



Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının XƏBƏRLƏRİ

HERALD
of the Azerbaijan Engineering Academy

ВЕСТНИК
Азербайджанской Инженерной Академии

Beynəlxalq elmi-texniki jurnal
The international science-technical journal
Международный научно-технический журнал

Cild 6. № 2
Vol. 6. № 2
Том 6. № 2

BAKİ – 2014

**Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının
XƏBƏRLƏRİ**
Beynəlxalq elmi-texniki jurnal

BAŞ REDAKTOR – AKADEMİK A.M. PAŞAYEV

Baş redaktorun müavini – akademik A.Ş. Mehdiyev

Baş redaktorun müavini – akademik Ə.X. Canəhmədov

Məsul redaktor – müxbir üzv H.F. Mirələmov

REDAKSİYA HEYƏTİ:

akademik **Ə.M. Abbasov**, akademik **R.İ. Abdullayev**, akademik **H.S. Bağırov**,

akademik **N.H. Cavadov**, akademik **B.H. Əliyev**, akademik **C.C. Əsgərov**,

akademik **A.Z. Quliyev**, akademik **H.Ə. Məmmədov**, akademik **G.H. Məmmədova**,

akademik **İ.R. Sadıqov**, müxbir üzv **N.A. Əliyev**

REDAKSİYA ŞURASI:

akademik **B.V. Qusev** (Rusiya), prof. **N. Antoneski** (Ruminiya), prof. **S. Sureş** (ABŞ), prof. **Bravu Konstantin** (İsrail), prof. **Baur Reinhard** (Almaniya), prof. **F. Franek** (Avstriya), akademik **B.T. Jumaqulov** (Qazaxıstan), prof. **P. Jost** (Böyük Britaniya), prof. **Junq – Younq Son** (Koreya), akademik **A.V. Kərimov** (Özbəkistan), prof. **D. Mavrakis** (Yunanistan), akademik **N.K. Mışkin** (Belarusiya), prof. **Nejdet Sağlam** (Türkiyə), akademik **V.E. Panin** ((Rusiya), prof. **S. Putko** (Polşa), akademik **A.I. Vasilyev** (Ukrayna))

The international science-technical journal
HERALD
of the Azerbaijan Engineering Academy

CHIEF EDITOR – A.M. PASHAYEV, ACADEMICIAN

Deputy editor – A.Sh. Mehtiyyev, academician

Deputy editor – A.Kh. Janahmadov, academician

Managing editor – H.F. Miralamov, member of correspondent

EDITORIAL BOARD:

A.M. Abasov, academician, **R.I. Abdullayev**, academician, **H.S. Bagirov**, academician,

N.H. Javadov, academician, **B.H. Aliyev**, academician, **J.J. Asgarov**, academician,

A.Z. Quliyev, academician, **Q.A. Mamedov**, academician, **G.H. Mamadova**, academician,

I.R. Sadigov, academician, **N.A. Aliyev**, member of correspondent

EDITORIAL ADVISORY BOARD:

B.V. Gusev, academician (Russia), **N. Antonesku**, professor (Romania), **S. Suresh**, professor (USA), **Bravu Konstantin**, professor (Israel), **Baur Reinhard**, professor (Germany), **F. Franek**, professor (Austria), **B.T. Zhumagulov**, academician (Kazakhstan), **Piter Jost**, professor (Great Britain), **Jung – Young Son**, professor (Korea), **A.V. Karimov**, academician (Uzbekistan), **D. Mavrakis**, professor (Greece), **N.K. Mishkin**, academician (Belarus), **Nejdet Saglam**, professor (Turkey), **V.E. Panin**, academician (Russia), **S. Pytko**, professor (Poland), **A.I. Vasilyev**, academician (Ukraine)

TİCİSÇİ:

“Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası” ictimai birlüyü.

2009-cu ilin noyabr ayından nəşr olunur.

Dövriliyi ildə 4 dəfədir.

Azərbaycan Respublikası Ədliyyə Nazirliyi tərəfindən rəsmi qeydiyyata alınmışdır. Qeydiyyat № 2965, 23.06.2009-cu il

Jurnal Azərbaycan Respublikası Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının reyestrinə namizədlilik və doktorluq dissertasiyalarının nəticələrini dərc olunmaq üçün daxil edilmişdir.

Jurnal texniki elmlər üzrə referativ məlumatların beynəlxalq ingilis dilli bazasına daxil edilmişdir – “INSPEC”

Jurnalda abunə “Azərpocht” ASC-nin poçt bölmələrində yazılmış olar.

Abunə il boyu davam edir.

Abunə indeksi: Hüquqi və fiziki şəxslər üçün – 1156

Redaksiyanın ünvani: Azərbaycan Respublikası, AZ 1010,

Bakı şəhəri, K.Səfərəliyeva 22.

Tel/Faks: (+99412) 598 24 52

(dax. 6-59)

E-mail: amaxeber@yahoo.com

<http://ama.com.az>

REKLAMALARIN YERLƏŞDİRİLMƏSİ
İLƏ ƏLAQƏDAR REDAKSİYAYA
MURACİƏT EDƏ BİLƏRSİNİZ

FOUNDER:

Public union “Azerbaijan Engineering Academy”

Published since November, 2009.

Issued 4 times a year.

Certificate about registration № 2965, june 23. 2009 was given by Ministry of Justice of the Republic of Azerbaijan.

Journal was included into the list of education for publication of result of candidate and doctoral thesis by the supreme Attestation Commission Attached to the President of the Republic of Azerbaijan.

Journal was included into international English – language abstracts database on technical sciences “INSPEC”

Subscription to journal may be drawn up at post offices of OJSC “Azerpocht”

Subscription index:

For juristic and for natural persons – 1156

Address of editorial offices: Azerbaijan Republic, AZ 1010,

Baku, K.Safaraliyeva 22.

Tel/Fax: (+99412) 598 24 52

(inter. 6-59)

E-mail: amaxeber@yahoo.com

<http://ama.com.az>

CONCERNING ADVERTISING
PLACING TO ADDRESS
IN EDITION

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Общественное объединение
«Азербайджанская Инженерная
Академия».

Издается с ноября 2009 года.

Выходит 4 раза в год.

Официально зарегистрирован
Министерством Юстиции Азербайджанской Республики. № регистрация: 2965 от 23.06.2009 г.

Журнал включен в перечень изданых, рекомендованных для публикации основных результатов кандидатских и докторских диссертаций Высшей аттестационной комиссии при Президенте Азербайджанской Республики.

Журнал включен в международную англоязычную базу реферативных данных по техническим наукам INSPEC.

Подписка на журнал осуществляется в отделениях ОАО «Азерпочта».

Подписка продолжается в течение года.

Индекс подписки для юридических и физических лиц: 1156.

Адрес редакции: Азербайджан,
AZ1010, г. Баку, ул. К.Сафаралиева, 22.

Тел./Факс: : (+99412) 598 24 52

(внутр. 6-59)

E-mail: amaxeber@yahoo.com

<http://www.ama.com.az>

ПО ВОПРОСАМ РАЗМЕЩЕНИЯ
РЕКЛАМЫ ОБРАЩАТЬСЯ
В РЕДАКЦИЮ

M Ü N D Ə R İ C A T

Paşayev A.M., Canəhmədov Ə.X.

Fiziki mezomexanika, möhkəmlik və plastiklik fizikası ilə bütöv
mühit mexanikasının birləşməsi (I hissə) 7

M e x a n i k a v ə m a ş i n q a v i r m a

**Canəhmədov Ə.X., Volçenko A.İ., Pirverdiyev E.S., Volçenko D.A.,
Volçenko N.A., Juravlyov D.Y.**

Metalpolimer sürtünmə cütlərinin elektrik və istilik sahələrində
friksion qarşılıqlı təsir 30

N e f t v ə q a z

İsmayılov Q.Q., Səfərov N.M., Nurməmmədova R.Q., Əliyev S.T.

Su-neft sistemlərinin fraktal təhlili haqqında 54
Məmmədov H.V.

Kipləndirici quyu pakerlərin kipləndirmə sintezi 63
Volçenko D.A.

Dünyada layların neftvermə qabiliyyətinin artırma üsullarının tətbiqi:
təcrübə və perspektivlər (I hissə) 74

N e f t k i m y a t e x n o l o g i y a s i

Nurullayev V.X., Qəhrəmanov F.S., Əliyev S.T.

Neft-mazut qarışqlarının nəqli zamanı texnoloji rejimin
tənzimlənməsinin mümkünluğu barədə 83
Qurbanov Ə.N.

Təbii qazın nəqlə hazırlanması zamanı qazın qurudulmasının
riyazi modelinin işlənməsi 89

I n s a a t

Həsənov E.E.

Hidrotexniki qurqlarda dok tipli konstruksiyasının termogərginlik
halının hesablanması 97

E k o l o g i y a

Mürvətov F.T., Məmmədov F.M., Məmmədov N.T.

Azərbaycanın köhnə neft yataqlarında laylara suvurmanın
bəzi ekoloji nəticələri haqqında 107

I d a r ə e t m ə s i s t e m l ə r i

Bağırıov B.Ə., Manafov E.K.

Elektrik hərəkət tərkiblərinin avtonom avtoidarəetmə sistemləri 113

K e n d t ə s ə r r ü f a t ı

Əliyev B.H., Atabayev E.R., Rzayev R.R.

Azərbaycanda aqrar sektorun idarəetmə modellərinin alqoritmlərinin xüsusiyyətləri...117

Xronika 128

C O N T E N T S

Pashayev A.M., Janahmadov A.Kh.

Physical mesomechanics as an integration of continuum mechanics
with physics of plasticity and strength (Part I) 7

Mechanics and mechanical engineering

Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Pirverdiyev E.S.,

Volchenko D.A., Volchenko N.A., Zhuravlyov D.Y.

Frictional interaction in electrical and thermal fields of metal-polymer friction pairs..... 30

Oil and gas

Ismayilov G.G., Safarov N.M., Nurmamedova R.G., Aliyev S.T.

The fractal analysis of water-oil systems..... 54

Mamadov G.V.

Synthesis sealing of well packer seal..... 63

Volchenko D.A.

The international application of eor methods: experience and prospects (Part I) 74

Chemical technology

Nurullayev V.X., Qahramanov F.S., Aliyev S.T.

The technological regimes management of the masut-oil pumping..... 83

Gurbanov A.N.

Working out of mathematical models drying natural gaz by preparation for transport 89

Construction

Hasanov E.E.

Thermal stress calculations of the dock designelementsinhydraulic structures 97

Ecology

Murvatov F.T., Mamedov F.M., Mamedov N.T.

Environmental risks of water injection in old oil fields of Azerbaijan..... 107

Control system

Bagirov B.E., Manafov E.K.

Autonomous multi-contour systems of auto-control in electric rolling stocks..... 113

Agriculture

Aliyev B.H., Atababayev E.R., Rzayev R.R.

Featuresof managementalgorithms in the agricultural sector of Azerbaijan 117

Chronicle..... 128

СОДЕРЖАНИЕ

Пашаев А.М., Джанахмедов А.Х.	
Физическая мезомеханика как соединение механики сплошной среды с физикой пластичности и прочности (часть I)	7
<u>Механика и машиностроение</u>	
Джанахмедов А.Х., Вольченко А.И., Пирвердиев Э.С.,	
Вольченко Д.А., Вольченко Н.А., Журавлев Д.Ю.	
Фрикционное взаимодействие в электрических и тепловых полях металлополимерных пар трения.....	30
<u>Нефть и газ</u>	
Исмаилов Г.Г., Сафаров Н.М., Нурмамедова Р.Г., Алиев С.Т.	
О фрактальном анализе водонефтяных систем	54
Мамедов Г.В.	
Синтез уплотнения скважинного уплотнителя пакеров	63
Вольченко Д.А.	
Применение методов увеличения нефтеотдачи пластов в мире: опыт и перспективы (часть I)	74
<u>Нефтехимические технологии</u>	
Нуруллаев В.Х., Гахраманов Ф.С., Алиев С.Т.	
О возможности регулирования технологического режима перекачки смеси мазут-нефть	83
Гурбанов А.Н.	
Разработка математических моделей осушки природного газа при подготовке к транспорту	89
<u>Строительство</u>	
Гасанов Э.Э.	
Расчет термонапряженного состояния элементов доковых конструкций гидротехнических сооружений	97
<u>Экология</u>	
Мурватов Ф.Т., Мамедов Ф.М., Мамедов Н.Т.	
Экологические риски, связанные с закачкой воды в пласты на старых нефтяных месторождениях Азербайджана	107
<u>Системы управления</u>	
Багиров Б.Э., Манафов Э.К.	
Автономные многоконтурные системы автоуправления в электроподвижных составах	113
<u>Сельское хозяйство</u>	
Алиев Б.Г., Атабабаев Э.Р., Рзаев Р.Р.	
Особенности алгоритмов в моделях управления аграрным сектором в Азербайджане	117
Хроника.....	128

Обзор актуальных проблем

ФИЗИЧЕСКАЯ МЕЗОМЕХАНИКА КАК СОЕДИНЕНИЕ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ С ФИЗИКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ (часть I)

А.М. ПАШАЕВ, А.Х. ДЖАНАХМЕДОВ

Дан аналитический обзор работ в новой области физики твердого тела – физической мезомеханике структурно-неоднородных сред, развивающейся на стыке механики сплошной среды (макроуровень) и физики пластичности и прочности деформируемых твердых тел (микроуровень). Согласно концепции структурных уровней деформации, поверхностный слой в деформируемом твердом теле является самостоятельным, ведущей функциональной подсистемой. С ростом степени деформации в нем развиваются автономные процессы (волны пластичности), оказывающие определяющее влияние на стадийность локализации пластического течения и разрушение образца в целом. На мезоуровне деформация носит характер трансляционно-ротационных вихрей.

Универсальность физической мезомеханики обусловлена тем, что она основывается на принципе калибровочной симметрии и является аналогом других калибровочных теорий, таких как электродинамика Максвелла или общая теория относительности.

Ключевые слова: *физическая мезомеханика, механика сплошной среды, пластичность, прочность, термомеханическая теория износа, мезоуровень, калибровочная симметрия.*

Введение. В последние три десятилетия в механике деформируемого твердого тела бурно развивается новое научное направление-физическая мезомеханика структурно-неоднородных сред. В его основе лежит новая парадигма – концепция структурных уровней деформации твердых тел, предложенная академиком Паниным В.Е. и его сотрудниками (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Москва) [1-9]. Воспринятая на первых порах как остродискуссионная, к настоящему времени эта концепция получила убедительное экспериментальное и теоретическое обоснование и позволила наметить пути соединения механики сплошной среды с физикой пластичности и прочности, базирующейся на теории дислокаций.

Многочисленные попытки органически связать теорию дислокаций и механику сплошной среды были безуспешны. Долгое время казалось, что это обусловлено чисто математическими трудностями макроскопического представления статистических ан-

самблей деформационных дефектов. Однако в последнее время стало очевидным, что общепринятое понимание элементарного акта пластической деформации было не совсем верным и определялось ошибочной схемой. Это приводило к неверной интерпретации поведения ансамблей деформационных дефектов, а также феноменологических закономерностей механики сплошной среды.

Неправильность таких представлений была связана с тем, что за элементарный акт пластической деформации принималось сугубо трансляционное движение любого деформационного дефекта (например, кристаллографический сдвиг), а условие сохранения сплошности представлялось как определенная самоорганизация только трансляционных мод деформации. Так, все известные в литературе схемы пластической деформации структурно-неоднородной среды (Закса, Кохендорфера, Бишопа-Хилла, Эшби, Тейлора и др.), несмотря на отличия друг от друга, строятся как различные комбинации кристаллографических сдвигов и рассматривают, таким образом, только трансляционный характер деформации. Это неадекватно действительности и в принципе не позволяет вскрыть природу источников дислокаций, понять закономерности самоорганизации дислокационных ансамблей.

1. Синергетика деформируемого твердого тела.

Органическая взаимосвязь сдвигов и поворотов приводит к тому, что элементарным актом пластической деформации оказывается не сдвиг, а трансляционно-ротационный вихрь (TPB). По своему масштабу они могут быть микро-, мезо- и макровихрями. Иерархия структурных уровней деформации формирует свою иерархию вихрей. Поворотные моды движения трехмерных структурных элементов приводят в само-согласованное движение всю иерархию структурных уровней и обуславливают появление в ней новых диссипативных структур. В ходе пластической деформации могут также возникать мезовихри, связанные с формированием мезоскопических диссипативных структур. Вихревой характер деформации приводит в движение всю иерархию структурных уровней деформации и обеспечивает организацию новых каналов диссипации энергии, более эффективных, чем от движения отдельных дислокаций [5]. Самосогласованная деформация во всем объеме деформируемого твердого тела описывается законом структурных уровней деформации твердых тел, согласно которому при пластической деформации без нарушения сплошности сумма роторов потоков деформационных дефектов на всей иерархии структурных уровней среды должна быть равна нулю [4].

Разрушение в мезомеханике считается заключительным этапом пластической деформации, когда в материале возникают локализованные трансляционно-ротационные вихри с размерами, соизмеримыми с поперечным сечением образца [5]. Ротор первичного скольжения в вихре не компенсируются суммарным ротором всех аккомодационных потоков дефектов. Трещина является неизбежным механизмом кристаллографического аккомодационного поворота. Другими словами, разрушение есть заключительный этап эволюции микро- и мезоструктуры, появляющийся после того, как материал исчерпал свои аккомодационные возможности. Рассмотрение нагруженного твердого тела

как многоуровневой самоорганизующейся системы, в которой микро-, мезо- и макроуровни органически взаимосвязаны, составляет предмет физической мезомеханики.

Эволюция масштабных уровней потери сдвиговой устойчивости деформируемого твердого тела – типичный синергетический процесс. В рамках методологии синергетики деформируемое твердое тело рассматривается как открытая, сильнонеравновесная в локальных зонах концентратов напряжений система, в которой в ходе нагружения протекают неравновесные локальные структурные превращения. Последние развиваются на различных масштабных уровнях (в отличие от трех масштабных уровней (микро-, мезо- и макро-) количество структурных уровней может быть значительно больше) и различаются по характеру, энергии, протяженности в объеме, скорости протекания. Их самоорганизации в заданных граничных условиях нагружения обуславливает формирование диссипативных структур, эволюция которых определяет характер пластического течения и разрушения материала.

В традиционной физике пластичности и прочности эти процессы описываются на языке теории дислокаций с использованием классических моделей механики сплошной среды. Однако это приводит к методологически неправильной интерпретации поведения сложной самоорганизующейся многоуровневой системы.

Анализ всех типов деформационных дефектов в кристаллах показывает [10], что в сущности их надо рассматривать не как нарушение периодичности структуры исходного кристалла, а как элементы других гексагональных структур. Например, расщепление дислокации в кристаллах с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК-кристаллы) есть элементы структур с плотной упаковкой (ГПУ-структуры), ограниченные частичными дислокациями. Протяженные дефекты упаковки и двойники в ГЦК-кристаллах с низкой энергией дефекта упаковки есть планарные ГПУ-структуры на плотноупакованных плоскостях. В кристаллах вблизи температур структурных превращений деформация осуществляется образованием мартенситных ламелей как структур другой фазы. Если кристалл испытывает структурный фазовый переход, его деформация происходит в режиме сверхпластичности. Наоборот, если кристалл не плотно упакован и имеет одну стабильную структуру, он хрупок.

Другими словами, зарождение пластического сдвига есть локальный синергетический структурный переход и может происходить только в локальной зоне кристалла за счет производства энтропии. Указанное структурное превращение принципиально отличается от термодинамического структурного фазового перехода и должно описываться на основе неравновесной термодинамики.

Последующее пластическое течение является сугубо релаксационным процессом, стремящимся равномерно распределить локальное сильное возбуждение по всему кристаллу. Поскольку структурное перестроение происходит наиболее легко в плотноупакованных плоскостях, элементы новой структуры движутся анизотропно, вызывая локализацию пластического сдвига и возникновению планарной «гексатической фазы» [11]. Ее последующая эволюция определяет законы пластического течения кристалла, которое оказывается по своей природе вихревым [12].

Из сказанного следует, что диаграмма пластического течения должна иметь вид, представленный на рис.1 [3].

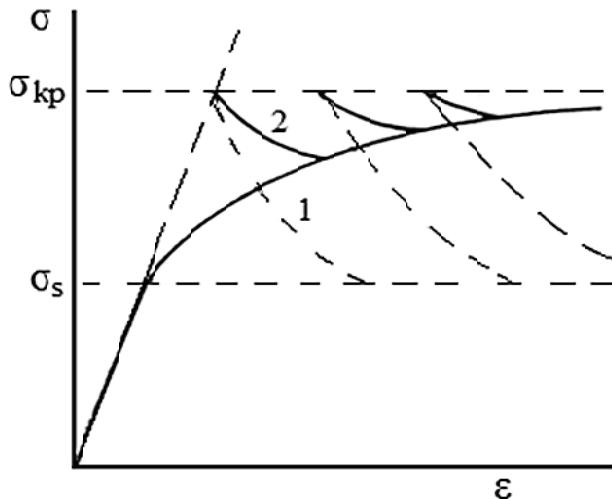


Рис.1. Диаграмма пластического течения твердого тела

Результатирующая кривая течения определяется тремя процессами: 1) зарождением пластического сдвига в локальной зоне сильного возбуждения при нагружении σ_{kp} ; 2) релаксацией σ при движении элементов новой структуры как дефектов кристалла; 3) деформационным упрочнением как следствие взаимодействия дефектов, обуславливающее релаксацию σ по кривым 2. Традиционное рассмотрение пластической деформации предполагает начало пластического течения при напряжении σ_s и учитывает только деформационное упрочнение. Это ошибочное описание является следствием неучета в теории градиентов напряжений пластического течения.

Неоднородность напряженного состояния в деформируемом кристалле, обуславливающая релаксационный характер пластического течения, порождает новое качество – возникновение внутреннего механического поля вихревой природы.

2. Законы поведения вихревого механического поля в деформируемом твердом теле.

В настоящее время для описания среды с дефектами широко используются представления калибровочных полей [13, 14, 15, 3, 16, 17, 18]. Это позволяет изучать процессы, обусловленные взаимосвязью механических изменений внутри заданного структурного элемента, в смежных с ним элементах и во внешних объектах.

В [3, 4] развита теория описания структурно неоднородной среды с дефектами, основанная на формализме Лагранжа. Исходным является лагранжиан, вариация которого приводит к волновым уравнениям классической теории упругости. В дальнейшем учитывается внутренняя структура материала. Принимается, что деформация протекает на двух структурных уровнях: деформация самих структурных элементов и их перемещение как целого. Согласно экспериментальным данным, никаких ограничений на де-

формацию структурных элементов нет. Это дает возможность использовать в качестве калибровочной группы классическую группу $GL(3,R)$ (определение и свойства этой группы описаны, например в книге [19]). При таком описании источники дефектов при пластической деформации связаны с изменением структурных элементов. Принцип локальной калибровочной инвариантности позволяет построить новый лагранжиан, из которого получается замкнутая система уравнений относительно источников и полей дефектов. Исходный и новый лагранжианы описывают два разных состояния системы. Принцип локальной калибровочной инвариантности является способом описания нового состояния с дефектами, состоящим в локализации пространственной симметрии.

Уравнения механического поля в векторной форме, принятой в механике сплошной среды, запишутся в виде [3]:

$$div S^a - f^{abc}(A^b S^c) = \frac{1}{l^{2D_f}} \cdot J^{a0}; \quad (1)$$

$$(rot S^a)_\mu - f^{abc}[A^b \times S^c]_\mu = \frac{\partial R_\mu^a}{\partial t}; \quad (2)$$

$$(rot R^a)_\mu - f^{abc}[A^b \times R^c]_\mu = \frac{1}{C_t^2} \frac{\partial S_\mu^a}{\partial t} + \frac{1}{l^{2D_f}} \cdot J^{a\mu}; \quad (3)$$

$$div R^a - f^{abc}(A^b \cdot R^c) = 0; \quad (4)$$

где

$$J^{ao} = -\rho g^{ij} \lambda_i^{ak} \eta_k^a \dot{\eta}_j^a, \quad J^{a\mu} = g^{ij} \lambda_i^{ak} (D_\nu \eta^\beta) C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}.$$

Здесь S^a - изменение во времени градиента компонента тензора дисторсии, $a = 1, 2, \dots, 9$ (9 – общее число калибровочных переменных); A^b – градиент компонента тензора дисторсии, отражающей калибровочное поле; C_t – предельная скорость распространения калибровочного поля в структурно-неоднородной среде; R^a – градиент компонента тензора изгиба-кручения; f^{abc} – структурные константы, учитывающие, что калибровочные поля образуют алгебру Ли; $\lambda^a = (\lambda^{ij})_{ik} = \delta_l^i \delta_k^j$ – генераторы группы $GL(3,R)$ в базисе Вейля [49] (δ_{ik} - символ Кронекера); J^{a0} – источники калибровочных полей, связанные с изменением репера η во времени; $J^{a\mu}$ – потоки, обусловленные изменением репера в пространстве; $D_\nu = \partial_\nu - \lambda^a B_\nu^a$ - ковариантная производная; $C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}$ – упругие константы; ρ – плотность материала; l – размерный параметр структурных уровней деформации среды; D_f – фрактальная размерность.

Если провести в уравнениях (1)-(4) суммирование по групповому индексу, то полевые уравнения будут иметь вид

$$div V = g^{ij} \eta_i^a \dot{\eta}_{ja}; \quad (5)$$

$$rot V = \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad (6)$$

$$(rot \omega)_\mu = \frac{1}{C_t^2} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_\mu + g^{ij} \eta_i^a (D_\mu \eta_{ja}), \quad (7)$$

$$\operatorname{div} \omega = 0, \quad (8)$$

где V - скорость смещений; ω – угол поворота.

Система уравнений (1)-(4) или (5-8) описывает законы поведения вихревого механического поля в деформируемом твердом теле. Как отмечалось выше, один вихрь может вовлекать в самосогласованное трансляционно-ротационное движение целую совокупность структурных элементов. Очевидно, в соответствии с законом сохранения момента количества движения смежные вихри механического поля должны иметь направления поворотов разных знаков. Поэтому вихревое механическое поле при движении вдоль образца должно быть осциллирующим, т.е. ротор первичного скольжения $rotS^a$ и связанный с ним вихрь трансляционно-ротационного движения должны быть органически связаны с ротором аккомодационных поворотных мод в смежном вихре с противоположным знаком поворота.

На рис.2 [6] изображена схема взаимодействия двух смежных вихрей: ТРВ-І и ТРВ-ІІ, испытывающих повороты в противоположных направлениях.

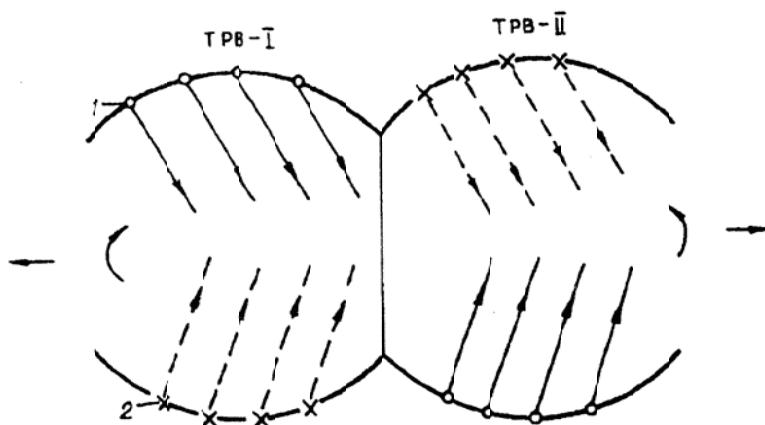


Рис.2. Схема взаимодействия двух смежных трансляционно-ротационных вихрей в деформируемом твердом теле. 1 - активные, 2 - потенциальные источники.

3. Нелинейные волновые процессы канализированного разрушения.

Введение дислокаций и дисклиниаций в механику деформируемого твердого тела проводится обычно с помощью калибровочной теории дефектов [20, 17, 18, 21]. В [3, 14, 15] предложено в качестве группы калибровочных преобразований рассматривать простую девятипараметрическую группу преобразований вещественного трехмерного пространства $GL(3, R)$, а также введены источники янг-миллсовских полей – квазиупругие микродиторсии (см. раздел 2). Полученные в этих работах волновые уравнения при их анализе с учетом неравновесной термодинамики дискретных подсистем позволяют в рамках многоуровневого подхода обосновать как волновую природу канализированной пластической деформации, так и диссипативный процесс движения деформационных дефектов на одном структурно-масштабном уровне.

Одним из частных случаев волновых уравнений, полученных в [14], являются уравнения для безразмерных величин потока J и плотности α линейных дефектов (разрывов вектора смещений u):

$$\frac{\partial}{\partial x_\alpha} J_\mu^\alpha = -\frac{\partial \ln u_\beta}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\mu\chi\delta} \frac{\partial J_\delta^\alpha}{\partial x_\chi} = -\frac{\partial \alpha_\mu^\alpha}{\partial t}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \alpha_\mu^\alpha}{\partial x_\alpha} = 0, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\mu\chi\delta} \frac{\partial \alpha_\delta^\alpha}{\partial x_\chi} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial J_\mu^\alpha}{\partial t} + \sigma_\mu^\alpha - P_v^\beta \frac{C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}}{E}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial v_\mu}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_\mu^\alpha}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial P_v^\beta}{\partial x_\alpha} \cdot \frac{C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}}{E}, \quad (13)$$

где $v_\mu = \partial \ln u_\beta / \partial t$ – скорость упругой деформации среды с дефектами, $\sigma_\mu^\alpha = \frac{\partial \ln u_\nu}{\partial x_\beta} \cdot \frac{C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}}{E}$ – упругие напряжения в такой среде, c и \tilde{c} – соответственно скорость звука и скорость распространения фронта пластического возмущения, $P_v^\beta(x, t)$ – пластическая часть дисторсии, $\varepsilon_{\mu\chi\delta}$ – символ Леви-Чевитье, $C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}$ – упругие константы.

Уравнения (9)-(13) имеют следующий смысл: (9) – уравнение непрерывности среды с дефектами, из которого следует, что источником пластического потока является скорость перестроения дефектов; (10) – условие совместности пластической деформации (принципиально важно, что изменение плотности среды со временем определяется в данном случае не операцией *div*, а операцией *rot* потока, т.е. его пространственной неоднородностью); (11) – условие непрерывности дефектов, что отражает отсутствие деформации ($\alpha_\chi^\beta = \varepsilon_{\chi\mu\nu} \partial_\mu P_v^\beta$); (12) – определяющее уравнение для среды с пластическим течением; (13) – уравнение квазиупругого равновесия, представляющее собой известное в континуальной механике уравнение, не содержащее в правой части, кроме слагаемого, ответственного за упругую деформацию, слагаемое, описывающее пластические дисторсии, что фактически отражает рождение деформационных дефектов в локальных зонах гидростатического растяжения, сформированных концентратором напряжений.

Выражение (12), присущее только среде с пластическим течением, связывает временные изменения пластического потока с анизотропным пространственным изменением плотности дефектов ($\varepsilon_{\mu\chi\delta} \partial \alpha_\delta^\alpha / \partial x_\chi$) и источниками ($\sigma_\mu^\alpha - P_v^\beta C_{\alpha\beta}^{\mu\nu} / E$). Отличие уравнений (12) и (13) от соответствующих уравнений теории упругости состоит в том, что изменение скорости пластической деформации со временем определяется самими напряжениями, а не производными $\partial \sigma_\mu^\alpha / \partial x$, как в упругом случае. Кроме того, в правую

часть (12) в качестве источника входит сама пластическая дисторсия $P_v^\beta(x, t)$, что свидетельствует о двойственности дефектов как полевых источников.

Из системы уравнений (9)–(13) выводятся волновые уравнения для безразмерных величин плотности потока J и плотности дефектов α :

$$\frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 J_\alpha^\mu}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 J_\alpha^\mu}{\partial x_\nu^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \ln u_\alpha(x, t)}{\partial x_\mu} - \frac{1}{E} \frac{\partial \ln u_\beta}{\partial x_\nu} C_{\alpha\beta}^{\mu\nu} - \frac{1}{E} P_v^\beta C_{\alpha\beta}^{\mu\nu} \right), \quad (14)$$

$$\frac{1}{\tilde{c}^2} \frac{\partial^2 \alpha_\alpha^\mu}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \alpha_\alpha^\mu}{\partial x_\nu^2} = \varepsilon_{\mu\chi\delta} \left(\frac{\partial^2 \ln u_\beta(x, t)}{\partial x_\chi \partial x_\nu} C_{\alpha\beta}^{\sigma\nu} - \frac{\partial P_v^\beta}{\partial x_\chi} C_{\alpha\beta}^{\sigma\nu} \right) \frac{1}{E}, \quad (15)$$

при условии совместности источников

$$\frac{\partial N_\mu}{\partial t} + \varepsilon_{\mu l m} \frac{\partial M_m}{\partial x_l} = 0, \quad (16)$$

где M – правая часть выражения (14), N – правая часть выражения (15), $u(x, t)$ – неупругие смещения в волне неупругой локализованной деформации.

Правая часть уравнения (14) характеризует источники потока дефектов, которые определяются скоростью квазиупругой деформации $\frac{\partial}{\partial t} (E_\mu^\alpha E - E_\nu^\beta C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}) (1/E)$, где E_μ^α и E_ν^β – шаровые и девиаторные компоненты тензора деформации соответственно, величина $E_\mu^\alpha E - E_\nu^\beta C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}$ представляет собой разность внутренних напряжений сжатия – растяжения и сдвига, связанных с распределением напряжений в зоне концентратора напряжений. Релаксационные процессы перестройки дефектов (типа кластеров различных атомных конфигураций или их конгломератов) представлены в (14) членом $P_v^\beta C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}/E$.

Правая часть уравнения (15) характеризует источник плотности деформационных дефектов, которым является завихренность $\varepsilon_{\mu\chi\delta} \partial/\partial x (E_\nu^\beta - P_v^\beta) (C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}/E)$ сдвиговой деформации, вызванной релаксацией сдвиговых напряжений при генерации деформационных дефектов в локальных зонах гидростатического растяжения.

Характер волновых потоков деформационных дефектов определяется правой частью уравнений (14) и (15). Пластическая дисторсия $P_v^\beta(x, t)$ играет здесь принципиально важную роль.

Волновые уравнения пластического течения твердых тел получены и в работах [3, 14, 15], однако они не были интерпретированы как *волны пластичности*.

Вывод о волновом характере распространения возмущения в среде всегда связан с вопросом о групповой скорости возмущения. В отсутствие дисперсии групповой скорости (как при однородной упругой деформации) волна вполне определена. Неоднородность среды приводит к дисперсии и разбиению волнового пакета. Пластическая деформация – это локальное, неоднородное изменение самой среды, и, следовательно, гово-

рить об обычных волновых свойствах пластической деформации вряд ли имеет смысл. Тем не менее когда локальная пластическая деформация среды нелинейна, она может вести себя как волна, несмотря на групповую дисперсию.

Волновые уравнения пластичности могут описывать дефекты не только структурного микроуровня (дислокации), но и мезоуровня (границы зерен, двойниковые пролистки, включения в композиционном материале и пр.) [15]. Такие дефекты представляют собой поверхности или линии разрыва со скачком δu вектора смещений. Если на всей области разрыва величина δu одинакова, то его механическое поведение подобно поведению дислокации, за исключением того, что δu может быть не равен периоду решетки. Области подобных разрывов всегда имеют место в контактных областях материала, поэтому можно рассматривать также пластическую среду, структурные элементы которой разделены контактными областями, границами. В частности, неоднородная среда со структурой может быть представлена зернами и границами зерен. Тогда механическое пластическое поведение границ и пограничная деформация могут вызывать развороты зерен, осуществляющие передачу деформации от зерна к зерну. В такой неоднородной среде со структурой локализованная пластическая деформация на мезоуровне может распространяться как нелинейные пластические волны.

Подобные волны имеют трансляционные и ротационные моды и представляют динамику пластической деформации – именно то, что в последнее время привлекает экспериментаторов: изучение процессов деформации и разрушения *insitu* (на месте нахождения) [22, 23].

В рамках одноуровневого подхода волн пластичности не может быть в принципе, так как неоднородность однородной среды приводит к дисперсии и разбиению волнового пакета. Однако при рассмотрении деформируемого твёрдого тела как многоуровневой системы с учетом наличия планарных подсистем в виде поверхностных слоев и внутренних границ раздела заключение о нелинейных волнах пластичности и разрушения получает убедительное обоснование. Более того, вне схемы нелинейных волн невозможно обеспечить воспроизведение концентраторов напряжений при распространении пластических сдвигов как локальных структурных превращений [24].

Нелинейные волновые процессы разрушения характерны для многих наноструктурированных объектов (многослойные наноструктурные покрытия, тонкопленочные структуры в микроэлектронике, наноструктурированные поверхностные слои функционального назначения в материаловедении и др.). Данными волновыми процессами можно управлять на основе вышеизложенной теории волн пластичности.

4. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле.

Хорошее согласие предсказаний калибровочной теории небилинейных волн канализированных структурных превращений в планарных подсистемах с экспериментальными данными свидетельствует о справедливости концепции авторов статьи [25] о необходимости представления поверхностных слоев и внутренних границ раздела *ведущей функциональной подсистемой* в деформируемом твердом теле. Поверхностные слои и

все внутренние границы раздела следует рассматривать не как планарные дефекты в трехмерном кристалле, а как самостоятельную планарную нелинейную подсистему с нарушенной трансляционной инвариантностью. Первичные пластические сдвиги в нагруженном твердом теле связаны не с дислокациями, а с нелинейными волнами канализированных структурных превращений в планарной подсистеме. Распространение нелинейных канализированных волн сопровождается периодической генерацией в зонах сильной кривизны деформационных дефектов, эмиссия которых в кристаллическую подсистему обеспечивает пластическое изменение ее формы.

Поверхностный слой в деформируемом твердом теле радикально влияет на масштабные уровни локализации пластического течения и разрушение материала в целом. Ослабленные силы связи и специфическая структура поверхностного слоя обусловливают более интенсивное развитие в нем пластического течения по сравнению с объемом материала. Несовместность деформации поверхностного слоя и кристаллической подложки обусловливает возникновение при их сопряжении эффекта гофрирования поверхности кристалла. С ростом степени деформации эффект гофрирования проходит три стадии своего развития.

В начальной стадии в тонком поверхностном слое возникает стохастически распределенное гофрирование на микромасштабном уровне. Подобный поверхностный слой является активной возбудимой средой, в которой распространяются бегущие импульсы атомных перераспределений, испускаемые базовым концентратором напряжений у захвата испытательной машины. Торможение бегущих импульсов кристаллической подложкой вызывает квазипериодическое возникновение микроконцентраторов напряжений, которые релаксируют генерацией дислокаций, уходящих в объем материала. В поверхностном слое возникает локализация деформации на мезомасштабном уровне.

