых нагрузках, а также их репликации.

Стек технологий для разработки и запуска платформы

Интернет-платформа персонализированной медицины реализует общепринятую трехзвенную архитектуру.

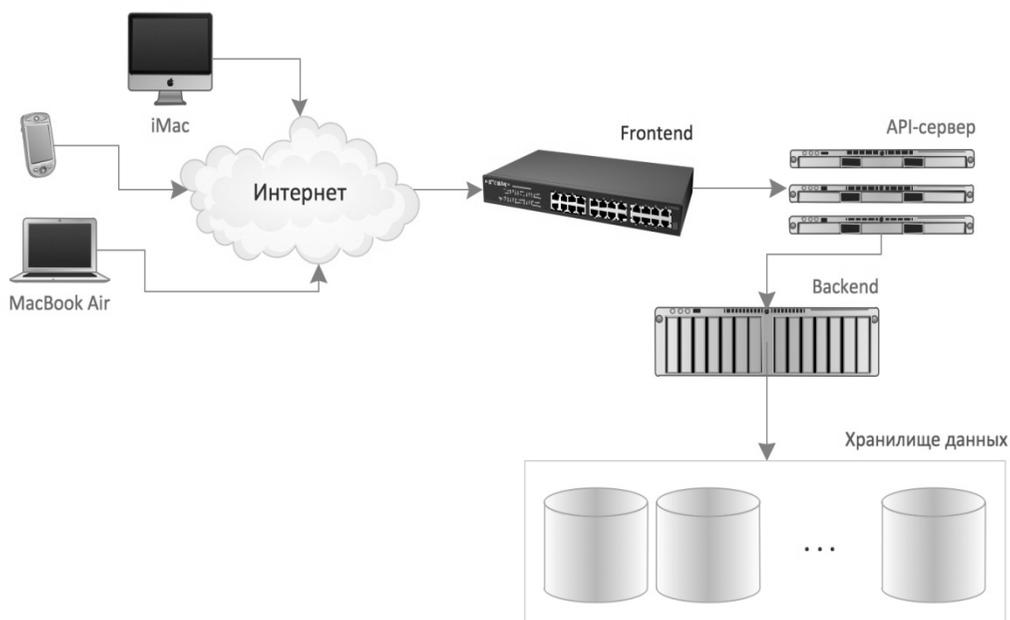
1. Frontend – пул физических серверов, которые отдают статику; передает все, что требует вычислений, дальше на сервер Backend. Обычно на Frontend также возлагается функция балансировки нагрузки.

2. Backend – сервер, который выполняет расчеты и готовит web-страницу или json-данные. На Backend данные не хранятся, он не имеет «памяти» и каждый запрос обрабатывает с нуля. Это позволяет легко добавлять новые серверы в

пул обработчиков.

3. Хранилище – обычно это реляционная база данных с возможностью персистентного хранения данных. Фактически это место, где данные пользователя физически хранятся.

Архитектура интернет-платформы для персонализированной медицины приведена на рисунке.



Архитектура интернет-платформы

Опишем стек технологий, которые будут использоваться в разработке данной платформы.

1. В качестве основного языка программирования для написания ядра платформы на сервере Backend используется скриптовый язык PHP. Текущая версия языка поддерживает ООП, пространство имен и содержит большое количество сторонних библиотек. Для ускорения интерпретации скриптов необходимо использовать eAccelerator – программу, кэширующую байт-код PHP.

2. В качестве движка сервера баз данных для постоянного хранения используется реляционная база данных MySQL. Выбор продиктован хорошими характеристиками быстродействия данного продукта, а также поддержкой шардинга и репликации по умолчанию [1].

3. В качестве движка хранения множеств и списков используется Redis – сетевое журналируемое хранилище данных типа «ключ – значение». Хранилище Redis содержит базу данных в оперативной памяти и снабжено механизмами снимков и журналирования для обеспечения постоянного хранения. Это обеспечивает очень высокую скорость доступа к данным, при этом гарантируется их персистентность.

3. Для кэширования данных используется Memcached – программное обеспечение, реализующее сервис кэширования данных в оперативной памяти на основе хеш-таблицы.

4. На стороне web-клиента (браузер) применяется основной язык программирования – JavaScript. Современная мощь этого языка позволяет сделать из сай-

та по-настоящему интерактивную систему и минимизировать трафик между клиентом и сервером за счет технологии AJAX.

5. Функционал платформы предполагает организацию обычного и видеочата. Для их реализации необходима программная прослойка с неблокирующим вводом/выводом. Для этого идеально подходит Node.js – программная платформа, основанная на движке V8 (транслирующем JavaScript в машинный код) и превращающая JavaScript из узкоспециализированного языка в язык общего назначения [2].

6. В качестве web-сервера для Frontend логичнее всего использовать Nginx – HTTP-сервер и обратный прокси-сервер. На данный момент это один из лучших web-серверов для использования в высоконагруженном проекте.

