

## Краткие сообщения

УДК 681.3

### СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ И БАЗА ЗНАНИЙ ПРОЕКТА ОБУСТРОЙСТВА НЕФТЕГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Н.Г. Губанов, А.А. Кимлык, Н.А. Сизова*

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

*Предлагается системная модель проектов обустройства нефтегазовых месторождений. Предложена фреймовая модель построения базы знаний проектов обустройства нефтегазовых месторождений. База знаний основывается на уже реализованных проектах, что позволяет в полной мере использовать накопленный опыт проектно-изыскательских организаций. Подход к построению базы знаний основывается на теории компактности, позволяющей судить по определенным начальным данным о ходе последующей реализации проекта с учетом анализа всех реализованных до этого проектов. Предложенная модель позволяет принимать управленческие решения по новым проектам с точки зрения экономической целесообразности, наличия необходимых компетенций и ресурсов.*

**Ключевые слова:** *проекты обустройства нефтегазовых месторождений, база знаний, системная модель проекта, фрейм, теория компактности.*

Перспективы развития нефтегазового комплекса России, которые отражены в энергетической стратегии РФ до 2030 года [1], предполагают реализацию большого количества проектов, связанных как со строительством новых объектов добычи нефти и газа и обустройством месторождений, так и с реконструкцией существующих объектов в связи с высокой степенью их износа.

Важным участником любого проекта в нефтегазовом комплексе являются проектные организации, отвечающие за принятие основных технических решений. При этом специфика организации проектных работ в нефтегазовой отрасли обусловлена сложностью создаваемых объектов, которые сочетают в себе элементы промышленного строительства, технологии и инфраструктуры, территориальную распределенность и пространственную протяженность, высокую наукоемкость проектных решений. Все это приводит к комплексности решаемых задач. Особую важность в связи с этим приобретает способность проектных организаций к быстрому анализу новых проектов, предсказыванию возможности их реализации.

---

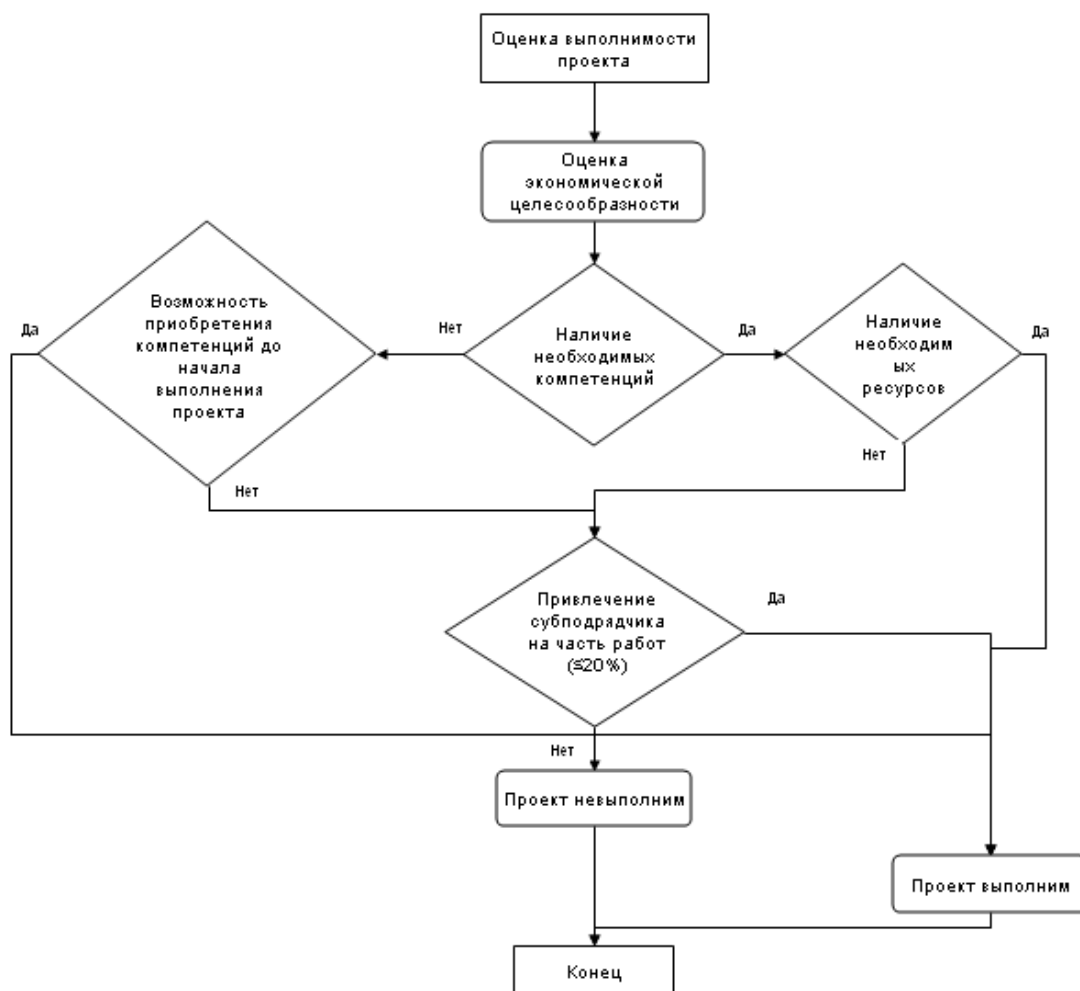
*Николай Геннадьевич Губанов (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами».*

*Александр Александрович Кимлык, аспирант.*

*Нина Алексеевна Сизова, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».*

### Алгоритм принятия решения при выборе проекта

Логично, что любой проект обустройства нефтегазового месторождения должен соотноситься в итоге с некоторой целью – конечным результатом. Прежде всего, конечно, речь идет об экономическом результате (получении прибыли), но возможен также и внеэкономический результат – например выстраивание долгосрочных партнерских отношений с перспективным заказчиком, выполнение обязательств перед головной организацией, следование долгосрочной стратегии предприятия и т. д. Комплексная оценка проекта обустройства нефтегазового месторождения позволит проводить анализ потенциальной целесообразности выполнения проекта; потенциальной возможности выполнения проекта; оценивать преимущества рассматриваемых проектов в сравнении с альтернативными проектами, ранжировать проекты с целью включения их в пул проектов предприятия.



Оценка выполнимости проекта

При принятии управленческих решений о принятии в разработку того или иного проекта по обустройству нефтяных и газовых месторождений, как правило, руководствуются следующими принципами:

- экономическая выгода от реализации проекта;
- соответствие интересам акционеров предприятия;
- соответствие потенциального проекта стратегическим целям предприятия;
- наличие соответствующих компетенций для выполнения проекта (иными словами, наличие профессиональных знаний, необходимых для проектирования обустройства нефтегазовых месторождений);
- наличие ресурсов для выполнения проекта;
- учет всех наиболее существенных последствий проекта, как экономических, так и внеэкономических [2];
- обеспечение условий сопоставимости показателей эффективности для различных проектов;
- учет влияния неопределенности и рисков, сопровождающих реализацию проекта;
- определение предпочтительности одного из ряда показателей эффективности при их совместном использовании для оценки проекта.

Рассмотрим комплексный алгоритм отбора проекта нефтегазовой отрасли; в нем оценка выполнимости проекта проводится в три этапа: сначала оценивается экономическая целесообразность проекта, на следующем этапе определяют наличие необходимых компетенций для выполнения проекта, затем наличие необходимых ресурсов для выполнения проекта (см. рисунок).

Данная задача является примером многокритериальной задачи принятия решения [3]. Одна из ключевых сложностей анализа многокритериальных задач – эффект несравнимости исходов. Несравнимость исходов является в некотором смысле формой неопределенности, которая связана со стремлением лица, принимающего решение, «достичь противоречивых целей» и является т.н. ценностной неопределенностью [3].

Математическая модель многокритериальной задачи принятия решения может быть представлена в виде множества векторных оценок, содержащего полную информацию о полезности этого исхода для лица, принимающего решение [3].

### **Системная модель проекта нефтегазовой отрасли**

Используя общесистемный подход, представим систему оценки проекта обустройства нефтегазового месторождения в виде структуры, состоящей из системы управления СУ, объекта управления ОУ и среды. В нашем случае данная формализация представится в следующем виде:

$$S = \langle G, P, L \rangle, \quad (1)$$

где  $G$  – система управления, представленная руководством проектной организации, которое осуществляет поддержку реализации проектов в организации и выбор этих проектов;

$$P^{oil} = \{p_1^{oil}, p_2^{oil}, \dots, p_n^{oil}\} = \bigcup_{i=1}^n P_i^{oil}, \quad (2)$$

где  $P^{oil}$  – множество проектов  $p_i^{oil}$  по обустройству нефтегазовых месторождений.

Система управления характеризуется совокупностью целей  $S$  и управляющих воздействий  $U$  :

$$G = C \cup U. \quad (3)$$

Управляющие воздействия осуществляются принятием решений по заданному проекту на различных этапах оценки: этапе оценки экономической целесообразности, этапе оценки наличия компетенций, этапе оценки наличия ресурсов, этапе оценки возможности привлечения субподрядной организации [4].

### **База знаний проекта нефтегазовой отрасли**

Объектом управления в данном случае является проект обустройства нефтегазового месторождения  $P^{oil}$ .

Стоит отметить, что создание математической модели достаточно затруднительно из-за существования множества неопределенных параметров, а также сложных взаимосвязей между ними.