Движение бегущих импульсов по направлению максимальных касательных напряжений τ_{max} вызывает локальные изгибы и связанные с ними периодические макроконцентраторы напряжений. Они релаксируют генерацией макрополос сброса, обуславливая периодическую макролокализацию деформации образца. На этой начальной стадии поверхностный слой функционирует подобно «насосу↓», заканчивающему дислокации в объем материала.

Вторая стадия гофрирования связана с формированием интерфейса между поверхностными слоем и объемом кристалла, на котором напряженно-деформированное состояние характеризуется распределением типа «шахматной доски». В этих условиях формируется стационарное гофрирование поверхностного слоя, которое наследует зоны растягивающих нормальных напряжений в «шахматной» структуре интерфейса.

На поверхности возникает мезосубструктурно-струйный материал. В зависимости от вида материала, «эффективной» толщины поверхностного слоя и его механических характеристик могут возникать три типа мезосубструктурно-струйного материала: одна система мезополос в направлении τ_{max} , две системы мезополос в сопряженных направлениях τ_{max} , система зигзагообразных двойных спиралей вдоль оси

деформируемого образца. На этой стадии стационарного гофрирования поверхностный слой работает по схеме «насоса↑», смещающего ламели мезополос гофра наружу.

На завершающей стадии гофрирования поверхностный слой, жестко прикрепленный к кристаллу в зонах сжимающих напряжений интерфейса, изгибаются как целое подобно потере устойчивости длинномерного стержня при одноосном сжатии. В зоне максимального изгиба поверхностного слоя, возникает макроконцентратор напряжений, который определяет место и время разрушения деформируемого образца.

Три вида стационарного гофрирования поверхностного слоя при структуре интерфейса в виде «шахматной доски» представлены на рис.3 и все наблюдаются экспериментально (рис.4) [25].

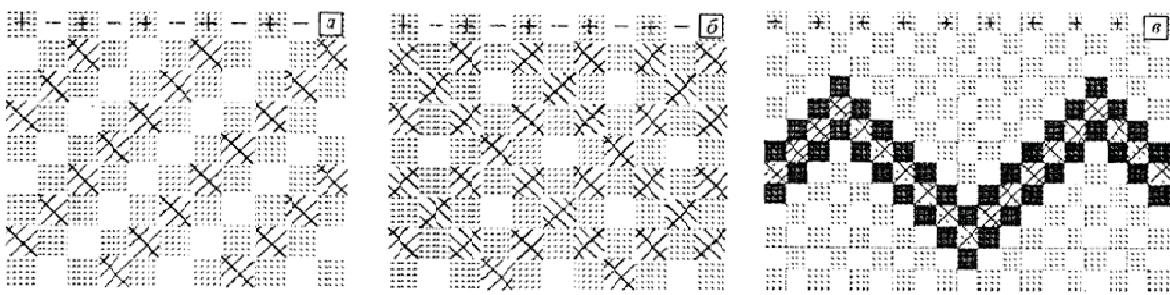


Рис.3. Три принципиально возможные схемы стационарного гофрирования поверхностного слоя деформируемого твердого тела при структуре интерфейса в виде «шахматной доски»

Характер гофрирования зависит от вида материала, состояния поверхностного слоя и его интерфейса с объемом кристалла, условий нагружения.

На рис.4,а показано гофрирование поверхностного слоя, которое выявляется спектр – интерферометрией при растяжении плоских образцов отожженных металлов и сплавов [26, 27]. Оно возникает после прекращения движения фронтов макрополос сброса. Поскольку эффективный поверхностный слой при деформации отожженного материала формируется только за счет избыточной плотности дислокаций, он имеет размытый интерфейс при сравнительно небольшой толщине поверхностного слоя [28]. Развитие в нем гофрирования только вдоль одного направления максимальных касательных напряжений τ_{max} (рис.3,а, 4,а) не должно сопровождаться сильными эффектами изгиба образца. Частично такой изгиб может компенсироваться встречным аккомодационным движением дислокаций в подповерхностном слое, частично может приводить к развитию поворотных мод деформации в образце. В связи с этим при растяжении нитеидных кристаллов всегда наблюдается эффект закручивания образца [29]. Однако до сих пор этот эффект не имел объяснения.

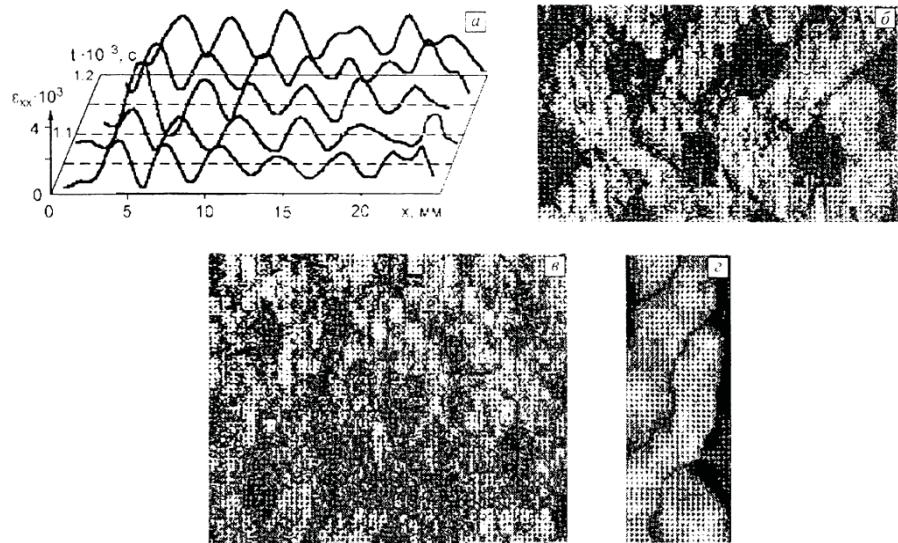


Рис.4. Экспериментальные картины стационарного гофрирования поверхностного слоя в деформируемом твердом теле; растяжение при 293К;
а – поликристаллический сплав Zr-2.5%Nb; б, в, г – малоуглеродистая сталь Ст3;
растяжение при T=293К после ультразвуковой обработки и последующего отжига при T=1103 K; ε =13 (б), 28 (в), 32% (г); сканирующая электронная микроскопия, ×250

Специальным конструированием поверхностного слоя и его интерфейса с объемом кристалла можно задерживать развитие всех трех стадий гофрирования, включая завершающую стадию разрушения. Это позволит упрочнять материал с одновременным увеличением его пластичности.

5. Структура поверхностных слоев металлов при трении с высокими нагрузками

Проблемы, связанные с трением и изнашиванием, имеют большое значение для решения прикладных задач повышения надежности и долговечности подвижных сопряжений, потому что только при трении возможно протекание процессов, связывающих воедино макро- и микропластическую деформации, квазиупругое взаимодействие контактирующих поверхностей, внутреннее и внешнее трение, схватывание за временные промежутки – значительно меньшие, чем позволяет диффузия, поверхностные волны, возбуждаемые ударным воздействием, автоколебания и многие другие явления.

Наиболее изучена микроструктура поверхностных слоев и ее изменение при трении [30], механизмы износа, включая зарождение и развитие систем трещин [31]. Этот успех понятен, так как сходство дислокационных структур при трении и больших пластических деформациях позволяет применить методы современной теории прочности и пластичности [7], которые указывают на многомасштабный характер процессов деформирования при трении.

Современные тенденции развития техники в сторону увеличения передаваемых через узлы трения мощностей при одновременном снижении габаритов и массы детали диктуют необходимость изучения поведения материалов в условиях тяжелых нагружений, когда происходит нарушение контактно-гидродинамического режима смазки и перехода в режим граничного или сухого трения. Это важно знать еще и потому, что в режимах установившегося трения возможны флуктуации температуры, нагрузки или изменение скорости подачи смазки, которые приводят к кратковременным отклонениям от стационарного режима и последующему разрушению поверхности трения. Способность материала устойчиво работать в условиях, близких к предельным уровням несущей способности (т.е. в условиях критической нагрузки, при которой нарушается стационарный режим трения), значительно расширяет область применения трибосопряжения.

В соответствии с концентрацией структурных уровней деформации [32, 7] при контактных взаимодействиях, когда осуществляется фрагментация, основным является мезоскопический уровень пластического деформирования. Следовательно, распределение напряжений имеет тот же масштаб. Напряжения ответственны за появление несплошностей по границам фрагментов и предопределяют разрушение поверхности трения. Кроме того, наличие высокодисперсной фрагментированной структуры и возможность перемещения фрагмента относительно друг друга обуславливают эффекты экструзии на тех участках поверхности, на которых тангенциальные и нормальные напряжения превышают критические. В дальнейшем эти участки выглаживаются [30], что ускоряет удаление материала с поверхности.

Таким образом, формирование поверхностных слоев при трении с отличной от исходной структурой в значительной мере определяет триботехнические характеристики скользящего контакта.

Следует отметить, что с точки зрения классической механики сплошной среды и теории теплопроводности нет никаких оснований считать, что существует поверхностный слой. Действительно, напряжения и температура в стационарной задаче трения однородно распределены по всей толщине образца. Представление о том, что внешнее напряжение и температура локализованы в приповерхностном слое, требует иного, отличного от стационарного, подхода к решению задачи контактирования при трении.

Рассмотрим ситуацию, когда тепловые и механические воздействия на поверхность материала при трении не являются стационарными, а носят характер последовательности коротких «ударов» большой амплитуды, имеющих случайные длительность и интервал следования. В основе такой нестационарности лежит стохастическое взаимодействие микронеоднородностей поверхности, которое в зависимости от сочетания внешних воздействий, параметров изнашивания и упругопластической податливости элементов трибосопряжения может перейти в автоколебательное состояние [31]. При размере трибосистемы порядка 1 см частота $\nu \sim 10^5 \text{ Гц}$ – это действительно характерная частота акустической эмиссии (АЭ) при трении (30-80 kГц) [33]. В пользу автоколебательного характера динамики свидетельствует и то, что изменение параметров трибосистемы, таких как состав, скорость труящихся поверхностей, величина контактных нагрузок

зок влияет в основном на уровень амплитуд АЭ, практически не изменяя его частотного состава [33].

Нестационарность взаимодействия поверхностей трения носит фактически макроскопический характер. Поэтому можно описывать процессы, протекающие при трении без явного учета влияния неоднородностей, моделируя лишь специфику внешнего воздействия при трении наложением нестационарных граничных условий.

Для анализа тепловых и механических воздействий на поверхностный слой материала фрикционного элемента Джанахмедовым А.Х. предложена термомеханическая теория износа [34], на основе которой проведено исследование нестационарных режимов износа и разрушения контактирующих деталей нефтепромыслового оборудования [35, 36]. Доказано, что основная часть возникающих при трении напряжений сосредоточена в приповерхностных слоях фрикционных элементов. Эти напряжения становятся пропорциональными температуре вспышки и вызывают сильный нагрев в тонких приповерхностных слоях, что приводит к образованию прижогов, термических пятен и очагов микротрещин (рис.5) [10].

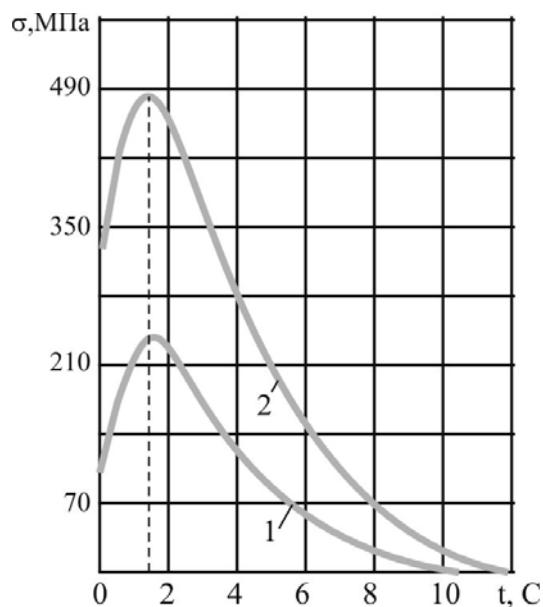


Рис. 5. Изменение поверхностных напряжений в материале шкива, вызванное градиентом температуры, температурными вспышками в процессе торможения: 1- σ_z ; 2 - σ_s

Поэтому можно считать, что именно в приповерхностном слое в случае нагрева при воздействии температурной вспышки $\theta_{всп}$ зарождаются трещины, обусловленные термической усталостью материала. Дальнейшее развитие эти трещины получают в результате остывания поверхностей слоя и возникновения температурного градиента, когда термические напряжения в приповерхностном слое достигают наибольших значений, определяемых формулой (17), и проходят через максимум (рис.6) [35]:

$$\bar{\sigma}_{10}^* = \frac{kB_i}{kB_i + \frac{1}{\sqrt{\pi t}}} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(1 - e^{-\frac{1}{4t}} \right) + erf \left(\frac{1}{2\sqrt{E}} \right) \right], \quad (17)$$

где k – коэффициент перекрытия, B_i – критерий Био, $\bar{t} = \frac{a}{b^2} t$ – безразмерное время, $\bar{x} = \frac{x}{b}$ – безразмерная пространственная переменная, b – эффективная глубина проникновения тепла, a – коэффициент в уравнении теплопроводности $\frac{\partial \Delta \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Delta \theta}{\partial x^2}$ ($\Delta \theta(x, t)$ - перепад температуры),

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt = \Phi(x\sqrt{2}),$$

$\Phi(x)$ – функция распределения стандартной нормальной случайной величины.

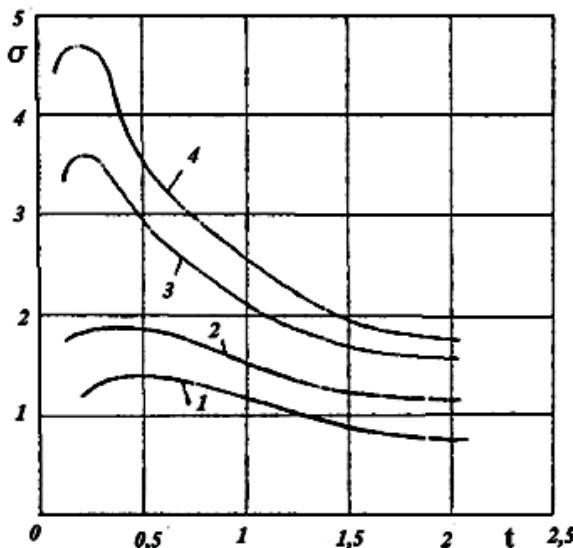


Рис.6. Зависимость безразмерного напряжения от безразмерного времени торможения при остывании шкива для различных значений критерия Би:
1- $Bi = 0,5$; 2- $1,0$; 3- $0,5$; 4- ∞ , $x=0$

Анализ механизма изнашивания фрикционных пар показал, что в условиях циклического нагрева и охлаждения большое влияние на зарождение и развитие трещин оказывают как многофазность структуры, так и термические свойства отдельных фаз. Определённую роль в разрушении материала играет характер распределения трещин на поверхности.

Поскольку температура вспышки может быстро достигать нескольких сот градусов, то такой скачок температуры может привести материал в состояние пластичности, когда сопротивление трению падает. Поскольку длительность взаимодействия на пятнах фактического контакта составляет $10^{-6} \div 10^{-3}$ с, то важное значение имеют не свойства статической прочности поверхностного слоя материала пары трения, а свойства усталост-

стной прочности, если учесть, что кристаллическая решетка твердого тела реагирует на воздействия через $10^{-8} \div 10^{-5}$ с. Поэтому перстройка поверхностного слоя под действием внешних тепловых нагрузок происходит именно в процессе установления температурного поля, и к моменту достижения установившейся температуры поверхностный слой уже находится под действием тех или иных остаточных напряжений.

Проведенные расчеты показали [35], что значительное влияние на основные показатели качества поверхностного слоя оказывает скорость теплового процесса. Скорость термомеханических процессов обуславливает существенное изменение характера структурных превращений в поверхностных и приповерхностных слоях, а также физико-механических свойств материала. В процессе трения зона пластической деформации не ограничивается объемом неровностей, а простирается в глубь материала. При этом материал поверхностного и подповерхностного слоев имеет невысокую плотность дислокаций. При скольжении дислокации накапливаются на некотором расстоянии от поверхности, происходит повышение их плотности, что приводит к образованию микропустот в подповерхностном слое.

Анализ напряженного состояния поверхностного слоя при торможении показал, что силы трения при торможении способствуют упрочнению поверхностного слоя, созданию сжимающих остаточных напряжений. Температурные же деформации приводят, как правило, к развитию в поверхностном слое эффекта разупрочнения, связанного с образованием растягивающих остаточных напряжений.

На глубину нагрева поверхностных слоев существенное влияние оказывает охлаждение (критерий Био). При одинаковых параметрах теплового источника максимальная глубина прогрева поверхностного слоя до заданной температуры при охлаждении всегда меньше, чем без охлаждения. Наличие теплоотдачи увеличивает скорость охлаждения поверхности материала, но по мере удаления от поврежденности влияние охлаждения снижается. Это особенно важно для тормозов, работающих в повторно-кратковременном режиме.

Поскольку температурно-силовое воздействие влияет на характер изменения скоростей нагрева и охлаждения и на температуры на различной глубине поверхностного слоя, это можно использовать для исследования влияния условий охлаждения на кинетику теплового процесса.

Предложенная в [34] теоретическая модель механизма разрушения в результате термомеханического нагружения при трении подтверждает предположение об образовании поверхностного слоя с низкой плотностью дислокаций и интенсивном трещинообразовании в подповерхностных слоях, которое согласуется с результатами экспериментальных исследований [37] и исследованиями рентгенографическим методом структурных изменений в тонком поверхностном слое металла при трении [38].

Рассматриваемая в [6а] модель механического воздействия на поверхность материала предполагает, что в поверхностном слое при трении протекают те же процессы, что и при ударном воздействии. В динамической теории кристаллических сред с дислокациями [16, 39, 40] показано, что при ударном воздействии на кристаллическую среду в

ней, наряду с хорошо известными типами волн (упругий предвестник, волна объемного упругого сжатия) и вязким течением, инициируется сильно диссипативная волна пластических поворотов, затухающая в тонком поверхностном слое. Это должно обусловить образование вблизи поверхности удара слоя с сильными кристаллографическими разориентировками, а следовательно, и с высокой плотностью дислокаций, поскольку наличие градиента кристаллографического поворота $\vec{\Omega}$ приводит к возникновению в материале дислокационной плотности α_{km} :

$$\alpha_{km} = \frac{\partial \Omega_k}{\partial x_m} - \delta_{km} \frac{\partial \Omega_p}{\partial x_p}. \quad (18)$$

Такие слои с высокой дислокационной плотностью действительно наблюдаются в экспериментах по ударному напряжению материалов [41].

В данной теории динамика кристаллической среды с дислокациями описывается полным смещением точек среды \vec{u} , тензором пластической деформации ε_{ij} и вектором пластического поворота $\vec{\Omega}$. Эти три группы степеней свободы обладают при не слишком высоких частотах воздействий независимой динамикой, определяемой ниже следующими уравнениями [42].

Динамика полных смещений. При достаточно высоких напряжениях упругопластическая среда ведет себя как вязкая жидкость с некоторым эффективным коэффициентом динамической вязкости и описывается уравнением Навье-Стокса:

$$\rho \ddot{\vec{u}} = K \nabla \operatorname{div} \vec{u} + \eta \left(\Delta \vec{u} + \frac{1}{3} \nabla \operatorname{div} \dot{\vec{u}} \right), \quad (19)$$

где K – модуль объемного сжатия, Δ – оператор Лапласа. «Продольные» смещения (по условию $\operatorname{rot} \vec{u} = 0$) дают известную волну объемного сжатия, а «поперечные» смещения, удовлетворяющие условию $\operatorname{div} \vec{u} = 0$, определяют сдвиговое вязкое течение согласно уравнению диффузионного вида:

$$\rho \dot{\vec{V}} = \eta \Delta \vec{V},$$

где $\vec{V} = \vec{u}$ – скорость течения.

Динамическое воздействие с частотой ω проникает в среду на глубину

$$l_u = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}}. \quad (20)$$

Динамика пластических поворотов. Как показано в [43], динамика пластических поворотов также задается уравнением диффузионного вида

$$\dot{\vec{\Omega}} = \frac{C}{4\eta} (\Delta \vec{\Omega} + \nabla \operatorname{div} \vec{\Omega}), \quad (21)$$

где C – коэффициент, характеризующий упругость среды по отношению к введению в нее пластического изгиба-кручения. Глубина проникновения волн пластических поворотов

$$l_\Omega = \sqrt{C/2\eta\omega}. \quad (22)$$

Заметим, что глубина слоя ламинарного течения (20) и глубина проникновения волн пластических поворотов (22) определяются совершенно различными материальными константами и могут иметь, в принципе, различный порядок величины. Более того, при увеличении вязкости среды толщина слоя течения растет, а толщина слоя пластических поворотов уменьшается.

Динамика пластических деформаций. Характер динамики пластических деформаций, согласно [44], кардинально отличается от такового для динамики пластических поворотов и определяется уравнением

$$B\ddot{\varepsilon} + \mu\varepsilon - C\Delta\varepsilon - 2\eta\dot{\varepsilon} = 0. \quad (23)$$

Здесь B - эффективная масса единицы длины дислокации. При малых частотах воздействий дисперсионное соотношение уравнения (23) имеет вид

$$k = i\sqrt{\mu/C}, \quad (24)$$

т.е. волновой вектор является чисто мнимой величиной, не зависящей от частоты. Это значит, что пластические деформации проникают в среду только на конечную глубину.

$$l_\varepsilon = \sqrt{C/\mu}. \quad (25)$$

Характер и свойства дефектной структуры, возникающей в результате трех описанных движений, принципиально различны [45]. Пластическое течение вообще не связано с рождением значительного количества дефектов.

Волна пластических поворотов обуславливает резкое возрастание концентрации дислокаций (18), однако не приводит к зарождению макроскопических внутренних напряжений, поскольку все дислокации при этом находятся в конфигурациях, соответствующих границам разориентации.

Наконец, волна пластических деформаций вызывает рост плотности дислокаций в конфигурациях, связанных с возникновением больших дальнодействующих напряжений. К сожалению, экспериментальные данные о параметрах C и η , определяющих механическое поведение поверхностных слоев, отсутствуют. Однако по наблюдаемым значениям глубин слоев пластического течения и фрагментированных структур ($l_u \sim 100$ и $l_\Omega \sim 20 \text{ мкм}$) для этих параметров получены следующие оценки [6a]:

$$\eta \approx 40 \frac{\kappa^2}{m \cdot c}, \quad C \approx 3 \cdot 10^{-2} \frac{\kappa^2 \cdot m}{c^2} \quad (26)$$

Подставляя эти оценки в (25), можно вычислить глубину проникновения пластических деформаций: $l_\varepsilon \approx 0,6 \text{ мкм}$. Образование таких слоев субмикронной толщины было отмечено в работе [46].

Толщину поверхностного слоя, включая его наиболее активную составляющую – приповерхностный слой, можно найти из динамики температурного поля в макроматериале, которое определяется уравнением температуропроводности

$$\dot{T} = \alpha \Delta T. \quad (27)$$

где α – коэффициент температуропроводности, Δ - оператор Лапласа. Дисперсионное соотношение для уравнения (27), определяющее волновой вектор k распространяющегося в среде возмущения с частотой ω , имеет вид [6a]

$$k = \sqrt{\omega/2\alpha} \cdot (1 + i). \quad (28)$$

Величина, обратная мнимой части волнового вектора, связана с глубиной l_T проникновения возмущения в глубь материала:

$$l_T = \sqrt{2\alpha/\omega}. \quad (29)$$

Подставляя частоту ω [33] и характерное значение коэффициента температуропроводности металлов $\alpha \approx 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [47] в формулу (29), найдем толщину «температурного поверхностного слоя» $l_T \approx 20 - 30 \text{ мкм}$, что по порядку величины совпадает с экспериментально наблюдаемой толщиной поверхностного слоя [33, 45, 48].

Таким образом, в результате удара по поверхности в глубь среды распространяются сразу несколько волн, соответствующих различным группам внешних и внутренних степеней свободы упругопластического континуума, что должно способствовать появлению не одного, а по крайней мере, трех поверхностных слоев число механического происхождения. Кроме того, динамическое воздействие при трении не обязательно связано с автоколебаниями. Оно может являться результатом стохастического взаимодействия неоднородностей поверхности, обусловленных шероховатостью. В этом случае характерная глубина проникновения возмущений будет другой.

Вышеизложенная концепция формирования поверхностных слоев в результате термомеханических воздействий не противоречит экспериментальным фактам ни для установившегося нормального режима трения, ни в случае критического трения, обусловленного схватыванием.

Заключение. Начиная с первой работы в 1982 г. [33], физическая мезомеханика внесла значительный вклад в материаловедение и смежные области. Введение в физической мезомеханике понятия структурного уровня в деформируемых твердых средах позволило связать механику сплошной среды и теорию дислокаций. В результате различные кристаллографические явления, ранее объясняемые с использованием эмпирических подходов, получили объяснение на строгой физической основе. С этой точки зрения можно сказать, что физическая мезомеханика открыла новую эпоху в материаловедении и смежных областях.

Органическая взаимосвязь сдвигов и поворотов приводит к тому, что элементарным актом пластической деформации оказывается не сдвиг, а трансляционно-ротационный вихрь (ТРВ). Вихревой характер деформации приводит в самосогласованное движение всю иерархию микро-, мезо- и масштабных структурных уровней деформации и обеспечивает организацию новых каналов диссипации энергии, более эффективных, чем от движения отдельных дислокаций.

Полученные с помощью группы калибровочных преобразований $GL(3,R)$ нелинейные волновые уравнения, при их анализе, с учетом неравновесной термодинамики дискретных подсистем, позволяют в рамках многоуровневого подхода обосновать как волновую природу канализированной пластической деформации (волны пластичности), так и диссипативный процесс движения деформационных дефектов на одном структурно-масштабном уровне.

Поверхностные слои и все внутренние границы раздела следует рассматривать не как планарные дефекты в трехмерном кристалле, а как самостоятельную планарную нелинейную подсистему с нарушенной трансляционной инвариантностью, которая является ведущей функциональной подсистемой в деформируемом твердом теле.

Формирование поверхностных слоев при трении с отличной от исходной структурой в значительной мере определяет триботехнические характеристики скользящего контакта. Предложенная в [9] теоретическая модель механизма разрушения в результате термомеханического нагружения при трении подтверждает предположение об образовании поверхностного слоя с низкой плотностью дислокаций и интенсивном трещинообразовании в подповерхностных слоях, которое согласуется с результатами экспериментальных исследований и рентгенографическими исследованиями структурных изменений в тонком поверхностном слое металла при трении.

Рассматриваемая в [35] модель механического воздействия на поверхность материала предполагает, что в поверхностном слое при трении протекают те же процессы, что и при ударном воздействии. Предложенная на основе данной модели концепция формирования поверхностных слоев в результате термомеханических воздействий не противоречит экспериментальным фактам ни для установившегося нормального режима трения, ни в коем случае критического трения, обусловленного схватыванием.

Для перехода от микроструктурного масштабного уровня к макроскопическому необходимо учесть вклад эволюции промежуточного, мезоструктурного уровня, который характеризуется движением соответствующих мезодефектов, обеспечивая формирование трансляционно-ротационных мод деформации. Убедительные масштабные экспериментальные результаты и теоретические обобщения о важной роли мезоструктурного уровня в процессе формирования свойств реальных, содержащих фундаментальное экспериментальное и методологическое обоснование нового научного направления – физической мезомеханики материалов.

LITERATURE

1. Panin V.E. Modern problems of the strength of solids // Math. USSR Academy of Sciences. Ser. tehn. sciences. 1987, Issue 3, pp. 87- 97.
2. Panin V.E., Grinyaev Y.V., Danilov.V.I. et al. Structural levels of plastic deformation and fracture. Novosibirsk: Sciences. Sib. Dept., 1990, – 225 p.
3. Panin V.E., Grinyaev Y.V., Egorushkin V.E. et al. The spectrum of excited states and mechanical vortex field in a deformed crystal // Math. universities. Physics, 1987, № 1, pp. 36- 51.
4. Panin V.E., Grinyaev Y.V., Yelsukova T.F., Ivanchin A.G. Structural levels of deformation of solids // Math. universities. Physics, 1982, № 6, pp. 5- 27.
5. Panin V.E., Egorushkin V.E., Yelsukova T.F., Veselov O.V. Translation- rotation vortices disclination substructure and the mechanism of fatigue fracture of polycrystalline // Dokl. USSR Academy of Sciences. – 1991, vol. 316, № 5, pp. 1130 -1132.

6. **Panin V.E., Egorushkin V.E., Makarov P.V. et al.** Physical Mesomechanics and computer modeling of materials. – Novosibirsk, Sciences, Siberian Academy of Sciences Publishing Company, 1995, a) vol. 1 – 298 p; b) vol. 2 – 320 p.
7. **Panin V.E., Likhachev V.A., Grinyaev Y.** Structural levels of deformation of solids. – Novosibirsk: Sciences. Sib. Dept., 1985, - 229 p.
8. **Panin V.E.** High-Strength and wear-resistant materials with damping structure, based on metals and ceramics // Abstracts of first European East-West Symp. on Materials and Processes - Helsinki, 1990.
9. **Panin V.E., Frolov K.V.** Wave nature of plastic deformation an fracture of Solids // The Physical and Mechanical Methods of Investigations of Materials under Loading: Proc. Intern. Conf.-Tomsk: University Press, 1990, pp. 9 - 17.
10. **Panin V.E., Buhbinder I.L., Grinyaev Y.V., Egorushkin V.E.** Preprint TF SO Academy of Science USSR, 1986, № 9, - 14 p.
11. **Halperin B.J., Nelson D.R.** Phys. Rev. Lett., 1979, 19, 2457.
12. **Panin V.E., Grinyaev Y.V.** Math. universities. Physics, 1984, № 1, - 61 p.
13. **Grinyaev Y.V., Devil N.V.** Gauge theories of plastic deformation in mechanics the continua // Math. universities. Physics, 1990, № 2, pp. 36- 50.
14. **Egorushkin V.E.** Gauge dynamic theory of defects in patchy environments with deformable structure. Behavior of the interface // Math. universities. Physics, 1990, № 2, pp. 51- 68.
15. **Egorushkin V.E.** The dynamics of plastic deformation. Waves localized plastic deformation in solids // Math. universities. Physics, 1992, № 4, pp. 19 - 41.
16. **Popov V.L., Devil N.V.** Gauge theory of waves in an elastic- plastic medium // Math. universities. Physics, 1992, № 4, pp. 83 -91.
17. **Kadic A., Edelen D.G.** A Gauge Theory of Dislocation and Declinations Lecture Notes in Physic. - Heidelberg: Springer - Verl., 1983, vol.174, -168 p.
18. **Krloner E.** Gauge Field Theories of Defects in Solids. - Stuttgart: Max Plank Inst., 1982, - 102 p.
19. **Barut A., Roichka R.** Group representation theory and its applications. - Moskow: Mir, 1980.
20. **Cunther H.** Ann. Physic, 1983, 495, 291.
21. **Lagoudas D.C., Edelen D.G.B.** Int. J. Eng. Sci, 1989, 27, 411.
22. **Mescheryakov Y.I., Antroshenko S.A., Balicheva T.V. et al.** (Preprint. / FTI Academy of science USSR, № 24) - L., 1989, - 55 p.
23. **Panin V.E., Zuev L.V., Danilov V.I., Mnih N.M.** Features of the displacement field during plastic deformation of coarse-grained siliceous iron // Preprint. / FTI Academy of science USSR, 1988, vol. 66, № 2, pp. 1005 - 1009.
24. **Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V.** Nonlinear wave processes in a deformed solid as a multilevel hierarchically organized system. 2012. DOI: 10.3367/UFNr.0182.2012 i. 1351
25. **Panin V.E., Panin A.V.** The effect of the surface layer in a deformable solid // Physical Mesomechanics, 2005, vol. 8, № 5, pp.7- 15.

26. **Barannikova S.A.** Dynamics and evolution macrolocalization deformation in metal single crystals at slip and twinning . Author. Dis. Dokl. physical and mathematical sciences. – Tomsk: IFNM SD RAS, 2005, 40 p.
27. **Zuev L.B., Danilov V.I.** Slow - wave processes in the deformation of solids // Phys. Mesomech, 2003, vol. 6, № 1, pp. 75 -94.
28. **Alekhin V.P.** Physics of strength and plasticity of the surface layers of materials. – Moskow: Nauka, 1983, - 280 p.
29. **Antipov S.A., Bataronov I.L., Drazhzhin A.M. et al.** The rotational instability of plastically deformed by stretching silicon whiskers // Crystallography - 1986, vol. 34, № 3, pp. 702 -705.
30. **Rapoport L.S., Rybakova L.M.**, Effect of the structural state of the surface layers on the friction and wear processes: In 2 parts // Friction and wear. - Part.I, 1987, vol. 8, № 5. - pp. 888 - 894; Part II, 1987, vol.8, №6, pp. 1038 - 1043.
31. **Alekseev N.M.** New structural features of wear solids / / In 2 Part // Friction and wear. - CH.I, 1989, vol.10, № 2, pp. 197 - 205.
32. **Vladimirov V.I.** Problems of physics of friction and wear // Physics durability of metal surfaces, L.: FTI, RAS 1988, pp. 8 - 41 .
33. **Vlasov V.M., Melnichenko N.V., Reiser E.S.** Diagnosis of acoustic emission processes of destruction of bridges seizure in theory steels without lubricant // Friction and wear. – 1989, vol.10, № 2, pp. 257 -261.
34. **Janahmadov A.Kh.** Thermal destruction of the friction pairs (brakes) , working in changed mode. Thermomechanical theory wear // Friction and wear. 1996, vol. 17, № 4, pp. 351 -356.
35. **Janahmadov A.Kh.** Tribological problems in the oil and gas equipment. - Baku: Elm, 1998. - 216 p.
36. **Janahmadov A.Kh.** Oil tribology. - Baku: Elm, 2003. - 326 p.
37. **Suh N.P., Yahanmir C.** Prospects tribology // Tribology in the CIS and the United States: Research and Applications. – Moskow: Engineering; N.Y, AllertonPressInc. 1993, pp. 14 - 16.
38. **Rybakova L.M., Kuksenova L.I.** Structure and wear resistance of the metal. - Moskow: Mechanical Engineering, 1982. - 212 p.
39. **Popov V.L., Chertova N.V.** Gauge theory of "plastically incompressible" elastic-plastic medium. II. Dispersion relations with dissipation // Ibid. 1992, pp. 335 - 340.
40. **Popov V.L.** Gauge theory of "plastically incompressible" elastic-plastic medium. I. Dispersion relations and propagation of perturbations without dissipation // Int.J. Engineer Sci., 1992, vol.30, № 3, pp. 329- 334.
41. **Lykov S.V., Itin V.I., Mesatsa G.A. et al.** The evolution of stress waves excited in metals pulsed electron beam // Dokl. USSR Academy of Sciences., 1990, vol. 310, № 4, pp. 858 - 861.
42. **Popov V.L.** Dynamic Gauge Model for Elastic-Plastic Behavior of Crystalline Solids. - Tomsk, 1993. - (Prep. Inst. for Strength Physics and Matherials Sciences; № 11).
43. **Popov V.L.** Dynamics of plastic rotations in crystals // Journal Letters to Technical Physics, 1993, vol. 19, Issue 14, pp. 80 - 82.

44. **Popov V.L.** Cutoff frequency effects and skin - layer when considering wave stress deviator in a crystalline medium with dislocations // Journal Letters to Technical Physics, 1993, vol.19, Issue. 23, pp. 79 - 82.
45. **Kolubaev A.V., Fadin V.V., Panin V.E.** Studies of durability of composites containing titanium carbide // Math. universities. Physics, 1992, № 12, pp. 64 -68.
46. Surface strength of materials of friction // Ed. B.I. Kostetskii. - Kiev: Technology, 1976. - 291 p.
47. Physical quantities: / Ed . IS Grigorieva , E.Z. Meylihova. - Moskow: Energoatomizdat, 1991. - 1232 p.
48. **Tarasov S.Y., Kolubaev A.V.** The structure of the surface layers of the alloy friction 36NHTY // Math. universities. Physics, 1991, № 8, pp. 9 - 12.
49. **Dubrovin B.A., Novikov S.P., Fomenko N.G.** Modern geometry. – Moskow: Nauka, 1979. - 769 p.

FİZİKİ MEZOMECHANİKA, MÖHKƏMLİK VƏ PLASTİKLİK FİZİKASI İLƏ BÜTÜV MÜHİT MEXANİKASININ BİRLƏŞMƏSİ

A.M. PAŞAYEV, Ə.X. CANƏHMƏDOV

Bərk cisim fizikasının – bütöv mühit mexanikasının (makrosəviyyə) və deformasiya olunan bərk cisimlərin möhkəmliyi və plastikliyi fizikasının (mikrosəviyyə) arasında inkişaf edən strukturlu-qeyri bircinsli mühitin fiziki mezomexanikasının yeni sahəsində əsərlərin analitik xülasəsi verilib. Deformasiyanın strukturlu səviyyələrin konsepsiyasına əsasən, deformasiya olunan bərk cisimdə, sahı lay aparıcı funksional sərbəst alt sistemdir. Deformasiyanın dərəcəsinin artması ilə burada nümunənin ümumiyyətlə plastik axımının və dağılımasının məhdudlaşdırma mərhələsinə müəyyən təsir göstərən atom prosesləri (plastiklik dalgaları) inkişaf edir. Deformasiya, mezosəviyyədə translyasiya-rotasiyalı axımların xarakterini daşıyır.

Fiziki mezomexanikanın universallığı ondan ibarətdir ki, kalibriyalı simmetriyanın prinsipinə əsaslanır və Maksvellin elektrodinamikası və ya ümumi nisbilik nəzəriyyəsi kimi başqa kalibriyalı nəzəriyyələrin analoqudur.

PHYSICAL MESOMECHANICS AS AN INTEGRATION OF CONTINUUM MECHANICS WITH PHYSICS OF PLASTICITY AND STRENGTH

A.M. PASHAYEV, A.Kh. JANAHMADOV

The analytical overviewof studies in the new field of solid physics - physical mesomechanics of structurally inhomogeneous media, developing at the junction of the continuum mechanics (macro level) and the physics of plasticity and strength of deformable solid objects (micro level). According to the concept of structural levels of deformation, the surface layer of deformable solid objects is independent, and the leading functional subsystem. With increase ofdeformation level, it develops the autonomous processes (plasticity waves), which have a decisive influence on the plastic flow staging localization and the sample destruction in general. On the meso level, the deformation has a translational-rotational vortices nature.

The versatility of physical mesomechanics is due to the fact that it is based on the principle of gauge symmetry and it is analogous to other gauge theories such as Maxwell's electrodynamics and general relativity theory.

ФРИКЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЯХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ

А.Х. ДЖАНАХМЕДОВ, А.И. ВОЛЬЧЕНКО*, Э.С. ПИРВЕРДИЕВ,
Д.А. ВОЛЬЧЕНКО*, Н.А. ВОЛЬЧЕНКО**, Д.Ю. ЖУРАВЛЕВ*

В материалах статьи раскрыты явления возникновения и развития электро- и тепловых взрывов в подповерхностном слое полимерной накладки, а также разрядного явления, пробивающего слой между микровыступами накладки.