Принцип построения архитектуры платформы – разделение приложения на логические модули, когда приложение делится на составные части (web, БД, кеш) и эти части работают на разных серверах (или группах серверов). С точки зрения производительности и дальнейшего масштабирования это оптимальная схема построения платформы [3].

Однако такое деление не решает задачу надежности и отказоустойчивости. Каждый узел не зарезервирован, и в случае выхода из строя любого из них перестает работать весь проект в целом. Эту проблему возможно решить с помощью кластера приложений. Обеспечить представление приложения в виде кластера можно с помощью следующих технологий, которые позволяют масштабировать базу данных, кеш, web и представить каждую из составляющих в виде группы взаимозаменяемых серверов:

- вертикальный шардинг (вынесение модулей на отдельные серверы MySQL);
- репликация MySQL и балансирование нагрузки между серверами;
- распределенный кэш данных (memcached);
- непрерывность сессий между веб-серверами (хранение сессий в базе данных);
- кластеризация веб-сервера: синхронизация файлов; балансирование нагрузки между серверами.

С проектной точки зрения создание такого приложения в виде веб-кластера нужно выполнять в два шага:

- разделение веб-сервера и базы данных на два логических уровня;
- построение собственно кластера приложения.

Основная идея, заложенная в организации разработки модулей проекта, – сервис-ориентированная архитектура (SOA). Сервис – это отдельная часть приложения, выполняющая конкретную задачу и имеющая API, через который предоставляется доступ к своим функциям [4].

Сервисы в разрабатываемой интернет-платформе:

- сервис регистрации и авторизации в системе пациентов;
- хранение статики, к примеру сканов анализов;
- чат и видеоконференции;
- хранилище данных;
- очередь выполнения автоматического анализа введенных пациентом данных.

Сервис-ориентированная архитектура предполагает, что все приложение разделяется на независимые сервисы [5]. Страница веб-приложения, которую видит конечный пользователь-пациент, – это результат работы многих сервисов.

Использование такой стратегии обеспечивает ряд положительных качеств. Во-первых, сервисы проще разрабатывать: есть конкретная задача; имеется API; проще наладить тестирование; разработка не будет зависеть от других частей

приложения. Во-вторых, программисту не надо знать все приложение, достаточно работать со своей частью. В-третьих, сервис, а значит и приложение в целом, проще масштабировать.

Масштабирование

Вопрос масштабирования очень важен для проектов с ожидаемой высокой нагрузкой по трафику и объему обрабатываемых и хранимых данных. Сразу можно обозначить, что вертикальное масштабирование совершенно не подходит для проекта. Предлагаются два типа масштабирования, которые будут активно применяться в процессе работы интернет-платформы персонализированной медицины.

1. Горизонтальное масштабирование – разбиение системы на более мелкие структурные компоненты и разнесение их по отдельным физическим машинам (или их группам) и/или увеличение количества серверов, параллельно выполняющих одну и ту же функцию. Масштабируемость в этом контексте означает возможность добавлять к системе новые узлы, серверы, процессоры для увеличения общей производительности. Этот способ масштабирования требует аккуратного проектирования на начальном этапе, чтобы сразу предусмотреть в программной части работу с распределенным пулом серверов.

2. Масштабирование во времени – очень важная парадигма проектирования высоконагруженных проектов в интернете. Смысл в том, что не все действия в интернет-приложении должны происходить немедленно. Допустим, врач добавил ответ-комментарий на вопрос пациента и пользователю должно прийти уведомление по e-mail. Нет необходимости сразу посылать email-письмо. Гораздо правильнее поставить задание "послать email" в очередь на специальном сервере и обработать по возможности. Такой подход призван разгрузить Backend и сделать отклик системы фактически реактивным, т. е. с минимальной задержкой, невидимой для пользователя.

Принятие решений

Важнейшим моментом для эффективного использования интернет-платформы в персонализированной медицине является процедура принятия решений врачом или медицинским работником (в том числе и управленческим персоналом) по обслуживаемому пациенту. Очевидно, что эта процедура многоступенчатая и проводится в условиях неопределенности данных. Следовательно, необходимо использовать интеллектуальную систему поддержки принятия решений [6, 7], которая должна генерировать альтернативные решения по диагностике, методам медикаментозного и терапевтического лечения и т. д. Предлагается построить систему, которая, опираясь на хранилище данных, будет основываться на продукционных моделях вывода с использованием баз знаний [8, 9]. Технологии этого типа строятся на принципах многомерного представления и анализа данных (OLAP).