Имеет смысл для принятия решений по новым проектам воспользоваться накопленным опытом и построить прецедентную модель на основе накопленных данных о многочисленных реализованных проектах и сформировать тем самым базу знаний проектов обустройства нефтегазовых месторождений. Знаниями в данном случае являются нетривиальные практически полезные и доступные для интерпретации сведения, необходимые для принятия решений в проектировании объектов нефтегазовых месторождений, заключающиеся в определенных закономерностях и систематических взаимосвязях между переменными, которые затем можно применить для исследования новых совокупностей данных [5].

Данный подход основывается на гипотезе компактности, состоящей в том, что реализации одного и того же образа обычно отражаются в признаковом пространстве в геометрически близкие точки, образуя компактные сгустки [4]. Если положить, что информативные признаки образов близки, то и целевые признаки, указывающие имя образа, тоже будут близки. Данная гипотеза равноценна предположению о наличии закономерной связи между признаками. Необходимо определенными методами сформировать базу знаний, содержащую информацию о закономерностях развития проектов обустройства нефтегазовых месторождений [7].

Базу знаний будем рассматривать как фрейм

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g) = \bigcup_{i=1}^g Z_i, \quad (4)$$

где  $Z_i$  – знания  $i$ -го проекта по обустройству нефтегазовых месторождений:

$$Z_i = \left\{ \left( \langle Z_i^o \rangle, Y \right), \left( \langle Z_i^n \rangle, T \right), \left( \langle Z_i^p \rangle, J \right) \right\}, \quad (5)$$

где  $Z_i^o$  – имя фрейма ⟨знания проекта по обустройству нефтегазовых месторождений на этапе основных технических решений⟩;

$Z_i^n$  – имя фрейма ⟨знания проекта по обустройству нефтегазовых месторождений на этапе разработки проектной документации⟩;

$Z_i^p$  – имя фрейма ⟨знания проекта по обустройству нефтегазовых месторождений на этапе разработки рабочей документации⟩;

⟨ $Y$ ⟩ – имя слота = ⟨параметры проекта по обустройству нефтегазовых месторождений на этапе основных технических решений⟩;

⟨ $T$ ⟩ – имя слота = ⟨параметры проекта по обустройству нефтегазовых месторождений на этапе разработки проектной документации⟩;

$\langle J \rangle$  – имя слота =⟨параметры проекта по обустройству нефтегазовых месторождений на этапе разработки рабочей документации⟩.

Рассмотрим более подробно эти массивы:

$$Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_l\} = \bigcup_{j=1}^l Y_j = \bigcup_{i=1}^u \{ \langle y_{ij} \rangle, \langle y_{ij} \rangle \}, \quad (6)$$

где  $Y_j$  –  $j$ -е знание этапа разработки основных технических решений проекта обустройства нефтегазовых месторождений;

$\langle y_{ij} \rangle$  – имя слота ⟨ $i$ -я характеристика знания проекта обустройства нефтегазовых месторождений⟩;

$y_{ij}$  – заполнитель слота.

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_k\} = \bigcup_{j=1}^k T_j = \bigcup_{i=1}^u \{ \langle t_{ij} \rangle, \langle t_{ij} \rangle \}, \quad (7)$$

где  $T_j$  –  $j$ -е знание этапа разработки проектной документации проекта обустройства нефтегазовых месторождений;

$\langle t_{ij} \rangle$  – имя слота ⟨ $i$ -ая характеристика знания проекта обустройства нефтегазовых месторождений⟩;

$t_{ij}$  – заполнитель слота.

$$J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\} = \bigcup_{j=1}^n J_j = \bigcup_{i=1}^n \{ \langle j_{im} \rangle, \langle j_{im} \rangle \}, \quad (8)$$

где  $J_m$  –  $m$ -е знание этапа разработки рабочей документации проекта обустройства нефтегазовых месторождений;

$\langle j_{im} \rangle$  – имя слота ⟨ $i$ -ая характеристика знания проекта обустройства нефтегазовых месторождений⟩;

$j_{im}$  – заполнитель слота.

Таким образом, имеем сформированную базу знаний проектов обустройства нефтегазовых месторождений на основе фреймовой модели [8].

### Заключение

Предложена системная модель комплексной оценки проекта обустройства нефтегазового месторождения. Рассмотрена модель базы знаний, основанная на фреймовой модели и позволяющая прогнозировать исход проекта на основе анализа базы уже реализованных проектов, что позволит принимать объективные управленческие решения по принятию в работу новых проектов обустройства нефтегазовых месторождений на основе наличия необходимых компетенций и ресурсов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (<http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostategy/>)
2. Орлов С.П., Чуваков А.В., Нечаев Д.А. Предпроектный анализ технологических схем при управлении инвестициями в региональной программе водоснабжения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – Вып. 3(31). – С. 244-247.
3. Ример М.И. Экономическая оценка инвестиций: Учеб. пособие / Ример М.И., Касатов А.Д., 128

- Матиенко Н.Н. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара: СГЭА, 2003. – 452 с.
4. Орлов С.П., Леднев А.М., Иващенко А.В. Применение модели P2P аутсорсинга в задачах управления проектами на предприятии нефтегазовой отрасли // Вестник Волжского университета им. Татищева. – 2013. – № 5 (21). – С. 5-10.
  5. Губанов Н.Г. Методы классификации знаний технических проектов // Мат-лы III Междунар. науч.-практ. конф. «Ашировские чтения». – Самара, СамГТУ, 2006. – С. 177-179.
  6. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – М.: Высшая школа, 1999.
  7. Губанов Н.Г. Метод формирования баз знаний поддержки жизненного цикла сложных технических объектов // Труды пятой Всероссийской межвузовской научно-практической конф. «Компьютерные технологии в науке, практике, образовании». – Самара, СамГТУ, 2006. – С. 83-86.
  8. Арсеньев Ю.Н. и др. Принятие решений. Интегрированные интеллектуальные системы: Учеб. пособие / Арсеньев Ю.Н., Шелобаев С.И., Давыдова Т.Ю. – УМО. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 270 с.

*Статья поступила в редакцию 6 октября 2015 г.*

## **A SYSTEM MODEL AND KNOWLEDGE BASE OF AN OIL AND GAS FIELD DEVELOPMENT PROJECT**

***N.G. Gubanov, A.A. Kimlyk, N.A. Sizava***

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

*The paper describes a system model of oil and gas field development projects. A frame model for designing a knowledgebase of oil and gas field development projects is offered. The knowledge base is established on the completed projects and allows using the entire background and experience of design research institutes. The approach to knowledge-based designing is based on the compactness theorem. The theorem uses certain initial conditions and can predict the way of new project developing, taking into account all the completed projects. The offered model allows making decisions on new projects in terms of economic efficiency, necessary skills and resources availability.*

***Keywords:*** *oil and gas field development projects, knowledge base, project system model, frame, density theory.*

---

*Nikolay G. Gubanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Alexander Kimlyk, Postgraduate Student.  
Nina A. Sizova, Senior Lecture.*

УДК 620.197

**АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЙ МАГНИЕВЫХ ПРОТЕКТОРНЫХ СПЛАВОВ*****Н.Г. Кац, Д.В. Коноваленко, С.В. Васильев***Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрены вопросы применения магниевых сплавов в качестве протекторов. Представлены характеристики магниевых сплавов для защиты нефтяных резервуаров от коррозионного разрушения. Показан общий вид протекторов до установки их в резервуар и после эксплуатации в промышленных условиях. Представлены характеристики используемой подложки пассиватора. Приведены результаты испытания по определению характеристик покрытия. Даны рекомендации по определению материального исполнения протекторов, их типоразмеры и область применения в зависимости от способа хранения нефтепродукта. Сделаны выводы о применении пассиваторов для установки протекторной защиты.*

**Ключевые слова:** резервуар, протекторная защита, пассиватор, полимерное покрытие.

Метод электрохимической защиты изобретен и впервые применен в 1824 г. в Англии для защиты обшивки судов от коррозионного разрушения [1]. Принцип метода основан на том, что коррозионное разрушение прекращается, если к защищаемому металлу приложить постоянный электрический ток от внешнего источника постоянного тока.

Такой способ дорогостоящий и трудно применим в пожаро- и газоопасных средах. Гораздо проще в качестве защиты использовать способ контактной коррозии, при котором к защищаемому металлу подсоединяется более электроотрицательный металл (например, магний, цинк, алюминий и т. д.).

Любой металл структурно неоднороден, в результате чего образуются гальванические пары. При взаимодействии металла с раствором электролита гальванические пары замыкаются и происходит коррозионное разрушение, в результате которого более электроотрицательные участки (аноды) растворяются, так как с них стекает ток во внешнюю среду, а более электроположительные участки (катоды) поддерживают протекание этого процесса, так как ток втекает в них из внешней среды.

Механизм действия протекторной защиты [1, 2] заключается в превращении всей поверхности металла в общий неразрушающий катод, а анодом будет являться более электроотрицательный металл, подсоединенный к защищаемой конструкции, который часто называют «жертвенным анодом» или чаще протектором. Электрический ток в этом случае получается вследствие работы гальванической пары протектор – металл.