Ключевые слова: *полимерная накладка, металлический фрикционный элемент, микровыступы, пятно контакта, фрикционное взаимодействие, электрическое и тепловое поле, электрический и тепловой взрыв, электрический разряд.*

Введение. Одним из важнейших разрешений научно-технического направления является создание полимерных материалов для фрикционных накладок, используемых в металлополимерных парах трения. Последние широко применяются в передаточных и тормозных устройствах. Наряду с механическими, физико-химическими и тепловыми характеристиками, полимерные материалы должны обладать электрическими характеристиками [1]: электропроводящими, электретными, пьезо- и пироэлектрическими. При этом применение полимерных материалов с заданной совокупностью электрических характеристик, которые не превышали бы допустимых величин, должны отвечать преобладающим условиям и режимам нагружения металлополимерных пар трения тормозных устройств.

В последнее время ряд исследователей обратили внимание на пробой полимерных диэлектриков. Последний бывает: электронный, электромеханический, электрический и тепловой [1, 2]. Однако во всех работах [3 – 29 и др.] не было уделено внимание взрыву металлических включений, которые применяются в качестве наполнителя полимерных накладок, и последующему за ним тепловому разряду. Взрыв металлических включений происходит в подповерхностном слое полимерной накладки в процессах электротермомеханического трения в тяжелонагруженных фрикционных узлах ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. Образовавшиеся после взрыва продукты в дальнейшем подвергаются разряду тепловыми токами.

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (г. Ивано-Франковск, Украина)

**Кубанский государственный технологический университет (г. Краснодар, Российская Федерация)

Одной из основных характеристик при исследовании взрыва проволоки является термическая стойкость металла, нагреваемого импульсом электрического тока [3], или удельное «действие» его взрыва.

Следует отметить, что удельное «действие» тока до момента плавления проволоки пользовалось ранее для расчета плавких предохранителей [4] и мостиков электродетонаторов [5]. Исследования электровзрыва проволоки выполнено в работах [3, 6]. Удобство использования характеристики удельного «действия» импульса тока до взрыва определяется тем, что для большинства металлов она слабо изменяется (по сравнению с введенной энергией) в широком интервале изменения скорости ввода энергии в металл [7].

Электропроводность поверхностных слоев полимерных накладок

Одной из основных характеристик полимерных материалов является электропроводность – их способность пропускать электрический ток I (А) под воздействием электрического поля напряженностью E (В/м). Количественно электропроводность характеризуется удельной объемной проводимостью γ при постоянном токе куба размером 1 x 1 x 1 м, причем ток проходит через куб между двумя противоположными гранями (рис. 1 а): $\gamma = I/A_1E$, где A_1 – площадь поперечного сечения; $I/A=i_V$ – плотность тока; единица измерения удельной объемной проводимости См/м (Сименс/м) или См/см (электропроводность куба размером 1 x 1 x 1 см).

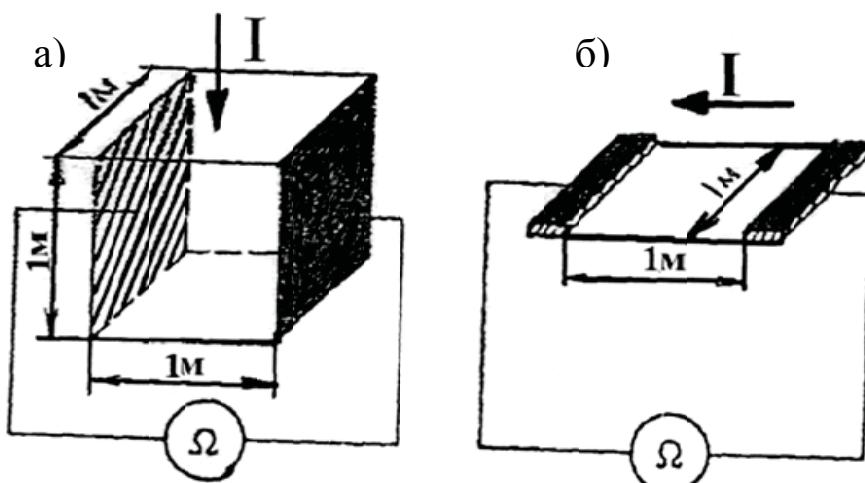


Рис.1 а, б Определение удельного объемного (а) и удельного поверхностного (б) сопротивления полимерных материалов в паре трения «металл – полимер»

Согласно принятой терминологии (согласно стандарта) удельное объемное сопротивление – отношение напряженности электрического поля к плотности тока, проходящего через объем полимерного образца материалов, удельное поверхностное сопротивление – отношение напряженности электрического поля к току на единицу ширины поверхности полимерного образца материалов. Значение ρ_V (Ом·м или Ом·см) определяют по формуле: $\rho_V = E / i_V$; $\gamma_V = 1 / \rho_V$. Удельное поверхностное сопротивление ρ_S – это

сопротивление квадрата поверхности размером (1 × 1 м, 1 × 1 см) тока, который идет по поверхности между двумя противоположными сторонами (рис. 1 б). Значение ρ_s (Ом) рассчитывают по плотности поверхностного тока i_s и напряженностью поля E : $\rho_s = E / i_s$. Нетрудно убедиться в том, что поверхностное сопротивление квадрата не зависит от его размеров.

Поверхностное сопротивление можно рассматривать как объемное сопротивление ρ тонкого поверхностного слоя, которыми являются пленки вторичных структур I и II типа, толщиной d ; тогда $\rho_s = \rho / d$.

Необходимо заметить, что при изменении толщины пленок ток на поверхности микровыступов полимерной накладки значительно меньше объемного тока, протекающего через толщину микровыступа. Зависимость для расчета имеет следующий вид

$$\rho_v = \frac{U}{I} \frac{\pi D^2}{4L},$$

где U – напряжение; D – диаметр пятен контакта металлического микровыступа; L – толщина пленки.

Сложной проблемой является определение ρ_v тонких полимерных пленок (< 10 мкм).

На рис. 2 приведены значения удельного объемного сопротивления полимеров и полимерных материалов, которые можно разделить на три группы: проводники с $\rho_v < 10^3$ Ом·м, антистатические материалы с ρ_v от 10^3 до 10^9 Ом·м и изоляторы с $\rho_v > 10^9$ Ом·м. Антистатические материалы имеют сопротивление достаточно низкое, чтобы статические заряды быстро спадали, но достаточно высокое, чтобы изоляционные свойства сохранились. Часто для ускорения спада статических зарядов снижают только поверхностное сопротивление, обрабатывая поверхность полимерных изделий специальными веществами – антистатиками; удельное объемное сопротивление при этом остается прежним.

Механизм электропроводности полимерной накладки зависит от химического состава и структуры полимера, а также инъекции носителей зарядов. Проводимость γ определяется концентрацией токов в единице объема n и подвижностью на μ , а также зарядом иона q

$$\gamma = qn\mu.$$

В самом чистом полимере имеется достаточное количество загрязнений, остатки катализаторов, продукты диссоциации и деструкции, которые могут быть источником ионов. При $\rho_v = 10^9$ Ом·м, а их подвижности = 10^{-9} м²/(В·с), чтобы обеспечить проводимость. (Эта концентрация исключительно низка: так, если молекулярная масса мономерного звена 100, число мономерных звеньев в 1 м³ 10^{28} , то на 1 миллиард мономерных звеньев приходится один ион).

Изменение электропроводности ρ_V при увеличении поверхностной температуры тесно связано с подвижностью элементов структуры полимеров, определяемой химическим строением и составом. Кроме ионов на измеряемые значения электропроводности и ρ_V влияют также поляризационные и инжекционные явления.

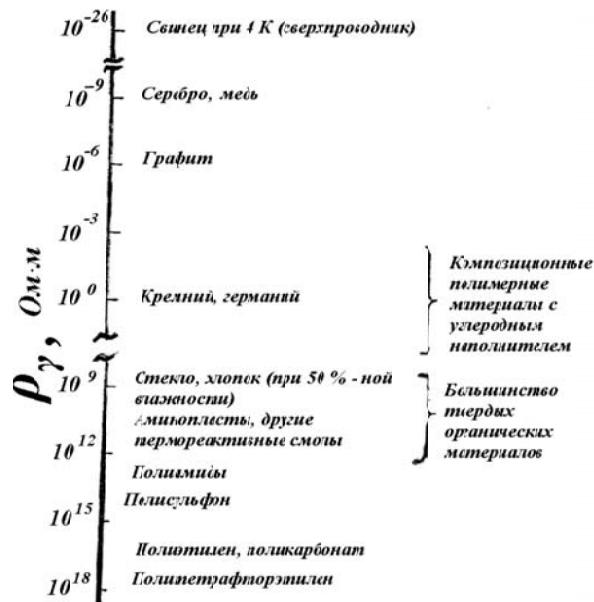


Рис. 2 Удельные объемы сопротивления полимеров, полимерных материалов, полупроводников и металлов

В ток проводимости, по которому рассчитывают ρ_V , кроме тока, соответственно, сквозной проводимости, обусловленной движением свободных носителей зарядов i_γ , входит и поляризационный ток i_Π : $i_n = i_\gamma + i_\Pi$. Поляризационный ток может быть обусловлен как зарядами емкости обода металлического фрикционного элемента $i_\Pi = dQ/dt$ [где $Q = P = \epsilon_0(\epsilon - 1)E$], (где ϵ_0 , ϵ – проницаемость: относительная диэлектрическая; электрическая), так и замедленными во времени поляризационными процессами: поляризацией микросмещения (в пределах микровыступа) и микросмещения (в пределах аморфных участков между кристаллическими областями) ионов, а также медленно образующейся дипольной поляризацией. Установливающаяся во времени поляризация P (ранее называемая «импульсной поляризацией») ослабляет напряженность поля подповерхностного слоя «металл-полимерного элемента» $E_{\text{вн}}$: $E_{\text{вн}} = E - P$, что приводит к снижению измеряемого тока проводимости и величины ρ_V , так как фактически

$$\rho_V = (E - P)/i \quad (1)$$

Устойчивая остаточная проводимость наблюдается только при поверхностной температуре выше допустимой для материалов поверхностного слоя полимерной накладки, когда на его участках возникают островки жидкости, образованные за счет выгорания связующих компонентов. В этом случае имеет место ионная проводимость.

Измерение больших сопротивлений требует применения полей высокой напряженности, при которой возможна инжекция носителей зарядов (чаще всего электронов) из микровыступов металлического элемента в полимерный диэлектрик. Признаком инжекции является зависимость ρ_V от природы материала (металла), из которого изготовлены ободы металлического элемента.

Ток проводимости, измеряемый при приложении постоянного напряжения к полимерному диэлектрику, с ростом напряженности поля растет быстрее, чем это должно быть по закону Ома. Начальный рост объясняется термическим возбуждением носителей зарядов и снижением потенциального барьера выхода носителей из пятен контактов микровыступов под действием электрического поля. Температурно-полевая зависимость тока проводимости описывается формулой [1, 2]:

$$i_\phi = i_0 \exp\left(\frac{2q}{kT} \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon\epsilon_0}}\right) \quad (2)$$

где q – заряд носителя заряда; k – постоянная Больцмана; T – температура микровыступа.

Логарифм тока (по Френкелю) прямо пропорционален, таким образом, $E^{1/2}$. Тангенс угла наклона зависимости равен:

$$\operatorname{tg}\beta_\phi = \frac{2\lg e}{kT} \sqrt{\frac{q^3}{4\pi\epsilon\epsilon_0}} \quad (3)$$

При дальнейшем повышении напряженности поля происходит инжекция носителей зарядов из пятен микровыступов вследствие термоэлектронной эмиссии (по Шоттки). Прикладываемое поле снижает потенциальный барьер ϕ , который необходимо преодолеть носителю заряда при переходе из металла в диэлектрик.

Таким образом, возрастание напряженности приводит к инжекции носителей зарядов из пятен микровыступов в диэлектрик и к образованию инжектированного объемного заряда. Значение «высоковольтной поляризации» снижается до нуля, и именно потому при повышенной напряженности поля соблюдается закон Ома. Инжекция начинается обычно при напряженности $> 10^6$ В/м.

Контактно-импульсное взаимодействие пар трения с различными энергетическими уровнями их материалов

В большинстве проводящих полимерных накладках свободные носители заряда инжектируются с электродов, которыми являются металлические добавки, находящиеся в полимерной системе (в состав последней входит около 50 компонентов).

В полимерах с прыжковым транспортом носителей заряда выделяют следующие группы:

а – носители заряда движутся по полимерным полисопряженным цепям, в которых суммарный транспорт определяется прыжками носителей заряда между полимерными цепями;

б – локализированные транспортные цепи без полисопряжения;

в – локализированные транспортные цепи являются боковыми заменителями основной цепи полимера;

г – полимеры, допированные активными низкомолекулярными соединениями и их агрегатным состоянием (самая обширная группа).

Последняя группа имеет большие возможности тонко «настраивать» характеристики поверхностных слоев накладок на заданное значение определенного параметра, связанное с дырочными транспортными центрами, электронным транспортом и с транспортными центрами, состоящими из групп с максимальным электронным средством. Преимущественное направление транспорта дырок и электронов задается электрическим полем, которое генерируется непрерывно при контактно-импульсном фрикционном взаимодействии пар трения «металл – полимер», «полимер – полимер» и «металл – металл». При этом представляется возможным реализовать эффект дистанционного переключения в системе комбинированных пар трения «металл – полимер – металл» и «полимер – металл – полимер». Это возможно благодаря возникновению металлической проводимости в тонкой полимерной пленке за счет контактирования металлических электродов между собой либо прорастания металлических дендритов через полимерную пленку, либо прямого электрического контакта электродов через разрывы в неоднородности тонкой органической пленки. Кроме того, при электротермомеханическом трении возникают физические условия, при которых эффект переключения в тонких полимерных пленках обусловлен исключительно электронными процессами. Установлено, что исследование эффекта переключения в полимерной пленке, индуцированного в таких условиях, при которых область изменения внешнего воздействия и область изменения электропроводности в полимерной пленке пространственно разделены.

Для подтверждения правильности рабочей гипотезы электровзрыва в подповерхностном слое полимерной накладки был выбран известный эффект переключения, индуцированный изменением граничных условий в паре трения "металл – полимер - металл". Изменение граничных условий обеспечивалось плавление одного из электродов. В одной из работ Т.Г. Зачурченко было выдвинуто предположение, что переключение становится возможным из-за перераспределение поверхностного заряда в приконтактной области полимера вследствие резкого изменения эффективной работы выхода электронов из металла вблизи критической температуры его плавления.

Это предположение не противоречило работам М. Матлака, в которых было получено численным моделированием поведение электрохимического потенциала вблизи фазовых переходов первого и второго рода с последующей их экспериментальной проверкой.

По экспериментальным данным Т.Г. Зачурченко, введение прослойки из пассивного материала в заданную область температур металла (отсутствие фазовых и структурных превращений) между полимером и металлом, претерпевающую фазовый переход, не должно препятствовать электронному переключению, так как в соответствии с правилом Вольты изменение работы выхода электронов из одного из контактирующих

металлов приведет к изменению потенциалов во всей системе, т.е. в том числе и потенциала на границе раздела «пассивный металл – полимер».

Таким образом, если переход полимера в высокопроводящее состояние вызван изменением положения уровня Ферми металла (эффективной работы выхода электронов) в точке фазового перехода, то аналогичного результата можно достичь, если между металлическим электродом, претерпевающим фазовый переход, и полимерной пленкой поместить другой электрод (намного большего диаметра, чем у первого), стабильный в заданном интервале температур. В такой ситуации все структурно-механические изменения (изменение агрегатного состояния, стрикционные явления т.п.) в первом электроде могут быть конструктивно подавлены с помощью второго электрода.

Фрикционные материалы для тормозных устройств должны исследоваться с позиций физико-химической механики трения в режиме торможения с применением термогравиметрического и дифференциально-термического методов анализа. Результаты указанных исследований для образца из материала ФК-24А представлены на рис. 3. Установлено, что деструкция образца ФК-24А начинается при температуре 300°C. Рассчитанная энергия активации разложения образца ФК-24А составила $85,5 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$. Доказано, что образец распадается в течение 15 минут при поддержании его температуры 400°C. Скорость уменьшения его массы при дальнейшем увеличении температуры возрастает. Необходимо отметить, что режимы исследования материала ФК-24А на термостойкость не всегда отвечают реальным условиям работы приповерхностных слоев фрикционных накладок в парах трения тормозных устройств [8, 9].

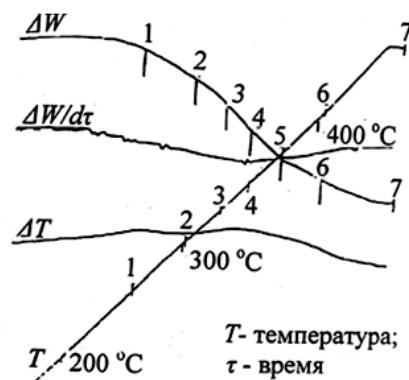


Рис. 3 Дериватограмма образца ФК-24А: ΔW - потери массы, определяемые по термогравиметрической кривой; dW/dt - скорость изменения (дифференциально-термогравиметрическая кривая); ΔT - дифференциально-термическая кривая

Деструкция фрикционного материала сопровождается интенсивным дымлением, а затем образованием жидких фракций в порах поверхностного слоя материала. При этом молекулы адсорбента наиболееочно удерживаются в микропорах поверхностно-

го слоя материала, вследствие того, что они окружены большим количеством атомов углерода. Адсорбция газовой фазы – это процесс конденсации, который происходит в условиях, когда энергия адсорбции оказывается достаточной для конденсации пара. Сконденсировавшийся пар остается в пористой структуре углерода в виде жидкости.

Изменение количества и состава газовой смеси, находящейся в межконтактном пространстве, указывает на то, что процесс трения (пара трения 30ХГСА-ФК-24А) носит сложный трибохимический характер (табл. 1) [10].

Работа выхода электронов с металлических фрикционных элементов влияет на величину и направление термотоков, которые генерируются на поверхности пар трения тормозных устройств.

Рассматриваемый метод определения работы выхода электронов базируется на том, что при электронной эмиссии каждый электрон, который покидает рабочую поверхность металлического фрикционного элемента, выносит с собой энергию, доля которой составляет работу выхода электрона W . При нагревании металлического фрикционного элемента тормоза во время торможения до температуры достаточной для термоэлектронной эмиссии вблизи его поверхности образуется так называемая электронная туча (пространственный заряд). В случае разомкнутой пары трения тормоза устанавливается равенство числа электронов, которые покидают рабочую поверхность металлического фрикционного элемента, и числа электронов, которые возвращаются на нее с области пространственного заряда [2]. При замыкании пар трения тормоза (предварительно нагретых) возникает движение электронов от рабочей поверхности металлического к «неметаллическому» (полимерному) фрикционному элементу, в результате чего происходит снижение поверхностной температуры рабочей поверхности металлического фрикционного элемента, связанное с указанным переносом энергии каждым электроном.

Таблица 1

Процентное соотношение компонентов газовой смеси, образованной в межконтактном пространстве пары трения

Номер пробы	Марка компонента	Температура, °C	Содержание газа, мас. доля, %						
			H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	ΣC _n H _m	другие газы ***
1	ФК-24А	150	*	19,8	78,8	0,28	*	*	
2	-	215	*	19,8	78,8	0,23	*	*	
3**	-	420	0,123	19,1	79,5	0,13	*	*	
4**	-	500	0,171	16,3	81,6	0,24	0,43	0,24	
5	-	730	0,308	9,8	81,2	0,08	6,51	1,06	Остальное

Примечание

*Наличие следов указанных газов.

**Отбор проб осуществлялся из четырех зон (точек) одновременно.

***Под другими газами подразумевается: Ar, Ne, He, Kr, N₂O, Xe, O₂, Rn [10].

Известно, что зависимость плотности тока от абсолютной температуры металлического фрикционного элемента описывается зависимостью Ричардсона-Дэшмана [1]

$$j = CT^2 e^{\frac{W}{kT}} \quad (4)$$

C - постоянная, термодинамически одинаковая для всех металлов; T - термодинамическая температура рабочей поверхности металлического фрикционного элемента; k - постоянная Больцмана; W - работа выхода электрона с металлического фрикционного элемента.

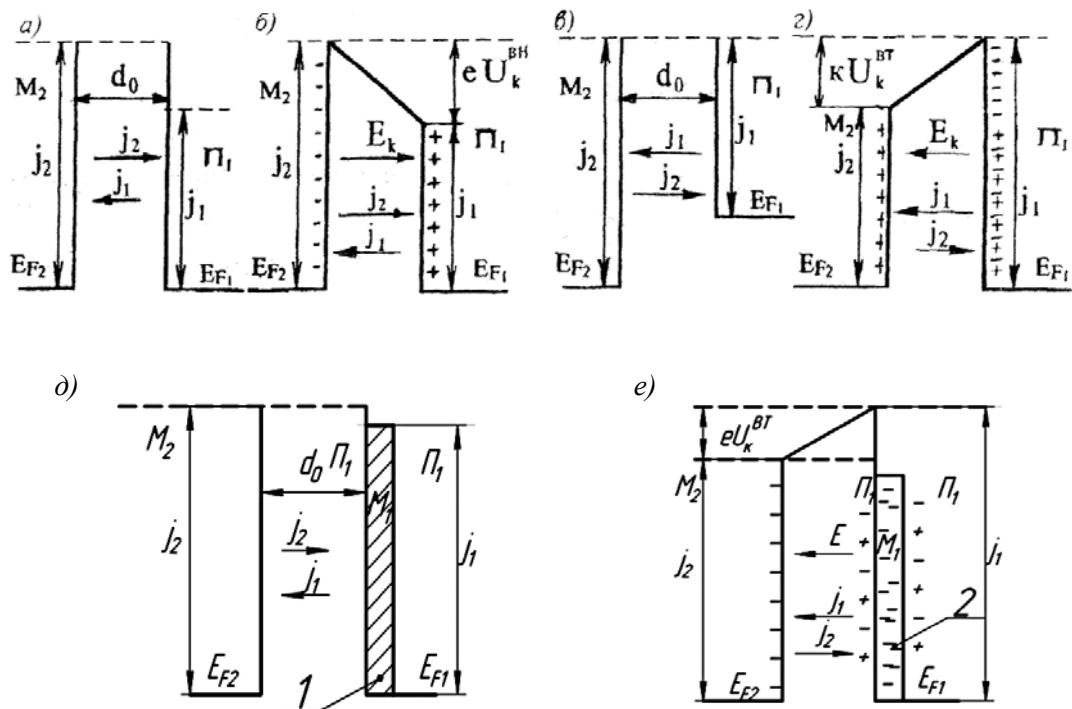


Рис. 4 а, б, в, г, д, е. Контактные явления в паре трения «металл (M_2) – полимер (Π_1) и металл (M_2) – металл (M_1) [электрод в накладке]» при работе накладки ниже (а, д, е) и выше (в) допустимой температуры для ее фрикционных материалов и в случае установления равновесия (б, г) и взрыва (электрода): 1,2 – электрод в твердом и в жидкком состоянии

Представим зависимость Ричардсона-Дэшмана в виде $j / T^2 = Ce^{\frac{W}{kT}}$, и после логарифмирования получаем

$$\ln \frac{j}{T^2} = \ln C - \frac{W}{kT} \ln e .$$

Полученное равенство представим для двух тепловых состояний металлического фрикционного элемента, т.е. до (T_1) и после (T_2) процесса торможения. При этом учитываем, что $\ln e = 1$ и $j = \frac{I}{A}$ (где I - ток, который генерируется, а $\varphi_2 + eU_k^{(вн)}$) должны быть равным потенциальному барьера для ионов, которые движутся справа налево, т.е. φ_1 . Другими словами, справедливо равенство

$$\varphi_2 + eU_K^{(вн)} = \varphi_1, \quad (5)$$

Таким образом, после установления равновесия возникает контактная разность потенциалов

$$U_K^{(вн)} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{e}, \quad (6)$$

Более сложным является случай, когда рассматривается пара трения «металл-полимер», разделенная тонким вакуумным зазором, при температуре фрикционных материалов полимера выше допустимой (рис. 4 в). В этом случае поверхностный потенциальный барьер (показан пунктирной линией) является одинаковым ($j_2 = j_1$) в связи с тем, что фрикционный материал полимера достиг допустимой температуры и начались деструктивные процессы в его приповерхностных слоях, которые и привели к образованию в них жидкостных островков.

Последние являются слабыми электролитами, которые разрешают водороду или металлу стать положительными зарядами (катионами), а кислотный радикал жидкостей получает отрицательный заряд, образуя таким образом анионы. Толщины жидкости, которые находятся в приповерхностных слоях насыщены катионами и анионами, образуя между собой внутреннее электрическое поле $E_K^{(вт)}$ с соответствующей разностью потенциалов $u_K^{(вт)}$. При этом $E_K^{(вт)}$ становится намного большим $E_K^{(вн)}$. Исходя из равенства $j_2 = j_1$ (рис. 4 г), получаем, что потенциальный барьер для катионов, которые движутся справа налево, т.е. $\varphi_1 + ku_K^{(вт)}$, должен быть равным потенциальному барьера для электронов, которые движутся слева направо, т.е. φ_2 . Выходит, что имеет место равенство

$$\varphi_1 + ku_K^{(вт)} = \varphi_2 \quad (7)$$

После установления равновесия возникает контактная разница потенциалов

$$u_K^{(вт)} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{k} \quad (8)$$

На основании вышеприведенного перейдем к выбору материала электрода, который будет устанавливаться в тело полимерной накладки.

Выбор материала электрода и его поведение при фазовом переходе первого рода

Одно из главных свойств меди, которое определяет ее преимущественные использование в качестве электрода, – очень высокая электропроводность (или низкое удельное электросопротивление). Второе важнейшее свойство меди – очень высокая теплопроводность. Наличие примесей и егрирующих добавок и уменьшают электро- и теплопроводность меди (табл. 2), потому сплавы на медной основе значительно уступают «чистой» меди по указанным показателям.

Температура рекристаллизации меди для разных марок составляют 150 - 240°C. Чем больше примесей, тем выше эта температура. Существенное увеличение температу-

ры рекристаллизации меди дает серебро, цирконий. Например, введение 0,05% Ag увеличивает температуру рекристаллизации вдвое, что проявляется в увеличении температуры размягчения и уменьшении ползучести при высоких температурах, причем без потери тепло- и электропроводности.

Выбор для электрода в качестве материала меди марки М1 был обусловлен следующим образом. Для испытаний электродов в лабораторных условиях требуется 3–4 шт., так как они подвергались исследованиям индивидуально. В эксплуатационных условиях на ленточно-колодочном тормозе буровой лебедки устанавливалось как минимум десять электродов в одной накладке, расположенной на тормозной ленте. Это давало возможность одному из электродов накладки при электротермомеханическом трении попадать в пятно контакта рабочей поверхности шкива.

Остановимся на содержании меди в других элементах фрикционной пары. Так, во фрикционных накладках типа D имеет место наибольшее содержание меди, которое составило 11,77%, а наименьшее 0,36% - в типе F. Что касается стали (табл. 3), то в ней находится 0,25% меди. В то же время в стали находится очень малая доля фосфора, т.е. всего 0,04%, а в меди марки М1 он отсутствует.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, соблюдено условие совместимости материалов в парах трения.

На рис. 4 д проиллюстрированы контактные явления в паре трения «металл (M_2) – металл (M_1) [электрод в накладке]» при работе накладки ниже допустимой температуры для ее материалов и в случае плавления электрода (рис. 4 е). Схема, представленная на рис. 4 е, была реализована в лабораторных условиях с применением электрической цепи для доведения твердого электрода до состояния плавления.

На рис. 5 представлена характерная зависимость тока, протекающего через систему сталь 35ХНМ – медный электрод Cu. Последний – в виде цилиндрического стержня длиной $l = 30,0$ мм и диаметром $d = 0,3$ мм, посаженного с натягом в тело полимерной фрикционной накладки ФК-24А. При начальной комнатной температуре система находилась в диэлектрическом состоянии. Удельное электросопротивление элементов трибо-системы приведено в табл. 4. При нагревании значение тока, протекающего через систему сталь 35ХНМ – медный электрод Cu, соприкасающемуся по всему периметру с полимерными материалами накладки ФК-24А, остается неизменным до температуры 130 - 135°C. Выше этой температуры в измерительной цепи возникают флуктуации тока. Эти флуктуации существуют при дальнейшем повышении температуры системы вплоть до температуры плавления медного электрода. Можно предположить, что наличие увеличивающихся по амплитуде флуктуаций тока связано с предпереходными явлениями, например, поверхностным многоатомным плавлением материалов электрода, предотвращающим объемный фазовый переход.

При достижении температуры плавления (меди - 1083°C) в системе происходит скачкообразное увеличение тока. Сопротивление электрода уменьшается до нуля. Ток достигает своего максимального значения в данном цикле измерений.

Таблица 2

Химический состав меди

Марка меди	Химический элемент, вес. %												
	Cu	P	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	Ag	O	Sb	Bi	Sn
M1 Не менее 99,9	-	до 0,005	до 0,002	до 0,004	до 0,002	до 0,005	до 0,005	до 0,004	до 0,003	до 0,005	до 0,001	до 0,001	до 0,002

Таблица 3

Химический состав металлических фрикционных элементов

Металлический элемент трения	Химический элемент, вес. %									
	C	Cr	Cu	Mg	Mn	Ni	P	S	Si	Fe
Чугун	3,0-3,5	0,15	0,001	0,001	0,6-1,0	0,50	0,60	0,15	1,8-2,4	92,66
Сталь	0,42-0,5	0,25	0,25	-	0,5-0,8	0,25	0,04	0,4	0,17-0,37	97,89

Таблица 4

Теплофизические свойства элементов фрикционной пары

Параметры	Материалы		
	Сталь 35ХНМ	ФК-24А	Медь М1
Плотность при 20°C, 10³, кг/м³	7,8	2,3 – 2,5	8,96
Температура плавления, °C			1083,0
кипения			2600,0
Удельная теплоемкость	475,0	1020,0	385,0
Теплопроводность, Дж/(кг·°C)	38,0	0,75	24,1
Температуропроводность, а, м²/с	(1,07 – 1,01)10⁻⁵	(3,0 – 3,5)10⁻⁷	0,7·10⁻⁵
Скрытая теплота плавления, кДж/кг			181,3
Коэффициент линейного расширения, 1/°C	0,000012		0,000017
Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м			0,0178

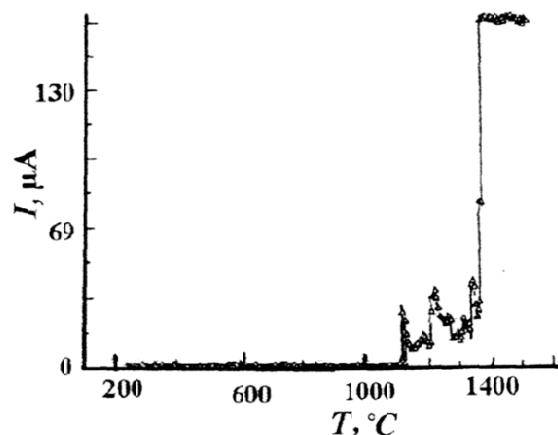


Рис. 5 Температурные зависимости токов, протекающих через систему "металл - металл", при использовании меди в качестве электрода. Напряжение, приложенное к системе, U=16,5 V при d = 0,3 мм и l = 30,0 мм электрода

Общие закономерности электродинамических характеристик пятен контактов микровыступов при их фрикционном взаимодействии

Электрический взрыв медной проволоки, вмонтированной в микровыступы полимерной накладки, при электротермомеханическом фрикционном взаимодействии с микровыступами металлического элемента реализуется при прохождении через проволоку импульса тока с плотностью $10^6\text{--}10^9 \text{ A}/\text{см}^2$. Сначала медное включение в накладку нагревается до температуры плавления, плавится, а затем взрывообразно разрушается вместе со соприкасающимися с ним поверхностями накладки. При расширении продуктов взрыва в межконтактном объеме металлополимерной пары трения происходит образование наночастиц.

Метод взрыва металлических включений в подповерхностном слое полимерных накладок реализуется за счет:

- высокого КПД при электротермомеханическом трении благодаря импульсной передаче энергии металлическим включением без теплообмена с поверхностями накладки и со скоростными токами компонентов омывающей среды;

- возможности прогнозируемого регулирования параметров процессов при помощи действующих импульсных нормальных сил на металлические включения, исходя из их геометрических параметров (диаметров проволоки);

- обеспечения сравнительно небольшого разброса частиц продуктов взрыва по размерам [13];

- достижения относительной стабильности свойств частиц продуктов взрыва, имеющих высокую активность в химических процессах в межконтактном объеме металлополимерных пар трения.

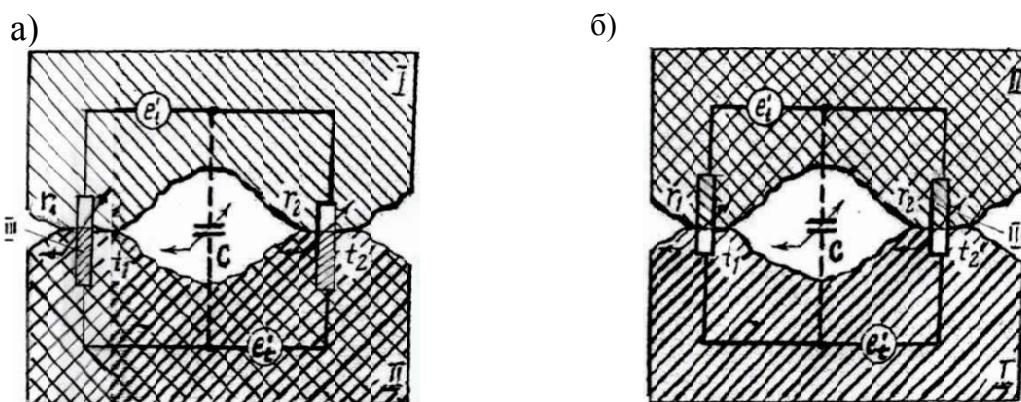
Приведем схемы контактного взаимодействия микроучастков поверхностей трения с вмонтированными в их микровыступы простых электрических схем применительно к барабанно- (рис. 6 а) и ленточно-колодочному (рис. 6 б) тормозам.

Известно, что в процессах электротермомеханического трения в непрерывно возникающих электрических и тепловых микроцепях генерируются импульсные электрические и тепловые токи, посредством которых нагреваются и плавятся проволоки (электроды) полимерных микровыступов. При этом электроды нагреваются, и на них наблюдается рост падения напряжения (рис. 7 а, в). Кроме того, электроды нагреваются и в жидком состоянии до момента времени t_2 (рис. 7 а, б), когда их сопротивление начинает возрастать не только за счет нагревания материалов, но и за счет их взрывного расширения. В момент времени t_3 электроды теряют металлическую проводимость, сопровождающейся ростом их сопротивления, которое становится на несколько порядков выше первоначального. Последнее обстоятельство обуславливает обрыв тока в микроэлектроцепях. Возникший при этом импульс напряжения на индуктивности микроэлектроцепей в несколько раз превышает зарядное напряжение микроконденсаторов, которыми являются пятна контактов микровыступов металлического фрикционного элемента. Это и есть электрический взрыв, с помощью которого его продукты попадают в зазоры между микровыступами. Затем наступает пауза тока за момент времени $t_3 - t_4$, когда продукты

взрыва между микровыступами выдерживают оставшиеся на микроконденсаторах напряжение U_P . При этом продукты взрыва между микровыступами претерпевают процессы увеличения объема и уменьшения их давления. В момент времени t_4 благодаря стабильному импульсному току и остаточному напряжению генерируется объемный заряд, способствующий развитию разряда для пробоя толщины слоя между микровыступами.

Явления электровзрыва и теплоразряда при фрикционном взаимодействии в металлополимерных парах

Последующие исследования велись применительно к поиску более строгих соотношений между условиями взрыва и его результатами, в т.ч. и размером получаемых частиц, поскольку от последних зависит электропроводность в контакте и износ пар трения, при наличии между ними «третьего» тела, существенно влияющими на коэффициенты распределения тепловых потоков в телах трущихся элементов, и как следствие, на их износо-фрикционные свойства. Было установлено, что при некоторых условиях взрыв происходит к концу первого полупериода тока в цепи. К этому же моменту накопленная в микроконденсаторах энергия W_0 равна нулю, так как она расходуется на нагревание взываемой проволоки, находящейся в пятне контакта микровыступа полимерной накладки и покрывает потери на сопротивление разрядного контура (составляет 0,05 – 0,1 от W_0). Таким образом, запасенная в микротермобатареях энергия работающих в режимах микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрохолодильников [15, 16] расходуется на эффект взрыва целенаправленно.



*Рис. 6 а, б. Контактное взаимодействие микроучастков поверхностей трения:
а – барабанно-колодочного тормоза; б – ленточно-колодочного тормоза:
I и II – металлический и полимерный элемент; III – проволока*

Этот режим взрыва проволоки назван согласованным (рис. 7 в). В дальнейшем показано, что взрыв остается согласованным под действием n-го количества микроцепей, если зарядное напряжение пятен контактов микровыступов металлического фрик-

ционного элемента изменяется пропорционально площади сечения и/или длине проволоки. Полезные для практических расчетов соотношения были получены для взрывов с паузой тока и согласованных. Так, было установлено, что энергия режимов W , введенная в проволоку в течение первого импульса тока (до паузы тока), определяется соотношением:

$$W = (h_b W_0 A^2 Z)^{0.5}, \quad (9)$$

где $W_0 = CU_0^2 / 2$, Дж; С – емкость, мкФ; U_0 – кВ; $A = \pi d^2 / 4$ – площадь сечения проволоки, мм^2 ; d – диаметр проволоки, мм; $Z = (L/C)^{0.5}$ – импеданс цепи, Ом;

$$h_b = \left(\int_0^{t_3} i^2(t) dt \right) / A^2$$

имеет единицу измерения $(\text{A}^2\text{с})/\text{мм}^4$ и означает удельное «действие» до взрыва, или термическую стойкость металла, нагреваемого импульсом тока [3]. Величины h_b для некоторых металлов были определены в [3, 6, 17, 18] и даны в табл. 5.

Таблица 5
Удельная энергия сублимации и удельное действие
некоторых металлов

Металл	$W_c, \text{Дж}/\text{мм}^3$	$h_b^* \times 10^{-5}, (\text{A}^2\text{с})/\text{мм}^4$
Ag	27,7	1,04
Al	33,0	1,09 0,93
Au	37,7	0,523
Cu	47,8	1,95 2,107 1,97
Ni	53,9	0,732 0,75
Fe	55,4	0,506
Pt	58,5	0,945
W	92,2	0,8

*Величины h_b определены при плотностях тока в момент его максимума $j_m \approx 10^5 \text{ А}/\text{мм}^2$.