Заключение

Описанный подход к построению архитектуры интернет-платформы персонализированной медицины базируется в первую очередь на достижениях геномной медицины, современных методах диагностики с использованием информационных технологий. Развитие предлагаемой системы позволит повысить уровень жизни населения за счет нового качества работы органов здравоохранения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шварц, Б. MySQL. Оптимизация производительности. 2-е изд. Пер. с англ. / Б. Шварц, П. Зайцев, В. Ткаченко, Дж. Заводны, А. Ленц, Д. Бэллинг.– СПб.: Символ-Плюс, 2010. – 832 с.
2. Кантелон М. K19 Node.js в действии / М. Кантелон, М. Харетер, Т. Головайчук. – СПб.: Питер, 2015. – 448 с.
3. Скляр Д. PHP. Рецепты программирования. 3-е изд. / Д. Скляр, А. Тахтенберг. – СПб.: Питер, 2015. – 784 с.
4. Архитектура высоконагруженных систем // InsightIT [2013–2013]. Дата обновления: 08.11.2013. URL: <http://www.insight-it.ru/highload/> (дата обращения: 02.10.2015).
5. Масштабирование нагрузки web-приложений // habrahabr. [2011–2011]. Дата обновления: 11.02.2011. URL: <http://habrahabr.ru/post/113992/> (дата обращения: 12.10.2015).
6. Нечаев Д.А. Модели анализа и принятия решений при управлении региональными программами / Д.А. Нечаев, С.П. Орлов // Системы управления и информационные технологии. – 2013. – № 2(52). – С. 35-38.
7. Орлов С.П. Система искусственного интеллекта при управлении целевыми программами развития регионов / С.П. Орлов // Вестник Волжского университета им. Татищева. – 2015. – № 2(24). – С. 63-71.
8. Орлов С.П. Разработка экспертной системы в составе интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области водоподготовки и водоочистки природных вод / С.П. Орлов, А.В. Чуваков, Д.А. Нечаев // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 5. – С. 44-52.
9. Батищев В.И. Комплексный подход к формированию алгоритмов логического вывода для анализа состояния сложных систем / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов, С.П. Орлов // Мат-лы VII междунар. науч.-практ. конф. «Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Информационные технологии в организации производства». – Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева, 2010. – С. 98-101.

Статья поступила в редакцию 12 октября 2015 г.

THE ARCHITECTURE OF THE WEB-BASED PLATFORM FOR PERSONALIZED MEDICINE

S.P. Orlov¹, V.P. Zolotov¹, A.V. Yakimov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

² NPO “Fund of assistance to modernize health care”
21, Novyi Arbat st., Moscow, 121099, Russian Federation

The paper deals with the problem of modern information technologies in the public health system. It is shown that the human genome should be placed to the heart of the modern information system designed on the basis of the web-based platform of personalized medicine. The requirements to the web-based platform tools are formulated. The basic modules which comprise the functional of the web-based platform are outlined. The paper offers the architecture of the web-based platform and describes the principles of the project scaling. On the basis of the three-tier client-server architecture analysis, a stack of techniques required for the project is selected. The issues of horizontal scaling and system-time scaling are discussed. The principles of designing an intelligent decision support system as part of the web-based platform are proposed.

Keywords: *information technologies, personalized medicine, architecture of internet-platform, service-oriented architecture, decision support system.*

*Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir P. Zolotov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Andrey V. Yakimov, Engineer.*

УДК 62-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ ЭТАНОЛАМИНОВ

Н.П. Песков, Э.М. Мончарж, А.А. Попов, Н.О. Кулигина

Дзержинский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
Россия, 606026, г. Дзержинск Нижегородской обл., ул. Гайдара, 49

E-mail: peskov87@bk.ru

Рассматривается задача параметрической идентификации математической модели процесса ректификации этаноламинов при известной структуре объекта и неизвестных параметрах процесса массопередачи в системе диэтаноламин – триэтаноламин. Математическая модель процесса представляет собой аналитическое описание фундаментальных законов массопереноса. Неизвестными параметрами модели оказались объемный коэффициент массопередачи и коэффициенты формализованной зависимости, описывающей парожидкостное равновесие в системе диэтаноламин – триэтаноламин. Непосредственно измерить эти параметры не представляется возможным. Поэтому был предложен расчетно-экспериментальный метод идентификации для оценки параметров модели, базирующийся на минимизации суммы квадратов расхождений между расчетными и экспериментальными значениями выходных технологических параметров по серии опытов. Идентификация проведена по результатам эксперимента на промышленной установке по разделению смеси диэтаноламин – триэтаноламин в ректификационной колонне насадочного типа. Проведено тестирование разработанной математической модели и доказана ее адекватность, а также показано дальнейшее направление ее использования в задачах оптимального управления.

Ключевые слова: ректификация, математическая модель, идентификация параметров, управление процессом.

Этаноламины являются базовым сырьем и входят в состав рецептур готовых продуктов во многих отраслях народного хозяйства: от нефте- и газоперерабатывающей, цементной и металлургической до косметической, фармацевтической и сельскохозяйственной. К качеству этаноламинов предъявляются высокие требования.