Протекторная защита реализуется совместно с применением различных

---

*Николай Григорьевич Кац (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».*

*Денис Владимирович Коноваленко, старший преподаватель кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».*

*Сергей Владимирович Васильев, ведущий инженер.*

стойких лакокрасочных покрытий, которые называют пассиваторами [3]. Лакокрасочное покрытие наносится в несколько слоев (обычно от трех до пяти), что обеспечивает снижение расхода протекторов и увеличивает срок их службы, равномерно распределяя защитный ток по поверхности конструкции с учетом неравномерности дефектов покрытия как при монтаже протекторов, так и при эксплуатации покрытия. Покрытие со временем может набухать, отслаиваться и становиться проницаемым. Вот почему для более эффективного применения протекторной защиты лучше всего между поверхностью протекторов и защищаемым металлом устанавливать прокладку, хотя протекторы могут обеспечить защиту металла и без лакокрасочного покрытия. В этом случае необходимо накладывать высокую плотность тока, т. е. увеличивать количество протекторов, что не всегда экономически эффективно. Кроме того, чрезмерное количество протекторов может привести к «перезащите», что связано с выделением водорода и, как следствие этого, изменением состава приэлектродного слоя, и ускорению коррозии защищаемого металла вследствие водородного охрупчивания и коррозионного растрескивания.

Наиболее эффективным зарекомендовало себя покрытие Tematar TFA фирмы «Тиккурила», Финляндия [4]. Были проведены испытания на стальных пластинах размером 150×70×3 мм с покрытием толщиной от 275 до 370 мкм. Определялись защитные и физико-механические характеристики свойств покрытия.

Образцы выдерживались в 3%-м растворе *NaCl* при температуре 20, 40 и 60 °С и в нефти при температуре 60 °С в течение 1000 часов.

После испытания методом Х-образового надреза адгезионная прочность оценивается не ниже 3-го балла, а методом отрыва – не ниже 4-го балла, причем адгезионный отрыв – 5–10 %, межслоевой – 30–50 % и когезионный – 50–90 %. Для образцов наблюдалось снижение относительного удлинения при разрыве не более чем на 30 %. Состояние металла под покрытием после выдержки в указанных средах остается без изменения, коррозия отсутствует.



Рис. 1. Общий вид протектора ПРМ-20 до эксплуатации

В качестве протекторов можно использовать чистый цинк, который растворяется неравномерно из-за крупнозернистой дендритной структуры, чистый алюминий, который покрывается плотной оксидной пленкой, чистый магний, который имеет высокую скорость собственной коррозии. Вот почему для прида-



ния протекторам необходимых эксплуатационных свойств в их состав вводят легирующие элементы в различных процентных соотношениях (см. таблицу).

Внешний вид протектора магниевого резервуарного массой 20 кг (ПМР-20) представлен на рис. 1.

Такие протекторы используются для защиты днища и первого пояса резервуара для хранения нефти, когда подтоварная вода скапливается внизу на высоте 1–2 м. Однако использование протектора ПМР-20 целесообразно только при содержании солей в дренажной воде более 0,3 %, в противном случае коррозия настолько низкая, что не вызывает серьезных разрушений поверхности металла, и тогда применение протекторов нецелесообразно [5, 6]. Область эксплуатации таких протекторов определяется *pH* среды, равной 9,5–10,5.

#### Химический состав магниевого протектора ПМР-20

<i>Mg</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>Ti</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>
Основа	0,006	0,0024	0,017	5,7	0,001	0,23	2,7	0,0013
Основа	0,008	0,0008	0,008	5,8	0,001	0,17	2,5	0,0017

На рис. 2 представлен общий вид протектора ПМР-20 после пяти лет эксплуатации в среде с содержанием солей более 0,3 %.



Рис. 2. Общий вид протектора после пяти лет эксплуатации

Как видно, после указанного срока службы внешний вид протектора резко изменился (см. рис. 1, рис. 2). На его поверхности образовались элементы оксидных отложений – по-видимому, это оксиды магния. Хотя поверхность (см. рис. 2) покрыта не только отложениями белого цвета, похожими на оксиды магния, но и более темными элементами – возможно, это остатки нефтяных продуктов.

Характер разрушения не такой, как это описано в научно-технической литературе. Видно, что протектор растворяется не в верхней части в месте его утоньшения, а в нижней части (рис. 3), там, где было нанесено три слоя покрытия. По-видимому, необходимо либо увеличить количество слоев покрытия, либо дополнительно изолировать протектор от металла при помощи, например, паронитовой прокладки толщиной 3–4 мм.



Рис. 3. Принцип растворения протектора ПРМ-20

### **Выводы**

1. Покрытие Tematar TFA может успешно использоваться как пассиватор при установке протекторов в резервуарах.

2. Для повышения эффективности протекторной защиты необходимо использовать большое количество слоев лакокрасочного покрытия, хотя бы в месте установки протекторов, или дополнительно изолировать протектор от защищаемой конструкции.

3. Необходимо более подробно оценивать образования отложений после эксплуатации протекторов, что поможет повысить срок их эксплуатации.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Кац Н.Г.* Химическое сопротивление материалов и защита оборудования нефтегазопереработки от коррозии: Учеб. пособие / Н.Г. Кац, В.П. Стариков, С.Н. Парфенова. – М.: Машиностроение, 2011. – 436 с.
2. Инструкция по протекторной защите резервуаров РВС от коррозии. Уфа-Бугульма // РД 39-0147585-93. – 1993. – 38 с.
3. Руководство для подготовки инспекторов по визуальному и измерительному контролю качества окрасочных работ. – Екатеринбург: Оригами, 2009. – 202 с.
4. Заключение по испытанию покрытия Tematar TFA фирмы «Тиккурила», Финляндия. ООО «НИИ по строительству и эксплуатации объектов ТЭК», ООО «Институт ВНИИСТ», 2009.
5. *Кац Н.Г.* Оценка работоспособности полимерных и лакокрасочных покрытий // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 2 (46). – С. 180-183.
6. *Коньгин С.Б., Коноваленко Д.В., Кац Н.Г.* Модель распределения потенциала в резервуаре с протектором // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1 (45). – С. 185-188.

*Статья поступила в редакцию 5 октября 2015 г.*

## THE ANALYSIS OF THE MAGNESIUM PROTECTOR ALLOYS DESTRUCTION

*N.G. Kats, D.V. Konovalenko, S.V. Vasilyev*

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

*The paper deals with using magnesium alloys as protectors. The characteristics of the magnesium alloys used for tank corrosion protection are provided. The general views of protectors before installing them into the tank and after utilization are presented. The characteristics of the used passivator base are offered. The results of the coating characteristics determination testing are shown. The paper also gives recommendations on the determination of the tank protector materials, their dimensions and their usage sphere depending on the oil storage method. The authors come to the conclusions about using passivators for corrosion protection.*

**Keywords:** *reservoir, cathodes protection, secondary raw alloys.*

---

*Nikolay G. Kats (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Denis V. Konovalenko, Senior Lecture.  
Sergey V. Vasilyev, Leading Engineer.*

УДК 544.015

## МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛИ ОТГОНА ПРИ РАСЧЕТЕ ГАЗОЖИДКОСТНОГО РАВНОВЕСИЯ

**С.Б. Коньгин**

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

*Рассмотрены вопросы модификации алгоритма для определения доли отгона при расчете газожидкостного равновесия. Выявлены недостатки традиционного алгоритма расчета доли отгона. Предложены способы исправления указанных недостатков, которые легли в основу модифицированного алгоритма. Приведены схема и описание модифицированного алгоритма. Проведено тестирование работы нового алгоритма для различных значений компонентных составов, констант фазового равновесия и погрешностей расчета. В результате тестирования показано, что алгоритм решает поставленную задачу с требуемой точностью за 7–10 итераций, что вполне приемлемо для технических расчетов. Количество комбинаций компонентного состава и констант фазового равновесия, требующих большего числа итераций, составляет порядка 3 %.*

**Ключевые слова:** алгоритм расчета, доля отгона, константа фазового равновесия.

Задача определения доли отгона является одним из основных этапов расчета газожидкостных равновесий [1]. В своей классической постановке задача заключается в определении мольной доли газа  $e$  при заданных значениях компонентного состава смеси  $z_i$  и констант фазового равновесия  $k_i$  ( $i$  – номер компонента). При этом на единичном интервале  $e = [0; 1]$  решается уравнение

$$f(e) = \sum_i y_i - \sum_i x_i = \sum_i \frac{(k_i - 1)z_i}{1 + e(k_i - 1)} = 0, \quad (1)$$

где  $y_i, x_i$  – мольные составы пара и жидкости соответственно.

Уравнение (1) обычно предлагается решать с помощью алгоритма Ньютона – Рафсона, причем в качестве начального приближения рекомендуется значение  $e = 1$  [1].

Однако при практической реализации указанного метода расчета на ЭВМ возникают следующие проблемы:

- из-за ограниченной точности чисел с плавающей точкой величина  $k_i - 1$  некорректно вычисляется при очень малых значениях  $k_i$  и при значениях  $k_i$ , очень близких к единице;

- при наличии очень малых констант фазового равновесия  $k_i$  определение доли отгона алгоритмом Ньютона – Рафсона при начальном значении  $e = 1$  требует большого количества итераций.

Указанные проблемы приводят к тому, что при проведении значительного количества расчетов для многокомпонентных смесей в широком диапазоне температур могут возникнуть дополнительные погрешности определения доли отгона или потребоваться значительные временные затраты. В этой связи необходи-

---

Сергей Борисович Коньгин (д.т.н.), заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

ма модификация алгоритма, которая гарантированно обеспечивает небольшое число итераций при самых различных значениях  $z_i$  и  $k_i$ .

Для устранения первой проблемы предлагается модифицировать уравнение (1) следующим образом:

$$f(e) = \sum_i z_i \left( \frac{k_i}{1 - e + ek_i} - \frac{1}{1 - e + ek_i} \right) = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) тождественно уравнению (1), но вычисления на ЭВМ производятся в другом порядке, что снижает погрешность расчетов.