Из равенства (9) видно, что при $W_0 = h_b A^2 Z$, если пренебречь потерями в цепи, $W \approx W_0$, другими словами,

$$W_0 = h_b A^2 Z \quad (10)$$

Это соотношение является одним из условий согласованного взрыва. Из него также следует, что при пропорциональном изменении площади сечения проволоки и U_0 взрыв остается «согласованным», что и наблюдалось [19].

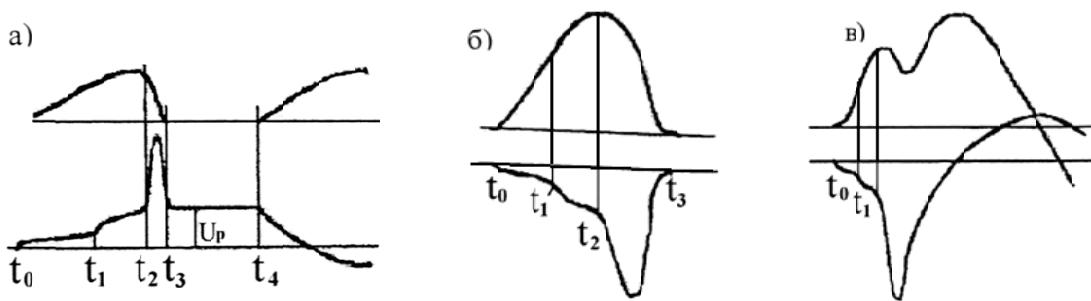


Рис. 7 а, б, в. Осцилограммы тока (а) и напряжения (б, в) при фрикционном взаимодействии в парах трения «металл – полимер»:

а – взрыв с паузой тока (U_p – напряжение на конденсаторе в течение паузы тока: нагревание металла за период времени в твердом ($t_0 - t_1$) и в жидкоком (т.е. $t_1 - t_2$) состояниях; паузы времени: $t_2 - t_3$ – взрыва; $t_3 - t_4$ – импульса тока; $t_3 > t_4$ – дугового разряда);
 б, в – взрывы: согласованный и с разрядом по поверхности

Обратим внимание на то, что в работе [20] при равной плотности введенной энергии размер получаемых частиц снижался от Zn к Cd и Ag, из чего следует, что в общем случае характерный размер частиц зависит не от введенной энергии, а от перегрева (К) материала проволоки, т.е. отношения W к некоторой характерной энергии материала, в качестве которой была принята удельная энергия сублимации W_c (табл. 5). Проверка этого предположения подтверждена литературными данными и специальными экспериментами [7, 20, 21 и др.] на Cu, Al, Ag, Ni и на проволоках из других металлов.

Разделив (9) на W , получим:

$$K = W / (W_c A) = (h_b W_0 Z)^{0.5} / (W_c l), \quad (11)$$

где W_c – удельная энергия сублимации в Дж/мм³.

Из этого равенства можно найти длину проволоки $l = l_m$ при перегреве, когда $K = 1,0$ для согласованного режима взрыва. Заменив W_0 в (9) на его значение $h_b A^2 Z$ из (11), получим:

$$l_m = h_b A Z / W_c. \quad (12)$$

Для условий согласованного взрыва (11) также видно, что если U_0 и l изменяются пропорционально, перегрев будет постоянным. В области $l > l_m$ и прочих равных условиях перегрев уменьшается обратно пропорционально длине проволоки, но взрыв остается согласованным, что и наблюдалось в [19, 20]. В области $l < l_m$ по мере уменьшения l взрыв будет протекать с паузой тока, а потом перейдет к взрыву с дуговым разрядом (рис. 7 в). При этом по мере уменьшения длины проволоки перегрев металла будет возрастать, а эффективность использования энергии W_0 – снижаться.

При возникновении микроэлектроцепей при реализации электровзрыва проволоки следует знать амплитуду получаемого импульсного тока. Соответствующее соотношение для Cu, Al и Ag проволок было получено в [22, 24] в более удобном виде

$$I_M = 0,751 I_0 \left(h_b A^2 Z / W_0 \right)^{0,25}, \quad (13)$$

где $I_0 = U_0 / Z$ - амплитуда тока короткого замыкания в той же самой цепи.

При проведении исследований электровзрыва, находящегося в микровыступе полимерной накладке, возникает потребность в определении условий, при которых пауза тока становится равна нулю. Это позволяет оценить максимальный перегрев материала выбранной проволоки в имеющемся контуре или выбрать необходимые параметры контура (C , L , U_0) для обеспечения желаемого перегрева. Длина проволоки, при которой наблюдается такой тип взрыва, когда время $t_3 - t_4 = 0$ (рис. 7 а), была названа допустимой, а ее значение для Cu, Al и Ag проволок было найдено в [24, 25] и в воздухе при нормальном давлении определяется соотношением:

$$l_k = \lambda_k d^2 Z \text{ мм}, \quad (14)$$

где $l_k = B \left(10^{-6} C^2 U_0^2 / d^5 \right)^{0,36}$ и B – размерная величина, значение которой зависит от материала проволоки и при принятых здесь единицах измерения равна для меди $1,35 \times 10^3$, для алюминия 2×10^3 и для серебра $1,5 \times 10^3$.

Обобщение экспериментальных данных показывает [17], что металлы можно разделить на две группы: а) чтобы взрыв происходил до разрушения микротермобатарей в процессе электротермомеханического трения, т.е. с отключением тока и образованием его паузы; б) взрыв которых всегда происходит с прошиванием током проволоки по длине, что приводит к току дугового разряда (рис. 7 в). Такое разделение вызвано величиной отношения энергии сублимации W_c к работе выхода электрона W_s (табл. 5, табл. 6).

Попадание во вторую группу, $W_c/W_s > 1$, означает, что прежде, чем в проволоку при электровзрыве будет введена энергия сублимации, термоэмиссия с ее поверхности на пятне контакта микровыступа оказывается настолько большой, что падение напряжения на проволоке оказывается достаточным для зажигания дугового разряда, и дальнейший ввод энергии в проволоку практически прекращается по завершении процесса торможения.

Таким образом, если известны параметры микроэлектроцепей L , C и действие h_b , можно выбрать U_0 , сечение и длину проволоки для обеспечения требуемого перегрева для многих металлов, обеспечивая разрядные явления между пятнами контактов микровыступов и, как следствие, массоперенос полимерного материала на поверхности пятен микровыступов металлического фрикционного элемента. Такое решение уменьшит взрывные явления в подповерхностных слоях полимерной накладки, что существенно снизит эффект ее электротермомеханического износа.

Для реализации взрыва проволоки, находящейся в подповерхностном слое полимерной накладки, в процессах электротермомеханического взаимодействия обычно используют следующие параметры технологичного процесса:

- диаметр взрывающейся проволоки составляет $D = (0,2 - 0,45) \cdot 10^{-3}$, м;

- относительное энергосодержание взрывающейся проволоки (перегрев) $E/E_c = 1,5 - 2,5$ (где E, E_c – энергия, введенная в проволоку: сублимации металла), определяемая по силе разрядного тока;
- удельное давление в зоне фрикционного взаимодействия металлополимерных пар трения, при котором происходит взрыв, $p = (0,5 - 0,9)\text{МПа}$;
- температура скоростных токов компонентов омывающей среды изменяется от $(250 - 400)^\circ\text{C}$.

Таблица 6

Некоторые характеристики металлов

№	Металл	$W_c, \text{эВ}$	$W_s, \text{эВ}$	W/A	$T_k, ^\circ\text{C}$
1	Цинк (Zn)	1,30	4,3	0,32	1179
2	Литий (Li)	1,69	2,35	0,72	1613
3	Свинец (Pb)	2,06	4,1	0,50	2024
4	Серебро (Ag)	2,95	4,7	0,63	2440
5	Олово (Sn)	3,39	4,3	0,79	2873
6	Алюминий (Al)	3,42	4,2	0,81	-2730
7	Медь (Cu)	3,56	4,5	0,78	2840
8	Никель (Ni)	3,67	5,0	0,73	3173
9	Золото (Au)	4,0	4,8	0,83	2553
10	Палладий (Pd)	4,78	5,0	0,96	3213
11	Железо (Fe)	4,08	4,7	0,87	3023
12	Хром (Cr)	3,82	4,58	0,83	2953
13	Платина (Pt)	5,51	6,3	0,87	4073
14	Иридий (Ir)	5,22	4,7	1,11	4656
15	Титан (Ti)	4,9	3,95	1,24	3533
16	Ванадий (V)	5,33	4,12	1,29	3673
17	Цирконий (Zr)	6,23	3,9	1,6	4623
18	Молибден (Mo)	6,9	4,1	1,68	~5073
19	Ниобий (Nb)	7,5	3,99	1,88	~5033
20	Тантал (Tm)	8,1	4,12	1,87	~5733
21	Вольфрам (W)	8,83	4,54	1,94	~6200

Исследования влияния диаметра проволоки на средней размер частиц продуктов взрыва проводилось с соблюдением параметров ϵ_0 (электрической проницаемости), λ (коэффициента теплопроводности) и ρ (плотности скоростных токов компонентов омывающей среды, а также p и симплекса E/E_c при подобных условиях). При взрывах проводников, находящихся в полимерных накладках, в некоторой степени выдерживаются условия $\epsilon=\text{const}$, $\lambda=\text{const}$, $\rho=\text{const}$, $p=\text{const}$ и $E/E_c=\text{const}$ посредством соблюдения режимов электротермомеханического трения металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза в лабораторных условиях. При этом продукты взрыва проходят

одинаковые состояния за время, пропорциональное диаметру проволоки d_0 . В этом случае длительность процесса формирования частиц определяется внешними гидро – (при попадании поверхностных слоев полимерных накладок в интервал температур выше допустимой для их материалов) и термодинамическими процессами, характерные масштабы которых, при прочих равных условиях, также пропорциональны d_0 .

Действительно, средний размер частиц продуктов взрыва увеличивается с ростом диаметра проволоки до значений $d_0=0,3\text{мм}$. В дальнейшем средний размер частиц взрыва определяется его энергосодержанием, а не диаметром проводника.

Многочисленными исследованиями [13, 14 и др.] установлено, что при сохранении подобных условий при стендовых испытаниях при постоянных удельных нагрузках в металлополимерных парах трения диаметр проволоки является независимым фактором, определяющим концентрационные параметры продуктов взрыва и, в конечном счете, средний размер наночастиц.

Величина E/E_c определяет степень перегрева металла проволоки в полимерной накладке и начальную скорость движения частиц продуктов взрыва в межконтактном объеме металлоаолимерных пар трения. На поздних стадиях движения частиц продуктов взрыва на скорость и плотность будет определяться величиной давления токов компонентов омывающей среды, окружающей проводник. Следовательно, оба указанных параметра должны оказывать влияние на процесс дисперсной фазы. Было установлено, что размер частиц, определяемый как $a_s=6/\rho A$ (где: ρ – плотность металла проводника; A – площадь удельной поверхности продуктов взрыва) монотонно снижается при увеличении E/E_c до значения $E/E_c = 1,5 - 2,0$, после чего размер частиц меняется несущественно [12]. Кроме того, повышение поверхностной температуры пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения будет способствовать росту температуры скоростных токов компонентов омывающей среды, которое приведет к росту размеров частиц и формированию фракций с размерами частиц более (400 - 500) мм . Более того, зависимости размера частиц от диаметра проволоки и температуры скоростных токов компонентов омывающей среды свидетельствуют в пользу того, что рост частиц продолжается после завершения электровзрыва проволоки и обусловлен вторичными процессами, происходящих при разлете продуктов взрыва в межконтактном объеме. При этом цепочные структуры из мелких частиц группируются вокруг крупных частиц. Этот факт согласуется с данными о действии сил взаимного заряжения [14]. Согласно последнего крупные частицы заряжены противоположно мелким частицам.

Пристальное внимание к частицам продуктов взрыва проволоки, находящийся в подповерхностном слое полимерной накладки при электротермомеханическом трении металлополимерных пар ленточно-колодочного тормоза, попадающим в их межконтактный объем, объясняется следующими причинами:

- разлетом частиц продуктов взрыва с одновременным формированием вокруг крупных частиц цепных структур из мелких частиц, что объясняется взаимодействием противоположных зарядов между ними;

- сгруппированная система частиц обладает зарядами влияющими на распределение по поверхностям пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения;
- заряженные частицы продуктов взрыва влияют на закономерности распространения солитонов на их формы в межконтактном объеме;
- влиянием частиц продуктов взрыва на износо-фрикционные свойства металлополимерных пар трения.

Явления теплового взрыва при фрикционном взаимодействии в металлополимерных парах

Наиболее характерными являются взрывы, при которых на первом этапе внутренняя химическая энергия подповерхностного слоя полимерной накладки превращается в тепловую. При этом указанный слой обладает

небольшим тепловыделением $\sim 4 \cdot 10^3$ кДж/кг, но из-за малого времени химического превращения ($\sim 10^5$ с), которое происходит без участия кислорода воздуха. Многокомпонентная смесь накладки в процессе электротермомеханического трения не успевает разлететься в течении взрыва и образуются скоростные токи многокомпонентной газовой среды с высокой температурой ($2 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$ К) и давлением до 1,0 ГПа. Расширение газовой среды интенсифицирует токи омывающего воздуха – возникает взрывная волна, скорость распространения которой вблизи очага взрыва является высокой. Взрывная волна оказывает механическое воздействие на микровыступы металлополимерных пар трения.

Тепловой взрыв осуществляется в условиях, когда оказывается невозможным тепловое равновесие между компонентами подповерхностного слоя накладки и скоростными токами омывающей среды. При достаточно больших значениях энергии активации E (разностях между средней энергией частиц, вступающих в химическую реакцию и средней энергией всех частиц в поверхностной и подповерхностной зонах трибосистемы) скорость химической реакции V_X быстро возрастает с увеличением T .

Взрывное вещество по закону Аррениуса $V_X \sim Z \exp(-E/RT)$, где R – универсальная газовая постоянная; Z – предэкспоненциальный множитель, значение которого зависит от механизма элементарного акта реакции. Таким же образом растет и скорость тепловыделения Q_+ в объеме V подповерхностного слоя накладки

$$Q_+ = V q_X Z \exp(-E/RT),$$

где q_X – тепловой эффект химической реакции.

Теплоотвод же во внешнюю среду Q_- через поверхности пятен контактов A микровыступов накладки зависит от T гораздо слабее

$$Q_- = -\frac{\lambda}{r}(T - T_0)A,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; r – линейный размер пятна контакта; T_0 – температура среды.

Условию теплового равновесия соответствует равенство $Q_+ = Q_-$, т.е. выделяющая в ходе реакции теплота должна полностью отводится через поверхности пятен контактов микровыступов полимерной накладки. Однако такое равновесие не выдерживается, поскольку тепловыделение от химической реакции и собственно от электротермомеханического трения во много раз превышают теплоотвод от пятен контактов микровыступов полимерной накладки. Это вызвано тем, что темпы нагревания пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения во много раз превышают темпы их охлаждения скоростными токами омывающих сред.

На рис. 8 приведены графики скоростей тепловыделения (кривые 1 – 3) и теплоотвода (кривые 4 – 6) при различных температурах нагревания ($T_1^+ \dots T_n^+$) и охлаждения ($T_1^- \dots T_n^-$) металлополимерных пар трения (диаграмма Вольченко).

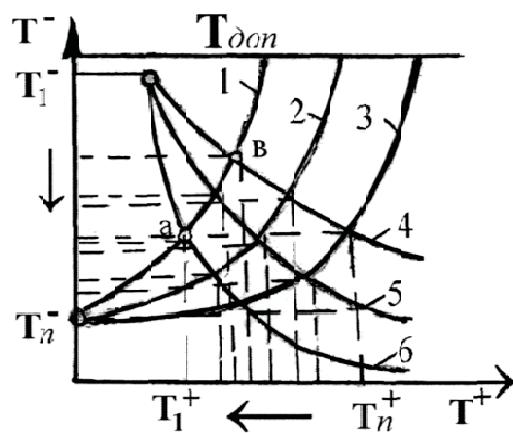


Рис. 8 Взаимосвязь между скоростями тепловыделения и теплоотвода в металлополимерных парах трения в зависимости от температур их нагревания и охлаждения

При температурах $T_1 \dots T_n$ (ниже допустимой температуры для материалов полимерной накладки) графики Q_+ (T_i) и Q_- (T_i) пересекаются в n – ом количестве точек. Точка их пересечения a соответствует медленному течению химической реакции на пятнах контактов микровыступов полимерной накладки при температуре T_1 . При повышении T_i^+ кривые нагревания 1 – 3 смещаются вправо из-за увеличения времени нагревания. Аналогичным образом смещаются кривые охлаждения 4 – 6, но при этом уменьшалось T_i с увеличением времени охлаждения. Точка пересечения кривой 1 с кривой 4 в указывает на то, что химическая экзотермическая реакция в подповерхностных слоях полимерной накладки самоускоряется – выделение теплоты приводит к повышению T , что, в свою очередь, увеличивается скорость тепловыделения – возникает тепловой взрыв.

Условие возникновения теплового взрыва формулируется в виде неравенства $\delta > \delta^*$, где безразмерный параметр δ зависит от величины, характеризующих химическую реакцию, условия теплоотвода и размеры подповерхностного слоя накладки

$$\delta^* = \frac{E}{RT_0^2} \frac{q_x}{\lambda} r^2 Z \exp(-E/RT_0),$$

а δ^* - число, определяемое только формой пятна контакта микровыступа полимерной накладки $\delta^* = 3,32$, причем в этом случае r – радиус микровыступа.

Тепловой взрыв выражен тем ярче, чем лучше выполняется неравенства $RT_0/E << 1$ и $RT_0/(Eq_x) << 1$. Если эти неравенства выполняются плохо, тепловой взрыв вырождается – одновременно с ростом T^+ до допустимой температуры ($T_{\text{доп}}$, см. рис. 8) происходит быстрое выгорание связующих компонентов подповерхностного слоя полимерной накладки, которые смазывают картину взрыва.

Выводы. Таким образом, показано, что в электрическом поле при фрикционном взаимодействии пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения в подповерхностном слое накладки доминирует электрический взрыв, после которого наблюдается электрический разряд. В тепловом поле доминирует только тепловой взрыв.

LITERATURE

1. **Lushcheykin G.A.** Methods for investigating the electrical properties of polymers / G.A Lushcheykin. - Moskow: Khimiya, 1988. - 160 p.
2. **Kolesnikov V.I.** Thermophysical processes in metal tribosystem / V.I Kolesnikov. - Moskow: Nauka, 2003. - 279 p.
3. **Anderson G.W., Neilson E.W.** Use of the action integral in exploding wire studies. / G.W. Anderson, E.W. Neilson. In Chace, W.G. & H.K. More (eds.), Exploding Wires. Vol. I. Proc. of Ist Conf. on the Exploding Wire Phenomenon, Boston, USA, 24-27 March. 1959, Plenum Press. New York. pp. 97 - 103.
4. **Rudenberg R.** Transient Perfomanc Electric Power Systems / R. Rudenberg. New York - Toronto - London. 1950.
5. **Lurye A.I.** Electric blasting charges / A.I. Lurye. - Moskow: Uraltehizdat, 1957.
6. **Cnare E.C. & Neilson F.W.** Large exploding wires-correlation to small wires and pause time versus length dependency. // E.C. Cnare & F.W. Neilson. Chace, W.G. & H.K. More (eds.), Exploding Wires. Vol. I. Proc. of Ist Conf. on the Exploding Wire Phenomenon, Boston, USA, 24-27 March / 1959. Plenum Press. New York. pp. 83- 96.
7. **Chemezova L.I.** Modeling and engineering calculation of the electric explosion of conductors of different metals: - diss. Candidate. tehn. Science / L.I. Chemezova. Inst of High Current Electronics SB RAS. Tomsk. 1987.
8. **Janahmadov A.Kh.** Oil tribology / Janahmadov A.Kh. - Baku: Elm, 2003. - 326 p.
9. **Janahmadov A.Kh.** Tribological problems in the oil exercise equipment / A.Kh. Janahmadov. - Baku: Elm, 1998. - 216 p.

10. Chichinadze A.V. Frictional wear resistance of polymeric materials / A.V.Chichinadze, V.Y.Belousov , I.M.Bogatchuk. - Lvov. - Higher School, 1989. - 144 p.
11. Johnson K. Contact Mechanics / K. Johnson. - Moscow: Mir, 1989. - 510 p.
12. The technology preparation, characterization, and some of the applications on elektroporoshkov / M.I. Lerner, N.V.Svarovskaya, S.G.Psakhye, O.V.Bakina // Russian nanotechnology. - M.: 2009, vol.4 , № 11 – 12, pp. 56 - 58.
13. Lerner M.I. Formation of nanoparticles when exposed to a metal conductor current pulse high power / M.I. Lerner, V.V. Shamanskiy // Journal of Structural Chemistry. – Moskow: 2004, vol. 45, pp. 112 - 115.
14. Kotov Y.A. Study of particles formed by electric explosion of conductors / Y.A. Kotov, N.A. Jaworski // Journal of Physics and Chemistry of Materials Processing. - Moskow: 1978, № 4, pp. 24 - 29.
15. Belt drum brakes. Monograph (scientific publication) in 2 volumes Volume 2 / [N.A. Volchenko D.A.Volchenko, S.I. Kryshtopa, D. Zhuravlev, A.V. Vozniy. – Kuban Goverment technologist. University is. - Krasnodar - Ivano-Frankovsk, 2013. - 441 p.
16. Janahmadov A.Kh. Heating rates of metal- friction pairs with momentum and long-term heat input friction belt drum brakes [Janahmadov A.Kh., A.I.Volchenko D.A.Volchenko et al.] // Problems of friction and wear : Scientist. - Tehn. Sat - K.: Science, 2013, vol. 2 (61), pp. 20 - 28.
17. Cnare E.C. Observation on the striations of electrically exploded copper foils. / E.C. Cnare. J. Appl. Phys, 1966, vol. 32, pp. 1043 - 1044.
18. Kotov Y.A. Azarkevich E.I., Beketov I.B., Demina T.M., Murzakaev A.M., Samatov O.M. Proc. Al and Al₂O₃ Nanopowders by Electrical Explosion of Wire / Y.A. Kotov, E.I. Azarkevich, I.B. Beketov, T.M. Demina, A.M. Murzakaev, O.M. Samatov. Key Engineer. Materials, Trans. Tech. Public., Switzerland, 1997, pp. 132 - 136.
19. Oktay E. Effect of wire cross section on the first pulse of an exploding wire / E. Oktay. Rev. Sci. Instr. 1965, vol. 36, pp. 1327 - 1328.
20. Sherman P.M. Generation of submicrom metal particles. / P.M. Sherman. J. of Colloid and Interfacc Sci., 1975, vol.51, pp. 87 - 93.
21. Lerner M.I. Manage the process of formation of fine particles under electrical explosion of conductors: diss... Candidate. tehn. sciences / Michael I. Lerner. Polytechnic. Ins-t. Tomsk. 1988.
22. Kotov Y.A Study of particles produced in electric explosion of conductors / Y.A. Kotov, N.Y. Jaworowski. // J. Physics and Chemistry of Materials Processing, 1978, № 4, pp. 24 -29.
23. Kotov Y.A., Azarkevich E.I., Beketov I.B., Demina T.M., Murzakaev A.M., Samatov O.M. Producing Al and Al₂O₃ Nanopowders by Electrical Explosion of Wire / Y.A. Kotov, E.I. Azarkevich, I.B. Beketov, T.M. Demina, A.M. Murzakaev, O.M. Samatov. Key Engineer. Materials, Trans. Tech. Public., Switzerland, 1997, pp. 173 - 176.
24. Azarkevich E.I. Conditions of the current pause / E.I.Azarkevich, Y.A. Kotov, V.S. Sedoy. - JTPh. 1975, № 1, pp. 175 - 177.

25. **Kotov Y.A.** Temporal characteristics of energy LC - circuit with exploding conductor / Y.A.Kotov, V.S. Gray, L.I.Chemezova. // Collection "Development of application and sources of intense electron beams". Novosibirsk: Nauka, 1976, pp. 61 - 69.
26. **Kotov Y.A.** Electric Explosion of Wires as a Method for Preparation of Nanopowders. / Y.A.Kotov. J. of Nanopractical Research. 2003, vol.5 (5-6), pp. 539 - 550.
27. **Kotov Y.A.** Electrical explosion of wire - Method of obtaining
28. Eelektricheskij vzryv provoloki – Metod poluchenija slaboagresirovannyh nanoporoshkov / Y.A. Kotov // Advanced nanotechnology. – Moskow: 2010, vol. 5, № 11-12, pp. 40 - 48.
29. **Nabibullin I.R.** Remote switching effect in the metal - polymer - metal / I.R.Nabibullin, A.N. Lochinov, A.Y. Ponomarev // Technical Physics. - Moskow: 2010, vol. 80, Issue. 5, pp. 107 - 110.
30. **Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Javadov M.Y., Volchenko D.A., Volchenko N.A., Janahmadov E.A.** The characteristic analysis of changes in the processes, phenomena and effects within working layers of metal polymerpairs during electro-thermo-mechanical friction. // Science & Applied Engineering Quarterly (SAEQ). UK, 2014, № 2, pp. 6 - 17.

METALPOLİMER SÜRTÜNMƏ CÜTLƏRİNİN ELEKTRİK VƏ İSTİLİK SAHƏLƏRİNDƏ FRIKSİON QARŞILIQLI TƏSİR

Ə.X. CANƏHMƏDOV, A.İ.VOLÇENKO, E.S. PİRVERDİYEV,
D.A. VOLÇENKO, N.A. VOLÇENKO, D.Y. JURAVLYOV

Məqalədə, polimer örtüyün səthaltı ləyində elektrik və istilik partlayışın yaranma və inkişaf hadisələri (halları), həmçinin örtüyün mikroçixıntılar arasında ləyi qıran, yüksəzləşmə hali açılmışdır.

FRICTIONAL INTERACTION IN ELECTRICAL AND THERMAL FIELDS OF METAL-POLYMER FRICTION PAIRS

A.Kh. JANAHMADOV, A.I. VOLCHENKO, E.S. PIRVERDIYEV,
D.A. VOLCHENKO, N.A. VOLCHENKO, D.Y. ZHURAVLYOV

The article studies the emergence and development of the electric and thermal explosions in the subsurface layer of the polymer linings and the discharge phenomenon that breaks the layer between the micro protrusions of the lining.

SU-NEFT SİSTEMLƏRİNİN FRAKTAL TƏHLİLİ HAQQINDA

Q.Q. İSMAYILOV, N.M. SƏFƏROV,
R.Q. NURMƏMMƏDOVA, S.T. ƏLİYEV

Məqalədə təcrubi və nəzəri tədqiqatlar əsasında su-neft sistemlərində baş verən struktur dəyişikliklərinin qiymətləndirilməsi üçün fraktal təhlildən istifadənin mümkünülüyü öyrənilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, su-neft sistemlərinin də aid edildiyi qərarlaşmamış polidispers sistemlərin struktur vəziyyətinin diaqnostikasının fraktal təhlil əsasında öyrənilməsi daha məqsədə uyğundur.

Açar sözlər: *polidispers sistemlər, su-neft emulsiyaları, struktur dəyişiklikləri, globullar, fractal təhlil, diaqnostika.*

Giriş. Müasir elmin sürətli inkişafı şəraitində təbiətdə cərəyan edən təbii proseslərin və hadisələrin cari vəziyyətinin kompleks qiymətləndirilməsi üçün mövcud elmi metodikalar artıq lazımı tələblərə cavab vermədiyindən, son dövrlər yeni fiziki, kimyəvi, riyazi üsulların və kompüter texnologiyalarının tətbiqi sayəsində onların struktur dəyişikliklərinə fərqli yanaşmağa imkan verən diaqnostika üsullarına tələbat getdikcə artır. Təəssüf ki, hal-hazırda mədən məlumatlarının riyazi işlənilməsi üçün tətbiq edilən metodlar heç də həmişə lay sistemində və hasil edilən quyu məhsulunun strukturunda baş verən real prosesləri düzgün eks etdirmir. Artıq təcrubi olaraq təsdiq edilmişdir ki, neftqazçıxarmada mürəkkəb, qərarlaşmamış struktura malik bir sıra heterogen sistemlərdə fəza və zaman hüdudları daxilində fraktallıq xüsusiyyətləri mövcuddur. Təbii proseslərdə fraktal strukturlar müxtəlif hissəciklərin çökəməsi və aqreqatlaşdırılması, mayelərin qarışması, məsaməli mühitdə bir mayenin digərini sıxışdırması prosesində dayanıqsız “sıkışdırma xəttinin” yaranması və s. nəticəsində meydana çıxır [1–3]. Son illər bir çox tədqiqatların nəticələri layda su-neft emulsiyalarının yaranması mümkünüyünü ehtimal etdiyindən, bunların da fraktal struktur quruluşa malik olduğu söylənilir və su-neft sistemlərinin struktur vəziyyətinin diaqnostikasının qeyri-ənənəvi Evklid həndəsəsinə əsaslanan fraktal nəzəriyyəsi çərçivəsində öyrənilməsi məqsədə uyğun hesab edilir [4].

«Fraktal» termini ilk dəfə olaraq 1970-ci illərin ortalarında fransız riyaziyyatçısı Benua Mandelbrott tərəfindən elmə gətirilmişdir. Terminin əsası latınca «fractus» sözün-

dən götürülmüş və mənası «hissələrə ayırmaq, parçalamaq, sindirmaq» deməkdir. B.Mandelbrotta görə «Fraktal- ayrılmış hissələri bütövə uyğun olan çoxluqdur». Başqa sözlə ifadə etsək, «Fraktal- hissələrə ayrıla bilən və ayrılıqda hər bir hissəsi bütöv obyektin kiçildilmiş inikası olan həndəsi formadır» [5]. Fraktal nəzəriyyəsinin elmi-nəzəri prinsipləri bir çox elmi işlərdə təşəkkül tapmış və dolğun izahı verilmişdir [6-8].

Fraktal təhlilin başqa mövcud oxşar analitik üsullardan əsas fərqi ondadır ki, sistemin «davranışını» təkcə dəyişmə dövründə deyil, həm də dəyişmədən əvvəlki dövrdə - yəni retrorakursda da xarakterizə etmək mümkündür. Həmçinin fraktal ölçüsü baxılan riyazi əyrinin (və ya prosesin) mürəkkəblik dərəcəsinin göstəricisi kimi də istifadə oluna bilər. Çünkü prosesin qrafiki əyrisini (və ya təsvirini) hissələrə ayırmaqla və ayrılıqda təhlil etməklə ona təsir edən daxili və xarici amillərin təsirindən sistemdə baş verə biləcək dəyişiklikləri qabaqcadan müəyyən etmək mümkündür. Digər tərəfdən, sistemin fraktal göstəricisi prosesləri diaqnostika etməyə və yarana biləcək metastabil halları əvvəlcədən proqnozlaşdırmağa imkan verir.

Deməli, fraktal göstəricisi – sistemin dayanıqlı halının pozulması və qeyri-stabil vəziyyətə keçməsi səbəbindən onu xarakterizə edən parametrlərinin artma və ya azalma tendensiyasını əks etdirən amildir və baxılan sistemin hesabi fraktal göstəricisi proseslərdə baş verən fiziki hadisələr üçün «tənəzzül indikatoru» və ya qəza siqnalı - «SOS» rolunu oynaya bilər.

Məsələnin aktuallığı. Məlumdur ki, uzun müddətli istismar dövrü ərzində dayanıqlı su-neft sistemlərinin - emulsiyaların əmələ gəlməsi neftin çıxarılması, yiğilması, saxlanması və nəqli proseslərində xeyli mürəkkəbləşmələr yaradır. Yüksek disperslik dərəcəsi ilə xarakterizə olunan bu neft emulsiyaları termodinamiki dayanıqlı olmaqla tarazlaşmış sistemlər hesab edilir [1].

Aparılan çoxsaylı tədqiqatlar göstərir ki, yaranan su-neft emulsiyalarının davamlılığı neftin sıxlıq və özlülüyü, tərkibindəki karbohidrogenlərin yüngül fraksiyasının miqdari ilə yanaşı, suyun tərkib və xassələrindən (məsələn, su qlobullarının ölçülərindən (dispersliyindən)) bilavasitə asılıdır [2].

Bu baxımdan neftin çıxarılması və nəqli zamanı texnoloji proseslərin səmərəliliyinin artırılması, deemulsasiya prosesinin mükəmməl aparılması məqsədilə su-neft emulsiyalarının strukturunun öyrənilməsi və baş verən dəyişikliklərin diaqnostikası xüsusi əhəmiyyət kəsb edir və daima öz aktuallığı ilə seçilir.

Məsələnin qoyuluşu. Yuxarıda deyilənlərə istinadən müəlliflər qarşısında fraktal yanaşmasının, su-neft emulsiyalarının da aid edildiyi qərarlaşmamış dissipativ sistemlərin dinamikasında baş verən dəyişikliklərin öyrənilməsi üçün vacib vasitə ola biləcəyi ehtimalının bir daha yoxlanılması, tədqiq olunan sistemlərə təsir edən daxili və xarici amillər nəzərə alınmaqla onların davranışının qiymətləndirilməsi və ən əsası – heterogen sistemlərin qeyri-stabil vəziyyətinin proqnozlaşdırılması və diaqnostikası məsələnin qoyuluşunun əsasını təşkil edir.

Sınaqların metodikası. Su-neft sistemlərinin sulaşma dərəcəsindən asılı olaraq onlarda baş verən struktur dəyişikliklərinin fraktal təhlil əsasında qiymətləndirilməsi üçün laboratoriya şəraitində «Muradxanlı» İriləşdirilmiş Neft Mədənlərinin Cəfərli sahəsindən götürülmüş susuz neftə müxtəlif hesabi həcmərdə su qatmaqla və mexaniki qarışdırmaqla müxtəlif sulaşma dərəcələrinə malik su-neft emulsiyaları hazırlanmışdır.

Su-neft sistemlərində struktur dəyişiklikləri tədqiqi və fraktal göstəricisinin təyini üçün «Mikrofotoşəkillərin təhlili» (başqa sözlə – optik skanlama) üsulundan istifadə edilmişdir. Bu üsuldan ilk dəfə tüstü dumani daxilində mövcud olan aqreqat halında birləşmələrin fraktal ölçülərinin təyini üçün istifadə olunmuş və qənaətbəxş nəticələr alınmışdır [9].

Laboratoriya standart $t=20^{\circ}\text{C}$ temperaturunda neft nümunələrinin süni sulaşdırılması nəticəsində alınan su-neft emulsiyalarında baş verən struktur dəyişiliklərini öyrənmək məqsədilə Nu-2E tipli elektron mikroskopdan istifadə olunmuşdur.

Məlumdur ki, hal-hazırda mövcud olan müasir elektron mikroskoplar aşağıda göstərilən iki rejimdə işləyə bilər:

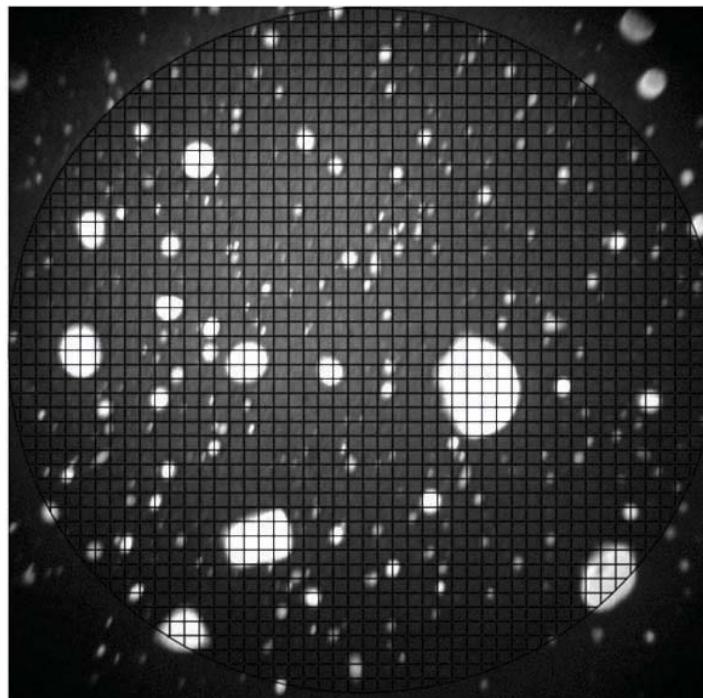
- a) eks olunma (məs. metallar, kompozit materiallar üçün)
- b) difraksiya (süzülüb keçmə) (məs. mayelər, emulsiyalar üçün).

Elektronmikroskoplardamayelərin instrukturquruluşlarının öyrənilməsiz zamanı hərəkət etməsi, onlardan düzülüb keçən elektron şüalanmasının məqsədi olmalıdır [10].

Laboratoriya tədqiqatları aşağıda qeyd olunan ardıcılıqla aparılmışdır. Süni hazırlanmış, müxtəlif sulaşma dərəcələrinə, eləcə də temperatura malik su-neft emulsiyalarından damcı formasında nümunələr götürülmüş və təbəqə şəklində şüşə slaydların üzərinə çəkilmişdir. Elektron mikroskopda bu nümunələr düzülmə (difraksiya) üsulu ilə tədqiq edilmiş və okulyardan fotosəkli çəkilərək mikrocizgiləri alınmışdır. Bu zaman fokus məsafəsinin sabitliyi, elektron fotoaparatin tərpənməz şəhərə bərkidilməsi yolu ilə əldə olunmuşdur. Alınmış fotosəkilləri gələcəkdə müqayisə etmək məqsədilə mikroşəkillərin böyüdülmə dərəcəsi (zoom) hər bir slayd üçün eyni götürülmüşdür. Sonra mikrocizginin səthi eyni ölçüyü kvadratlardan ibarət vahid hesabi torla örtülmüşdür (şəkil 1).

Mikroskop vasitəsilə alınmış rəqəmsal fotosəkillərin struktur dəyişmələrinin fraktal həndəsənin tətbiqi ilə təhlili üçün damalara (kvadratlara) bölməklə riyazi hesablamalar üsulundan istifadə olunmuşdur. Eyni temperatura, lakin müxtəlif sulaşma dərəcəsinə malik su-neft emulsiyalarının böyüdülmüş mikrofotoşəkillərində su qlobulları (damlaları) ağ rəngdə eks olunduğundan, tədqiq olunan (yəni vahid dairənin içərisinə salınmış) sahədə ümumi damalar sayı və su qlobullarının tutduğu damalar sayı təyin edilmişdir. Aparılmış riyazi hesablamaların nəticələri cədvəldə verilmişdir.

Cədvəldən göründüyü kimi, vahid dairə içərisində yerləşdirilmiş cizgidəki su damları qruplaşdırılaraq, hər bir su qlobulunun üzərini örtən damalar sayı hesablanmışdır.