В промышленности этаноламины получают в результате синтеза оксида этилена и аммиака. Заключительной стадией производства является разделение трехкомпонентной смеси моноэтаноламина (МЭА), диэтанолamina (ДЭА) и триэтанолamina (ТЭА) путем ректификации в двух колоннах насадочного типа. Управление работой последней из этих колонн по разделению ДЭА и ТЭА

Николай Павлович Песков, старший преподаватель кафедры «Автоматизация, транспортные и информационные системы».

Эрнст Маркович Мончарж (к.х.н., доц.), доцент кафедры «Автоматизация, транспортные и информационные системы».

Анатолий Аркадьевич Попов (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматизация, транспортные и информационные системы».

Наталья Олеговна Кулигина, старший преподаватель кафедры «Автоматизация, транспортные и информационные системы».

вследствие того, что оба ее выходных потока являются целевыми, требует регулирования состава как дистиллята, так и кубовой жидкости. Применение двух прямых или косвенных регуляторов состава дистиллята и кубовой жидкости из-за наличия перекрестных связей по управляющим воздействиям этих регуляторов приводит к их неустойчивой работе. Для решения данной проблемы предлагается использование математической модели в системе управления ректификационной колонной, позволяющей предсказывать состав дистиллята X_d (содержание ДЭА в дистилляте) и состав кубовой жидкости X_w (содержание ДЭА в кубовой жидкости) в зависимости от величины управляющих воздействий L (расход флегмы) и G (паропроизводительность кипятильника) соответственно. Таким образом, задача управления процессом ректификации может быть поставлена как задача оптимального управления, заключающаяся в поиске значений L и G с использованием математической модели, при которых величины X_d и X_w соответствуют технологическому регламенту. Найденные таким образом величины L и G выдаются в качестве заданий регуляторам, стабилизирующим эти технологические параметры [1].

Технологическая схема процесса бинарной ректификации представлена на рис. 1.

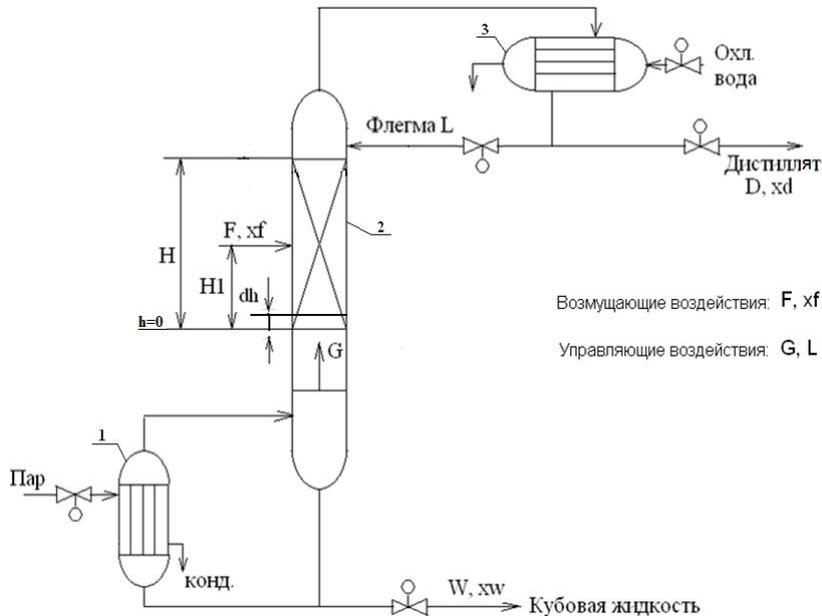


Рис. 1. Технологическая схема ректификации смеси диэтаноламин – триэтаноламин:
1 – выносной кипятильник; 2 – колонна; 3 – дефлегматор

Составим требуемую для решения задач управления процессом ректификации математическую модель, а затем определим ее параметры.

Расчет состава выходных потоков ректификационной колонны обычно проводится итерационным методом [2] с уточнением показателя состава кубовой жидкости X_w . По технологическому регламенту эта величина меняется от 0,2 до 0,3 кмоль/кмоль; в качестве начального приближения принималось среднее регламентное значение мольной доли низкотемпературного компонента (ДЭА) в кубовой жидкости $X_w^0 = 0,25$ кмоль/кмоль.

$$X_w = X_w^0. \quad (1)$$

В соответствии с общепринятым подходом гидродинамика процесса в кубовой части колонны описывается с помощью модели идеального смешения, поскольку в ней происходит кипение кубовой жидкости. Состав пара, поступающего из куба колонны на насадку, определяется уравнением равновесия пар – жидкость

$$Y_w = b_0 + b_1 X_w + b_2 X_w^2 + b_3 X_w^3, \quad (2)$$

где Y_w – содержание ДЭА в паровой фазе, кмоль/кмоль;
 X_w – содержание ДЭА в кубовой жидкости, кмоль/кмоль;
 b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты формализованной зависимости.