Для решения второй проблемы предлагается первые несколько итераций делать с помощью метода половинного деления. Это позволит исключить попадание алгоритма Ньютона – Рафсона в область вертикальной асимптоты и, как следствие, большого числа итераций.

С учетом вышеизложенного был разработан модифицированный алгоритм определения доли отгона (см. рисунок).

В начале расчета проверяются условия существования чистой жидкости и чистого газа. При их выполнении доли отгона устанавливаются равными соответственно  $e = 0$  и  $e = 1$  и расчет заканчивается. Затем устанавливаются минимальная  $e_L = 0$  и максимальная  $e_R = 1$  границы доли отгона для половинного деления, а также вычисляются значения функции  $f(e)$  в этих точках.

Первые итерации (в ходе исследований было определено, что достаточно четырех) выполняются методом половинного деления, а затем происходит переход к алгоритму Ньютона – Рафсона. Специфической особенностью является то, что за начальное приближение здесь берется результат метода половинного деления и при определенных значениях  $z_i$  и  $k_i$  возможен выход за пределы интервала  $e = [0; 1]$ . Для исключения этого предусмотрена следующая коррекция значений:

$$e^{n+1} = 0 \text{ при } e^{n+1} < 0 \text{ и } e^{n+1} = 1 \text{ при } e^{n+1} > 1. \quad (3)$$

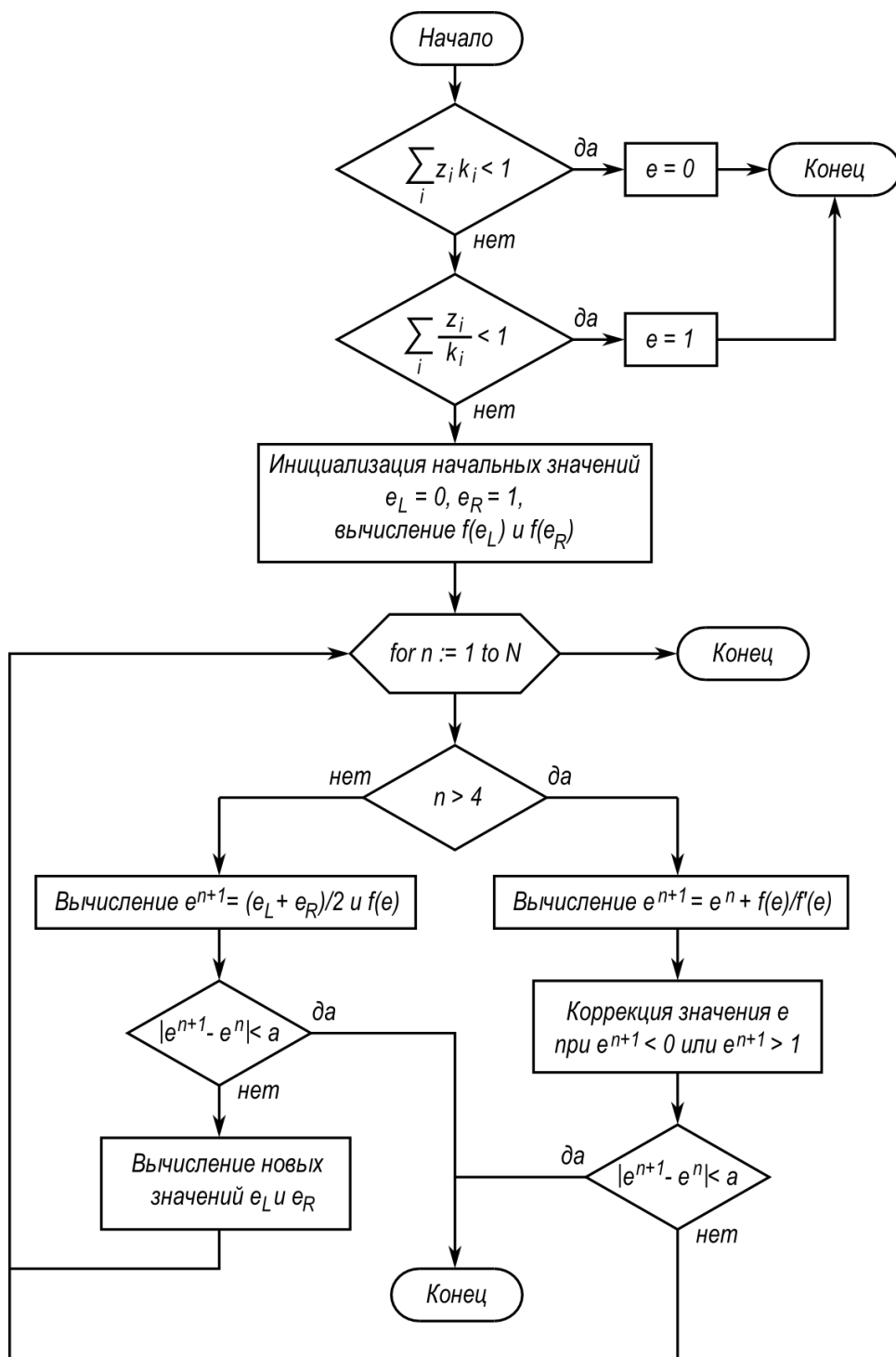
Решение считается найденным, если значения доли отгона на текущей и предыдущей итерациях не превышают величину погрешности  $a$ :

$$\left| e^{n+1} - e^n \right| < a. \quad (4)$$

Если решение не найдено за максимальное количество итераций  $N$ , то алгоритм выдает ошибку.

Для апробации данного алгоритма была проведена серия вычислительных экспериментов с различными значениями  $z_i$  и  $k_i$ . Тестирование проводилось на системе из четырех компонентов для трех различных значений погрешности  $a$ . Каждый тест состоял из 10 000 вычислений доли отгона. При каждом вычислении доли отгона составы  $z_i$  создавались с помощью равномерно распределенного генератора случайных чисел  $r_i$  с последующей нормировкой:

$$z_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^4 r_i}. \quad (5)$$



Модифицированный алгоритм расчета доли отгона

## Результаты тестирования модифицированного алгоритма

Параметр	Значение		
	при $a = 10^{-8}$	при $a = 10^{-10}$	при $a = 10^{-12}$
Число итераций:			
6	0,1 %	0,0 %	0,0 %
7	10,6 %	3,7 %	1,2 %
8	42,7 %	38,3 %	29,1 %
9	12,5 %	21,9 %	30,9 %
10	2,5 %	5,2 %	6,6 %
11 и более	2,3 %	2,3 %	3,0 %
Чистые газ или жидкость (0 итераций)	29,3 %	28,6 %	29,2 %
Ошибки	0 %	0 %	0 %
Максимальное число итераций	56	58	58

В свою очередь, константы фазового равновесия  $k_i$  также формировались с помощью случайных чисел  $R_i$  следующим образом:

$$k_i = A \exp(BR_i). \quad (6)$$

Здесь случайные числа  $R_i$  являлись аналогом температуры, а параметры  $A$  и  $B$  подбирались таким образом, чтобы константы фазового равновесия находились в пределах от  $10^{-16}$  до  $10^7$ .

Результаты тестирования сведены в таблицу. Из рассмотрения данных таблицы видно, что предлагаемый вариант алгоритма расчета доли отгона:

- обеспечивает сходимость в среднем за 7–10 итераций при значениях погрешностей, достаточных для проведения технических расчетов (в число итераций входят четыре итерации, выполняемые по методу половинного деления);
- допускает порядка 2–3 % вычислений с числом итераций более 10;
- обеспечивает определение чистых газа или жидкости;
- не приводит к появлению ошибок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коньгин С.Б., Крючков Д.А.* Моделирование и расчет процессов и аппаратов (МиР ПиА). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613176.
2. *Уэйлес С.* Фазовые равновесия в химической технологии. Т. 2. – М.: Мир, 1987. – 300 с.
3. *Гуревич Г.Р., Брусиловский А.И.* Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойства газоконденсатных смесей. – М.: Недра, 1984. – 264 с.
4. Термодинамика равновесия жидкость – пар / Под. ред. А.Г. Морачевского. – Л.: Химия, 1989. – 344 с.
5. *Коньгин С.Б.* Моделирование двумерных фазовых переходов в адсорбционных слоях // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 1(29). – С. 238-241.

*Статья поступила в редакцию 1 октября 2015 г.*

## **ALGORITHM MODIFICATION FOR VAPOR FRACTION CALCULATION AT GAS-LIQUID EQUILIBRIUM MODELLING**

***S.B. Konygin***

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

*This paper is devoted to modification of vapor fraction calculation algorithm used in gas-liquid equilibrium solving. Drawbacks of traditional calculation algorithm are revealed and solutions are offered. Scheme and description of modified algorithm are presented. A testing of new algorithm reveals that solution reaches in 7-10 iterations. It is acceptably for technical calculations. A part of cases with more iterations amount to 3 %.*

***Keywords:*** calculation algorithm, vapor fraction, phase equilibrium constant.



УДК 620.9.001.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ СЕТЯМИ С МУЛЬТИАГЕНТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

**Ю.П. Кубарьков, И.С. Кулаев, И.Д. Кубарьков**

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

*Рассматриваются основы информационно-аналитической системы для разработки, анализа и моделирования интеллектуальных сетей и систем управления. Система состоит из среды графического моделирования, агентов для взаимодействия с системой управления, инструментов для мониторинга и визуализации данных для человека-оператора. Преимущество такого подхода в том, что система управления может быть протестирована и оптимизирована с окружающей средой моделирования и конечная модель в дальнейшем может использоваться в системе управления для того, чтобы прогнозировать поведение распределительной сети.*

**Ключевые слова:** моделирование режимов, мультиагенты, Smart Grid, распределительная сеть.

### **Введение**

Большинство современной электросетевой инфраструктуры было разработано и использовалось на протяжении десятилетий. Сети и инфраструктура управления росли и развивались в течение последних лет, что было обусловлено как совершенствованием технологий, так и расширением самих сетей. В результате существующая инфраструктура оказалась очень неоднородной по структуре и по технологии. В то же время объекты, используемые в энергосистемах, и способы управления меняются кардинально.