Şək. 1. Mikrocizginin səthinin vahid hesabi torla örtülməsi

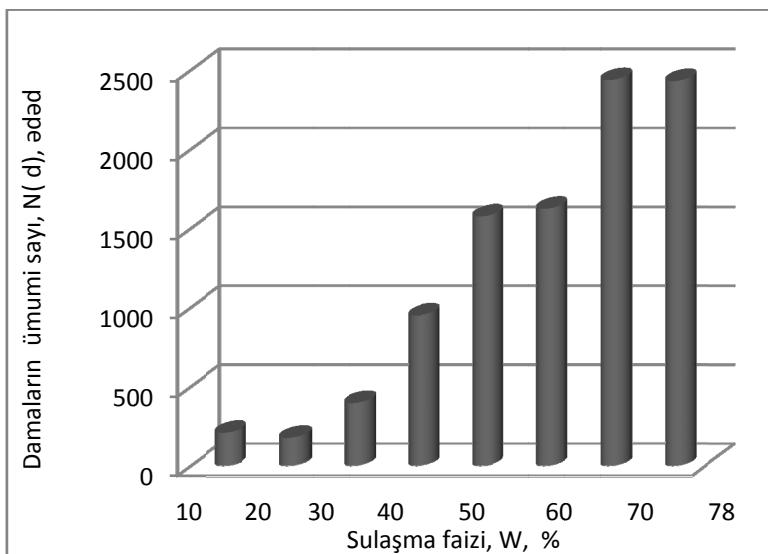
Cədvəl

Su qlobullarının orta diametrlərinin təyini üçün ilkin verilənlər

Sulaş-ma dərəcəsi, W, %	Su qlobullarının sayı və diametri											Fraktal ölçüsü, D_m
	7 dama $d=0,4277$ mm	6 dama $d=0,3666$ mm	5 dama $d=0,3055$ mm	4 dama $d=0,2444$ mm	3 dama $d=0,1833$ mm	2 dama $d=0,1222$ mm	1,5 dama $d=0,09165$ mm	1 dama $d=0,0611$ mm	0,5 $d=0,03055$ mm	0,3 dama $d=0,01833$ mm	0,1 dama $d=0,00611$ mm	
10	-	-	-	-	1 0,1833	-	6 0,5499	8 0,4888	21 0,64155	130 2,3829	44 0,26884	1,94
20	1 0,4277	-	-	3 0,7332	2 0,3666	4 0,4888	5 0,45825	60 3,666	61 1,86355	41 0,75153	-	1,79
30	-	2 0,7332	-	-	-	8 0,9776	5 0,45825	48 2,9328	102 3,1161	221 4,05093	11 0,06721	1,62
40	1 0,4277	-	-	-	2 0,3666	6 0,7332	12 1,0998	50 3,055	80 2,444	177 3,24441	775 4,73525	1,53
50	-	-	-	-	-	-	-	60 3,66	20 0,611	150 2,7495	1350 8,2485	1,95
60	-	1 0,3666	-	-	1 0,1833	1 0,1222	1 0,09165	14 0,8554	10 0,3055	600 10,998	1000 6,11	2,82
70	-	-	-	-	-	5 0,611	6 0,5499	12 0,7332	72 2,1996	436 7,99188	1912 11,68232	2,96
78	-	-	1 0,3055	-	2 0,3666	3 0,3666	14 1,2831	29 1,7719	82 2,5051	578 10,5947	1728 10,5581	2,97

* Mikroskopun böyütməsi – 35dəfə, fotoaparatin böyütməsi -1, 683 dəfə, damanın diametri – $d = 3,6 \text{ mm}$ kvadratın tili $\delta = 3,6 / 35 \cdot 1,683 = 0,0611 \text{ mm}$

Hesablamalar zamanı götürürlən vahid damaların tilinin uzunluğu mikroskopun, eləcə də fotoapparatın böyütmə dərəcələri və bir çox təsir edici amillər nəzərə alınmaqla, $\delta = 6,11$ mkm qəbul edilmişdir. Vahid dairə daxilində olan ümumi qlobulların (yəni onları örtən damalar) sayının ($N(d)$) sulaşma dərəcəsindən (W) asılı olaraq paylanması dinamikası şəkil 2-dəki histoqramda göstərilmişdir.



Şək.2. Damaların ümumi sayının sulaşma dərəcəsinə nəzərən paylanması

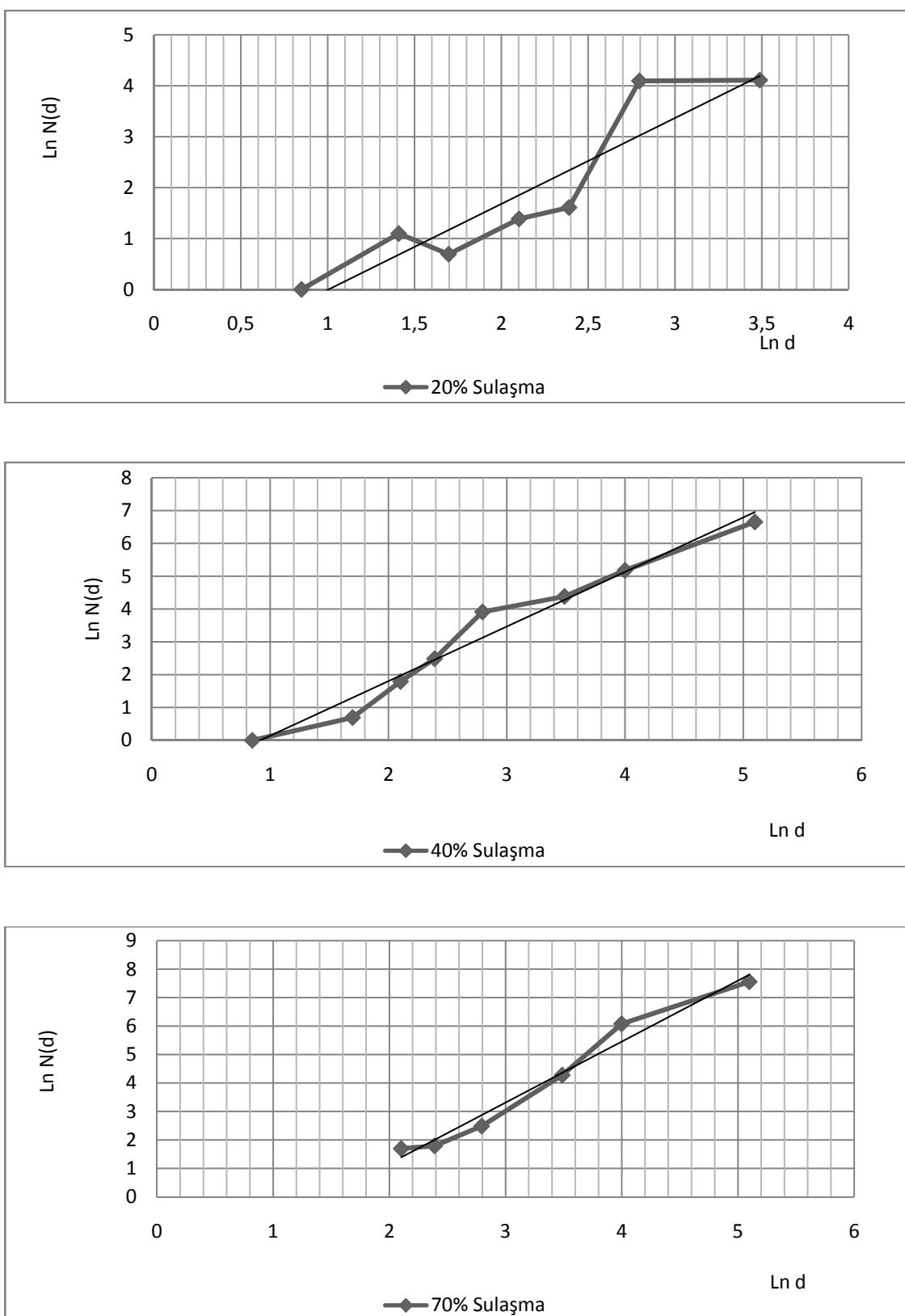
Şəkil 2-dəki histoqramdan göründüyü kimi, sulaşmanın $W=70$ %-dən çox qiymətində disperslik dərəcəsinin göstəricisinin stabillaşması müşahidə edilir.

Hər bir sulaşma halı üçün ayrılıqda fraktal ölçüsünün qiymətini təyin etmək məqsədilə, cədvəldən alınmış hesabi nəticələr əsasında ikiqat loqarifmləmə sistemində $\ln N(d) = f(\ln(d))$ düzxətli asılılıqlarından istifadə olunmuşdur. Baxılan $W=20; 40; 70$ % sulaşma hallarında fraktal ölçüsünün təyini üçün qurulmuş əyrilər şəkil 3-də verilmişdir.

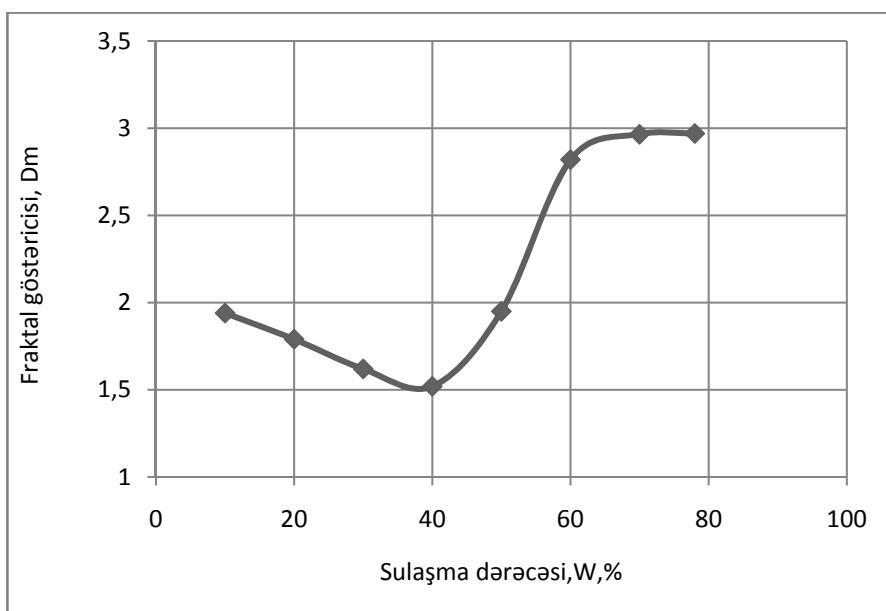
Qeyd etmək lazımdır ki, su-neft emulsiyalarının tədqiq edilən hər sulaşma faizi üçün su qlobullarının orta hesabi diametri d_{orta} nəzərə alınmaqla fraktal ölçüsünün qeyd olunan asılılıqlardan aşağıdakı ifadəyə əsasən təyin olunmuş hesabi qiymətləri cədvəldə göstərilmişdir:

$$D_m = - \frac{\ell n N(d)}{\ell n d}$$

Hər bir su-neft sistemi üçün hesablanmış fraktal göstəricilərinin sulaşma dərəcəsindən asılılığı əyrisi şəkil 4-də verilmişdir.



Şək. 3. Müxtəlif sulaşma dərəcələrində fraktal ölçüsünün təyini



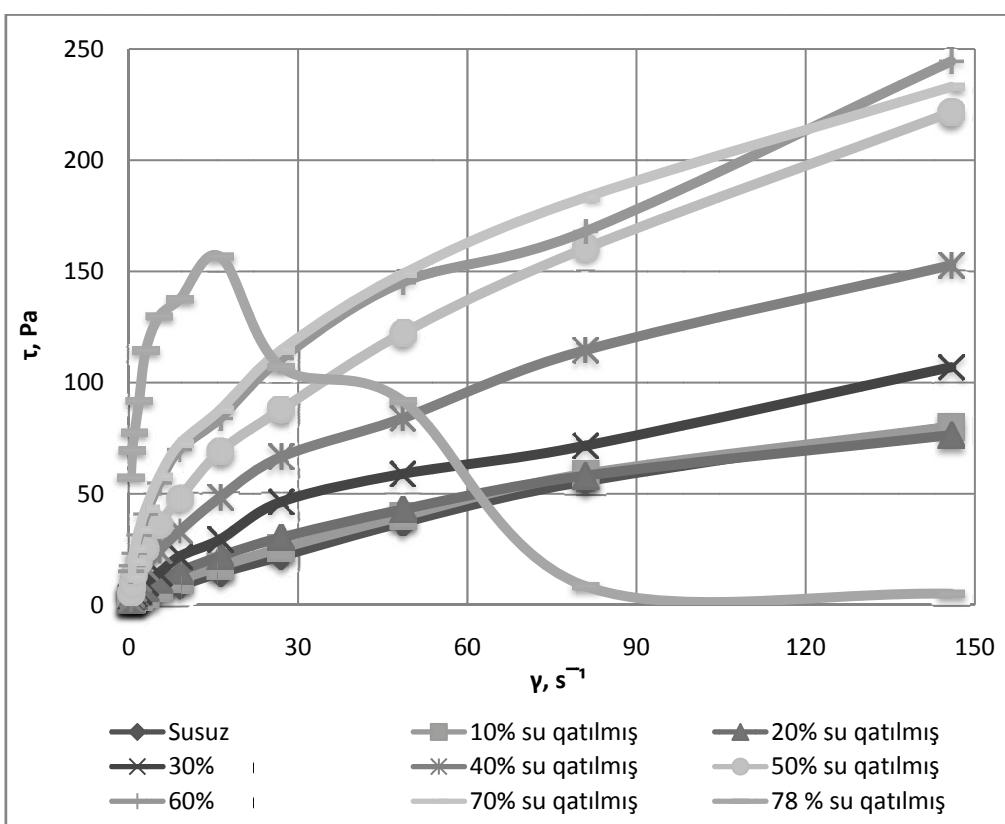
Şək.4. Fraktal göstəricisinin sulaşma dərəcəsindən asılılığı

Şəkil 4-dən göründüyü kimi, qurulmuş fraktal göstəricisi əyrisi, sulaşma dərəcəsinin artımı ilə əlaqədar su-neft sistemlərində baş verən struktur dəyişiklikləri real təhlil etməyə imkan yaradır. Belə ki, sulaşmanın 40 % həddindən başlayaraq sürətlə yüksələn fraktal ədədi, sulaşma faizinin 70% həddindən sonra stabillaşən maksimal qiymətini almış olur. Sulaşmanın $W=78\%$ həddində bu göstərici getdikcə stabillaşır ki, bu da su-neft sisteminin dispers faza – su ilə doyduğunu bir daha sübut edir. Bundan sonra əlavə edilən su həcmi emulsiyada qarışmadığından, koalesensiya prosesi nəticəsində «sərbəst» su qismində ayrılır.

Maraqlısı odur ki, bu fakt su-neft emulsiyalarının reoloji xassələrinin öyrənilməsi üçün «Reotest-2» rotasion viskozimetrində aparılmış təcrübələrin nəticələri əsasında qurulmuş rotoviskozimetrik əyirlərlə də bilavasitə uzlaşır (Şək.5).

Belə ki, sulaşma dərəcəsinin $W=78\%$ qiymətində su-neft sistemi su ilə «doyduğundan», əlavə edilən su emulsiyada artıq həll olmur və təbəqələşərək ayrılır. Sürüşmə gərginliyinin kəskin azalması da məhz bu səbəbdən təzahür edən «hidravlik yastıq» effektinin işə düşməsi ilə izah edilə bilər [11].

Təcrubi nəticələrin təhlili və müzakirəsi. Alınmış nəticələrin təhlili göstərir ki, su-neft emulsiyalarında suyun miqdarı çoxaldıqca dispers faza kəskin dəyişikliyə uğrayır, yəni qlobulların diametri azalır (xirdalanır) və təqribən bərabərləşir, başqa sözlə desək, disperslik dərəcəsi çoxalaraq stabillaşır. Sulaşmanın 40% həddindən başlayaraq anomal xassələrin meydana çıxmazı, sürüşmə gərginliyinin sıçrayışlı xarakterində - qeyri-monoton dəyişməsində öz əksini tapır. Sulaşma həddinin 70 %-dən böyük qiymətində isə fraktal göstəricisinin stabillaşməsi aydın nəzərə çarpır.



Şək.5. Müxtəlif sulaşma dərəcələrində su-neft sistemi üçün rotoviskozimetrik əyrişlər

Fraktal strukturların xaos xarakterə malik olduqları barədə bir sıra tədqiqatları nəzərə alsaq, su-neft emulsiyalarında meydana çıxan bu struktur dəyişikliklərini «Feygembau ssenarisi» əsasında izahı daha məqsədə uyğun sayıla bilər. Bu ssenariyə əsasən hər bir qərarlaşmamış sistemin fraktal ölçüsünün müəyyən böhran nöqtəsi mövcuddur ki, o həddə yanaşdıqda sistem idarə olunması xeyli mürəkkəbləşən qeyri-stabil vəziyyətə - xaos halına keçir və bu keçid nöqtəsindən sonra yeni (bəzən isə anomal) xassələrin meydana çıxması təsadüf edilir [12].

Nəticə. Beləliklə, fraktal yanaşma su-neft sistemlərinin makrostrukturlarında baş verən dəyişikliklərə əsasən onların mikrostruktur quruluşu barədə məlumat almağa imkan verir. Su-neft emulsiyalarının fraktal ölçüsünə əsasən onların struktur dəyişikliyi və reofiziki xüsusiyyətlərinin diaqnostikası üçün riyazi modellərin qurulması mümkündür. Məqalədə qeyd olunanların polidispers sistemlərin təhlili üçün perspektivdə yeni imkanların yaradılmasına səbəb olacaqı şübhəsizdir.

LITERATURE

1. **Mirzadzhanzade A.H., Hasanov M.M., Bakhtizin R.N.** Modelling of processes of oil and gas // Linearity disequilibrium, uncertainty. – Moskow, Izhevsk, Institute of Computer Science, 2005. - 368 p.
2. **Feder E.** Fractals. - Moskow: "Mir", 1991. - 264 p.
3. **Julien R.** Fractal aggregates. // Physics achievement Sciences, 1989, vol.157, № 2, pp. 339 -357.
4. **Ismayilov G.G., Safarov N., Guliyev V.K., Hasanov H.I.** Opportunities and reasons for the formation of abnormal water emulsions in the formation. // Materials of the international scientific-practical conference "Modern problems of oil and gas complex of Kazakhstan ", 2011, Aktau, pp. 153 - 158.
5. **Mandelbrott B.B.** The Fractal Geometry of Nature. New-York, W.H. Freeman, 1982, pp. 22 -29.
6. **Kronover R.M.** Fractal and chaos in dynamical systems. Fundamentals of the theory. - Moskow: "Postmarket", 2000. - 352 p.
7. **Bozhokin S.V., Parshin D.A.** Fractal and Multifractals // SRC "Regular and Chaotic Dynamics". – Moskow - Izhevsk, 2001. - 128 p.
8. **Roldugin V.I.** Fractal structures in disperse systems // Chemical achievement, 2003, vol.72, №10, pp. 931 - 959.
9. **Smirnov B. M.** Fractal clusters // Physics achievement Sciences, 1986, vol.149, № 2, pp. 177-219.
10. **Lukyanovich V.M.** Elektronics microscopy physicochemical studies // Methods and Applications. – Moskow: Publishing House of Acad. Sciences of the USSR, 1960. - 272 p.
11. **Ismayilov G.G., Safarov N.M.** Reotekhnologiya heterogeneous systems and its reflection in the effects associated with oil and gas production // Proceedings of ANAS, section geosciences, 2011, № 4, pp. 49 - 55
12. **Schreder M.** Fractals, Chaos, Power Laws. // SRC "Regular and Chaotic Dynamics". – Moskow - Izhevsk, 2004. - 528 p.

О ФРАКТАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ВОДОНЕФТЯНЫХ СИСТЕМ

Г.Г. ИСМАИЛОВ, Н.М. САФАРОВ, Р.Г. НУРМАМЕДОВА, С.Т. АЛИЕВ

В статье на основе экспериментальных и теоретических исследований авторами изучена возможность применения фрактального анализа для оценки структурных изменений в водонефтяных системах. Выявлено, что диагностирование структурного состояния водонефтяных эмульсий целесообразно в рамках фрактального анализа, который может служить инструментом для изучения скрытого порядка в динамике неупорядоченных систем, каковыми являются водонефтяные эмульсии.

THE FRACTAL ANALYSIS OF WATER-OIL SYSTEMS

G.G. ISMAYILOV, N.M. SAFAROV, R.G. NURMAMEDOVA, S.T. ALIYEV

On the basis of the experimental and theoretical studies, the authors investigate the possibility of using the fractal analysis to assess the structural changes in the oil-water systems. It is established, that the diagnosis of the structural state of the water-oil emulsions is purposeful in terms of the fractal analysis and can be used as a tool to study the dynamics of the disorganized systems, to which the water-oil emulsions belong.

СИНТЕЗ УПЛОТНЕНИЯ СКВАЖИННОГО УПЛОТНИТЕЛЯ ПАКЕРОВ

Г.В. МАМЕДОВ

Статья посвящена разработке метода расчета уплотнений из резины, применяемом в нефтепромысловом оборудовании. Проанализированы основные особенности расчета необходимых конструктивных изменений уплотнений, с помощью которых можно обеспечить реализацию заданных механических характеристик уплотнений.

Для синтеза уплотнений (скважинного пакера) применен упругий потенциал, на основе чего определена форма асимметричного уплотнения, так, чтобы при сжатии уплотнения к контактной поверхности возникло бы заданное напряжение, заполняющее посадочное место.

Ключевые слова: *резиновый уплотнитель, скважинный пакер, упругий потенциал материала, контактное напряжение поверхности уплотнения, оптимальная форма уплотнителя, модуль сдвига резинового уплотнителя.*

Резиновые уплотнители широко представлены в современном оборудовании нефтяной и газовой промышленности. Они применяются для уплотнительных узлов гидравлических и пневматических устройств, в буровом оборудовании, для разделения сред, пакеровки скважин при изыскательских работах, при разведке и раздельной эксплуатации нефтяных и газовых скважин, уплотнений и поршней нефтяных насосов, затворов и регулирующей аппаратуры химических производств и для многих других целей. Конструкции резиновых контактных уплотнений разнообразны. Широко применяются уплотнительные кольца “O”-образных, “□”-образных сечений и диаметров, “V”-образные манжеты, многорядные шевронные уплотнения, надувные уплотнения рукавного типа, цилиндрические манжеты скважинных пакеров и конические манжеты уплотнения вращающихся валов, резинометаллические поршни и многие другие.

Эти детали предназначены для того, чтобы возникающие в зоне контакта резины с металлом (или другим, более жестким материалом) напряжения могли обеспечивать герметичность соединения по этой контактной поверхности при заданном давлении жидкости или газа.

При создании уплотнения необходимо задать тот уровень деформации резиновой детали [1], при котором напряжения будут достаточными, и то же время в течение кото-

рого можно гарантировать, что напряжение будет оставаться в необходимых пределах. Создать деталь, которая вечно будет служить хорошим уплотнителем, невозможно. Зная первоначальные напряжения, можно определить гарантийное время службы конструкции. Здесь основной задачей является синтез эпюры напряжений, заданной на контактной поверхности.

В механике задача синтеза часто перерастает в задачу оптимизации. Это означает, что формируются требования, которым должны соответствовать конструкции, например, заданная кривая жесткости, эпюра напряжений и др. Широта использования резиновых уплотнителей выдвинула перед их создателями высокие требования по эксплуатационным и качественным показателям как материала, так и конструкции уплотнителей. Подробный набор требований не может быть обеспечен одним материалом и одной универсальной конструкцией уплотнителя.

Конструктор машины при проектировании уплотнительного соединения, как правило, стремится подобрать известный резиновый уплотнитель, проверенный в предшествующих проектах, серийно выпускаемый в промышленности. При этом не всегда принимается во внимание недопустимость даже незначительных на первый взгляд изменений жесткости уплотнений, управление упругой характеристикой уплотнения с помощью изменения условий закрепления.

Конструктор, создавая уплотнение, должен уметь достаточно точно предсказать основные механические характеристики уплотнения, жесткость при разных видах нагрузления, размеры контактных поверхностей уплотняющих деталей, распределение напряжений на них, изменение механических показателей во времени и сроки службы отдельных деталей.

В этой работе рассмотрим синтез уплотнения с заданными механическими характеристиками герметизирующего узла скважинных пакеров.

Решим следующую задачу: нагружение внутренним давлением предварительно сжатого цилиндрического резинового уплотнителя (скважинный пакер). Эта задача имеет приложение в расчетах уплотнений резиновыми скважинными пакерами (рис.1). Посадка резинового уплотнителя в посадочное место в скважине (в эксплуатационных колоннах) происходит в условиях одноосной однородной деформации. В цилиндрической системе координат r , θ , z при однородном сжатии перемещения рассчитываются согласно зависимостям [1].

$$U_r^0 = r(-1 + \lambda^{-1/2}), \quad U_\theta^0 = 0, \quad U_z^0 = z(-1 + \lambda^{-1}) \quad (1)$$

здесь λ - кратность однородного сжатия, для сжатия $\lambda = 1 - \varepsilon$; где $\varepsilon = \Delta h / h_0$ - относительно осевой деформации; Δh - осевая деформация; h_0 - размеры уплотнителя до деформирования.

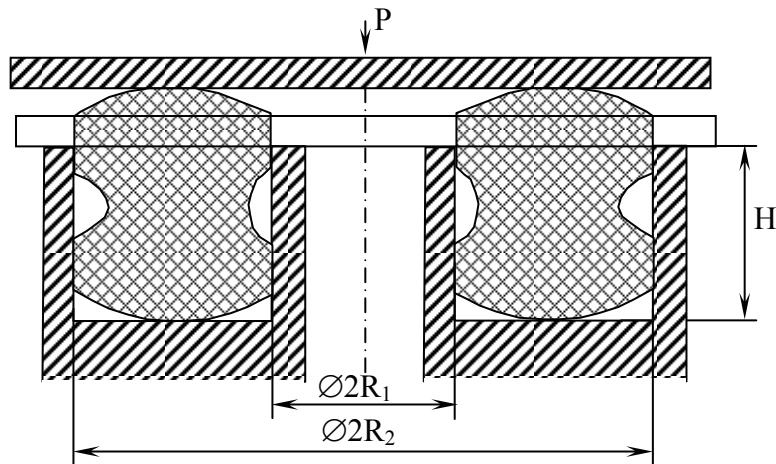


Рис.1. Расчет уплотнений резиновыми скважинными пакерами

Соответствующее однородной деформации (1) напряженное состояние определяется следующими известными зависимостями для несжимаемого материала [2]:

Потенциал неогуковского тела Л. Трелоара:

$$\sigma_{zz}^0 = G(\lambda^2 - \lambda^{-1}), \quad S^0 - 1 = -\lambda^{-1} \quad (2)$$

Потенциал Бартева Г.М. и Хазановича Т.Н.:

$$\sigma_{zz}^0 = 2G(\lambda - \lambda^{-1/2}), \quad S^0 - 1 = -\lambda^{-1/2} \quad (3)$$

Потенциал дельта-метода –

$$\sigma_{zz}^0 = 3G(\lambda - 1) \quad (3a)$$

G - модуль сдвига; S^0 - гидростатическое давление

$$S^0 = \sigma_{z'z'} / 3G$$

Соотношения (1)-(3a) характеризуют предварительное напряженно-деформированное состояние полого цилиндра (уплотнения). Рассматривая нагружение предварительно сжатого цилиндра (уплотнения) внутренним давлением, используем постановку линеаризованных задач расчета. Для приращений примем [2]:

$$U_r = U(r); \quad U_o = U_z = 0 \quad (4)$$

Решение задачи получим для несжимаемых тел, свойства которых описываются тремя приведенными [3] потенциалами:

$$W_1^0 = \frac{1}{2} G(J_1^0 - 3) \quad (5)$$

$$W_1^0 = 2G(\lambda_1^0 + \lambda_2^0 + \lambda_3^0 - 3) \quad (6)$$

$$W_{10(U_{ij})} = \frac{G}{4} \left[\frac{\partial D^0}{\partial U_{j,k^0}} U_{i,k} + \frac{\partial D^0}{\partial U_{i,k^0}} U_{j,k} \right] \times \left[\frac{\partial D^0}{\partial U_{j,k^0}} U_{i,k} + \frac{\partial D^0}{\partial U_{i,k^0}} U_{j,k} \right] \quad (7)$$

где $i, j, k = x, y, z$

здесь W - упругий потенциал (удельной энергии деформации).

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - кратность деформации соответственно по ребрам элементарного объема – имеет вид:

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$$

J_1^0 - инварианты деформации; D - якобиан, относительное изменение объема через W определяется соотношением [1]

$$D = 1 + W = \begin{vmatrix} 1 + U_{x,x} & U_{y,y} & U_{z,x} \\ U_{y,x} & 1 + U_{y,y} & U_{y,x} \\ U_{z,x} & U_{z,y} & 1 + U_{z,z} \end{vmatrix}$$

где $U_{x,x}, U_{y,y}, U_{z,z}$ - перемещения по осям.

При обеспечении условия несжимаемости резины уплотнение имеет форму

$$\begin{vmatrix} 1 + U_{x,x} & U_{y,y} & U_{z,x} \\ U_{y,x} & 1 + U_{y,y} & U_{y,x} \\ U_{z,x} & U_{z,y} & 1 + U_{z,z} \end{vmatrix} = 1$$

Исследование упругих свойств различных высокоэластичных материалов уплотнения при однородных конечных деформациях показывает, что экспериментальные результаты не могут быть описаны с помощью какого-либо одного упругого потенциала для всех материалов уплотнений. Для различных по структуре типов материалов следует предполагать существование соответственно различных видов потенциалов, с помощью которых возможно описать поведение материалов уплотнения, либо во всем интервале изменения деформации, либо при умеренных деформациях. В расчетах используем либо линеаризованные системы уравнений, либо вариационные принципы соответственно для трех простейших типов упругих потенциалов: неогуковское, Бартенева – Хазановича и дельта-метода.

Как увидим в дальнейшем, решение задач позволяет установить качественные и количественные отличия этих потенциалов.

Приведенные выше три потенциала (5), (6), (7) представлены в записи для прямоугольной системы координат. Переход к записи необходимых соотношений в системе цилиндрических координат осуществляется по известным соотношениям.

Неогуковское тело. В этом случае используем из соотношений линеаризованных компонент тензора напряжений t_{ij} , не равных тождественно нулю:

$$t_{rr} = G[u_{r,r} + S\sqrt{\lambda} - u/r], \quad t_{\theta\theta} = G[u/r + S\sqrt{\lambda} - u_{r,r}], \quad t_{zz} = G\lambda^{-1}[S - (u_{r,r} + u/r)] \quad (8)$$

здесь $t_{rr}, t_{\theta\theta}, t_{zz}$ - линеаризованных компонент тензор напряжений.

Линеаризованное условие несжимаемости имеет вид:

$$\frac{\partial D^0}{\partial U_{i,j^0}} U_{i,k} = 0 \quad (9)$$

Линеаризованное условие несжимаемости (9) с учетом (1) и (4) принимает вид
 $u_{,r} \left(1 + u_{r,r^0}\right)^{-1} + ur^{-1} \left(1 + u^0/r\right)^{-1} = 0$

и допускает решение в форме

$$u = C_0 r \quad (10)$$

С учетом (1), (10) напряжения (8) при $S = C_1 = \text{const}$ тождественно удовлетворяют системе дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} t_{rr,r} + (t_{rr} - t_{\theta\theta}) \cdot \frac{1}{r} &= 0, \\ t_{zz,z} &= 0 \end{aligned}$$

Таким образом, напряжения определяем соотношениями

$$\left. \begin{aligned} t_{rr} &= G \left[C_1 \sqrt{\lambda} - 2C_0 r^{-2} \right] \\ t_{\theta\theta} &= G \left[C_1 \sqrt{\lambda} + 2C_0 r^{-2} \right] \\ t_{zz} &= GC_1 \lambda^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Постоянные C_0 и C_1 в (10), (11) рассчитываются из граничных условий на внутренней ($r = a$) и наружной ($r = b$) поверхностях уплотнения.

Когда наружная поверхность уплотнения не соприкасается с ограничителем посадочного места (назовем эту ситуацию случаем «а»), имеем статические краевые условия (для случая «немертвого» нагружения):

$$t_{rr} \left(1 + U_{r,r^0}\right) \Big|_{r=a} = -P, \quad t_{rr} \left(1 + U_{r,r^0}\right) \Big|_{r=b} = 0 \quad (12)$$

и (11) определяем

$$C_0 = \frac{\sqrt{\lambda}}{2} \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{b^2 \cdot a^2 / b^2}{1 - a^2 / b^2}, \quad C_1 = \frac{P}{G} \cdot \frac{a^2 / b^2}{1 - a^2 / b^2} \quad (13)$$

Подстановкой (13) в (11) находим компоненты тензора t_{ij} и приращение осевого напряжения тензора σ_{ij} :

$$\sigma_{zz} = \left(1 + u_{z,z^0}\right) \cdot t_{zz} = P \cdot \frac{a^2 / b^2}{1 - a^2 / b^2} \quad (14)$$

Когда наружная поверхность уплотнения соприкасается с ограничителем при предварительном сжатии (назовем эту ситуацию «б»), формируем смешанные граничные условия

$$t_{rr} \left(1 + U_{r,r^0}\right) \Big|_{r=a} = -P, \quad U \Big|_{r=b} = 0 \quad (15)$$

В этом случае находим постоянные в (10), (11);

$$C_0 = 0, \quad C_1 = -\frac{P}{G}$$

и далее по (11) определяем

$$\sigma_{zz} = \left(1 + u_{z,z^0}\right) \cdot t_{zz} = -P \quad (16)$$

Соотношение (16) совместно с (15) показывает, что в случае «б» в уплотнении реализуется объемное сжатие. Характер изменения осевого напряжения σ_{zz} при нагружении давлением предварительного сжатого уплотнения до момента выхода резины (уплотнитель) на ограничитель определяется по: (в случае несжимаемого высокоэластичного материала для перемещений)

$$u' = u^0 + u,$$

$$\text{тензоров деформаций: } \sigma' = \sigma^0 + \sigma,$$

$$\text{скалярной функции: } S' = S^0 + S \text{ [2] суммой}$$

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz^0} + \sigma_{zz} = G \left[\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} + \frac{P}{G} \cdot \frac{a^2/b^2}{1-a^2/b^2} \right] \quad (17)$$

Соотношение (17) используется при анализе работоспособности уплотнений.

Потенциал Бартенева-Хазановича. В рассматриваемой задаче, согласно (1), (4), не равные тождественно нулю линеаризованные компоненты тензора t_{ij} имеют вид

$$\left. \begin{aligned} t_{rr} &= 2G\sqrt{\lambda} \left(S - \frac{u}{r} \right), \\ t_{\theta\theta} &= 2G\sqrt{\lambda} \left(S - u_{r,r} \right), \\ t_{zz} &= 2GS\lambda^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Как и в рассмотренном выше случае неогуковского тела, решение задачи, удовлетворяющее уравнениям равновесия и условию несжимаемости, имеет вид

$$\begin{aligned} U_0 &= C_0 \cdot \frac{1}{r} \\ S &= C_1 \end{aligned} \quad (19)$$

где постоянные C_0 и C_1 определяются в ситуациях «а» или «б». Для краевых условий (12) согласно (18), (19) в случае «а» находим:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{b^2 \cdot a^2/b^2}{1-a^2/b^2}, \\ C_1 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{a^2/b^2}{1-a^2/b^2} \end{aligned}$$

Откуда

$$\sigma_{zz} = P \cdot \frac{a^2/b^2}{1-a^2/b^2} \quad (20)$$

а из (15) следует

$$C_0 = 0, \quad C_1 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{P}{G}$$

И получим результат, совпадающий для случая «б» с (16):

$$\sigma_{zz} = (1 + U_{zz^0}) \cdot t_{zz} = -P$$

Согласно (3) и (20), изменение осевого напряжения σ_{zz} до выхода резины (уплотнителя) на ограничитель определяется суммированием

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz^0} + \sigma_{zz} = G \left[2 \left(\lambda - \lambda^{-\frac{1}{2}} \right) + \frac{P}{G} \cdot \frac{a^2}{1 - a^2/b^2} \right] \quad (21)$$

Потенциал дельта-метода. Поскольку деформации по (1), (4) осуществляются с сохранением осевой симметрии, то решение задачи о нагружении давлением предварительно сжатого уплотнения удобнее получить с использованием постановки, вытекающей из соотношений [4]:

$$\left. \begin{array}{l} \tau_{rr} = G(2U_{,R} + S); \\ \tau_{\theta\theta} = G(2uR^{-1} + S) \\ \tau_{zz} = GS \end{array} \right\} \quad (22)$$

и линеаризованное условие несжимаемости принимает вид

$$U_{,R} + U/R = 0 \quad (23)$$

В предположении справедливости (1), (4) уравнением равновесия

$$\begin{aligned} \tau_{rr,R} + (\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}) \cdot \frac{1}{R} &= 0 \\ \tau_{zz,z} &= 0 \end{aligned}$$

и условию несжимаемости (23) тождественно удовлетворяет решению

$$u = \frac{C_0}{R} = C_0 \sqrt{\lambda} \cdot \frac{1}{r}, \quad S = C_1 \quad (24)$$

C_0 и C_1 определим либо из условий типа «а»

$$\tau_{rr}|_{r=a} = -P, \quad \tau_{rr}|_{r=b} = 0 \quad (25)$$

либо из условий типа «б»

$$\tau_{rr}|_{r=a} = -P, \quad u|_{r=b} = 0, \quad (26)$$

Из (24) и (25) находим

$$C_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{b^2 \cdot a^2/b^2}{1 - a^2/b^2}, \quad C_1 = \frac{P}{G} \cdot \frac{a^2}{1 - a^2/b^2} \quad (27)$$

Подсчитывая далее напряжения τ_{ij} согласно (22) и компоненты тензора t_{ij} согласно [2]:

$$t_{ij} = \frac{1}{D^0} \cdot \frac{\partial D^0}{\partial U_{i,h^0}} \tau_{jn}, \quad i,j,k = x,y,z$$

определяем

$$t_{zz} = G \cdot \frac{C_1}{1 + U_{z,z^0}} \quad (28)$$

соответствующую составляющую σ_{zz} тензора напряжений σ_{ij}

$$\sigma_{zz} = (1 + u_{z,z^0}) \cdot t_{zz} = P \cdot \frac{a^2/b^2}{1 - a^2/b^2} \quad (29)$$

Таким образом, в случае дельта-метода до выхода уплотнений (резины) на ограничитель изменение осевого напряжения σ_{zz} представляется суммированием (3а) и (29), т.е.

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz^0} + \sigma_{zz} = G \left[3(\lambda - 1) + \frac{P}{G} \cdot \frac{a^2/b^2}{1 - a^2/b^2} \right] \quad (30)$$

В случае, когда уплотнения вышла на ограничитель в результате предварительного сжатия, из (26) приходим к выводу о справедливости соотношения (16), показывающего реализацию в цилиндре объемного сжатия.

Решим следующую задачу: найдем такую форму Ω резинового уплотнения, чтобы при сжатии уплотнения жесткой плитой на контактной поверхности возникли бы заданные напряжения σ_e . Форма уплотнения после сжатия Ω_0 считается заданной, она определяется, например, размерами посадочного места. Рассмотрим предложенный уплотнительный узел (рис. 2) скважинного пакера защищенным патентом (Мамедов Г.В. “Уплотнительный узел пакера” патент № а2012 0087, М.КЛ.Е21 V33/22).