Гидродинамика процесса в насадке колонны описывается как модель идеального вытеснения, поскольку площадь поперечного сечения материальных потоков в насадке сравнительно мала. Модель идеального вытеснения представляется двумя дифференциальными уравнениями для жидкости и пара, определяющими изменения состава этих потоков по высоте насадки. Граничные условия для интегрирования дифференциальных уравнений определяются из уравнения материального баланса для кубовой части колонны. При значении координаты высоты сечения насадки $h = 0$ мольная доля низкотемпературного компонента в паровом потоке $Y = Y_w$, а в потоке жидкости

$$X = (GY_w + WX_w)/(L + F), \quad (3)$$

где G – расход пара, кмоль/ч;
 W – расход кубовой жидкости, кмоль/ч;
 L – расход флегмы, кмоль/ч;
 F – расход потока питания колонны, кмоль/ч.

Дифференциальное уравнение материального баланса для потока пара:

$$dY / dh = K_{OMP}(Y^* - Y) / G, \quad (4)$$

где K_{OMP} – объемный коэффициент массопередачи, кмоль/(м · ч);
 Y^* – равновесная мольная доля низкотемпературного компонента в паровой фазе, кмоль/кмоль;
 h – высота бесконечно малого элемента насадки, м.

Уравнение (4) справедливо для всей насадки. Дифференциальное уравнение материального баланса потока жидкости для части насадки, расположенной ниже подвода питания, принимает вид

$$dX / dh = K_{OMP}(Y^* - Y) / (L + F). \quad (5)$$

Аналогичное уравнение справедливо и для другой части насадки:

$$dX / dh = K_{OMP}(Y^* - Y) / L. \quad (6)$$

Уравнения (4) и (5) интегрируются до сечения по высоте насадки, соответствующего подаче на насадку питания ($h = H_1$), а затем интегрируются уравнения (4) и (6) до верхнего сечения насадки ($h = H$). При интегрировании дифференциальных уравнений (4), (5) и (6) величина равновесной мольной доли низкотемпературного компонента в паровой фазе Y^* определяется при переменных

значениях X по уравнению равновесия пар – жидкость, аналогичному уравнению (2):

$$Y^* = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 + b_3 X^3. \quad (7)$$

Значение величины $Y_k = Y$, рассчитанной при $h = H$, соответствует составу пара, поступающего с насадки на дефлегматор. В приближении полной конденсации пара в дефлегматоре состав конденсата (флегма и дистиллят) имеет показатель состава $X_d = Y_k$. Уравнение материального баланса для всей колонны позволяет уточнить состав кубовой жидкости (найти расчетное значение) X_w^p :

$$X_w^p = (FX_f - DX_d) / W, \quad (8)$$

где X_f – содержание ДЭА в питании, кмоль/кмоль;

D – расход дистиллята, кмоль/ч.

Для уточнения значения величины X_w , принятой в качестве начального приближения, используется улучшенная итерационная процедура с инерционным множителем $\mu = 0,01 - 0,05$:

$$X_w = X_w + \mu(X_w^p - X_w). \quad (9)$$

Если погрешность итерационного расчета не соответствует допустимой погрешности ε ,

$$Abs|X_w^p - X_w| > \varepsilon,$$

то итерационный расчет повторяется начиная с расчета по уравнению (2). После достижения допустимой погрешности итерационный расчет завершается. Уравнения (1) – (9) и порядок их применения (моделирующий алгоритм) представляют собой математическую модель процесса ректификации, реализованного в насадочной колонне. Эта модель при наличии данных о значениях неуправляемых технологических параметров F и X_f , а также данных о значениях управляющих воздействий L и G позволяет определить значения выходных технологических параметров процесса D , W , X_w и X_d .

Блок-схема модели процесса ректификации представлена на рис. 2. Порядок применения уравнений на схеме при расчете математической модели представлен снизу вверх.

Для практического использования математической модели процесса ректификации с целью управления им необходимо определить ее параметры. К таким параметрам относится объемный коэффициент массопередачи K_{OMP} , используемый в уравнениях (4), (5) и (6). Кроме того, ввиду отсутствия данных по равновесию системы пар – жидкость компонентов ДЭА и ТЭА коэффициенты уравнений (2) и (7) (одинаковые по величине для обоих уравнений) также являются неизвестными параметрами математической модели процесса ректификационного разделения бинарной смеси ДЭА – ТЭА. Общее количество параметров рассматриваемой модели, подлежащих определению, составляет пять.