Многие собственники распределительных сетей внедряют альтернативные или возобновляемые источники энергии, которые все шире используются во всех сетях. Производственные мощности этих источников различаются в зависимости от погоды и спроса, тем самым обеспечивая дополнительную нагрузку на сеть.

Например, количество возобновляемых источников энергии в мире выросло с 4 % в 1996 г. до 20 % в 2014 г., из которых 8 % – энергии ветра и 3 % – солнечная энергия.

Таким образом, внедрение в производство энергии альтернативных источников изменяет нагрузку в распределительных сетях, которые работают в настоящее время.

В то же время все большее распространение получают интеллектуальные и совершенно новые типы потребителей, которые не только увеличивают общий спрос, но также делают существующие графики потребления устаревшими. Появление новых нагрузок приводит к необходимости реконструкции сетей, что, в свою очередь, требует частых и динамических изменений в топологии. В целом

---

*Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электрические станции».*

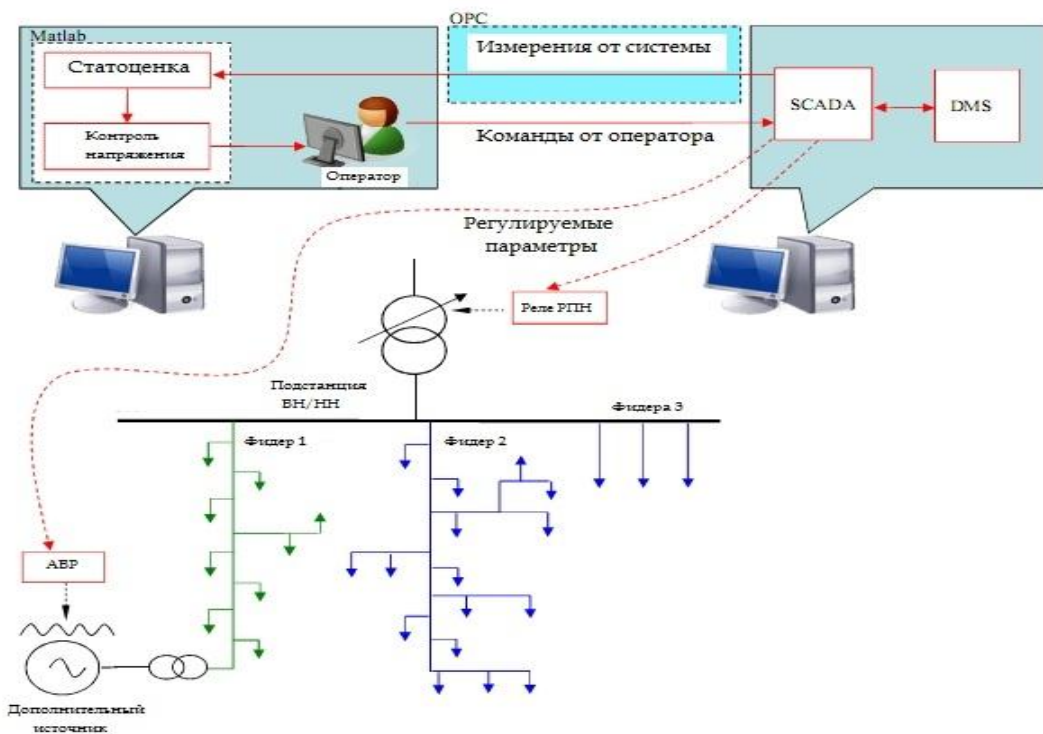
*Игорь Сергеевич Кулаев, студент.*

*Илья Дмитриевич Кубарьков, студент.*

технические требования к сети, а также сложность энергетического рынка резко возрастут в ближайшие годы.

Все эти изменения определяют новые проблемы как для работы оборудования сетей, так и для производителей, а также для программного обеспечения и диспетчерского персонала. Программное обеспечение должно поддерживать переход сетевой инфраструктуры к работе на новом оборудовании, а также учитывать изменения и динамические характеристики новых источников и потребителей.

Управление будущими электрическими сетями должно быть децентрализованным, способным действовать в рамках локальных сетей и в то же время координировать обмен потоками мощности между несколькими такими кластерами. Система должна иметь возможности автономно принимать решения при изменениях в сети и находиться под наблюдением человека-оператора. Кроме того, такая система должна обеспечивать поддержание жизненного цикла электрооборудования и функций управления, которые являются общим звеном в современных системах программного обеспечения, таких как дистанционное управление, управление обновлениями и изменениями во время работы. Установка и активация новых функций и рабочих подсистем важна для обеспечения таких показателей, как стабильность и отказоустойчивость.



Структура системы управления в сети с распределенной генерацией

Основой системы управления должна быть программная платформа на базе мультиагентов, которая позволяет обеспечить непрерывное развитие структуры сети. Она должна быть гибкой и обеспечивать основные атрибуты управления, такие как взаимодействие распределенных автономных компонентов, самовосстановление режима работы с возможностью добавления новых функций во вре-

мя выполнения [1]. Она должна быть в состоянии взаимодействовать с мульти-агентной моделью инфраструктуры для того, чтобы проводить оценку новых реализаций до внедрения элементов в реальной сети. Предварительные расчеты должны охватить сложные и многогранные взаимодействия элементов интеллектуальной сети, с которыми приходится иметь дело.

Такая система позволяет сократить циклы внедрения, что обеспечит быструю интеграцию новых функций управления, чтобы идти в ногу с развитием других умных компонентов сети.

### **Smart-моделирование сети и интеллектуальные системы управления**

Моделирование интеллектуальных сетей является сложной задачей. Как упоминалось ранее, наиболее важным моментом для Smart Grid является обеспечение силовых сетей информационными и коммуникационными технологиями. Это означает, что необходимо рассмотреть перетоки мощности, а также информационно-коммуникационные связи при моделировании. Для тренажеров это обычно реализуется с помощью механизмов создания специализированных учебных баз данных (БД). Чтобы синхронизировать модель с реальной БД, она должна быть в состоянии присоединиться к этой БД, что не всегда является возможным (см. рисунок).

### **Мультиагентная система управления**

Область управления электрической сетью с помощью мультиагентного подхода стала популярной среди исследователей с 2003 г., когда была описана система поддержки принятия решений на основе мультиагентов, которые анализируют состояние электрической сети и генерируют рекомендации для человека-оператора. В дальнейшем появились два подхода к управлению магистральными и распределительными сетями. Первый пытается минимизировать каскадные сбои с применением интеллектуальных стратегий отключения нагрузки. Второй пытается выполнить восстановление режима работы в местных распределительных сетях после аварий. Оба подхода описывают систему, которая управляет сетями низкого напряжения с высокой степенью готовности внедрения распределенной генерации.

### **Объединение мультиагентной системы (MAS) и Smart-моделей**

Типичные комбинации MAS и Smart-моделей строятся на основе моделирования условий, в которых агенты выполняют имитацию различных моделей [2]. Этот подход оптимален в условиях реализации при применении полезных параметров MAS (например, масштабируемость, автономия и т. д.) в ресурсоемких и сложных моделях. В данной работе представлен подход, который основан на несколько иной концепции. MAS не является основанием для моделирования режимов работы, но в автономной MAS проверяется механизм взаимодействия с окружающей средой.

Это позволяет агентам использовать различные модели коммуникации, такие как простые сообщения, пакет услуг или протоколов.

Задачей системы является создание гибкой и надежной системы управления для Smart-сети. В частности, она включает в себя:

- наблюдение и накопление информации о текущем состоянии сети;
- обнаружение сбоев и перенапряжений, в том числе прогнозов о поведении Smart-сети на основе общих потребительских профилей;

- управление и контроль инфраструктуры Smart-сети, предпочтительно после консультаций с человеком-оператором, но автономно, если это необходимо;
- обеспечение стабильности и отказоустойчивости, особенно в связи с задачами, основной целью которых является обработка взаимодействия между электро- и телекоммуникационными сетями в случае сбоя.

Предлагается использовать 5 типов агентов следующих видов: агент подстанции (АП – SA), агент шин (АШ – BA), агент фидера (АФ – FA), агент нагрузки (АН – LA) и агент генерирующего элемента (АГ – GA). В основном предлагаемая МАС использует децентрализованную структуру и агенты могут взаимодействовать только с соседними агентами. Связь между несмежными агентами выполняется посредством отправления сообщений через других промежуточных агентов. С помощью обмена информацией с соседними агентами каждый агент может динамично получать информацию о его ограниченном районе и балансировать спрос и поставку электроэнергии при помощи местной информации.

Этот подход позволяет системе работать на местном уровне. Например, в случае сценария деления сети на кластеры или потери связи с системным оператором местные агенты подстанции могут контролировать свои подсети самостоятельно и попытаться обеспечить запрос своих местных потребителей любыми имеющимися средствами. Учитывая текущую тенденцию по установке местных источников в виде солнечных и ветроэнергетических станций, такие сценарии возможны в будущем и должны быть обеспечены контролем со стороны инфраструктуры управления [3].