В основу алгоритма, определяющего форму уплотнения, положено предположение, что можно найти такое растягивающее напряжение σ_p , которое, будучи приложенным к заданной контактной поверхности Ω_0 , после деформации дает нужную нам форму Ω . Будем определять σ_p с помощью следующего итерационного процесса: предположим, что на i -м шаге мы получили некоторое растягивающее напряжение σ_p^i . Тогда $(i+1)$ -й шаг выполняется следующим образом.

1. К контактной поверхности, соответствующей уплотнению формы Ω_0 , прилагается растягивающее напряжение σ_p^i . После деформации получаем форму уплотнения Ω^{i+1} .

2. Сжимая уплотнение формы Ω^{i+1} жесткими плитами, находим напряжения σ_c^{i+1} на контактной поверхности.

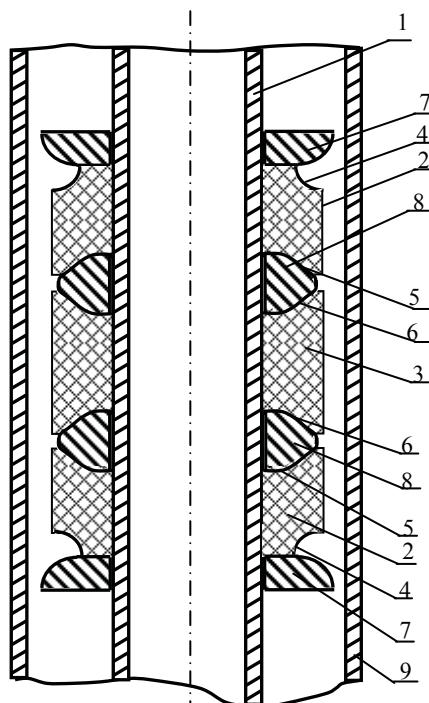


Рис. 3. Уплотнительный узел пакера (патент №а2012 0087, M.KL.E21 V33/22 автор Мамедов Г.В.).

1 – ствол; 2 – крайние манжеты; 3 – средний манжет; 4 – полусферический профиль крайних манжетов; 5 – внутренний сферический профиль крайних манжетов; 6 - сферический профиль среднего манжета; 7 – упорные шайбы; 8 – промежуточные шайбы; 9 – эксплуатационная колонна.

3. Если напряжение σ_c^{i+1} достаточно близко к σ_e , то решение $\sigma_p = \sigma_p^i$, $\Omega = \Omega^{i+1}$ – достаточное, в противном случае σ_p^{i+1} определяется по формуле

$$\sigma_p^{i+1} = \sigma_p^i + (\sigma_c^{i+1} - \sigma_e),$$

а затем выполняется следующий шаг.

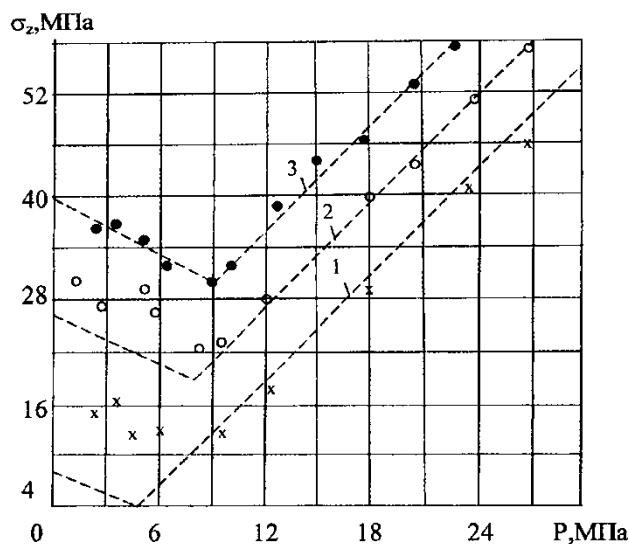
Практика показала, что процесс достаточно быстро сходится, если выбрать $\sigma_p^0 = \sigma_e$.

На рисунке 3 пунктирными линиями показаны теоретические зависимости для уплотнительных резиновых колец, выполненных из различных резин, с модулем-сдвигами $G = 2 \text{ MPa}$, 3 MPa , 5 MPa , а точками и крестиками обозначены экспериментальные значения. Характерная точка перелома для кривых подсчитываются из условия перехода от расчетной случаем «а» к случаю «б» (16).

Пример. Найдем форму осесимметричного уплотнения, если известно, что после поджатия уплотнение должно заполнять посадочное место в виде трубного пространства скважины, а эпюра нормальных давлений на контактной поверхности $\sigma_e = 0,5$ должна

быть постоянной (рис. 1). Трение между резиной и металлом отсутствует. Задача решается в предположении, что контакт уплотнителя с боковыми стенками посадочного места допускается в двух вариантах:

- 1) $R_1=1$, $R_2=2$ - на участках $0 \leq z \leq 0,3$ и $0,7 \leq z \leq 1,0$;
- 2) при $R_1=1$ - на участке $0,3 \leq z \leq 0,7$, $R_2=2$ - на участках $0 \leq z \leq 0,3$ и $0,7 \leq z \leq 1,0$.



*Рис. 3. Зависимость напряжений от давления модуль-сдвига
G, MPa : 1 – 2, 2 – 3, 3 – 5.*

На рис. 4 изображены соответственно две формы осесимметричного уплотнения, полученные по изложенному выше алгоритму.

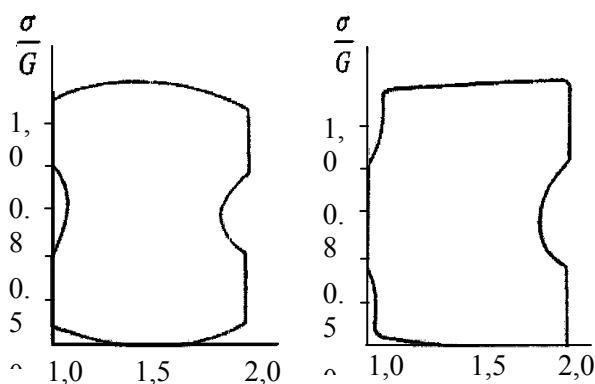


Рис. 4. Распределение напряжения по разным формам.

- а) наружная поверхность уплотнения не соприкасается с ограничителем посадочного места; б) наружная поверхность уплотнения соприкасается с ограничителем при предварительном сжатии.

Выводы.

1. Для синтеза уплотнений (скважинного пакера) применен упругий потенциал, на основе которого дается качественное описание свойств различных типов материалов, уплотнений скважинных пакеров.
2. Полученные в этой работе решения уточняют количественные характеристики, используемые при проектировании уплотнений с различными профилями (патент).
3. Для синтеза уплотнений (скважинного пакера) применен упругий потенциал, на основе которого определена форма асимметричного уплотнения так, чтобы при сжатии уплотнения к контактной поверхности возникло бы заданное напряжение, заполняющее посадочное место.

LITERATURE

1. **Janahmadov A.Kh.** Mechanic elastomers in the oil and gas equipment. - Baku: Chashiogli 2002. – 308p.
2. **Lukomskaya A.I., Evstratov V.R.** A basis for forecasting the mechanical behavior of rubber and rubber. - Moscow: Khimiya, 1975. – 360p.
3. **Biderman V.L., Martyanova G.V.** Variational method for calculating the details of incompressible material. Strength calculations. – Moskow, 1977, Issue 18, pp. 3-27.
4. **Bezukhov N.I.** Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep. - Moscow: Visschaya Shkola, 1968. – 512 p.

KİPLƏNDİRİCİ QUYU PAKERLƏRİN KİPLƏNDİRMƏ SİNTEZİ

H.V. MƏMMƏDOV

Məqalə, neft mədən avadanlıqlarında tətbiq olunan rezin kipləndiricilərin hesablama üsulunun tədqiqinə həsr olunub. Kipləndiricilərin verilən mexaniki xarakteristikalarının reallaşması, zəruri konstruktiv dəyişikliklərin köməkliyi ilə təmin olunan hesablamanın əsas xüsusiyyətləri təhlil olunub.

Kipləndirmənin sintezi üçün (quyu parkeri) assimetrik kipləndiricinin forması müəyyən olunan elastiki potensial tətbiq olunmuşdur, belə ki kontakt səthlə kipliyin təmin olunması üçün müvafiq gərginlik yaradılmalıdır.

SYNTHESIS SEALING OF WELL PACKER SEAL

G.V. MAMADOV

The paper develops the calculation techniques of the sealing rubber used in the oil-field equipment. The main calculation features are analyzed for the necessary constructive changes of sealing, which provide the realization of given mechanical characteristics.

For the synthesis sealing (down-hole packer) the elastic potential is applied, which is defined on the basis of the asymmetric shape of the seal, so that when the seal is compressed against the contact surface there would be a fixed voltage, filling the seat.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ В МИРЕ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ (часть I)

Д.А. ВОЛЬЧЕНКО¹

В материалах первой части статьи рассмотрены существующие способы увеличения нефтеотдачи пластов, их эффективность, а также история разработки методов повышения нефтеизвлечения и приведена их классификация.

Ключевые слова: *методы увеличения нефтеотдачи пластов, коэффициент нефтеизвлечения, технологический эффект, физико-химические, газовые, тепловые, гидродинамические, микробиологические и комбинированные методы повышения нефтеотдачи.*

Введение. Эффективность извлечения нефти из нефтеносных пластов современными, промышленно освоенными методами разработки во всех нефтедобывающих странах на сегодняшний день является неудовлетворительной, притом, что потребление нефтепродуктов во всем мире растет из года в год. Средняя конечная нефтеотдача пластов по различным странам и регионам колеблется в пределах от 25 до 45%. Например, в странах Латинской Америки и Юго-Восточной Азии средняя нефтеотдача пластов составляет 24-27%, в Иране – 16-17%, в США, Канаде и Саудовской Аравии – 33-37%, в странах СНГ и России – до 40%. Это зависит от структуры запасов нефти и используемых методов разработки месторождений.

Остаточные или неизвлекаемые промышленно освоенными методами разработки запасы нефти достигают в среднем 55-75% от первоначальных геологических запасов нефти в недрах. Процентное соотношение извлекаемых и остаточных запасов нефти представлено на рис. 1.

¹ Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (г. Ивано-Франковск, Украина)

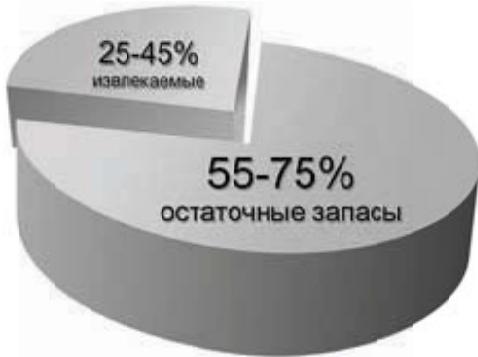


Рис. 1 – Соотношение извлекаемых и остаточных запасов нефти

Из рис. 1 видно, что процент остаточных неизвлекаемых запасов нефти весьма высок. Поэтому актуальными являются задачи применения новых технологий нефтедобычи, позволяющих значительно увеличить нефтеотдачу разрабатываемых пластов, на которых традиционными методами извлечь значительные остаточные запасы нефти уже невозможно.

Во всем мире с каждым годом возрастает интерес к разработке новых методов повышения нефтеотдачи пластов, и расширяются исследования, направленные на поиск научно обоснованного подхода к выбору наиболее эффективных технологий разработки месторождений. Использование прогрессивных методов увеличения нефтеотдачи позволяет увеличить мировые извлекаемые запасы нефти в 1,4 раза, то есть до 65 млрд. т.

Цели применения новых методов увеличения нефтеотдачи (МУН).

Объем геологических запасов нефти во всех известных месторождениях мира составляет более 500 млрд. т, из них свыше 300 млрд. т относятся к категории неизвлекаемых современными промышленно освоенными методами разработки. Остаточные запасы нефти на разрабатываемых месторождениях представляют собой большой резерв для увеличения извлекаемых ресурсов. Извлечение 10-15% нефти (30-40 млрд. т) из ее остаточных запасов возможно даже при использовании известных в настоящее время методов увеличения нефтеотдачи пластов. При длительной или интенсивной эксплуатации период легко извлекаемой нефти заканчивается. В настоящее время большинство крупнейших в мире разрабатываемых месторождений выходят на поздние стадии эксплуатации, а их остаточные запасы относят к трудноизвлекаемым.

Во всем мире с каждым годом возрастает интерес к разработке новых МУН пластов. Увеличивается число исследований, направленных на поиск научно обоснованного подхода к выбору наиболее эффективных технологий разработки месторождений. Увеличение коэффициента извлечения нефти (КИН) в глобальном масштабе всего на 1 % позволит увеличить годовой объем добываемой нефти в 3 раза. Результаты прогнозирования свидетельствуют, что при благоприятных условиях к 2020 г. извлекаемые только в России запасы за счет промышленного применения МУН могут быть приращены на 2-4 млрд. т с годовой дополнительной добычей в 30-60 млн. т.

История разработки методов увеличения нефтеотдачи.

Историю разработки и реализации методов увеличения нефтеотдачи пластов можно разделить на несколько этапов. Первый этап: с середины 60-х годов до середины 90-х годов XX века. На этом этапе перспективы внедрения МУН представлялись весьма оптимистичными. Основная концепция их применения в те годы заключалась в стремлении получить максимальный технологический эффект от их внедрения. Считалось, что высокие коэффициенты вытеснения нефти теплоносителями, химреагентами или различными газами, получаемые в лабораторных условиях на физических моделях, могут обеспечить хороший технологический эффект при внедрении этих методов на промыслах. Однако этот этап разработки МУН характеризуется большим количеством опытных работ с невысокой технико-экономической эффективностью. Лидером в области внедрения физико-химических МУН является США. Им принадлежит 176 проектов из 208. Особенностями развития работ на этом этапе являются: неполное понимание механизма происходящих процессов; недостаточная изученность геологии коллекторов; низкая надежность перевода лабораторных результатов в масштабы промысла (неточности в масштабировании); большое количество впервые испытываемых технологий; низкие цены на нефть в 70-х годах и к середине 90-х годов, а также отсутствие 3D-моделирования и экспериментов на моделях.

Второй этап разработки и внедрения МУН начался с середины 90-х годов и длится до настоящего времени. Он характеризуется небольшим количеством крупных проектов, имеющих коммерческое значение (7 % от всех проектов МУН), и значительным увеличением технологической эффективности. Лидером в области физико-химических МУН является Китай. Ему принадлежит 19 проектов из 27. Получила развитие поддержка со стороны государства (налоговые льготы и т.д.). Научно-исследовательские работы второго периода характеризуются: осмыслением ошибок прошлого и разработкой критериев выбора рациональных методов воздействия на пласт; внедрением надежных, оправдавших себя технологий, с проведением комплекса лабораторных исследований и математическим моделированием; закачкой больших объемов оторочек химреагентов (до 60 % порового объема на объекте воздействия); получением значительного технологического (КИН увеличился на 10-15 %) и экономического эффекта.

Число действующих проектов по новым технологиям увеличения нефтеотдачи пластов в этот период во всем мире возрастало. Меньше чем за 20 лет, с середины 60-х годов до 1985 г., число действующих проектов по новым технологиям нефтеотдачи возросло с 120-130 до 800 [2]. На сегодняшний день имеются результаты внедрения более 3 тыс. технологий добычи, методов и способов воздействия на пластины, направленных на интенсификацию добычи нефти и повышение коэффициента нефтеотдачи. Механизм их влияния базируется на физических, химических и др. воздействиях на коллекторы, содержащих нефть и газ, что, в свою очередь, улучшает условия притока пластовых флюидов в призабойную зону скважин. Их эффективность зависит от природных характеристик и условий разработки [3].

Росту активности внедрения МУН в какой-то мере способствовал рост цен на нефть. Вначале 80-х стало ясно, что реальные условия (неоднородность и температура пласта, его вещественный состав, тип остаточной нефтенасыщенности, степень минерализации вод, а также процессы, происходящие в пласте при взаимодействии с закачиваемыми рабочими агентами) существенно корректируют лабораторные результаты, что необходимо учитывать при внедрении новых МУН. Было признано, что технологии увеличения нефтеотдачи пластов – это сложные процессы, зачастую происходящие на макро- и микромолекулярном уровне. Падение цен на нефть в 1986 г. заставило многие компании изменить свое отношение к внедрению новых МУН. Прежде чем вкладывать средства в опытно-промышленные испытания, необходимо провести многочисленные лабораторные исследования применительно к конкретным реальным условиям месторождения, включая математическое моделирование, а также глубокие исследования фундаментальных основ вытеснения нефти из пласта различными рабочими агентами.

Следует подчеркнуть, что ситуация на мировом рынке отразилась не только на текущем состоянии дел в области внедрения МУН, но и на стратегии развития этих методов. Если раньше приоритетными считались процессы, доказавшие свою технологическую эффективность, то в условиях низких цен на нефть основные усилия необходимо направлять на повышение эффективности новых технологий и уменьшение удельных затрат. По мнению экспертов благоприятной минимальной ценой на нефть для начала внедрения этих процессов считается 20-23 дол./бар.

В этих условиях была проведена переоценка приоритетности технологий. В одних случаях дорогостоящие процессы, а также процессы длительные во времени были переориентированы на технологии, действующие не на весь пласт, а на ограниченную призабойную зону, которые могут дать быстрый результат. Были закрыты многие мелкие проекты. В других случаях проекты, реализуемые разными операторами на одном и том же месторождении, объединялись под руководством одного оператора, что позволяло высвободить и более эффективно использовать дорогостоящее оборудование.

Классификация методов увеличения нефтеотдачи. Теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными в различных странах в последние годы, установлено, что наиболее эффективные технологии разработки трудноизвлекаемых запасов нефти основываются на комбинации известных методов воздействия на нефтяные пласты. К ним относятся: физико-химические, тепловые, газовые, гидродинамические, микробиологические и др. На сегодняшний день существует множество различных классификаций МУН, начиная с «классики» – Сургучева М.Л., и заканчивая современными учеными. Все основные методы принято классифицировать следующим образом (табл. 1).

Коротко охарактеризуем эти методы.

Физико-химические методы обеспечивают увеличение коэффициентов вытеснения и охвата. Среди них выделяют две подгруппы: методы, улучшающие заводнение, которые основаны на снижении межфазного поверхностного натяжения и изменении

соотношения подвижностей фаз, они обеспечивают увеличение коэффициентов вытеснения и охвата; методы извлечения остаточной нефти из заводненных пластов, основанные на полной или частичной смесимости рабочих агентов с нефтью и водой.

Таблица 1
Классификация МУН

№ п/п	Группа методов	Методы
1	Физико-химические	Заводнение с применением ПАВ
		Полимерное заводнение
		Щелочное заводнение
		Мицеллярное заводнение
		Заводнение кислотами
2	Газовые	Закачка углеводородов
		Закачка дымовых газов
		Закачка двуокиси углерода
		Закачка азота
		Закачка жидких растворителей
3	Тепловые	Вытеснение нефти теплоносителями
		Воздействие с помощью внутрипластовых экзотермических окислительных реакций
4	Гидродинамические	Интегрированные технологии
		Вовлечение в разработку недренируемых запасов
		Нестационарное (циклическое) заводнение
		Форсированный отбор жидкости
5	Микробиологические	Введение в пласт бактериальной продукции
		Образование бактериальной продукции в пласте
6	Комбинированные «улучшенные»	Сочетание элементов групп 1-4 с современными техническими средствами и способами (горизонтальные скважины и др.)
		Уплотнение сетки скважин

Газовые методы. Нагнетание газа в нефтяные залежи для поддержания пластового давления (ППД) и повышения нефтеотдачи применяли значительно раньше, чем заводнение. Для этого использовали воздух, выхлопные или дымовые газы, углеводородный газ. При использовании сжиженных углеводородных газов, как и других жидких углеводородных растворителей, возникает новая и не менее трудная проблема извлече-

ния из недр заструвающего в порах пласта дорогого растворителя, цена которого значительно выше, чем нефти.

Вытеснение может быть как несмешивающимся, так и смешивающимся (без существования границы раздела фаз). Смесимость газа с нефтью в пластовых условиях при современных технических средствах достигается только в случае легких нефтей (плотность дегазированной нефти менее $800 \text{ кг}/\text{м}^3$) при давлении нагнетания сухого углеводородного газа около или более 25 МПа, обогащенного газа – 15-20 МПа (для сравнения сжиженного газа – 8-10 МПа). С улучшением смесимости повышается нефтеотдача.

Гидродинамические методы. Назначение гидродинамических методов – увеличение коэффициента охвата малопроницаемых нефтенасыщенных объемов пласта вытесняющей водой путем оптимизации режимов нагнетания и отбора жидкости при заданной сетке скважин и порядке их ввода в работу. Эти методы представляют собой дальнейшую оптимизацию технологии процесса заводнения, поэтому не требуют ее существенного изменения.

Тепловые методы. Сущность тепловых методов состоит в том, что наряду с гидродинамическим вытеснением повышается температура в залежи, что способствует существенному уменьшению вязкости нефти, увеличению ее подвижности, испарению легких фракций и др.

Объектами применения тепловых методов являются залежи высоковязкой смолистой нефти вплоть до битумов, залежи нефтей, обладающих неньютоновскими свойствами, а также залежи, пластовая температура которых равна или близка к температуре насыщения нефти парафином. Высокой вязкостью характеризуется относительно большая доля известных запасов нефти в мире, причем отмечается тенденция ее возрастания. Другие методы разработки и повышения нефтеотдачи для таких условий либо не применимы, либо не обеспечивают достаточной эффективности [1, 3].

Первые четыре группы методов широко распространены, поэтому детальнее рассмотрим менее изученные микробиологические и комбинированные методы.

Микробиологические методы. В настоящее время заметно возрос интерес к поиску путей и средств повышения вторичной добычи нефти и, в частности, к микробиологическим методам. Микробные технологии основаны на использовании физиологобиохимических особенностей микроорганизмов, вводимых в пласт (их способности расти в широком диапазоне температур, давления, солености, в аэробных и анаэробных условиях). Они в качестве источника питания используют нефть. Микробиологические методы повышения нефтеотдачи привлекают внимание, прежде всего, своей малой капиталоемкостью, высокой эффективностью и безопасностью для окружающей среды.

Принципиальная возможность использования микробиологического воздействия с целью увеличения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти, запатентованная С.Е. Zobell (1946 г.), в настоящее время подтверждена многими исследователями и результатами успешных промысловых экспериментов. Микробиологии, как науке, менее 100 лет, в то время способности микроорганизмов использовать углеводороды для сво-

ей жизнедеятельности рассматривались чисто из биологического любопытства. Большая часть исследований была проведена в лабораториях до 1940-х годов.

Все микробиологические методы воздействия на нефтяные пласты можно разделить на две основные группы. К первой относят технологии, в которых используются продукты жизнедеятельности микроорганизмов – метаболиты, полученные на поверхности земли в промышленных установках-ферментерах. Эти методы близки к химическим. Улучшение нефтеотесняющих свойств закачиваемой воды происходит в данном случае за счет таких соединений, как биоПАВ, биополимеры, эмульгаторы.

Вторая группа предусматривает развитие микробиологических процессов с целью получения метаболитов непосредственно в пласте. В этом случае образование нефтеотесняющих агентов в результате микробиологической деятельности бактерий происходит за счет дополнительного внесения в пласт микроорганизмов и питательных веществ – мелассы, молочной сыворотки и других отходов пищевой или химической промышленности. В свою очередь, вторая группа может быть подразделена на подгруппы в зависимости от вида биоценоза - пластового или введенного с поверхности.

В процессе использования микробиологического метода в результате биосинтеза непосредственно в пласте бактерии образуют такие метаболиты, как газы, кислоты, поверхностно-активные вещества, что способствует повышению нефтеотдачи пласта на 40%.

Бактерии способны производить из нефти кислоты и другие органические соединения, которые растворяют карбонаты, тем самым увеличивая проницаемость. Они также могут производить газы, которые увеличивают давление в пласте и снижают вязкость нефти, растворяясь в ней.

Микробиологические методы позволяет на 57,7% увеличить нефтеотдачу вовлекаемых в разработку запасов, в 1,5-2 раза увеличить дебит скважин, а текущую добычу нефти – на 15-25%. Технико-экономические расчеты, проводимые для уточнения эффективности метода, показывают, что даже на фоне постоянного роста цен на энергоносители окупаемость микробиологических методов не превышает 1,5-2 лет.

Микробиологические технологии используются во многих отраслях промышленности. На сегодняшний день широко известны следующие основные направления развития и применения микробиологических технологий в нефтяной промышленности: при разработке нефтяного месторождения для повышения нефтеотдачи пластов; стимуляция скважин; для очистки почвенного покрова земли и воды при разливах нефти; для очистки скважинного оборудования; для очистки отложений солей в скважинном оборудовании и трубопроводах.

Технология микробиологического воздействия на пласт основана на закачке биомассы микроорганизмов (сухого активного ила) в нагнетательные скважины на нефтяных месторождениях средней и поздней стадии разработки, где низка эффективность заводнения.

Механизм увеличения нефтеотдачи достигается, во-первых, селективной закупоркой высокопроницаемых промытых пропластков скоплениями микроорганизмов и

выделяемыми ими биополимерами, что повышает коэффициент охвата пласта заводнением.

Во-вторых, генерируемые микроорганизмами нефтевытесняющие продукты метаболизма (биогазы, биоПАВы) увеличивают подвижность остаточной нефти, повышая коэффициент вытеснения.

Технологический процесс реализуется закачкой микробиологического раствора, содержащего углеводородокисляющие бактерии (УОБ), источники кислорода, азота и фосфора таким образом, чтобы окончание закачки раствора совпало с окончанием цикла закачки воды, проводимого в соответствии с программой заводнения.

В пластовых условиях УОБ способны синтезировать органические растворители, такие как спирты и альдегиды, жирные кислоты поверхностно-активного действия и газы, увеличивающие подвижность нефти. Технология может применяться на участках, заводняемых как пресной, так и минерализованной водой. Она использует доступные реагенты отечественного производства и не требует сложного оборудования для реализации. За счет применения естественных непатогенных микроорганизмов и полностью утилизируемых в природе реагентов эта технология безопасна для окружающей среды и человека.

Микробиологическое воздействие является третичным методом повышения нефтеотдачи пластов, проводимым для создания оторочки с целью увеличения коэффициентов охвата и вытеснения.

Разработку заводненных пластов более эффективно начали вести с применением маслорастворимых ПАВ.

При закачке водной дисперсии маслорастворимых ПАВ в пласте на фронте вытеснения формируется микроэмulsionная оторочка с низким содержанием нефти, хорошей нефтевытесняющей способностью и вязкостью, близкой к вязкости нефти, что увеличивает коэффициент вытеснения и охват пласта заводнением.

Биотехнологические способы повышения нефтеотдачи пластов позволяют усовершенствовать существующие ныне и применяемые на практике микробиологические способы. Они дают возможность использования в нефтегазовом производстве других перспективных видов живых организмов и продуктов их жизнедеятельности [4].

Комбинированные методы. По мере развития технологий реализации новых МУН введено понятие «улучшенные методы повышения нефтеотдачи». Эти методы, которые иногда также называют четвертичными, предполагают комбинирование элементов перечисленных выше четырех групп МУН, а также таких перспективных технических средств повышения нефтеотдачи, как горизонтальные скважины. Следует подчеркнуть, что применение горизонтальных скважин для повышения эффективности МУН связывают, главным образом, с решением таких стратегических задач как организация вертикального воздействия, повышение эффективности гравитационного режима разработки, выработка не вовлеченных в разработку запасов нефти. При этом применение горизонтальных скважин нельзя использовать в качестве самостоятельного метода повышения нефтеотдачи.

К улучшенным методам увеличения нефтеотдачи пластов относится также уплотнение сетки скважин. В этой связи под термином «улучшенные МУН» подразумевается применение всех прогрессивных технологий и средств повышения охвата процессом вытеснения нефти, в том числе оптимизация сеток размещения скважин и системы воздействия для вовлечения в разработку недренируемых и слабодренируемых запасов, нестационарное воздействие и перемена направлений фильтрационных потоков, выравнивание профиля вытеснения, барьерное заводнение и др.

Заключение. Таким образом, предложена уточненная классификация методов увеличения нефтеизвлечения, более детально рассмотрены микробиологические и комбинированные МУН и доказана перспективность их применения.

LITERATURE

1. **Surguchev M.L.** Secondary and tertiary methods of EOR / ML Surguchev. – Moscow: Nedra, 1985 . – 308 p.
2. **Volchenko D.A.** Foreign experience of EOR / DA Volchenko // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Oil and gas energy – 2013 ." – Ivano-Frankivsk (Ukraine). – 2013 . pp – 26-28.
3. **Halimov E.M.** Innovative technology development of oil field development / E.M. Halimov // Petroleum Geology. Theory and practice . – St. Petersburg, 2008 . – № 2 . – pp. 82-89 .
4. **Kabdushev A.A. Karabaeva A.** Application of microbiological methods to increase oil recovery, 2013.

DÜNYADA LAYLARIN NEFTVERMƏ QABİLİYYƏTİNİN ARTIRMA ÜSULLARININ TƏTBİQİ: TƏCRÜBƏ VƏ PERSPEKTİVLƏR (1-ci hissə)

D.A. VOLÇENKO

Məqalənin birinci hissəsində layların neftvermə qabiliyyətinin artırılmasının mövcud üsulları, onların effektivliyi, həmçinin neftçixarmanın artması üsullarının hazırlanma tarixi baxılıb və onların təsnifatı göstərilib.

THE INTERNATIONAL APPLICATION OF EOR METHODS: EXPERIENCE AND PROSPECTS (Part I)

D.A. VOLCHENKO

The first part of paper reviews the existing methods of enhanced oil recovery (EOR) methods, their effectiveness, as well as their history and classifications.

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРЕКАЧКИ СМЕСИ МАЗУТ-НЕФТЬ

В.Х. НУРУЛЛАЕВ, Ф.С. ГАХРАМАНОВ, С.Т. АЛИЕВ

В данной статье авторами рассмотрены возможности регулирования технологического режима перекачки смеси мазут-нефть. На основе экспериментальных исследований смеси установлено оптимальное соотношение мазута с нефтью, которое получается при его добавлении до 20%. Также выявлено, что технологический режим перекачки следует регулировать с учетом температуры смещивания и экспериментальных результатов вязкости смеси мазут-нефть.

Ключевые слова: *мазут, трубопроводный транспорт, вязкость, смесь, температура застывания.*

В настоящее время увеличиваются объемы потребления мазута в различных отраслях промышленности, и если раньше мазут использовался как сырье установок термического крекинга, то на сегодняшний день он применяется также в качестве сырья установок гидрокрекинга и каталитического крекинга. Перерабатывается большое количество мазута, и в результате переработки получаются дистиллятные смазочные материалы и моторные топлива. Несмотря на то, что мазут применяется во многих отраслях, основными его потребителями являются предприятия промышленности, а также жилищно-коммунальные хозяйства. В связи с этим большую актуальность приобретают вопросы транспортировки мазута.

Наиболее отработанные технологии транспортировки мазута – это его перевозки железнодорожным, водным и автомобильным транспортом, но из-за увеличения объема производства и потребления мазута возможности интенсивного развития этих видов транспорта оказались в основном исчерпанными. В конце 80-х начал развиваться трубопроводный транспорт мазута. Трубопроводный транспорт мазутов является более перспективным и экономически выгодным, так как здесь исключаются вспомогательные операции, сокращается объем работ в наиболее напряженных транспортных узлах и становится возможной непрерывная подача топлива непосредственно к потребителю. При трубопроводном транспорте мазута необходимо учитывать специфику мазута, а она определяется его особым химическим составом, структурно-механическими свойствами,

повышенной вязкостью, высокой температурой застывания, аномальной кривой течения [1].

Основным источником сырья для добычи мазута является нефть. От исходного состава нефти в большой степени зависят физико-химические свойства мазута – вязкость, плотность, теплота сгорания, а также процентное содержание в нем серы и золы [2]. Химический состав мазута довольно сложен: помимо углеводородов в него входят нефтяные смолы и ряд органических соединений, содержащих различные металлы – никель, марганец, железо и др. Ориентировочная вязкость мазута определяется при температуре 50°C и в дальнейшем отображается в цифрах, которыми обозначают ту или иную марку – Ф5, М40 и т.д. Наиболее популярная марка мазута М100, который относят к классу топочных мазутов. Мазут М100 характеризуется низким содержанием серы и золы, однако за счет высокой вязкости имеет довольно высокую температуру застывания. Добавляя в мазут М100 дизельное топливо, можно получить мазут М40 с пониженной температурой застывания. Предварительное подогревание непосредственно в топке снижает вязкость мазута и улучшает процесс его сжигания [3]. Мазут М100 является одним из наиболее распространенных видов топлива, используемого в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве, так как стоимость данной марки мазута сравнительно невысока. Обычно в летний период объемы потребления мазута несколько снижаются, однако в целом мазут М100 не относится к сезонным видам топлива – он является вос требованным в любое время года.

Рассмотрим основной физико-химический показатель мазута – вязкость. Вязкостью определяются:

- распыление топлива (полнота его сгорания);
- условия слива и налива при транспортировке;
- схема топливных систем у приобретателя, обогрев, перекачка, гидравлические сопротивления при транспортировке, эффективность работы форсунок.

От вязкости в значительной мере зависят скорость осаждения механических примесей при хранении, а также способность топлива отстаиваться от воды. В США для определения вязкости используют вискозиметр Сейболта универсальный для маловязких мазутов и Сейболта-Фурола для высоковязких мазутов, а в Британии – вискозиметр Редвуда. Между определенными в различных единицах значениями вязкости существует зависимость. В ряде спецификаций указывают вязкость, найденную экспериментально и пересчитанную в кинематическую. В практике трубопроводного транспорта мазута часто используют вязкостно-температурные кривые, так как изменение гидравлического режима мазутопровода в условиях колебания температуры подогрева связано с изменением вязкости транспортируемого мазута вследствие неустановившегося теплообмена [4]. Как правило, изменение давления при транспортировке также связано с изменением температуры через вязкостно-температурную зависимость. Изменения температуры мазута влияют на скорость и режим течения по трубопроводу, а тем самым меняют условия работы насосной станции. Поскольку линейная часть трубопровода и насосные

станции являются единой целой гидравлической системой, то всякие изменения в каждом из ее элементов отражаются в определенной мере на работе других.

Однако неустановившийся процесс в мазутопроводах имеет две отчетливо выраженные стадии, на первой из которых изменение давления и скорости велики, а температура остается практически постоянной, а на второй – гидравлические режимы квазистационарны, а температура может изменяться значительно. Причем если переходный процесс вызван изменением теплового состояния трубопровода, например, в результате изменения температуры подогрева, то очевидно, что первая стадия отсутствует. Оценка интенсивности изменения давления и скорости на первой стадии важна из-за опасности разрывов трубопровода вследствие гидравлического удара, такая оценка необходима для определения параметров систем автоматизации насосных станций, а также средств защиты мазутопроводов от гидравлических ударов.

А целенаправленное изменение температуры мазута в свою очередь позволяет регулировать загрузку трубопровода, варьировать режим работы насосных станций для обеспечения заданного графика поставок мазута и минимального расхода энергоресурсов. С другой стороны, при запланированных изменениях или аварийных нарушениях режима работы основного технологического оборудования важно знать масштабы и особенности изменения температуры и давления для оценки опасности возникновения аварийной ситуации и выбора эффективных способов управления работой трубопровода в таких условиях.

С повышением температуры различие в вязкости топлив существенно уменьшается. Для мазутов, как и для всех темных нефтепродуктов, зависимость вязкости от температуры приближенно описывается уравнением Вальтера:

$$\lg \lg (v \cdot 10^6 + 0,8) = A - B \cdot \lg T$$

где v – кинематическая вязкость, $\text{мм}^2/\text{с}$; A и B – коэффициенты; T – абсолютная температура, К.

Вязкость не является аддитивным свойством, и при смешивании различных котельных топлив ее следует определять экспериментально. Анализ кривых течения мазута показывает, что при температуре выше $40-50$ $^{\circ}\text{C}$ мазут ведет себя как ньютоновская жидкость, а при более низкой температуре отмечаются характерные для псевдопластичных жидкостей особенности. Степень отклонения от ньютоновских свойств у разных мазутов различная, но при температуре выше $30-40$ $^{\circ}\text{C}$ в целом остается небольшой. В области температур менее $30-40$ $^{\circ}\text{C}$ течение мазута совпадает с течением линейно- и нелинейно-вязкопластичных жидкостей [5]. Во время транспортировки мазута в трубопроводе могут возникнуть аварийные ситуации, что, в свою очередь, может привести к серьезным проблемам.

Отмеченные особенности мазута как транспортируемой среды определяют не только экономическую целесообразность, но и техническую возможность его транспортировки по технологическим и местным трубопроводам вместе с маловязкой нефтью.

Исходя из этого, технология перекачки мазута с маловязкой нефтью, в своей основе совпадающая с технологией перекачки маловязкой нефти, обеспечит снижение энергии перекачки до целесообразного уровня и исключит многие осложнения, связанные с перекачкой мазута. В результате смещивания мазута с маловязкой нефтью улучшается его основной физико-химический показатель – вязкость, которую при помощи лабораторных измерений можно с большой точностью выявить, оценив её зависимость от определяющих факторов (рис.).

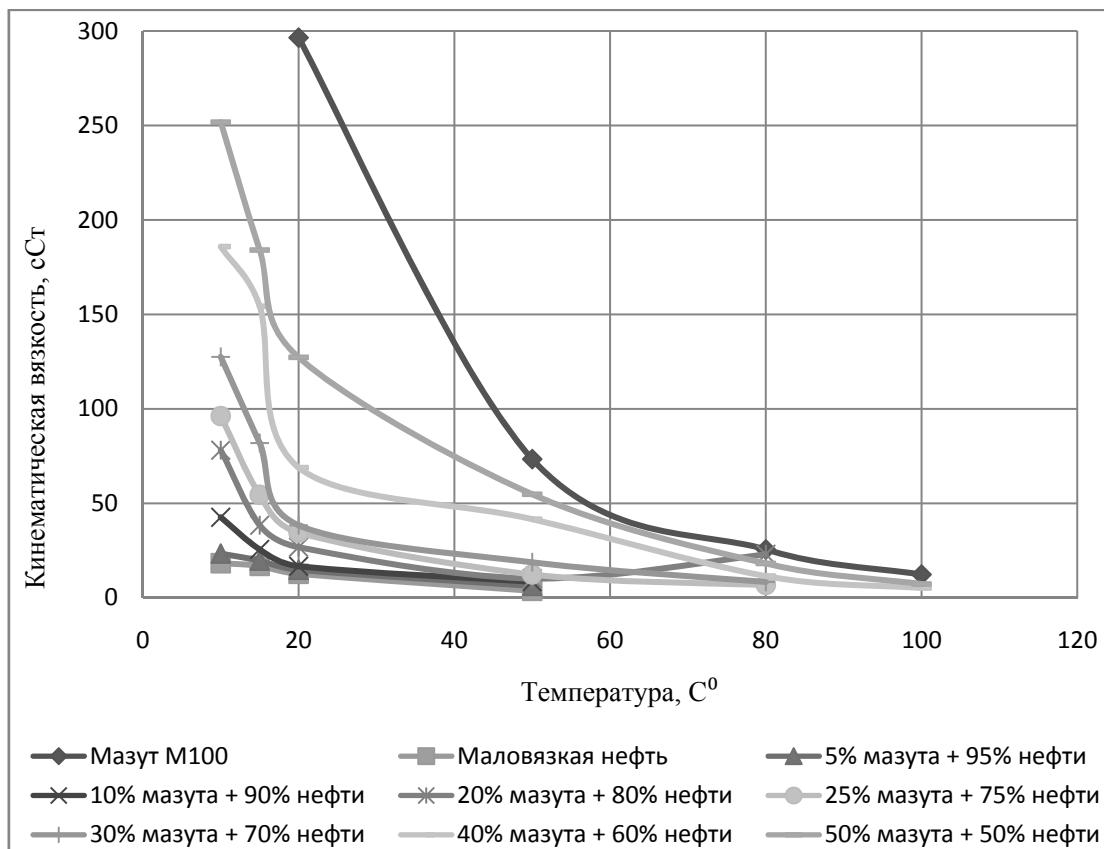


Рис. Зависимость изменения кинематической вязкости от температуры для различных смесей.