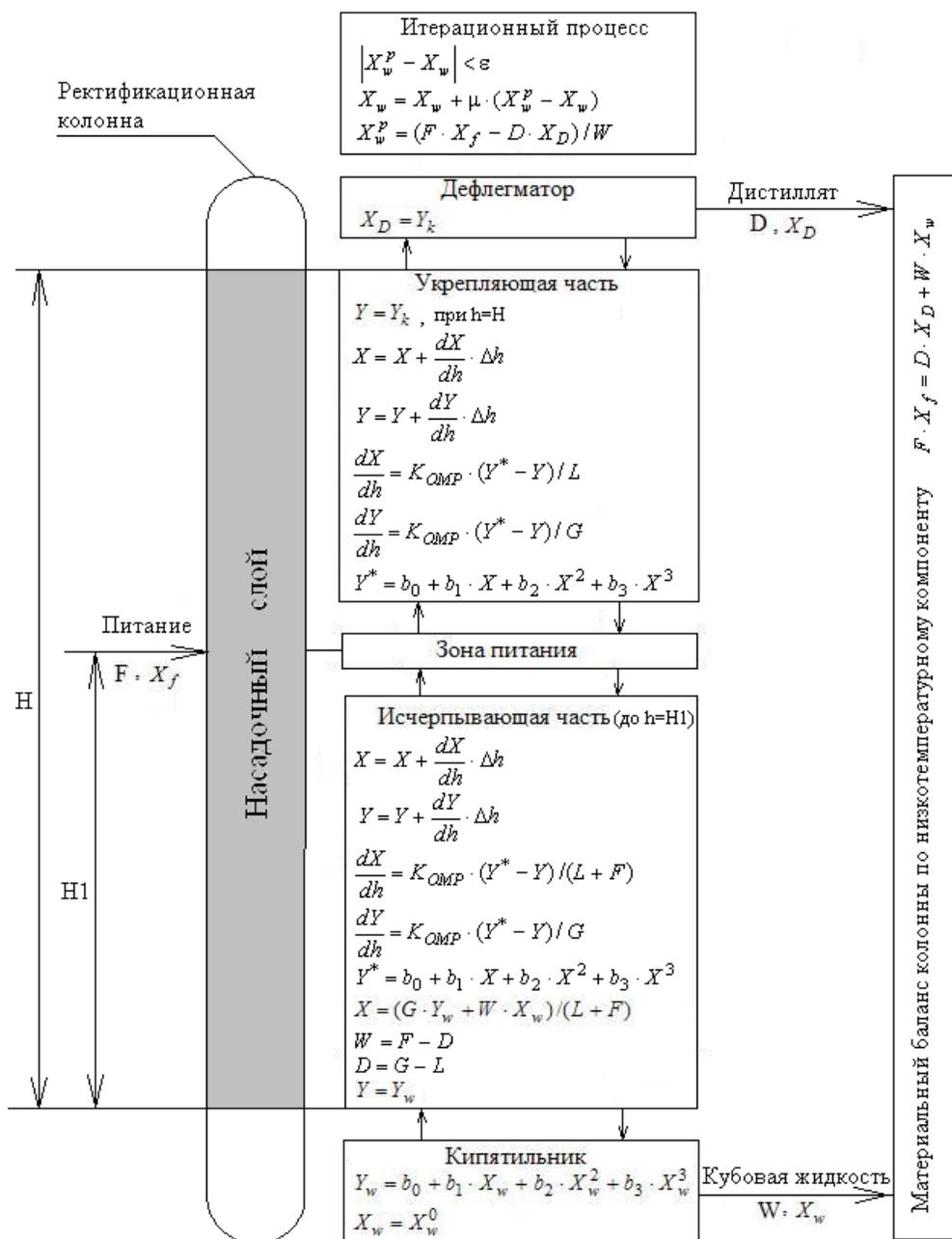


Рис. 2. Блок-схема модели процесса ректификации этаноламинов

Наличие математической модели, включающей пять неизвестных параметров, позволяет определить эти параметры с использованием опытных данных по промышленной эксплуатации процесса ректификации смеси ДЭА и ТЭА при наличии данных о работе колонны в различных режимах (не менее пяти), отличающихся значениями входных технологических параметров. Комплект опытных данных должен включать значения всех входных и выходных технологических параметров работы ректификационной колонны.

Опытные данные промышленной эксплуатации ректификационной колонны для определения параметров ее модели

F, расход питания Кмоль/ч	X _г , содержание ДЭА в питании Мол. доля	G, расход пара Кмоль/ч	L, расход флегмы Кмоль/ч	D, расход дистиллята Кмоль/ч	W, расход куб. жидкости Кмоль/ч	X _в , содержание ДЭА в кубе Мол. доля	X _д , содерж. ДЭА в дистилляте Мол. доля
16,01646	0,642768	18,04524	9,022622	9,022622	7,273639	0,215151	0,998535
16,03982	0,631353	17,54739	8,773696	8,773696	7,529917	0,216393	0,998535
13,83757	0,587692	13,5104	6,7552	6,7552	7,279471	0,217571	0,998534
17,23889	0,691288	21,5811	10,79055	10,79055	6,792929	0,21996	0,997802
15,28771	0,63118	16,64273	8,321365	8,321365	7,235554	0,222375	0,998535
15,92942	0,645355	17,88931	8,944653	8,944653	7,270948	0,224788	0,998535
15,94018	0,649883	17,83166	8,91583	8,91583	7,307031	0,237967	0,998535
15,06637	0,64296	15,88748	7,943739	7,943739	7,375699	0,27221	0,998535
15,6479	0,644405	17,12503	8,562513	8,562513	7,354614	0,245088	0,998535
14,49294	0,683005	17,54724	8,773621	8,773621	6,01203	0,237914	0,998535
15,2008	0,65375	17,16037	8,580186	8,580186	6,90133	0,239125	0,998535
14,87962	0,65429	16,93835	8,469175	8,469175	6,692288	0,233153	0,998535