В более широком объеме подстанции (АП), которые отвечают за местные подсети, могут вести переговоры о текущих и ожидаемых нагрузках и либо предоставить избыточные мощности в другие подсети, либо удовлетворить их дефицит своими энергетическими возможностями.

В будущей работе необходимо определить набор подходящих оценочных функций различных приложений для оптимизации режимов работы электрической сети в условиях взаимодействия мультиагентов.

## **Выводы**

1. Управление будущими электрическими сетями должно быть децентрализованным, способным действовать в рамках локальных сетей.
2. Система должна иметь возможности автономно принимать решения при изменениях в сети и в то же время находиться под наблюдением человека-оператора.
3. Наиболее важным моментом для Smart Grid является обеспечение силовых сетей информационными и коммуникационными технологиями.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. V.M. Catterson, E.M. Davidson, and S.D.J. McArthur. Embedded intelligence for electrical network operation and control. IEEE Intelligent Systems, 26:38-45, 2011.
2. H. Lin, S. Sambamoorthy, S. Shukla, J. Thorp, and L. Mili. Power system and communication network co-simulation for smart grid applications. In Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES, pages 1-6, jan. 2011.
3. Z. Wang, R. Yang, and L. Wang. Intelligent multi-agent control for integrated building and micro-grid systems. In Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES, pages 1-7, jan. 2011.

*Статья поступила в редакцию 7 октября 2015 г.*

## THE SIMULATION OF A CONTROL SYSTEM OF MULTI-AGENT INTERACTION DISTRIBUTION GRIDS

*Yu.P. Kubarkov, I.S. Kulaev, I.D. Kubarkov*

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

*The paper covers the basics of a data-analysis system for the design, analysis, and simulation of intelligent networks and control systems. The system comprises a graphical modeling environment, agents for the communication with the control system, instruments for data monitoring and visualization for the operator. This approach has the advantage of the possibility of the control system being tested and made optimal according to the modeling environment, and the final model can then be used in the control system to predict the distribution network behavior.*

**Keywords:** *Simulation Mode, Multi-Agents, Smart Grid, Distribution Network.*

---

*Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Igor S. Kulaev, Student.  
Iliya D. Kubarkov, Student.*

УДК 681.5:621.315

## СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЕМ ПОЛИМЕРНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ЕЁ НАЛОЖЕНИИ НА ЭКСТРУЗИОННУЮ ЛИНИЮ<sup>1</sup>

**Ю.В. Митрошин**

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

*Разработана система оптимального программного управления охлаждением полимерной изоляции в водяных ваннах экструзионной линии с граничными управляющими воздействиями. В процессе изготовления проводных кабелей связи в условиях заданных ограничений система обеспечивает достижение требуемой точности приближения к заданному конечному распределению температуры изоляции в ванне минимальной длины.*

**Ключевые слова:** *наложение кабельной изоляции, ванны охлаждения, оптимальное управление.*

При наложении полимерной изоляции на экструзионных линиях в процессе производства проводных кабелей связи охлаждение изоляции осуществляется в нескольких водяных ваннах, имеющих общую длину порядка 15 метров. При этом температура охлаждения последовательно уменьшается от максимальной до температуры проточной воды. Охлаждение может быть закончено, когда температура изоляции во всём её сечении на выходе последней ванны не превышает  $45 \pm 5$  °С, что исключает деформацию изоляции при намотке кабельной жилы на приёмное устройство [1].

С учетом изменения типоразмеров изготавливаемых на линии кабелей и режимов работы технологического оборудования, таких как скорость изолирования, обороты шнека экструдера и других, постоянно возникает необходимость выбора режимов охлаждения накладываемой изоляции. Задача проектирования участка охлаждения экструзионных линий решается технологами эмпирически на основе существующего опыта.

Намного эффективнее следующий подход. На основе полученной математической модели объекта управления с распределёнными параметрами – температурного поля изолированной кабельной жилы на участке охлаждения [2] были разработаны алгоритм и система оптимального программного управления охлаждением полимерной кабельной изоляции при её наложении на экструзионной линии [3]. Задача оптимального управления решена в следующей постановке. Найдено оптимальное управление – пространственное распределение температуры охлаждающей среды, обеспечивающее в условиях имеющихся ограничений достижение требуемой точности приближения к заданному конечному распределению температуры охлаждаемой изоляции изолированной жилы по радиусу кабеля в ванне минимальной длины.

Система управления охлаждением накладываемой кабельной изоляции син-

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 15-08-04209-а)

Юрий Владимирович Митрошин, аспирант.

тезирована с учетом фазового ограничения на максимум радиального температурного градиента в изоляции, превышение которого приводит к возникновению в изоляции внутренних напряжений и её последующему растрескиванию [4].

При условии технической реализуемости алгоритма оптимального управления с учетом фазового ограничения на предельную величину температурного градиента в изоляции оптимальное управление охлаждением кабельной жилы для одно- и двухинтервального управления с граничными управляющими воздействиями имеет вид, приведенный на рис. 1.

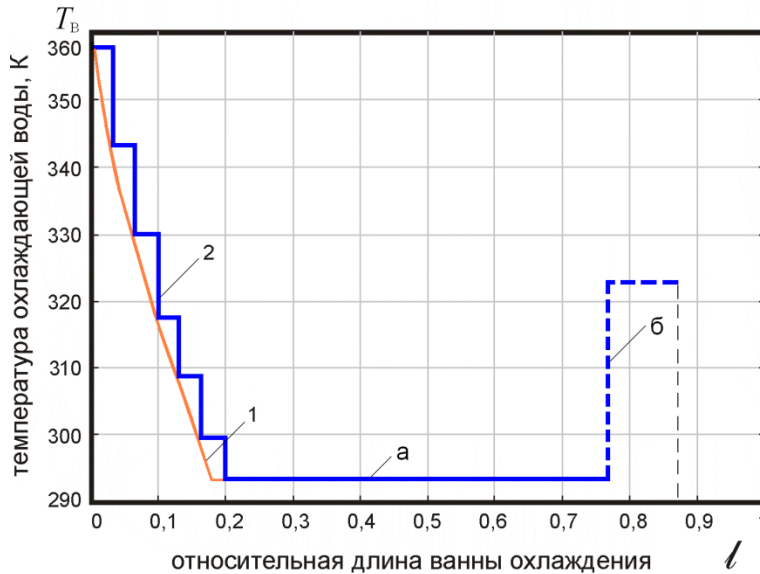


Рис. 1. Оптимальное (1) и технически реализуемое (2) программное управление охлаждением кабельной жилы с учетом фазовых ограничений для одно- (а) и двухинтервального (б) управления

Как видно из рис. 1, начальный участок оптимального охлаждения (кривая 1) является практически нереализуемым из-за технической невозможности обеспечить требуемое граничное управление.

По технико-экономическим соображениям для обеспечения фазового ограничения на начальном участке охлаждения и максимального приближения технически реализуемого алгоритма граничного управления к оптимальному весь участок водяного охлаждения выполнен в виде секционированных ванн длиной  $\Delta L = 0,5$  м, как показано на рис. 2. Секционирование ванн в конце участка водяного охлаждения вызвано необходимостью реализации двухинтервального управления (б). Температура воды в секционированных ваннах охлаждения устанавливается в соответствии с рассчитанным алгоритмом оптимального программного управления {кривая (а) на рис. 1} и контролируется погружными датчиками температуры MBT153 (компании Danfoss A/S), а температура изоляции на выходе ванн охлаждения – бесконтактным датчиком температуры TW2000 (компании IFM Electronic GmbH). Измерение диаметра изолированной жилы осуществляется бесконтактным датчиком диаметра LG1010 фирмы Beta.

Приведенное на рис. 1 программное управление охлаждением кабельной жилы с учетом фазовых ограничений с граничными управляющими воздействиями получено без учета усадки кабельной изоляции при её охлаждении. Поэтому для оценки корректности такого допущения необходимо оценить величину усадки.

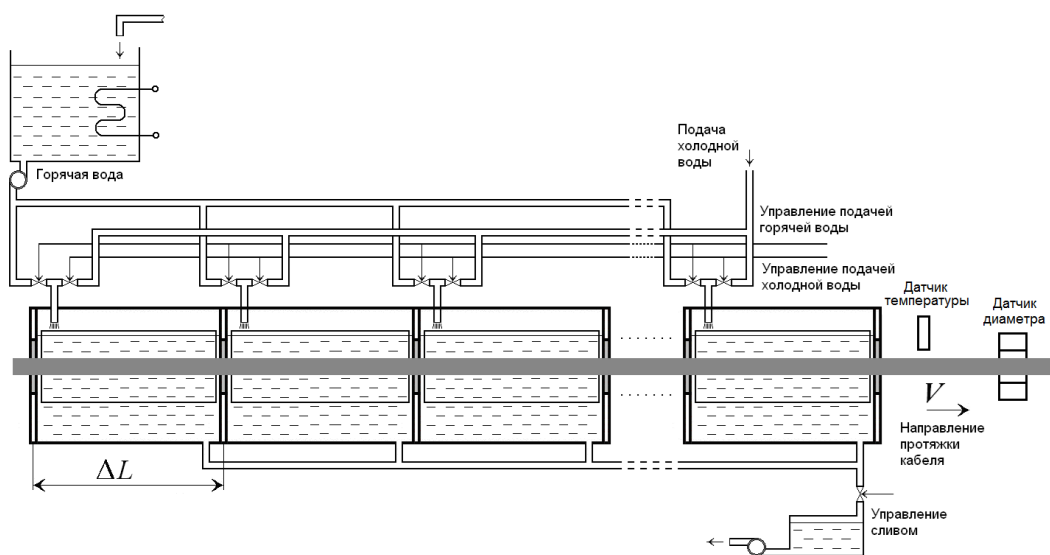


Рис. 2. Техническая реализация участка охлаждения

Это предлагается сделать следующим образом. Из закона сохранения массы наложенной кабельной изоляции можно легко получить выражение, связывающее диаметр изолированной жилы до участка охлаждения (после выхода из кабельной головки)  $D_{изГ}$  и диаметр жилы на полностью сформировавшейся изоляции (после охлаждающих ванн)  $D_{изВ}$ :

$$D_{изГ} = \sqrt{d^2 + \rho_B \cdot \frac{(D_{изВ}^2 - d^2)}{\rho_G}}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр медного проводника;  $\rho_G$  – плотность полимера при температуре его выхода из кабельной головки (160 °С);  $\rho_B$  – плотность полимера при температуре выхода из ванны охлаждения (45 °С).