С целью изучения влияния процентной доли мазута на кинематическую вязкость смеси были проведены лабораторные исследования. Результаты экспериментального исследования показаны в таблице. Экспериментальные исследования разных процентов компаунда маловязкой нефти с мазутом проводились при разных температурах в течение 30 минут на приборе Ультра-Туррах Т25. Процентная доля добавляемого мазута менялась в интервале 5, 10, 20, 25, 30, 40 и 50 %.

Таблица.
Результаты экспериментального исследования смеси маловязкой нефти с мазутом при разных температурах

Наименование показателя	ГОСТ 10585-99 Значение для марки М-100	Фактический показатель мазута М-100	Процентная доля мазута в смеси									Метод испытания
			Маловязк. нефть	5%	10%	20%	25%	30%	40%	50%		
Кинематическая вязкость при 10 °C, сСт	-	-	18,3	23,4	42,6	78,1	96,2	127,5	185,9	251,8		Метод Вальтера ГОСТ 33
Кинематическая вязкость при 15 °C, сСт	-	-	16,9	19,7	25,6	38,4	54,5	81,9	154,3	184,1		Метод Вальтера ГОСТ 33
Кинематическая вязкость при 20 °C, сСт	-	296,5	12,7	14,8	16,7	26,8	34,5	38,4	68,9	127,3		Метод Вальтера ГОСТ 33
Кинематическая вязкость при 50 °C, сСт	-	73,41	3,7	6,3	8,5	10,2	12,3	18,8	41,6	54,8		ГОСТ 33
Кинематическая вязкость при 80 °C, сСт	-	25,6	-	--	-	2,3	6,8	8,4	11,5	18,2		ГОСТ 33
Кинематическая вязкость при 100 °C, сСт	50	12,3	-	-	-	-	-	-	5,2	7,3		ГОСТ 33
Плотность при 20 °C кг/м ³	Не нормируется	921,3	856,7	860,2	863,2	870,1	872,4	875,6	881,4	887,9		ГОСТ 3900

Из графика видно, что после смещивания маловязкой нефти с мазутом изменяется кинематическая вязкость. Несмотря на изменение вязкости, оптимальное соотношение мазута с нефтью получается при его добавлении до 20%. При соотношении мазута с нефтью в интервале 20-50% наблюдается уменьшение вязкости. При прерывистом режиме перекачки возникают технические проблемы.

На основании этих факторов вязкость смеси мазута с нефтью не подчиняется правилу аддитивности, поэтому технологический режим перекачки надо регулировать с учетом температуры смещивания и экспериментальных результатов вязкости смеси мазут-нефть.

LITERATURE

1. **Agapkin V.M.** Pipeline transportation fuel. – Moscow: Nedra, 1986. – 140 p.
2. **Glagoleva O.F. Kapustina V.M., Chernysheva E.A.** Refining technology. Part I. - Khimiya, Colossus, 2005. - 400 p.
3. GOST 10585-99. Interstate standard. Fuel oil. Oil. Specifications.
4. **Kasymov T.M.** Determination of the viscosity of crude oil and petroleum products at a temperature of frosting. - INTER Proceedings, 1996, Vol. 43.
5. **Nurullayev V.H., Ismailov G.G., Guliyev V.K., Aliyev S.T.** On the possibility of reducing environmental risks during transportation fuel. - Proceedings of the international scientific conference "Problems of Ecology and Security life activities" - Atyrau, 2012. - pp. 243-252

NEFT-MAZUT QARIŞIQLARININ NƏQLİ ZAMANI TEXNOLOJİ REJİMİN TƏNZİMLƏNMƏSİNİN MÜMKÜNLÜYÜ BARƏDƏ

V.X. NURULLAYEV, F.S. QƏHRƏMANOV, S.T. ƏLİYEV

Məqalədə müəlliflər tərəfindən neft-mazut qarışıklarının nəqli zamanı texnoloji rejimin tənzimlənməsinin mümkünluğunə baxılmışdır. Laboratoriya tədqiqatları əsasında nəql zamanı neftlə mazutun optimal nisbəti kimi, qarışıqda sonuncunun kütlə payının 20%-ə qədər olması təyin edilmişdir. Həmçinin müəyyən edilmişdir ki, nəql zamanı texnoloji rejimi mazut-neft qarışığının temperatur və özlülüğünün eksperimental nəticələrinə əsaslanaraq tənzimləmək lazımdır.

THE TECHNOLOGICAL REGIMES MANAGEMENT OF THE MASUT-OIL PUMPING

V.X. NURULLAYEV, F.S. QAHRAMANOV, S.T. ALIYEV

Authors review the possibilities of technological regimes management of masut-oil pumping. The optimum proportion of masut to oil mixture is establishedon the basis of experimental data,which is attained at the level up to 20%. It is shown that a technological regime of pumping should include themixing temperature as a necessary factor of mixing and experimental results of the mixture viscosity.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОСУШКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ТРАНСПОРТУ

А.Н. ГУРБАНОВ

Разработана модель образования гидратов при течении в каналах сырого газа, основанная на уравнениях гидродинамики и теплообмена в осесимметричной постановке. Учет двумерных эффектов образования гидратов позволяет уточнить начало образования гидратов в трубопроводах.

Разработана методика оценки выпадения конденсированной фазы при движении природного газа, использующая результаты совместного численного решения уравнений для газовой и конденсированной фаз в двумерной постановке. Расчет траекторий частиц в технологической аппаратуре указывает на возможность либо абразивного износа деталей, находящихся в потоке, либо интенсивного налипания и накопления конденсированной фазы.

Ключевые слова: *трубопроводы, жидкость, блоки АВО,
гидратообразование, математическая модель.*

На газовых промыслах организуется комплексная подготовка газа к дальнему транспорту, в схеме которой основную роль играют массообменные аппараты. Усилия специалистов направлены на разработку технических решений, позволяющих интенсифицировать процесс массообмена, увеличить производительность и уменьшить унос абсорбента из аппаратов.

Образование газовых гидратов обусловлено термобарическими условиями в трубопроводах и аппаратах, наличием свободной капельной влаги, образованием центров кристаллизации. Разработка современных технологических процессов переработки природного углеводородного сырья и оптимальная эксплуатация действующих производств невозможна без применения моделирующих программ, позволяющих без значительных материальных и временных затрат производить исследования этих процессов [1]. Настоящая статья посвящена разработке и научному обоснованию математических моделей термогазодинамических процессов современных технологий подготовки природного газа в промысловых условиях, обеспечивающих товарные показатели газа при эксплуатации действующих производств.

Для поставленной цели надо решить и оценить эффективность работы массооб-

менных аппаратов для осушки газа и разработать рекомендации по режимам эксплуатации модернизированных абсорбера с регулярной пластинчатой насадкой, а также разработать численную модель образования гидратов в аппаратах и трубопроводах.

Для обеспечения высоких показателей по производительности и эффективности применяемые для заполнения массообменных аппаратов насадки должны удовлетворять следующим требованиям: иметь большую удельную поверхность; иметь большой свободный объем; иметь малое гидравлическое сопротивление; обладать хорошей смачиваемостью; элементы насадки должны иметь каналы для прохода газа в определенном направлении от штуцера входа к штуцеру выхода; конструкция насадок должна обеспечивать равномерное распределение потоков газа и жидкости по поперечному сечению аппарата, поэтому слои насадки должны быть однородными, исключая движение жидкости вдоль корпуса аппарата; конструкция насадки должна обеспечивать высокую кратность обновления поверхности контакта фаз [2]; насадка должна обеспечивать минимальный унос жидкости с газом, т.е. быть одновременно сепаратором; обеспечивать работоспособность при широком изменении расходов газа и жидкости, в том числе при малых массовых соотношениях жидкости и газа.

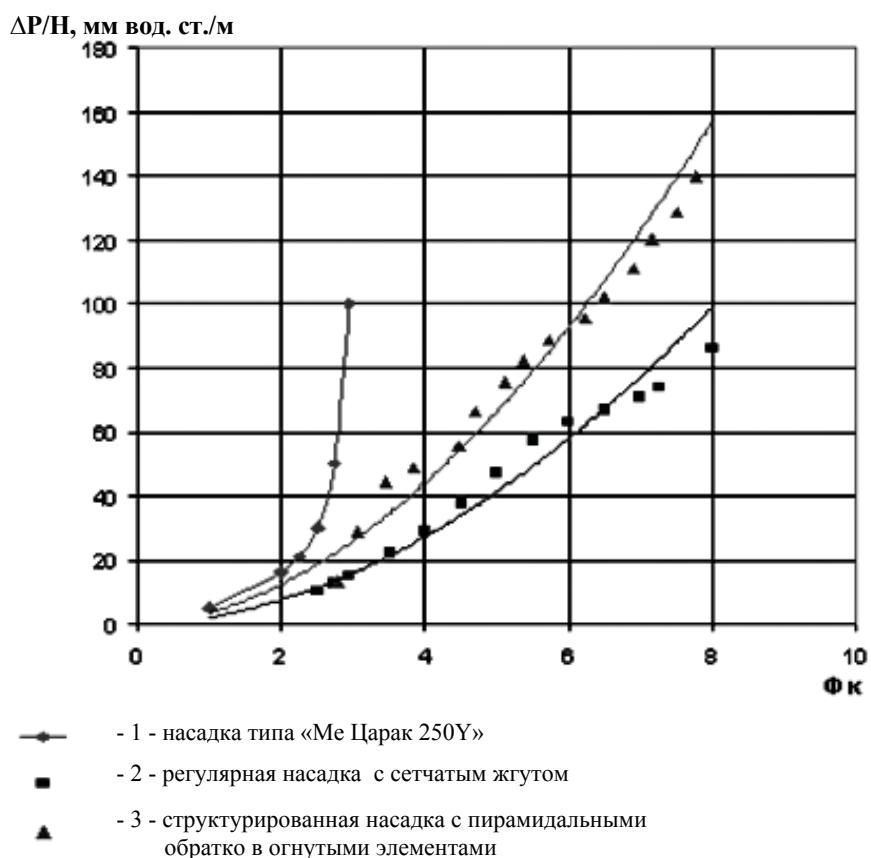


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления x насадок высотой 1 м от фактора скорости в аппаратах осушки

Кроме того, насадка должна иметь малую объемную плотность и обладать высокой коррозионной стойкостью и достаточной механической прочностью.

Для интенсификации процесса массопередачи следует использовать турбулизацию газового потока. Это достигается применением гофрированных и рифленых листов. Интенсификация массоопередачи достигается турбулизацией пленки жидкости, стекающей вниз по насадке, кратностью обновления фаз, особенно при наличии двух несмешивающихся жидкостей, например, абсорбента и углеводородов [3]. При малых плотностях орошения движение пленки жидкости происходит в ламинарном, волновом режиме, а газ движется в турбулентном режиме. В этом случае большой эффект достигается турбулизацией, которая разрушает пристеночный пограничный слой жидкой пленки и способствует осаждению капель жидкости.

Основные факторы интенсификации технологических процессов, влияющие на конструкцию насадок и связанные с гидродинамикой двухфазных потоков в аппарате:

- равномерное распределение потоков по поперечному сечению аппарата;
- интенсивное взаимодействие фаз на уровне элементарного объема аппарата, обеспечивающее непрерывное обновление поверхности контакта фаз;
- исключение байпасного движения потоков – возвратного движения стекающей жидкости, уноса жидкости с потоком газа и прохождения его без контакта с жидкостью в элементарном объеме слоя и на поверхности насадки.

Разработка регулярных насадок позволила отказаться от строительства дополнительных технологических линий, сократить эксплуатационные затраты при обслуживании оборудования, повысить в целом технико-экономические показатели производства.

На основании анализа экспериментальных данных, установлено, что вышеуказанные контактные устройства имеют широкий диапазон устойчивой работы, обеспечивают минимальное гидравлическое сопротивление. Ни на одном из режимов работы насадок не был достигнут эффект. При снижении нагрузки по жидкости регулярные насадки работали стablyно, слив жидкости с насадок равномерный [4].

Технические решения позволили увеличить нагрузки на абсорбера осушки по газу в полтора раза, снизить в несколько раз гидравлические потери, обрабатывать газ с повышенным влагосодержанием и при этом снизить точку росы газа по влаге до нормативных значений с доведением фактических потерь абсорбента в капельном виде до $1 \text{ мг}/\text{м}^3$ вместо проектных $15-20 \text{ мг}/\text{м}^3$ газа, исключить необходимость ввода дополнительных мощностей для подготовки газа на месторождениях, находящихся на поздней стадии эксплуатации, увеличить коэффициенты массопередачи в 1,5-2 раза, снизить энергозатраты в массообменной секции во столько раз, во сколько снижено соотношение перепада давлений массообменной секции колонн до и после модернизации.

Практическое отсутствие выноса абсорбента на фильтрующую секцию модернизированных абсорберов с регулярными насадками в массообменной секции и газораспределительной насадкой дает возможность увеличить срок службы фильтр-патронов, а

в перспективе даст возможность отказа от выходной сепарационной секции, что позволит при проектировании нового оборудования значительно снизить высоту абсорбера или увеличить высоту массообменной части аппарата с обеспечением требований по качеству газа при снижении технологического давления в компрессорный период эксплуатации для осушки газа с повышенной температурой.

Низкое гидравлическое сопротивление и высокая эффективность структурированных насадок позволяет использовать их как при высоких давлениях в абсорберах, так и при пониженных, в том числе в вакуумных аппаратах в десорберах системы регенерации гликоля.

Технические решения с применением насадочных устройств позволяют не только создать технологическое оборудование, обеспечивающее показатели работы на уровне мировых стандартов, но и произвести модернизацию существующих аппаратов для работы на завершающей стадии эксплуатации месторождений при пониженных давлениях, высоких температурах проведения процесса осушки и повышенном начальном влагосодержании газа без ввода дополнительного технологического оборудования.

На газовых и газоконденсатных месторождениях нашли широкое применение АВО. Блоки АВО состоят из 10-16 аппаратов. В каждом аппарате имеются три продольных теплообменных секций с шестью рядами горизонтальных оребренных труб. В каждом ряду тридцать (двадцать девять) труб, расположенных в шахматном порядке. Поток холодного воздуха снизу вверх через эти шесть рядов создается двумя вентиляторами, установленными на фундаменте под трубчатыми секциями.

АВО в безгидратном режиме работы удовлетворительно охлаждают осушенный природный газ, а также сырой газ при положительных температурах окружающего воздуха. Однако в зимних условиях в процессе охлаждения сырого газа после первой ступени возникает ряд проблем. В нижнем ряду труб, в результате локального переохлаждения газа, возникают условия для гидратообразования; на внутренней стенке теплообменных труб образуются гидраты, лед, и отдельные трубы разрушаются.

Для предотвращения процессов гидратообразования при охлаждении сырого газа в трубах АВО на практике приходится поддерживать достаточно высокую среднюю температуру газа на выходе из аппаратов, иногда до 18-20 °С, тем самым ограничивая не только потенциальные возможности АВО, но и снижая качество газа, подготовляемого к транспортировке. Особенно остро стоит вопрос качества подготовки газа по показателю «температура точки росы по влаге» в условиях падающего пластового давления.

Основной целью АВО, охлаждающего сырой газ, является получение минимальной температуры газа, подаваемого на осушку при подготовке его к дальнему транспорту. Эта температура не должна быть ниже температуры гидратообразования сырого газа внутри наиболее охлаждаемых теплообменных труб при стационарном режиме охлаждения, и она может быть ниже температуры гидратообразования при нестационарном охлаждении, при применении предварительной осушки и подачи ингибитора гидратообразования в трубы нижних рядов.

Необходимым условием образования кристаллогидратов является присутствие в газе конденсированной влаги. Влагосодержание газа определяется отношением массового количества влаги, содержащейся во влажном газе, к массовому количеству сухого газа. В случае превышения точки росы газа в газопроводе формируются условия образования кристаллических гидратов. При транспортировке в холодных условиях предпосылки для образования гидратов прежде всего появляются на стенке трубы, где и происходит отложение конденсированных частиц. Поэтому целесообразно рассмотреть многомерную структуру течения сырого газа, влияющую на процесс отложения гидратов на стенках.

Математическая модель основана на стационарных уравнениях вязкого течения, записанных в осесимметричной постановке.

$$\begin{aligned}
 & (y\rho u)_x + (y\rho v)_y = 0, \\
 & (y\rho uu)_x + (y\rho uv)_y = -yp_x + (y\mu u_x)_x + (y\mu u_y)_y + y(\mu_x u_x + \mu_y v_x), \\
 & (y\rho uv)_x + (y\rho vv)_y = -yp_y + (y\mu v_x)_x + (y\mu v_y)_y + y\left(\mu_x u_y + \mu_y v_y - \mu \frac{v}{y^2}\right), \\
 & (yuT)_x + (yvT)_y = \left(y \frac{\mu}{\sigma_T} T_x\right)_x + \left(y \frac{\mu}{\sigma_T} T_y\right)_y, \\
 & (yuw)_x + (yvw)_y = \left(y \frac{\mu}{\sigma_w} w_x\right)_x + \left(y \frac{\mu}{\sigma_w} w_y\right)_y + J_w, \\
 & (yug)_x + (yvg)_y = \left(y \frac{\mu}{\sigma_g} g_x\right)_x + \left(y \frac{\mu}{\sigma_g} g_y\right)_y + J_g, \\
 & (yuK)_x + (yvK)_y = \left(y \frac{\mu}{\sigma_K} K_x\right)_x + \left(y \frac{\mu}{\sigma_K} K_y\right)_y + y\rho(B - \varepsilon), \\
 & (yue)_x + (yv\varepsilon)_y = \left(y \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_x\right)_x + \left(y \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_y\right)_y + \rho\varepsilon \frac{c_1 B - c_2 \varepsilon}{K},
 \end{aligned}$$

где ρ – плотность газа; P – давление; u, v – составляющие вектора скорости на оси x, y ; μ – коэффициент динамической вязкости; T – температура газа; w, g – содержание влаги и гидратов в потоке; $\sigma_T, \sigma_w, \sigma_g$ – числа Прандтля и Шмидта; R_C – газовая постоянная смеси продуктов сгорания. Плотность ρ определяется из уравнения состояния $\rho = p/(R_C T)$.

Система уравнений движения рассматривается совместно с уравнениями переноса кинетической энергии K и скорости диссипации ε . Коэффициент вязкости μ определяется суммой $\mu = \mu_m + \mu_t$, где μ_m, μ_t – коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости, B, c_1, c_2, c_μ – эмпирические коэффициенты, $\mu_t = c_\mu \rho K^2 / \varepsilon$.

Массовая скорость перехода воды в гидраты и скорость образования гидратов задается источниками членами J_w, J_g . Возможность образования гидратов (при содержании в газе свободной воды, то есть при условии, что температура газа меньше температуры точки росы T_r и больше температуры фазового перехода T_f) увеличивается с повышением давления и понижением температуры газа. Массовая скорость образования гидратов принимается пропорциональной разности температуры газа и температуры начала гидратообразования T_g .

$$J_w = \begin{cases} -A_w w \frac{T_g - T}{T_g - T_f}, \\ 0 \quad | \quad T < T_g, T < T_r, T > T_f, \end{cases}$$

$$J_g = \begin{cases} A_g w \frac{T_g - T}{T_g - T_f}, \\ 0 \quad | \quad T < T_g, T < T_r, T > T_f. \end{cases}$$

Границные условия.

На входе в трубу при $x = 0$ заданы начальные параметры потока $u^0 = G/(\pi R^2), v^0 = 0, T^0, w^0, g^0 = 0, K^0, \epsilon^0$. На стенке трубы при $y = R$: для u, v, K, ϵ условия прилипания; для температуры

$$\lambda \frac{\partial T(x, R)}{\partial y} = \alpha_0 (T_0 - T(x, R)); \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \frac{\partial g}{\partial y} = m_g.$$

При $m_g < 0$ происходит отложение гидратов на стенку трубы. На выходной границе $x = L$ заданы «мягкие» условия, соответствующие равенству нулю вторых производных для всех переменных.

Система уравнений решается численным методом Патанкара. Распределение содержания гидратов в газе по сечению и по длине трубы, полученное расчетом, показано на рис. 2.

Рассматривается участок трубы при давлении на входе 0,5 МПа. Характерной особенностью течения является существование условий для образования гидратов в пристенной области даже в начальном участке трубы. С увеличением расстояния зона образования гидратов расширяется и распространяется на все поперечное сечение трубы. Влажность газа снижается по мере связывания воды гидратами. Неоднородное распределение содержания гидратов по сечению трубы, полученное по результатам двухмерных газодинамических расчетов, существенно влияет на характер отложений гидратов на стенках трубы. В первую очередь гидраты образуются в непосредственной близи-

сти от стенки. Низкая скорость движения газа в ламинарном подслое и высокое содержание гидратов в газе способствуют налипанию гидратов на стенку.

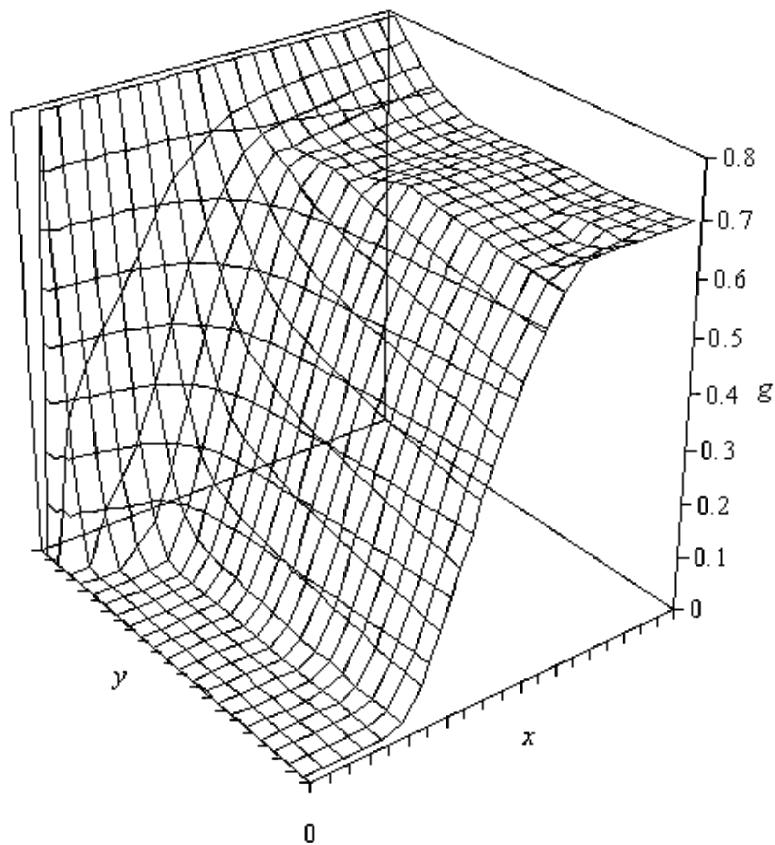


Рис.2. Рассчитанное распределение содержания гидратов

Заключение. Разработана модель образования гидратов при течении в каналах сырого газа, основанная на уравнениях гидродинамики и теплообмена в осесимметричной постановке. Учет двумерных эффектов образования гидратов позволяет уточнить начало образования гидратов в трубопроводах.

Разработана методика оценки выпадения конденсированной фазы при движении природного газа, использующая результаты совместного численного решения уравнений для газовой и конденсированной фаз в двумерной постановке. Расчет траекторий частиц в технологической аппаратуре указывает на возможность либо абразивного износа деталей, находящихся в потоке, либо интенсивного налипания и накопления конденсированной фазы.

В технологическом плане выявлены следующие перспективные решения для предупреждения гидратообразования в аппаратах воздушного охлаждения: подача абсорбента в нижний ряд теплообменных трубок секции и рециркуляция его через АВО,

распределение расхода газа с увеличением от верхнего к нижнему ряду при сохранении среднего расхода по секции.

LITERATURE

1. **Denisov S.V., Laryuhin A.I.** Application of the mathematical theory of intelligent systems for simulation of gas dehydration process technology. // Bulletin of the Moscow Academy of the labor market and information technologies. 2006. № 22. pp. 88-95 .
2. **Gurbanov A.N. Isgenderov E.H.** The study of phase transformations in pipelines for transportation of gas produced from fields Guneshli and Chyrag on land. - Moskow: Petroleum Engineering, № 1, 2011, pp.31- 36.
3. **Gurbanov A.N.** Improving the technology of collecting and transporting nizkona the locking gas between deepwater offshore platforms. - Moskow: Petroleum Engineering, № 12, 2011, pp. 39-42
4. **Kerimov M.Z.** Oil and gas pipelines. - Moscow: Nauka, 2002. – 256 p.

TƏBİİ QAZIN NƏQLƏ HAZIRLANMASI ZAMANI QAZIN QURUDULMASININ RİYAZİ MODELİNİN İŞLƏNMƏSİ

Ə.N. QURBANOV

Qazın nəqli zamanı çətin xəttlərdən keçdiyi vaxtı hidrodinamiki və istilik mübadiləsi üsulu ilə hidratbirləşmə modeli işlənmişdir. Bu modelə əsasən qaz kəmərlərində hidratbirləşməsinin ilkin yaranmasını təyin etmək mümkündür.

Kondensat fazasının ayrılması üsulu işlənmiş, texnoloji aparatlarda hissəciklərin hərəkəti hesablanmış və nəticədə təyin edilmişdir ki, kondensat fazasının intensiv işlənməsi avadanlığın sıradan çıxmasına şərait yaradır.

WORKING OUT OF MATHEMATICAL MODELS DRYING NATURAL GAZ BY PREPARATION FOR TRANSPORT

A.N. GURBANOV

The hydrates formation model is developed inside of the crude gas channels, it is based on the hydrodynamics and heat exchange equations in the axes symmetry conditions. The account of two-dimensional effects of the hydrates formation allows specifying the initial point of the hydrates formation in pipelines.

The technique is developed to estimate the deposition of the condensed phase at the natural gas movement, using the results of the joint numerical solution of equations for the gas and condensed phases in two-dimensional statement. The calculation of particle trajectories in the technological equipment shows the possibility of either the abrasive wear of the details that are in a stream, or the intensive sticking and accumulation of the condensed phase.

РАСЧЕТ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДОКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Э.Э. ГАСАНОВ

Доковые конструкции, широко применяющиеся в гидротехническом строительстве, подвержены различным внешним нагрузкам и воздействиям. В настоящей статье произведен расчет термонапряженного состояния стенки и днища доковой камеры судоходного шлюза.

Ключевые слова: *доковые конструкции, днища, грунтовая среда, температурное воздействие, прогиб, угол поворота.*

Введение. Конструкции докового типа широко применяются в одно- и многокамерных отстойниках периодического действия, гасительных устройствах поверхностных и донных водосбросов, перепадах, быстротоках, а также в судопропускных сооружениях, входящих в состав искусственных водных путей [1]. Камеры судоходных шлюзов и судоподъемников чаще всего выполняются докового типа. Доковые конструкции камер судоходных шлюзов отличаются между собой по форме боковых стен, днища и обратных засыпок. По типу стен различают откосные и вертикальные доковые конструкции камер судопропускных шлюзов. Откосные стены в основном применяют в малонапорных гидроузлах. Широкое распространение получили камеры с вертикальными стенами, иногда с небольшим уклоном ($\frac{1}{50} \dots \frac{1}{100}$). По типу днищ применяют два основных вида камер: со сплошными, практически водонепроницаемыми железобетонными днищами и с водопроницаемыми днищами.

Постановка задачи. При проектировании судопропускных сооружений, элементы камер докового типа рассчитываются на наиболее невыгодное сочетание действующих нагрузок. К таким нагрузкам относятся также нагрузки от температурного воздействия, создающие дополнительные деформации и усилия в статически неопределеных системах. В настоящей работе рассматриваются статические контактные задачи, связанные с термонапряженным состоянием стен и днища камер судоходных шлюзов.

Решение задачи. Ниже произведем расчет термонапряженного состояния элементов доковых конструкций гидротехнических сооружений.

Доковая камера шлюза со сплошным днищем представляет собой статически не-определенную систему. Изменение температурного режима в случаях опорожненной камеры, и особенно нагрев наружных поверхностей стен и днища, вызывает в этих конструкциях дополнительные перемещения и усилия. В связи с этим при оценке напряженно-деформируемого состояния элементов доковой конструкции наряду с основными нагрузками и воздействиями должно учитываться влияние температурного фактора. Для рассматриваемой расчетной схемы влияние температурного воздействия можно учитывать, исходя из принципа суперпозиции, то есть принципа независимости действия различных факторов.

Рассмотрим влияние положительного температурного воздействия на стены и днища доковых камер судоходных шлюзов. Для решения поставленной задачи будем исходить из известного положения о свободных температурных перемещениях стен и днища, рекомендованных в работах [2, 3] для различных расчетных схем.

При рассмотрении термонапряженного состояния стен доковой камеры шлюзов возможны следующие расчетные схемы (рис. 1 а,б,в) :

1. Стена характеризуется постоянной по всей высоте толщиной и постоянным температурным перепадом, а нижний конец стены абсолютно жестко заделан в фундаментную плиту днища, т.е.:

$$\begin{cases} b(x) = b_0 = \text{const} \\ t(x) = t = t_{\eta} - t_m = \text{const} \\ \varphi_3 = 0; y_3 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

2. Стенка имеет переменную по высоте толщину и характеризуется постоянным расчетным температурным перепадом, а нижний конец стенки абсолютно жестко или упруго заделан к фундаментной плите днища:

$$\begin{cases} b(x) = b_0 + \frac{(b_c - b_0)x}{h_c} = b_0 + ax \\ t(x) = t = t_{\eta} - t_m = \text{const} \\ \varphi_3 = \varphi \neq 0; y_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

3. В более общем случае изменение температурного перепада и толщины стенки по высоте принимается по линейному закону:

$$\begin{cases} b(x) = b_0 + \frac{(b_c - b_0)x}{h_c} = b_0 + ax \\ t(x) = t_0 + \frac{t_c - t_0}{h_c}x = t_0 + \varepsilon_t x \\ \varphi_3 = 0; y_3 = 0 \text{ или } \varphi_3 = \varphi \neq 0; y_3 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

4. При рассмотрении термонапряженного состояния днища последнее представляется в виде шарнирно опертой плиты (балки), постоянной по длине поперечным сечением. Расчетное значение температурного воздействия также принимается постоянным по длине днища:

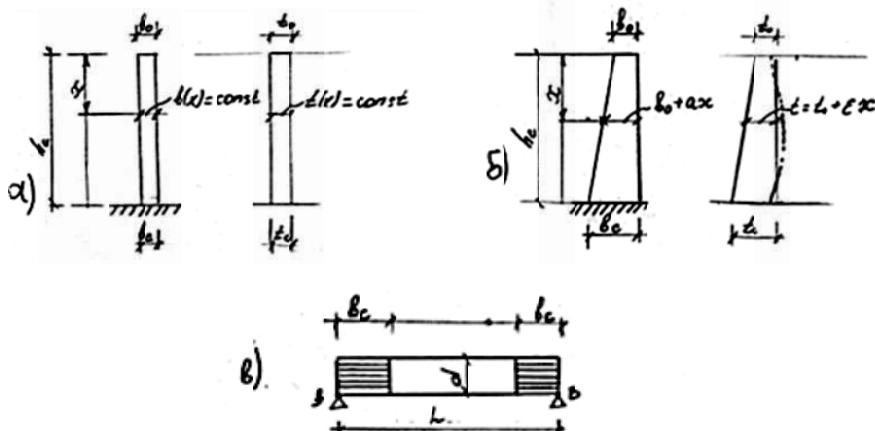


Рис. 1. Расчетная схема температурного воздействия на днище и стены доковой камеры

$$\begin{cases} d(y) = d = \text{const} \\ t(y) = t = t_n - t_m = \text{const} \\ |\varphi_A| = |\varphi_B| = \varphi = \text{const}; y_A = y_B = 0 \end{cases} \quad (4)$$

В приведенных выражениях (1)-(4):

t - расчетное значение температурного перепада;

t_n, t_m - соответственно расчетные значения температуры на лицевых и тыловых гранях элемента;

φ_3 и y_3 - значения угла поворота и перемещения сечения заделки;

b_0 и b_c - толщина верхнего и нижнего концов стенки;

h_c и d - соответственно высота стенки и толщина плиты днища;

φ_A и φ_B - угол поворота опорных сечений днища;

ε_t - коэффициент изменения расчетного воздействия температуры по длине консоли.

Вначале рассмотрим задачу об определении деформаций и усилий от температурного воздействия для стенки при соблюдении условий (1). Согласно (1) в рассматриваемом случае свободные температурные перемещения консольной стены определяются формулой:

$$y_{cs} = \frac{\alpha_t t}{2b_0} (h_0 - x)^2 , \quad (5)$$

где α_t - коэффициент линейного расширения бетона, принимаемый равным $(0.75-1.1)10^{-5}$ 1/град.

В результате перемещения стены в сторону обратной засыпки возникает реактивное сопротивление грунта, которое направлено против возможных горизонтальных смещений. Под действием реактивного отпора грунта стенка камеры перемещается противоположно свободным температурным перемещениям. Поэтому действительный про-

гиб или перемещения стены в любом сечении при наличии реактивного отпора грунта должны удовлетворять равенству:

$$y_c(x) = y_{c\theta}(x) - y_{ep}(x) \quad (6)$$

где, $y_c(x)$ и $y_{ep}(x)$ соответственно действительные перемещения стенки и перемещения стенки от реакции грунта засыпки. Исходя из модели Фусса-Винклера, интенсивность реактивного отпора грунта засыпки выражается зависимостью:

$$P_{ep}(x) = -K(x)y_{ep}(x) \quad (7)$$

где $K(x)$ – коэффициент жесткости грунта засыпки, принимаемый линейно-нарастающим по глубине.

$$K(x) = \frac{K_{hc}}{h_c} x \quad (8)$$

Здесь K_{hc} – значение коэффициента жесткости грунта на уровне заделки стены и днища в направлении горизонтальных смещений.

С учетом (7) и (8) имеем:

$$P_{ep}(x) = \frac{K_{hc}}{h_c} xy_{ep}(x) \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение изгиба стены согласно (9) имеет вид:

$$EIy_{ep}^{1V}(x) = -\frac{K_{hc}}{h_c} xy_{ep}(x)$$

Или:

$$y_{ep}^{1V}(x) = -axy_{ep}(x) \quad (10)$$

$$\text{где } a = \frac{K_{hc}}{h_c EI}; [M^{-5}] \quad (11)$$

Принимая во внимание (6), уравнение (10) можно представить в виде:

$$[y_{c\theta}(x) - y_c(x)]^{1V} = -ax[y_{c\theta}(x) - y_c(x)]$$

откуда имеем:

$$y_c^{1V}(x) = ax \left[\frac{\alpha_t t}{2b_c} (h_c^2 - 2h_c x + x^2) - y_c(x) \right] = \frac{\alpha_t t}{2b_c} (h_c^2 - 2h_c x + x^2) - ax y_c(x)$$

Обозначив

$$\beta = \frac{\alpha_t t}{2b_c} a; [M^{-6}] \quad (12)$$

окончательно получим:

$$y_c^{1V}(x) = \beta(h_c^2 - 2h_c x + x^2) - ax y_c(x) \quad (13)$$

Уравнение (13) рассматривается при следующих граничных условиях для верхнего конца стенки:

$$y_c(0) = y_c^0; \quad y_c'(0) = -\theta_c^0; \quad y_c''(0) = 0; \quad y_c'''(0) = 0 \quad (14)$$

Здесь y_c^0 и θ_c^0 – действительные значения прогиба и угла поворота начального сечения стенки от температурного воздействия с учетом влияния реактивного отпора грунта.

Произведя четырехкратное интегрирование уравнения (13) с учетом граничных условий (14), сводим задачу к следующему интегральному уравнению:

$$y_c(x) = y_c^0 - \theta_c^0 x + \beta h_c^2 \frac{x^5}{5!} - 4\beta h_c \frac{x^6}{6!} + 6\beta h_c \frac{x^7}{7!} - a \int_0^x \int_0^x \int_0^x x y_c(x) dx \quad (15)$$

Общее решение уравнения (15) может быть построено лишь приближенными способами. Наиболее эффективный для этой цели – способ последовательных приближений по Пикару [4]. При этом в качестве нулевого приближения к искомой функции $y_c(x)$ примем так называемую краевую функцию

$$y_{kp}(x) = y_c^0 - \theta_c^0 x + \beta h_c^2 \frac{x^5}{5!} - 4\beta h_c \frac{x^6}{6!} + 6\beta h_c \frac{x^7}{7!} \quad (16)$$

Последовательные приближения строятся следующим образом:

$$y_{c,0}(x) = y_{kp}(x);$$

$$y_{c1.}(x) = y_{kp}(x) - a \int_0^x \int_0^x \int_0^x \int_0^x xy_{kp}(x) dx^4;$$

$$y_{c2.}(x) = y_{kp}(x) - a \int_0^x \int_0^x \int_0^x \int_0^x xy_{c,1.}(x) dx^4;$$

$$y_{cn.}(x) = y_{kp}(x) - a \int_0^x \int_0^x \int_0^x \int_0^x xy_{c,n.}(x) dx^4$$

и т.д.

При неограниченном построении последовательности этих функций:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [y_{c,n.}(x) - y_{c,n-1.}(x)] \rightarrow 0$$

и очевидно, что предельная функция $y_{cn.}(x)$ будет являться решением уравнения (15).