Таблица 2

Данные промышленной эксплуатации колонны ректификации для тестирования адекватности ее модели

F, расход питания Кмоль/ч	X _г , содерж. ДЭА в питании Мол. доля	G, расход пара Кмоль/ч	L, расход флегмы Кмоль/ч	D, расход дистиллята Кмоль/ч	Опытные данные		Расчет по модели		
					W, расход куб. жидкости Кмоль/ч	X _в , содерж. ДЭА в кубе Мол. доля	X _в , содерж. ДЭА в кубе Мол. доля	X _д , содерж. ДЭА в дистилляте Мол. доля	
16,846	0,62765	18,176	9,0888	9,0888	7,758	0,2168	0,9984	0,2083	0,9931
15,4428	0,58357	14,592	7,2958	7,2958	8,147	0,2236	0,9972	0,2294	0,9992
15,4315	0,67234	17,237	8,6185	8,6185	6,813	0,2483	0,9985	0,2372	0,9946
16,2282	0,64172	17,732	8,8662	8,8662	7,362	0,2217	0,9969	0,2133	0,9928
14,3979	0,65426	15,040	7,5199	7,5199	6,878	0,2615	0,9976	0,2736	0,9965

В данной работе для определения параметров модели собрана информация о двенадцати режимах функционирования ректификационной колонны (обучающая информация), разделяющей смесь ДЭА и ТЭА (табл. 1). Кроме обучающей информации здесь приводится информация еще о пяти режимах работы этой колонны для тестирования адекватности модели при найденных значениях ее параметров. Данная информация представлена в табл. 2, там же приводятся данные расчета показателей состава выходных потоков X_w и X_d , выполненного с использованием модели колонны. Для снижения погрешности опытных данных, представленных в табл. 1 и 2, выполнялся предварительный отбор таких данных, по которым соблюдался материальный баланс по расходам компонентов с погрешностью не более 1 % от величины расхода.

Экспериментальные данные, приведенные в табл. 1 и 2, после получения на производстве этаноламинов были предварительно преобразованы путем изменения размерности величин так, чтобы расходы потоков были выражены в размерности Кмоль/час и все показатели состава потоков – в мольных долях низкотемпературного компонента диэтаноламина. Мольная доля высокотемпературного компонента в соответствующем потоке определяется вычитанием из единицы мольной доли низкотемпературного компонента.

Обработка опытных данных с целью определения параметров модели процесса ректификации проводилась следующим образом. Для каждого из двенадцати режимов работы ректификационной колонны по значениям входных технологических параметров рассчитывались с использованием математической модели процессные величины выходных технологических параметров X_d^p и X_w^p (расчетные значения), которые сравнивались с экспериментальными значениями этих параметров для данного режима работы колонны. Сумма квадратов расхождений между расчетными и экспериментальными значениями выходных параметров по всем опытам рассматривалась как критерий оптимальности при выборе значений параметров математической модели:

$$Q = \sum (X_d^p - X_d^э)^2 + \sum (X_w^p - X_w^э)^2.$$

Оптимальный выбор пяти параметров математической модели выполнялся путем минимизации критерия оптимальности Q методом Розенброка [3] с учетом ограничений на расчетные величины выходных технологических параметров. Эти ограничения относятся к расчетным величинам мольных долей низкотемпературного компонента в выходных потоках колонны и состоят в том, что они должны находиться в диапазоне от нуля до единицы:

$$0 < X_d^p < 1, \quad 0 < X_w^p < 1.$$

Результаты определения параметров модели для процесса ректификации в насадочной колонне представлены в табл. 3, там же даны стартовые значения (начало поиска) этих параметров и величины суммы квадратов расхождения между расчетными и опытными значениями выходных технологических параметров Q по всем опытам.

Уточнение значений параметров математической модели для процесса ректификации в результате применения метода наименьших квадратов оказалось существенным. Таким образом, поиск оптимальных значений параметров математической модели для процесса ректификации бинарной смеси ДЭА и ТЭА прошел успешно.