Зависимость плотности применяемого для изолирования кабелей связи полиэтилена марки 153-01 от температуры приведена на рис. 3 [5].

Расчет производился для изолированной жилы диаметром  $D_{изВ} = 4$  мм с медным проводником диаметром  $d = 1,4$  мм. При этом плотность полимера на выходе из головки  $\rho_G = 810 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , а на выходе из ванны охлаждения  $\rho_B = 905 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

В соответствии с (1) получаем  $D_{изГ} = 4,2$  мм. Таким образом, величина усадки полимерной изоляции на участке охлаждения 15 метров составляет 0,2 мм, или 4,8 %.

Полученный результат позволяет подтвердить справедливость сделанного ранее допущения о незначительном влиянии усадки кабельной изоляции при её наложении на экструзионной линии на температурное поле в изоляции.

Предложенная конструкция участка охлаждения позволяет осуществлять быструю перенастройку системы при переходе на новую продукцию либо при значительной смене режимов работы оборудования.



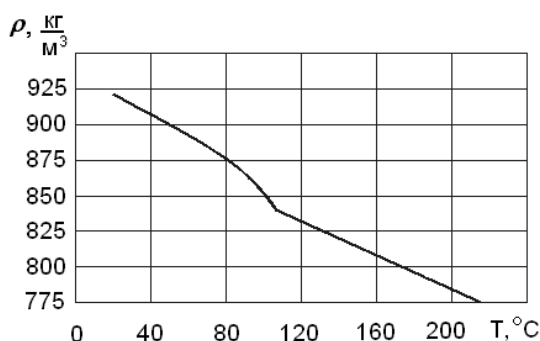


Рис. 3. Зависимость плотности полиэтилена марки 153-01 от температуры

Разработанная система оптимального программного управления охлаждением полимерной изоляции обеспечивает в процессе изготовления проводных кабелей связи в условиях заданных ограничений достижение требуемой точности приближения к заданному конечному распределению температуры изоляции в ванне минимальной длины.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зиннатуллин Р.Р., Труфанова Н.М., Шилинг А.А. Исследование процессов теплопереноса и фазовых превращений при охлаждении провода с полимерной изоляцией // V Минский международ. форум по тепло- и массообмену. Тезисы докладов и сообщений. Т. 2. 24-28 мая 2004 г. – Минск, 2004. – С. 130-131.
2. Митрошин В.Н. Структурное моделирование процесса охлаждения изолированной кабельной жилы при ее изготовлении на экструзионной линии // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2006. – Вып. 40. – С. 22-33.
3. Митрошин В.Н., Лойко А.Ю., Митрошин Ю.В. Система оптимального программного управления процессом охлаждения полимерной кабельной изоляции как объектом с распределенными параметрами // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2009. № 1(23). – С. 47-53.
4. Карякин Н.Г., Фурсов П.В. Расчет возможности образований воздушных включений в пластмассовой изоляции кабеля при охлаждении // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1977. – № 5. – С. 8-11.
5. Полиэтилен. Справочное руководство / Под ред. М.И. Гарбара. – Л.: Госхимиздат, 1955.

*Статья поступила в редакцию 10 октября 2015 г.*

## OPTIMAL COOLING SYSTEM OF POLYMER CABLE INSULATION AT EXTRUSION LINE

**Y.V. Mitroshin**

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

*The system of optimal programmed control of polymeric insulation cooling in extrusion line water baths with boundary control actions is developed. In a communication cables manufacturing process under specified restrictions the system provides required accuracy of final insulation temperature distribution in a bath of minimum length.*

**Keywords:** *cable insulation, cooling baths, optimal control.*

---

*Yuri V. Mitroshin, Postgraduate Student.*

УДК 622.276

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБ С ТРЕУГОЛЬНОЙ РЕЗЬБОЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

*В.Л. Папировский*

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

*Рассмотрены вопросы использования метода конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния резьбового соединения труб. Построена модель резьбового соединения обсадной трубы диаметром 168 мм с толщиной стенки 8 мм. В результате моделирования построена зависимость перемещения торца трубы от усилия растяжения. Проведено сравнение результатов с традиционным методом расчета усилия страгивания. Также построено распределение величины продольной силы по виткам резьбы. В результате показано, что при свинчивании труб с номинальным натягом из-за пластических деформаций соединение сохраняет свои свойства только при однократном свинчивании. Кроме того, установлено, что предельная несущая способность резьбового соединения выше, чем величина, рассчитанная по формуле Яковлева – Шумилова.*

**Ключевые слова:** обсадные трубы, соединение труб, страгивающая нагрузка.

При проектировании обсадных колонн нефтяных и газовых скважин одним из основных является расчет на растяжение под действием собственного веса колонны. В этом расчете для труб с треугольной резьбой предельной считается так называемая «страгивающая нагрузка», при которой в наиболее опасном сечении резьбового соединения напряжения достигают предела текучести или происходит смещение (страгивание) ниток резьбы [1].

Определение страгивающей нагрузки  $P_{cm}$  (в кН) производят по формуле Яковлева – Шумилова

$$P_{cm} = \frac{\pi D_c b \sigma_T 10^{-3}}{1 + \eta \frac{D_c}{2l} \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi)}, \quad (1)$$

где  $D_c$  – средний диаметр сечения по впадине полного витка резьбы (в основной плоскости), мм;

$$D_c = D - 2h - b; \quad (2)$$

где  $D$  – номинальный диаметр трубы, мм;  $H$  – глубина резьбы, мм;  $b$  – толщина стенки трубы по впадине того же витка, мм;  $\sigma_T$  – предел текучести материала трубы, МПа;  $\alpha$  – угол профиля, градус;  $\varphi$  – угол трения, градус;  $l$  – длина резьбы с полным профилем (до основной плоскости), мм;  $\eta$  – коэффициент разгрузки;  $s$  – толщина стенки трубы, мм;

$$\eta = \frac{b}{b + s}. \quad (3)$$

Допускаемая растягивающая нагрузка определяется выражением

$$[P_p] = \frac{P_{cm}}{n_3}, \quad (4)$$

где  $n_3$  – коэффициент запаса прочности, устанавливаемый в пределах 1,15–1,45 в зависимости от диаметра и длины обсадной колонны.

Эта зависимость заложена в нормативные расчетные документы отрасли, хотя она не лишена недостатков. В ней не учтены напряжения, возникающие в результате свинчивания соединения с натягом, и некоторые другие факторы.

Развитие вычислительной техники и программного обеспечения позволило более глубоко исследовать напряженно-деформированное состояние (НДС), несущую способность и герметичность этого соединения.

В настоящей работе приведены результаты исследования НДС методом конечных элементов [2-6]. При этом создается виртуальная модель резьбового соединения со свойствами материала, соответствующими свойствам реального объекта, и приложением нагрузок и других воздействий, соответствующих реальным воздействиям. В результате воздействий конструкция приобретает напряженно-деформированное состояние, соответствующее НДС реального объекта. Точность решения отвечает требованиям инженерного расчета. Таким образом, расчет методом конечных элементов представляет собой выполнение виртуального эксперимента, выполняемого в компьютере.

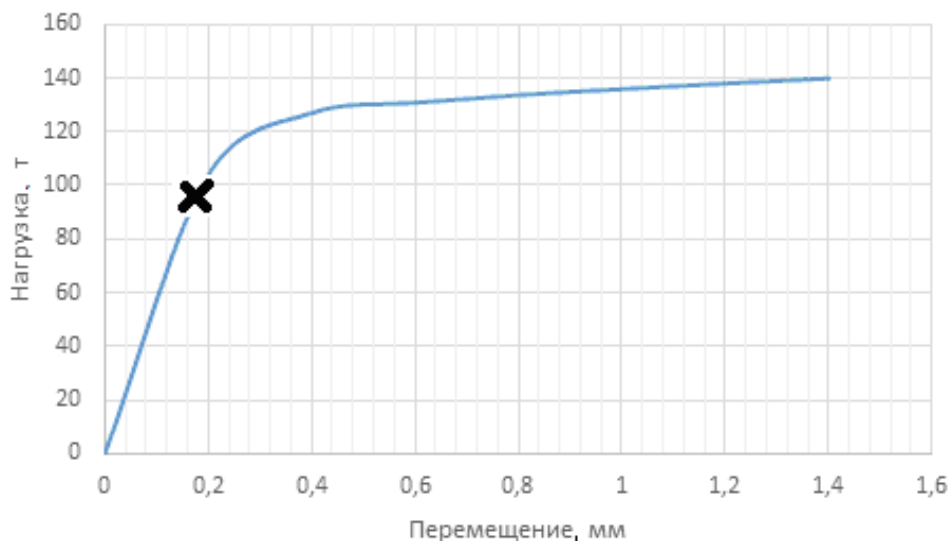


Рис. 1. График зависимости *перемещение торца трубы – усилие растяжения* (крестиком помечено усилие, вычисленное по формуле Яковлева – Шумилова)

Для выполнения эксперимента построена модель резьбового соединения с короткой треугольной резьбой обсадной трубы по ГОСТ 632-80. Труба диаметром 168 мм с толщиной стенки 8 мм выполнена из стали группы прочности D. Страгивающая нагрузка, рассчитанная по формуле Яковлева – Шумилова, составляет 951 кН [1]. Соединение свинчено с номинальным натягом – осевой натяг 9,5 мм или 3 оборота после свинчивания от руки. Радиальный натяг на одну сторону 0,3 мм. В результате создания натяга в соединении обе детали деформируются.