**Результаты определения параметров модели для процесса ректификации
в насадочной колонне**

Приближение	Параметры модели для процесса ректификации					Q
	K_{OMP}	b_0	b_1	b_2	b_3	
Стартовое	0,50781	0,1003	4,3613	-7,4548	4,1831	0,9479
Финальное	9,4597	0,6432	2,2979	-4,00032	2,104253	0,000582

Однако для установления адекватности составленной модели ректификации этаноламинов с найденными здесь значениями ее параметров необходимо сравнить дисперсии расхождения опытных и расчетных данных, полученных при обучении (см. табл. 3) и тестировании адекватности модели (см. табл. 2).

Дисперсия, достигнутая при обучении:

$$S_{ob}^2 = \frac{Q_{ob}}{f_{ob}},$$

где Q_{ob} – сумма квадратов расхождений, достигнутая при обучении;

f_{ob} – число степеней свободы дисперсии обучения.

Согласно данным табл. 3: $Q_{ob} = 5.82 \cdot 10^{-4}$.

Значение f_{ob} определяется количеством опытных данных в табл. 1, количеством выходных параметров (X_d и X_w), количеством параметров модели, найденных по данным табл. 1:

$$f_{ob} = n \cdot m - k,$$

где n – количество опытных данных ($n = 12$);

m – количество выходных параметров модели ($m = 2$);

k – количество неизвестных параметров модели ($k = 5$).

Таким образом, дисперсия, достигнутая при обучении, равна

$$S_{ob}^2 = \frac{5.82 \cdot 10^{-4}}{19} = 3.063 \cdot 10^{-5}.$$

Сумма квадратов расхождений между опытными и расчетными данными по величинам X_d и X_w , полученная при тестировании адекватности модели (согласно данным табл. 2): $Q_t = 5.114 \cdot 10^{-4}$.

Дисперсия, достигнутая при тестировании:

$$S_t^2 = \frac{5.114 \cdot 10^{-4}}{10} = 5.114 \cdot 10^{-5}.$$

Дисперсионное отношение:

$$F = \frac{5.114 \cdot 10^{-5}}{3.063 \cdot 10^{-5}} = 1.67.$$

Критическое значение дисперсионного отношения при числе степеней свободы числителя $f_t = 10$, числе степеней свободы знаменателя $f_{ob} = 19$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ равно $F_{кр} = 2,38$ [4].

Поскольку $F < F_{кр}$, можно считать, что тестирование модели показало ее

адекватность с вероятностью 0,95. Таким образом, представленная модель может быть использована для управления технологическим процессом ректификации этаноламинов в насадочной колонне. Результаты исследования переданы в ООО «Синтез Ока» (г. Дзержинск Нижегородской области) для дальнейшего внедрения на предприятии. Полученные алгоритмы могут быть применены и на других производственных площадках для проведения ректификации бинарных смесей в колоннах насадочного типа с целью получения двух целевых продуктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Песков Н.П. Система оптимального управления ректификацией этаноламинов с использованием математической модели процесса // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6. URL: www.science-education.ru/100-5076 (дата обращения: 27.07.2014).
2. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Академкнига, 2006. – 416 с.
3. Розенброк Х., Стори С. Вычислительные методы для инженеров-химиков. – М.: Мир, 1968. – 444 с.
4. Дерффель К. Статистика в аналитической химии. – М.: Мир, 1994. – 268 с.

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2015 г.

DEFINITION PARAMETERS OF MATHEMATICAL MODEL OF THE DISTILLATION PROCESS ETHANOLAMINE

N.P. Peskov, E.M. Moncharzh, A.A. Popov, N.O. Kuligina

Dzержинsky Polytechnic Institute (branch) of the federal state budgetary educational institution of higher professional education "Nizhny Novgorod State Technical University name R.E. Alexeyev"
49, Gaidar st., Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, 606026, Russian Federation

The problem of parametric identification of the mathematical model of the process of rectification of ethanolamines in the known structure of the object and the unknown parameters of the process of mass transfer in the system of diethanolamine-triethanolamine. A mathematical model of the process is an analytical description of the fundamental laws of mass transfer. The unknown parameters of the model proved to surround the mass transfer coefficient and the coefficients according to a formalized, describing the vapor-liquid equilibrium in the system, diethanolamine-triethanolamine. Directly measure these parameters is not possible. Therefore, it was proposed settlement and experimental identification method to estimate the parameters of the model based on minimizing the sum of squares of the differences between the calculated and experimental values of the output of process parameters on a series of experiments. Identification results of the experiment conducted on an industrial plant for the separation of a mixture of diethanolamine-triethanolamine packing type distillation column. Testing of the developed mathematical model and prove its value, and shows the future direction of its use in optimal control problems.

Keywords: *distillation, mathematical model, parameter identification, process control.*

*Nikolay P. Peskov, Senior Lecture.
Ernst M. Moncharzh (Ph.D (Chem.)), Associate Professor.
Anatoly A. Popov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Nataliya O. Kuligina, Senior Lecture.*