Анализ показал, что напряжения в ниппеле превысили предел текучести, т. е. имеют место пластические деформации. Результаты расчета приведены в табл. 1

и на рис. 1. По формуле Яковлева – Шумилова для данного случая усилие срагивания резьбы составляет 96 т.

В табл. 2 и на рис. 2 и 3 представлено изменение продольного усилия по виткам ниппеля и нагрузка на каждый виток при приложении максимального растягивающего усилия.

Таблица 1

**Перемещения и соответствующие им нагрузки в соединении**

Перемещение, мм	Нагрузка, т
0	0
0,2	103,9
0,4	127,0
0,6	130,8
0,8	133,7
1,0	135,9
1,2	138,0
1,4	139,9

Таблица 2

**Изменение продольной силы по виткам резьбы**

№ витка ниппеля с полным профилем	Продольная сила, Н	Примечание
1	$0,13988 \cdot 10^7$	
2	$0,13984 \cdot 10^7$	
3	$0,13988 \cdot 10^7$	Перед первым нагруженным витком
4	$0,11906 \cdot 10^7$	После первого нагруженного витка
5	$0,10388 \cdot 10^7$	
6	$0,93139 \cdot 10^6$	
7	$0,87274 \cdot 10^6$	
8	$0,81896 \cdot 10^6$	
9	$0,76243 \cdot 10^6$	
10	$0,70631 \cdot 10^6$	
11	$0,64771 \cdot 10^6$	
12	$0,58562 \cdot 10^6$	
13	$0,52028 \cdot 10^6$	
14	$0,45196 \cdot 10^6$	
15	$0,38124 \cdot 10^6$	
16	$0,30942 \cdot 10^6$	
17	$0,23848 \cdot 10^6$	
18	$0,17094 \cdot 10^6$	
19	$0,10943 \cdot 10^6$	
20	54611,0	
21	0,00	

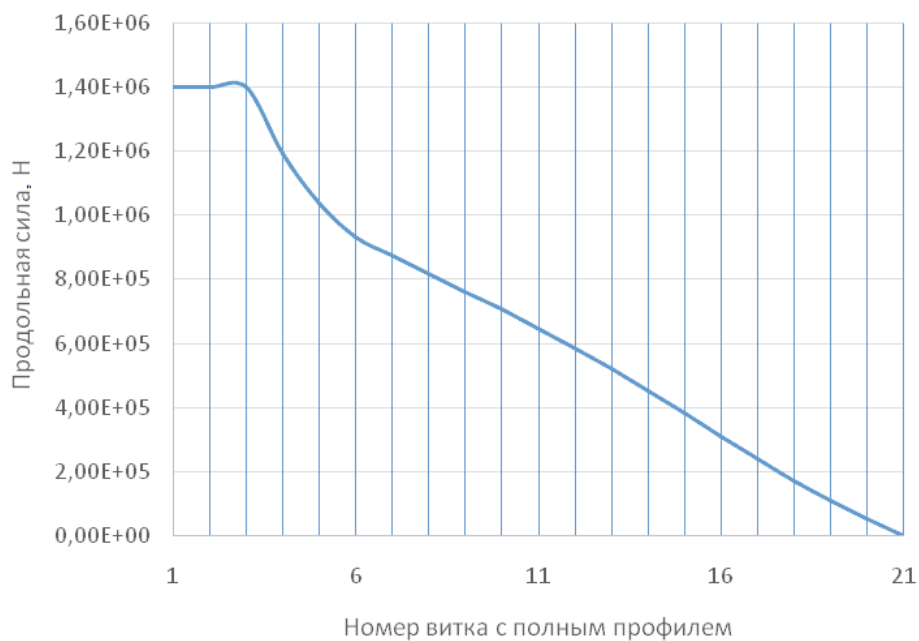


Рис. 2. Изменение продольной силы по виткам резьбы

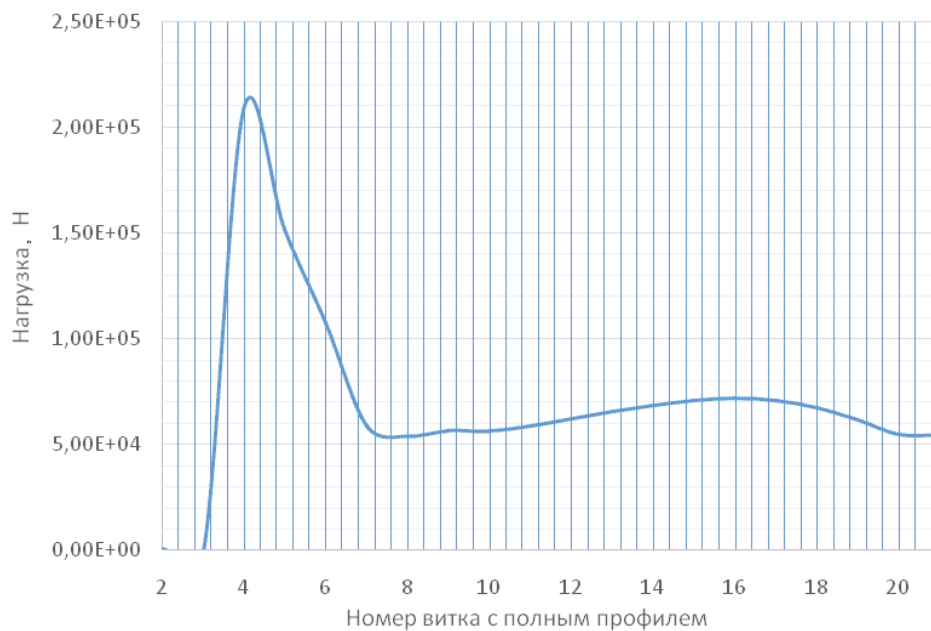


Рис. 3. Нагрузка на виток

Анализ результатов моделирования показал, что при растягивающей силе 96 т (что соответствует сдвигающей нагрузке по Яковлеву – Шумилову) давление на нижней (не рабочей) контактной поверхности витка ниппеля практически отсутствует, а при растягивающей нагрузке 110 т его вообще нет.

Основные выводы:

– при свинчивании с номинальным натягом ниппельная часть резьбового соединения подвержена необратимым пластическим деформациям; это подтверждает положение о том, что данное соединение сохраняет все свойства только при однократном свинчивании;

– расчет по формуле Яковлева – Шумилова определяет усилие, выше которого происходит смещение контактных поверхностей витков ниппеля относительно витков муфты и раскрывается зазор на нерабочей поверхности витка;

– предельная несущая способность резьбового соединения выше рассчитанной по формуле Яковлева – Шумилова (в данном примере в  $140/96=1,46$  раза).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айзуппе Э.А. Трубы нефтяного сортамента: конструкция и расчет: Учеб. пособие для вузов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2004. – 300 с., ил.
2. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. – М: Машиностроение-1, 2004. – 510 с., ил.
3. Папировский В.Л., Шестеркин С.О., Опарин В.Б. Анализ усталостного излома в бурильных трубах // Бурение и нефть. – 2012. – № 3. – С. 30-31.
4. Шестеркин С.О., Опарин В.Б., Папировский В.Л. Углубленный анализ усталостного излома в бурильных трубах и метод его решения // Бурение и нефть. – 2013. – № 1. – С. 32-33.
5. Папировский В.Л., Опарин В.Б., Елфимова И.Д. Анализ уплотнений обсадных труб премиум-класса // Бурение и нефть. – 2014. – № 4. – С. 28-29.
6. Григорян Л.Г., Папировский В.Л., Игнатенков Ю.И., Иваняков С.В., Коноваленко Д.В. Совершенствование конструкции узла ввода газа для снижения температурных напряжений // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2 (42). – С. 174-178.

*Статья поступила в редакцию 20 октября 2015 г.*

## STRESS-STRAIN STATE OF THE PIPE THREADED CONNECTION WITH TRIANGULAR THREAD UNDER STRETCHING

**V.L. Papirovsky**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

*This paper is devoted to using of the finite element method for stress-strain state of the pipe threaded connection. A model of casing threaded connection (diameter 168 mm, thickness 8 mm) is created. A dependence of the butt-end move from the stretching force is determined. A comparison of the results with the traditional calculation method is followed. Also dependence of linear force from the number of thread is determined. It is achieved that pipe connection retains its properties only after single screwing. Also it is determined that the connection bearing strength is greater than the value determined by Yakovlev-Shumilov formula.*

**Keywords:** casing, pipe connection, ultimate joint strength.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 10 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке будут рассматриваться материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

**Требования к оформлению статей находятся на сайте университета**

**<http://vestnik-teh.samgtu.ru>**

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

***Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.***

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: [vest\\_teh@samgtu.ru](mailto:vest_teh@samgtu.ru)

Редколлегия журнала