Таким образом, можно получить:

$$y_{cn.}(x) = \left(y_c^0 - \beta \frac{h_c^2}{a} \right) F_1(x) - \theta_c^0 F_2(x) - 4\beta h_c F_3(x) + 6\beta F_4(x) \quad (17)$$

где основные функции решения $F_1(x), F_2(x), F_3(x), F_4(x)$ определяются следующими быстросходящими рядами:

$$\begin{cases} F_1(x) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{a^n x^{5n}}{(5n)!} [1 \cdot 6 \cdot 11 \cdot \dots \cdot (5n-4)] \\ F_2(x) = x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{a^n x^{5n+1}}{(5n+1)!} [2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \dots \cdot (5n+3)] \\ F_3(x) = \frac{x^6}{6!} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{a^n x^{5n+6}}{(5n+6)!} [7 \cdot 12 \cdot 17 \cdot \dots \cdot (5n+2)] \\ F_4(x) = \frac{x^7}{7!} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{a^n x^{5n+7}}{(5n+7)!} [8 \cdot 13 \cdot 18 \cdot \dots \cdot (5n+3)] \end{cases} \quad (18)$$

При выполнении практических расчетов с достаточной точностью можно ограничиться первыми двумя или тремя членами разложений бесконечных рядов в выражении функции $F_1(x)$.

Согласно общему решению (17), для определения значений угла поворотов, изгибающих моментов и перерезывающих сил в произвольных сечениях стены от расчетного температурного воздействия можно получить формулы

$$\theta_c(x) = \left(y_c^0 - \beta \frac{h_c^2}{a} \right) F'_1(x) - \theta_c^0 F'_2(x) - 4\beta h_c F'_3(x) + 6\beta F'_4(x) \quad (19)$$

$$\frac{M_c(x)}{EI} = \left(y_c^0 - \beta \frac{h_c^2}{a} \right) F_1''(x) - \theta_c^0 F_2''(x) - 4\beta h_c F_3''(x) + 6\beta F_4''(x) \quad (20)$$

$$\frac{Q_c(x)}{EI} = \left(y_c^0 - \beta \frac{h_c^2}{a} \right) F_1'''(x) - \theta_c^0 F_2'''(x) - 4\beta h_c F_3'''(x) + 6\beta F_4'''(x) \quad (21)$$

В расчетных формулах (17), (19), (20), (21) параметры y_c^0 и θ_c^0 являются неизвестными. Для их определения можно воспользоваться условиями для нижнего конца стенки (сечение жесткой заделки), т.е.:

$$y_c(h_c) = 0; \theta_c(h_c) = 0$$

или

$$\begin{cases} \left(y_c^0 - \beta \frac{h_c^2}{a} \right) F_1(h_c) - \theta_c^0 F_2(h_c) = 4\beta h_c F_3(h_c) - 6\beta F_4(h_c) \\ \left(y_c^0 - \beta \frac{h_c^2}{a} \right) F_1'(h_c) - \theta_c^0 F_2'(h_c) = 4\beta h_c F_3'(h_c) - 6\beta F_4'(h_c) \end{cases} \quad (22)$$

Решая эту систему относительно y_c^0 и θ_c^0 , находим:

$$y_c^0 = \frac{\beta h_c^2}{a} + \frac{A_1 F_2'(h_c) - A_2 F_2(h_c)}{F_1(h_c) F_2'(h_c) - F_1'(h_c) F_2(h_c)} \quad (23)$$

$$\theta_c^0 = \frac{A_1 F_1'(h_c) - A_2 F_1(h_c)}{F_1(h_c) F_2'(h_c) - F_1'(h_c) F_2(h_c)} \quad (24)$$

где

$$\begin{cases} A_1 = 4\beta h_c F_3(h_c) - 6\beta F_4(h_c) \\ A_2 = 4\beta h_c F_3'(h_c) - 6\beta F_4'(h_c) \end{cases} \quad (25)$$

Определив значения действительных прогибов стены по формуле (17), можно вычислить перемещение только от реактивного отпора грунта

$$y_{ep}(x) = y_{c6}(x) - y_c(x) \quad (26)$$

и построить эпюры дополнительного реактивного давления грунта засыпки от температурного воздействия.

Рассмотрим более общий случай. Пусть стена камеры переменного сечения жестко заделана к плите днища. Расчетное значение температурного перепада изменяется по высоте по линейному закону. В этом случае имеем:

$$\begin{cases} b(x) = b_0 + ax \\ t(x) = t_0 + \varepsilon_t x \end{cases} \quad (27)$$

$$\text{где } a \frac{b_e - b_0}{h_c}; \varepsilon_t = \frac{t_e - t_0}{h_c} \quad (28)$$

Свободные температурные перемещения такой стенки определяются выражением:

$$y_{c6}(x) = \frac{\alpha_t(a t_0 - \varepsilon_t b_0)}{a^3} \left[-(b_0 + ax) \ln \frac{b_{hc}}{b_0 + ax} + (h_0 - x)a \right] + \frac{\alpha + \varepsilon_t}{2a} (h_0 - x)^2 \quad (29)$$

Для интегрирования выражения (29) воспользуемся удобной функцией:

$$y_{c6}(x) = A_0 - A_1 x + A_2 x^2; \quad (30)$$

$$\text{где } \begin{cases} A_0 = \frac{\varepsilon_t \alpha_t}{2a} h_c^2 + \frac{\alpha_t(a t_0)}{a^3} \left(a h_c - b_0 \ln \frac{b_{hc}}{b_0} \right) \\ A_1 = \frac{\varepsilon_t \alpha_t}{a} h_c - \frac{\alpha_t(a t_0 - \varepsilon_t b_0)}{a^2} \ln \frac{b_{hc}}{b_0} \\ A_2 = \frac{1}{2} \frac{\alpha + \varepsilon_t}{b_0} \end{cases} \quad (31)$$

Изменение жесткости стены по высоте примем по экспериментальному закону:

$$B(x) = B_0 e^{kx} \quad (32)$$

где $B_0 = \frac{Eb_0^3}{12}$ - жесткость начального сечения;

$K = \frac{1}{h_c} \ln \frac{B_h}{B_0}$ - коэффициент, характеризующий изменение жесткости стены по глубине;

$B_h = \frac{Eb_h^3}{12}$ - жесткость стены в сечении заделки;

Е- модуль упругости бетона.

С учетом изменения жесткости по (32) для определения перемещений стены от реактивного отпора грунта $y_{ep}(x)$, аналогично предыдущему случаю можно получить уравнение:

$$y_c^{1V}(x) = -a_0 x e^{kx} y_{ep}(x) - 2K y_{ep}'''(x) - K^2 y_{ep}''(x) \quad (33)$$

Принимая во внимание выражение (7), будем иметь:

$$y_c^{1V}(x) = -a_0 x e^{kx} [(A_0 - A_1 x + A_2 x^2) - y_c(x)] - K[2y_c'''(x) - Ky_c''(x)] + 2k^2 A_2 \quad (34)$$

Границными условиями уравнения (34) при $X=0$ являются:

$$y_c(0) = y_c^0; \quad y_c'(0) = -\theta_c^0; \quad y_c''(0) = \frac{M_0}{B_0} = 0; \quad y_c'''(0) = \frac{Q_0}{B_0} = 0 \quad (35)$$

Построив решение уравнения (34) с учетом (35) в степенных рядах, приближенное выражение упругой линии стенки можно представить в виде:

$$\begin{aligned} y_c(x) = & y_c^0 \left[1 - a_0 \frac{x^5}{5!} + 4a_0 K \frac{x^6}{6!} \right] - \theta_c^0 \left[x - 2a_0 \frac{x^6}{6!} \right] + \\ & + \left[2K^2 A_2 \frac{x^4}{4!} + (a_0 A_0 - 4K^3 A_3) \frac{x^5}{5!} + (10K^4 A_2 - 2A_1 a_0 - 4a_0 K A_0) \frac{x^6}{6!} \right] + \dots \end{aligned} \quad (36)$$

Неизвестные начальные параметры y_c^0 и θ_c^0 в (36) определяются из условия работы нижнего конца стенки:

$$\begin{cases} y_c^0 \left(1 - a_0 \frac{h_c^5}{5!} + 4a_0 K \frac{h_c^6}{6!} \right) - \theta_c^0 \left(h_c - 2a_0 \frac{h_c^6}{6!} \right) + [2K^2 A_2 \frac{h_c^4}{4!} + \\ + (a_0 A_0 - 4K^3 A_3) \frac{h_c^5}{5!} + (10K^4 A_2 - 2A_1 a_0 - 4a_0 K A_0) \frac{h_c^6}{6!}] = 0; \\ Y_c^0 \left(-5a_0 \frac{h_c^4}{4!} + 24a_0 K \frac{h_c^5}{5!} \right) - \theta_c^0 \left(1 - 12a_0 \frac{h_c^5}{5!} \right) + [8K^2 A_2 \frac{h_c^3}{3!} + \\ + 5(a_0 A_0 - 4K^3 A_3) \frac{h_c^4}{4!} + 6(10K^4 A_2 - 2A_1 a_0 - 4a_0 K A_0) \frac{h_c^5}{5!}] = 0 \end{cases}$$

Решая эту систему относительно неизвестных параметров y_c^0 и θ_c^0 , можно найти их значения. Таким образом, и в этом рассматриваемом случае легко решается вопрос об определении деформации и усилий в сечениях стенки доковой камеры от температурного воздействия с учетом переменности изгибной жесткости.

Перейдем к рассмотрению термонапряженного состояния днища доковых камер шлюзов.

В случае опорожненной камеры изменение температуры воздуха существенно влияет на напряженно-деформированное состояние днища. Согласно [2] для шарнирно опертой плиты днища постоянного сечения с жесткими участками у опор при одинаковом по длине (L) значении расчетного воздействия температуры (t), свободный прогиб в середине пролета (y_c) и угол поворота опорного сечения (φ) определяются выражениями:

$$y_c = \frac{\alpha_t t}{8d} (L^2 - 4b_{hc}^2); \quad (37)$$

$$\varphi = \frac{\alpha_t t}{2d} (L - 2b_{hc}) \quad (38)$$

где α_t - коэффициент линейного температурного расширения бетона,

d - постоянная по длине толщина днища;

b_{hc} - толщина стены в заделке консоли или длине бесконечно жестких участков днища в пределах заделки консолей. Исходя из формул (37) и (38) и используя возможные для данной схемы граничные условия, свободные температурные прогибы днища в их произвольных сечениях достаточно хорошо аппроксимируются функцией:

$$y_{\partial h,cv}(x) = \varphi(x) + \left(\frac{16}{L^2} Y_c - \frac{5\varphi}{L}\right) x^2 + \frac{8}{L^2} \left(\varphi - \frac{4y}{L}\right) x^3 + \frac{4}{L^3} \left(\frac{4y}{L} - \varphi\right) x^4 \quad (39)$$

Свободные температурные перемещения точек тыловой поверхности днища вызывают реактивное сопротивление грунта основания. Очевидно, что под действием реактивного отпора грунта поперечные смещения (прогибы) днища будут направлены обратно свободным температурным перемещениям. Поэтому прогибы днища в их произвольных сечениях должны удовлетворять условию:

$$y_{\partial h}(x) = y_{\partial h,cv}(x) - y_{\partial h,ep}(x). \quad (40)$$

где $y_{\partial h,ep}(x)$ – прогибы днища от реактивного отпора грунта основания.

Согласно модели Фусса-Винклера, интенсивность реактивного отпора грунта основания выражается зависимостью:

$$P_{ep}(x) = -Ky_{\partial h,ep}(x) \quad (41)$$

где K - погонный коэффициент жесткости грунта основания.

Значения коэффициента жесткости для вида грунта определяются методами, приведенными в работе [3].

С учетом (41) уравнение изгиба днища имеет вид:

$$y_{\partial h,ep}^{1V}(x) = -ay_{\partial h,ep}(x) \quad (42)$$

Здесь $a = \frac{K}{EI}; [M^{-4}]$

Принимая во внимание выражение (42) для определения действительных прогибов днища, получим уравнение:

$$y_{\partial h}^{1V}(x) = (A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3) - ay_{\partial h}(x) \quad (43)$$

Где

$$A_0 = \frac{9a}{L^3} \left(\frac{4y_c}{L} - \varphi \right); A_1 = a\varphi; A_2 = \frac{a}{L} \left(\frac{16y_c}{L} - 5\varphi \right); A_3 = \frac{8a}{L^2} \left(\varphi - \frac{4y_c}{L} \right); \\ A_4 = \frac{4a}{L^3} \left(\frac{4y_c}{L} - \varphi \right) \quad (44)$$

Уравнение (43) рассматривается при следующих граничных условиях для левого конца днища:

$$y_{\partial H}(0) = 0; y'_{\partial H}(0) = \varphi_0; y''_{\partial H}(0) = 0; y'''_{\partial H}(0) = \frac{Q_0}{EI} = \overline{Q}_0 \quad (45)$$

Здесь φ_0 и Q_0 - соответственно угол поворота левого опорного сечения, перерезывающая сила в этом сечении.

Построив решение уравнения (43) в степенных рядах с использованием граничных условий (45), будем иметь:

$$y_{\partial H}(x) = \varphi_0 F_1 + \overline{Q}_0 F_2 + A_0 F_3(x) + A_4 F_4(x) + 2A_2 F_5(x) + 6A_3 F_6(x) + 24A_4 F_7(x) \quad (46)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1(x) = x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a^n \frac{x^{4n+1}}{(4n+1)!} \\ F_2(x) = \frac{x^3}{3!} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a^n \frac{x^{4n+3}}{(4n+3)!} \\ F_3(x) = \frac{x^4}{4!} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a^n \frac{x^{4n+4}}{(4n+4)!} \\ F_4(x) = \frac{x^5}{5!} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a^n \frac{x^{4n+5}}{(4n+5)!} \\ F_5(x) = \frac{x^6}{6!} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a^n \frac{x^{4n+6}}{(4n+6)!} \\ F_6(x) = \frac{x^7}{7!} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a^n \frac{x^{4n+7}}{(4n+7)!} \end{array} \right. \quad (47)$$

Значения неизвестных начальных параметров φ_0 и Q_0 определяются из условий:

$$y_{\partial H}(L) = 0; y''_{\partial H}(L) = 0$$

При этом имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_0 F_1(L) + \overline{Q}_0 F_2(L) + \psi(L) = 0 \\ \varphi_0 F_1''(L) + \overline{Q}_0 F_2''(L) + \psi''(L) = 0 \end{array} \right. \quad (48)$$

где

$$\psi(L) = A_0 F_3(L) + A_1 F_4(L) + 2A_2 F_5(L) + 6A_3 F_6(L) + 24A_4 F_7(L);$$

$$\psi''(L) = A_0 F_3''(L) + A_1 F_4''(L) + 2A_2 F_5''(L) + 6A_3 F_6''(L) + 24A_4 F_7''(L) \quad (49)$$

Решая систему (48), находим:

$$\varphi_0 = \frac{\psi''(L)F_2(L) - \psi(L)F_2''(L)}{F_1(L)F_2''(L) - F_2(L)F_1''(L)}$$

$$Q_0 = EI \frac{\psi(L)F_1''(L) - \psi''(L)F_1(L)}{F_1(L)F_2''(L) - F_2(L)F_1''(L)}$$

Поскольку основные функции решения (46) представлены в виде быстросходящихся рядов, то для практической точности расчетов можно ограничиться первыми двумя или тремя членами их разложений. Согласно решению (45), значения угла поворотов, изгибающих моментов и перерезывающих сил в произвольных сечениях днища в зависимости от температурного воздействия будут определяться выражениями:

$$\begin{cases} \theta_{\partial h}(x) = \varphi_0 F'_1(x) + \overline{Q}_0 F'_2(x) + \psi'(x); \\ \frac{M_{\partial h}(x)}{EI} = \varphi_0 F''_1(x) + \overline{Q}_0 F''_2(x) + \psi''(x); \\ \frac{Q_{\partial h}(x)}{EI} = \varphi_0 F'''_1(x) + \overline{Q}_0 F'''_2(x) + \psi'''(x) \end{cases} \quad (50)$$

Таким образом, предложенный метод позволяет произвести полный деформационный расчет температурных воздействий на днища доковых конструкций гидротехнических сооружений.

Заключение. В статье, исходя из модели Фусса-Винклера, характеризуемой переменным коэффициентом жесткости грунта, рассматриваются статические контактные задачи термонапряженного состояния боковых стен и днищ доковых конструкций камер судоходных шлюзов. В расчетах определены значения деформации и усилий в произвольных сечениях стен и днища от температурного воздействия. В связи с этим при оценке напряженно-деформируемого состояния элементов доковой камеры гидротехнических сооружений следует учитывать влияние факторов температурного воздействия.

LITERATURE

1. **Mikhailov A.V.** Navigation locks. - Moscow: Transport, 1966. – 528 p.
2. SNIP II-55-79. Retaining walls, navigation locks, and fish-fish protection structures. - Moscow, 1980. - 41 p.
3. **Klepikov S.N.** Calculation of structures on elastic foundation. - Kiev: "Budevilnik", 1967. – 184 p.
4. **Bronstein I.N., Semendeev K.A.** Handbook of mathematics for engineers and university students. - Moscow: Nauka, 1964. - 608 p.

HİDROTEXNİKİ QURĞULARDA DOK TIPLİ KONSTRUKSİYASININ TERMOGƏRGİNLİK HALİNİN HESABLANMASI

E.E. HƏSƏNOV

Hidrotexniki qurğularda tətbiq olunan dok tipli konstruksiyaların müxtəlif yüklər və təsirlərə məruz qalır, o cümlədən də temperaturdan yaranan təsirlərə. Bu səbəbdən konstruksiyaların gərginlik deformasiya məsələlərinə baxılan zaman temperaturdan yaranan təsirlərdə nəzərə alınmalıdır.

THERMAL STRESS CALCULATIONS OF THE DOCK DESIGN ELEMENTS IN HYDRAULIC STRUCTURES

E.E. HASANOV

Dock structures that are widely used in hydraulic engineering are subject to various external pressures and influences. In this paper the thermal stress is calculated for the wall and the bottom of the docking chamber ship lock.

AZƏRBAYCANIN KÖHNƏ NEFT YATAQLARINDA LAYLARA SUVRUMANIN BƏZİ EKOLOJİ NƏTİCƏLƏRİ HAQQINDA

F.T. MÜRVƏTOV, F.M. MƏMMƏDOV, N.T. MƏMMƏDOV

Məqalədə köhnə neft yataqlarında laylara suvrma prosesinin yaratdığı bəzi ekoloji risklərə baxılmış, prosesə alternativ olaraq, enerji və vəsaitə maksimum qənaət edən, iqtisadi, texnoloji və həm də ekoloji cəhətdən daha proqressiv üsullardan istifadə olunması tövsiyyə olunur.

Açar sözlər: suvrma, ekoloji risklər, sulaşma, korroziya.

Hazırkı dövr möhtəşəm ixtiralar, kəşflər, elm və texnikanın yüksək həddə çatdığı era kimi tarixə düşsə də, bu elmi texniki tərəqqi, kəşflər atmosfer və Yer kürəsində misilsiz fəlakətlər törətmüşdir. Bu gün XXI əsr insanına miras qalan atmosferin ozon qatının dağıılması, iqlimin get-gedə istiləşməsi, səhralaşma prosesinin genişlənməsi, biomüxtəlifliyin artması, ən əsası isə müxtəlif xəstəliklərin yaranması kimi bəlaların qarşısının alınması naminə Dünyanın ən məşhur ekoloqları, təbiət biliciləri qədəm qoyduğumuz əsrə dair proqnozlar verir, bəşəriyyətin ekoloji fəlakətdən xilası naminə bir araya gəlir, gələcəyin konturlarını müəyyənləşdirməyə çalışırlar. Bu tendensiyada böyük neft ölkəsi kimi ekoloji aşınma ilə daha çox üzləşən Azərbaycan Respublikası da iştirak edir.

Ekoloji mühiti çırkləndirən texnogen mənbələr içərisində neft sənayesi xüsusi yer tutur.

Məsələnin goyuluşu

Azərbaycanın neft yataqlarında layların neft veriminin artırılması məqsədilə bir çox üsullar təklif olunmuş və işlənmə prosesində tətbiq edilmişdir. Uzun müddət bu texnologiyalardan ən səmərəlisi laylara suvrma hesab olunmuşdur. Proses geoloji-fiziki, mədən-istismar və hidrodinamiki xüsusiyyətləri ilə bir-birindən fərqlənən obyektlərdə, müxtəlif mərhələlərdə və cürbəcür texnoloji sistemlərdə (konturarxası, konturyanı, konturdaxili, kombinasiya edilmiş və s.) tətbiq olunmuşdur. Lakin, bu çox mürəkkəb bir məsələdir, böyük risk, qeyri müəyyənliliklə və nəticələri məlum olmamaqla çoxlu kapital qoyuluşu ilə həyata keçirilir.

Eyni zamanda bütün üstünlüklerinə baxmayaraq, suvrma artıq çətin çıxarıla bilən neft ehtiyatlarının işlənməsində, yüksək dərəcədə sulaşmış, enerjisi tükənmiş obyektlərdə və s.

layların neft verimini təmin edə bilmir. Əksər hallarda geoloji və ətraf mühitə mənfi təsir göstərir, təhlükəli ekoloji risklərlə müşayiət olunur.

Qeyd etmək lazımdır ki, aparılmış təhlil və elmi-tədqiqat işləri nəticəsində laylara su ilə təsiretmənin səmərəliliyi sözügedən yataqlarda bu və ya digər dərəcədə qiymətləndirilsə də, ekoloji aspektlərinə lazımı səviyyədə baxılmamışdır. Ona görə də su ilə təsir prosesi aparılan yataqlarda toplanmış çoxsaylı məlumatların bu kontekstdə müxtəlif təhlil prinsipləri əsasında araşdırılması müasir neftçixarmada böyük elmi praktiki əhəmiyyət kəsb edir.

Hazırkı məqalədə məqsəd neft yataqlarında laylara su ilə təsir prosesində yaranan ekoloji risklərin araşdırılmasının zəruriliyinə toxunmaqdır. Belə ki, məqalə bir növ elmi-tədqiqat deyil, icmal xarakteri daşıyır və burada suvurma prosesində yaranan bəzi ekoloji risklərə baxılmışdır.

Azərbaycanın köhnə neft yataqlarından hesab olunan, bir sıra spesifik, geoloji-fiziki, hidrodinamik və istismar xüsusiyyətlərinə malik Siyəzən monoklinalı neft yataqlarında (SMNY) quyuların qeyri-adi istismar şəraitində (uzun süzgəclərlə) 1976-87-ci illərdə laylara su ilə təsir prosesi çox mürəkkəb fiziki-kimyəvi hadisələrin müşayiəti şəraitində aparılmış, nəticəsi isə tam səmərəsiz olmuşdur. Belə ki, suvurmada iştirak etmiş 32 su vurucu quyudan 19-da vurulan su kəsilişin üst hissəsində udulmuş və ya qrifon əmələ gəlmişdir. 4 vurucu quyu ilə bir sıra yaxın məsafələrdə (150-200m.) yerləşmiş istismar quyuları qısa müddətdə sulaşmış, 9 vurucu quyuda udulma profili müəyyənləşdirilməmiş, təsirin nəticələri müşahidə olunmamışdır (cədvəl 1) [3].

Suvurma prosesi aparılmış 927 N-li vurucu quyunun ətraf istismar quyularından olan 926 və 216 N-li quyuların hər birindən suvurma prosesindən əvvəl və sonra götürülmüş suların kimyəvi analizlərinin nəticələrinə görə onların komponent tərkibi, xüsusi çəkisi və ümumi minerallığı bir-birini təsdiqləməklə suvurma ilə əhatə olunmuş obyektlər üzrə vurulan suyun (Ata-çay suvurma sahəsindən) komponent tərkibindən fərqli olmuşdur (cədvəl 2). Bu isə vurulan suyun yayılma sərhədlərinin sözügedən quyuları əhatə etmədiyini göstərir.

Əksinə, 987 №-li ətraf istismar quyusundan suvurmadan əvvəl və sonra götürülmüş suların kimyəvi analizlərinin nəticələri bir-birindən kəskin fərqlənməklə tərkibi vurulan suyun konponent tərkibinə yaxın olmuşdur (bax: cədvəl 2). Qeyd olunanlar və quyunun istismar göstəricilərinin dinamikasının təhlili vurulan suyun quyunun suyu ilə əlaqələnməsini təsdiqləyir. Quyunun proseslə bağlı hasilatında neft debitinin azalması, su debitinin artması suvurmanın quyunun hasilatına mənfi təsirini göstərir.

Qeyd edək ki, 927 №-li vurucu quyunun ətraf istismar quyularından olan 905, 928, 929, 1013, 1132 və s. №-li quyularında da proseslə bağlı mövcud istiqamətdə aparılmış təhlillərin nəticələri analoji olmuşdur. Bu analoji tendensiyalar yatağın digər sahələrində də (Siyəzən-Nardaran, Əmirxanlı, Zağlı-Zeyvə) özünü göstərmişdir.

Cədvəl 1.

Monoklinalın su ilə təsir prosesi aparılan sahələri	Vurulan suyun həcmi, min.m ³	Su vurucu quyular		Quyu şəbəkəsi sıxlığı, ha/quyu		Quyunun gündəlik hasilatı, ton		Hasıl edilmiş mayenin sulaşma faizi		Qalıq geoloji neft ehtiyat-larından istifadə tempi, %	Neft vermə əmsalı	
		ümumi sayı	il ərzində fəaliy-yətdə olan	Cari	Cəmi qazılmış quyular üzrə	Neft	Maye	Cari	İslənmənin əvvəllindən		Cari	son
Siyəzən-Nərdaran	1908	7	1-5	3-4,0	2,0	0,22	2.49	88,7	82,1	0,21	0,190	0,20
Saadan	3715	19	4-10	2,0	1.1	0,12	0,60	77,5	71,8	0,06	0,187	0,19
Əmirxanlı	15	1	1	1,5	2.4	0,09	0,54	81,3	73,2	0,07	0,176	0,18
Zağlı-Zeyvə	121	5	1-2	2,3	3,1	0,39	2,8	82,3	67,7	0,07	0,105	0,21

Cədvəl 2.

Quyu N-si	Analizin aparılması	Suyun xüsusi çəkisi, q/sm ³	Ekvivalent miqdarı, mq,ekv/100 qq						Σ k+a	Mine-rallığı, q/l	Codluq, mq,ekv/l
			Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺			
926	25.05.72	1,0158	53,30	0,082	0,02	1,36	3,92	48,122	106,80	30,77	52,8
926	24.12.80	1,0158	52,55	0,70	-	3,60	7,59	42,06	106,50	30,38	111,9
926	20.03.81	1,0250	49,99	0,09	-	2,56	4,87	42,65	100,16	28,73	74,3
216	29.05.72	1,0163	58,29	1,05	-	2,00	5,43	51,91	118,68	34,26	74,3
216	23.12.80	1,0162	58,48	0,59	-	2,16	5,28	51,63	118,14	33,74	74,4
987	10.05.67	1,0182	37,59	5,39	-	1,05	2,24	39,69	85,96	26,22	32,9
9E7	27.12.78	1,0223	54,39	0,86	0,20	0,96	3,67	50,82	110,90	31,73	46,3
Ata-çay suvurma sahəsi	12.10.80	1,03 12	76,09	0,07	İzi	1,76	4,87	69,53	152,32	43,96	66,3

Məsələnin həlli: SMNY-da laylara suvurma prosesində yuxarıda qeyd olunan neqativ halların baş verməsi nəticəsində yeraltı və yerüstü avadanlıqlarda, quyuların istismar kəmərlərində, süzgəclər zonasında duz çökməsi, qaldırıcı borularda duz tixaclarının yaranması və s. ilə nəticələnən uzun müddətli problemlər yaranmışdır. Duz çökməsi ilə xarakterik olan 50-yə yaxın quyularda (226, 358, 480, 649, 794, 841, 842, 883, 996, 1017, 1115, 1318, 1712 və s. N-li) həm su və həm də boruların divarlarına çökmüş duz nümunələrinin təhlili aparılmış və müəyyənləşdirilmişdir ki, bu duzların tərkibi maqnezium karbonat, kalsium karbonat, həm də həll olunmayan silikat qalığı və dəmir oksidindən ibarətdir. Dəmir oksidi isə suların tərkibində olan hidrogen-sulfidin yeyicilik xassəsi nəticəsində əmələ gələn korroziya məhsuludur. Bu isə lay məhsullarının tərkibinin xeyli cırklənməsini göstərir. Suvurma prosesində ətraf istismar quyularında baş verən sulaşma istismar şəraitini kəskin mürəkkəbləşdirməklə layların neft veriminin azalmasına, lay sularının xarakter və tipinin dəyişməsinə, aqressivlik xassələrinin daha da yüksəlməsinə, yer səthinə çıxarılan suların həcminin əhəmiyyəti dərəcədə artmasına səbəb olmuşdur. Bu səbəblərdən ətraf ərazilərin təbii landşaftı pozulmuş, torpaqlar şorlaşaraq yararsız vəziyyətə düşmüşdür [1].

Həmçinin, Qırmakü lay dəstəsi üzrə Binəqədi, Sulutəpə, Çaxnaqlar yataqlarında Böyük Sor gölünün suyundan istifadə etməklə laylara suvurma prosesində suyun kəmərarxası boşluqlardan başqa horizontlara axması aşkar olunmadı, eyni zamanda istifadə edilən göl suyunun tərkibində hidrogen-sulfid əmələ gətirən bakteriyaların olması kütləvi surətdə yeraltı avadanlıqların və xüsusilə kəmərlərin korroziyaya uğraması və sıradan çıxması ilə nəticələnmişdir [2].

Yuxarıda qeyd olunan mənfi tendensiyalar digər yataqlarda da özünü bu və ya digər dərəcədə göstərmişdir. Belə ki, suvurma tətbiq olunmuş 160 istismar obyektinin 51-də (32 %-də) heç bir texnoloji səmərə alınmamış və 21 (13%) obyekt üzrə isə uzunmüddətli təsir dövründə cüzi səmərə alınmışdır.

Qeyd edək ki, adətən suvurmada çay, göl, dəniz sularından, çox hallarda isə lay sularından istifadə olunur. Lakin, suvurma zamanı istifadə olunan suların tərkibinə qoyulan müxtəlif kimyəvi, mexaniki, bakterialoji və s. tələblərə praktiki olaraq riayət etmək mümkün olmur. Laya vurmaq üçün istifadə olunan təbii suların tərkibində, adətən, həll olmuş duzlar, müxtəlif qazlar, asılı və kalloid şəkildə mexaniki qarışıqlar və bəzi mikroorganizmlər olur. Göstərilən hər bir komponent lay suyu ilə əlaqədə olduqda baş verən reaksiyalar nəticəsində bir sıra maddələrin əmələ gəlməsinə səbəb olur. Məsələn, sulfat suyunu xlorlu suyu olan laya vurduqda, məsaməli mühitdə həll olunmayan çöküntü-gips əmələ gəlir. Eyni zamanda laya vurulmuş su, layda olan su ilə müvazinət vəziyyətinə gəlməyə çalışır. Bunun nəticəsində layda susurlarda, suda və neft-qaz qarışığında bəzi xarakterik dəyişikliklər baş verir.

Suvurma prosesində suyun tərkibində sulfat-reduksiyaedici bakteriyaların olması nəticəsində layda müəyyən vaxtdan sonra kükürd qazı yaranır ki, bu da avadanlığın korroziya uğramasına səbəb olur. Bununla yanaşı, layların qeyri-bircins olması, vurucu quyuların gəbuletmə qabiliyyətinin qeyri-bərabər olmasına səbəb olur. Nəticədə vurulan su birinci növbədə yüksək keçiricikli laylara daxil olur və nefti intensiv sıxışdırır, az keçiricikli laylar isə təsirlə əhatə olunmur və layın qalınlığı boyu əhatəetmə əmsali azalır. Belə şəraitdə yüksək

keçiricilikli laylarda (tərkibində kükürd qazı olan) su tez bir zamanda quyudibinə çatır və bu səbəbdən neft yataqlarında quyuların kütləvi surətdə istismar fondundan çıxma halları baş verir. Eyni zamanda bir çox yataqlarda laylara suvurma prosesində ayrı-ayrı lay dəstələri arasında gil qatlarının dağılması nəticəsində hidrogeoloji əlaqələr yaranır, laylararası axınlar baş verir. Bu isə bir sıra mürəkkəbləşmələrdə yanaşı, lay fluidlərinin keyfiyyət xarakteristikasına təsir göstərməklə, neftli, qazlı, sulu laylarda paylanması da mənfi təsir göstərir. Nəticədə, geoloji və hasilat riskləri əhəmiyyətli dərəcədə artır, texnoloji proseslərin səmərəliliyi azalır, suvurma prosesinin yerinə yetirilməsindən sonra da ilkin neft ehtiyatlarının 40-50 %-i yataqda qalır.

Bununla yanaşı, bir çox hallarda suvurma prosesində layda temperatur rejiminin pozulması ilə süxurların dezinterqasiyana şərait yaranır. Kiçik zərrəciklərə bölünmüş süxurların bir hissəsi quyudibi zonaya çökür, digər hissəsi isə istismar prosesində yer səthinə qaldırılaraq ətraf əraziləri çirkəkdirir.

Çoxsaylı texnoloji proseslər konkret hallarda özlərinin fiziki-kimyəvi mahiyyətinə görə müəyyən işçi agentdən istifadə olunmasını tələb edir. Ona görə də suyun vurulmasından əvvəl onun tərkibinə müxtəlif maddələr qələvilər, səthi-aktiv maddələr (SAM), polimerlər əlavə edilir. SAM-in istifadəsinin əhəmiyyəti ilə yanaşı, ekoloji risklərin yaranmasında da rolü böyükdür. Məsələn, qeyri-ionogen SAM yüksək köpüklənmə qabiliyyətinə malikdir. Köpük isə su yığımlarının oksigen rejimini müəyyən qədər pozmaqla, flora və faunanın təbii inkişafı üçün əlverişsiz şərait yaradır. Köpük külək vasitəsi ilə əkin sahələrinə və digər kənd təsərrüfatı sahələrinə yiğilaraq bitkilərə və torpaq örtüyünə öldürəcü təsir göstərir. Eyni zamanda texnoproseslər zamanı SAM-in yer örtüyünə dağılması, yağış vasitəsilə qrunt sularına daxil olmasına, su hövzələrinin çirkəlnəməsinə gətirib çıxarır. Nəzərə alsaq ki, 1 litr SAM 1 mln tona yaxın yeraltı suyu çirkəndirir, təsəvvür etmək olar ki, SAM-in istifadə ekoloji baxımdan nə qədər ziyanlı və təhlükəlidir.

Kimyəvi suvurma zamanı təmizlənmə prosesində məhluldan ayrılan H₂S ilə lokal çirkəlnəmə, nəql zamanı kimyəvi maddələrin sızması, yeraltı axmalar, süxurların kimyəvi dağılması nəticəsində lay təbəqələrinin sürüşməsi və yaxud aşağı düşməsi baş verir.

Nəticə. Siyəzən monoklinal neft yataqlarında aparılmış laylara suvurma prosesinin ekoloji nəticələrinin qarşısının alınması, hasiledici quyuların eko-istismar göstəricilərinin yaxşılaşdırılması məqsədilə Azərbaycan Neft Akademiyası nəzdində “Neftin, qazın geoteknoloji problemləri və kimya “ elmi tədqiqat institutu ilə əlaqələr genişləndirilmiş, sözügedən institutun “Kimyəvi reagentlər və sensorlar” laboratoriyasında kraun efir və nanodəmirdən istifadə etməklə allınmış nonomembran Siyəzən neftində laboratoriya şəraitində yoxlamış və əhəmiyyətli dərəcədə yaxşı nəticələr əldə olunmuşdur.

Bu maddədən istifadə etməklə neftin özlülüyü 4,5 s/St, neftdə gətrənin miqdarı 23%-ə qədər, mexaniki qarışıqların miqdarı 5% azalmış, ayrılmış təmiz neft miqdarı 2,91%, suyun miqdarı isə 2,09% artmışdır.

Hal-hazırda nanomembranın yatağın ayrı-ayrı hasiledici quyularında tətbiq olunmasının zəruriliyi və mümkünüy məsələlərinə baxılır.

Yuxarıda qeyd olunanları nəzərə alaraq, sözügedən yataqlarda suvurma prosesində yaranan ekoloji risklər differensial təlil olunmalı, diaqnozlaşdırılmalıdır və proqnozlaşdırılmalıdır, habelə suvurmaya alternativ olaraq enerji və resurslara qənaət edən, texnoloji proseslərin səmərəliliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırmağa imkan verən, ekoloji cəhətdən təmiz texnologiyaları özündə birləşdirən üsul və metodların işlənilməsi və tətbiqi ən prioritet məsələlərdən hesab olunmalıdır.

LITERATURE

- Huseynov A.N., İbragimov Z.M., Aslanov T.I.** Anomaly in complex geological conditions of onshore oil fields, some of the results of the impact with the water. // Azerbaijan oil operating, 2001, №7, pp. 23 - 33.
- Ismailov Q.Q., Murvatov F.T.** Monoclonal fields operated Siazan Well some of the environmental consequences of irrigation / Azerbaijan Higher Technical Schools news, 2002, № 5 (21), pp. 72 - 74.
- Miralamov Q.F., Mamadov N.T.** On the territory of the Absheron peninsula use of technological devices for collecting and preparation of oil and gas In Azerbaijan. // "Oil and gas complex environmental protection", - Moskow, 2012, № 4, pp. 8 - 10.
- Huseynov A.N., İbragimov Z.M., Aslanov T.I.** Onshore oil fields and reservoirs of water affect the results // Azerbaijan oil operating, 2000, № 9, pp. 11 - 14.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ С ЗАКАЧКОЙ ВОДЫ В ПЛАСТЫ НА СТАРЫХ НЕФТИНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ АЗЕРБАЙДЖАНА

Ф.Т. МУРВАТОВ, Ф.М. МАМЕДОВ, Н.Т. МАМЕДОВ

В статье рассмотрены некоторые экологические риски, вызванные процессом закачки воды в пласты на старых нефтяных месторождениях, и в качестве альтернативы процессу рекомендуется использование более прогрессивных с экономической, технологической и экологической точек зрения методов, позволяющих максимально экономить энергию и средства.

ENVIRONMENTAL RISKS OF WATER INJECTION IN OLD OIL FIELDS OF AZERBAIJAN

F.T. MURVATOV, F.M. MAMEDOV, N.T. MAMEDOV

Some ecological risks caused by the water injection process at the old oilfields is studied in this paper and the use of more advanced methods which will maximize energy and resource saving from economic, technological and ecological standpoint is recommended.

ELEKTRİK HƏRƏKƏT TƏRKİBLƏRİNİN AVTONOM AVTOİDARƏETMƏ SİSTEMLƏRİ

B.Ə. BAĞIROV, E.K. MANAFOV

Məqalədə dəmir yollarında elektrik qatarlarının avtomatik idarə edilməsi üçün yaradılmış cərəyanə və sürətə görə tənzim dövrəli ikikonturlu avtonom avtoidarə sisteminin funksional sxeminin işi tədqiq edilmiş və onların avtomatik olaraq yerinə yetirdiyi funksiyalar izah olunmuşdur.

Açar sözlər: *avtoidarə, teleidarə, avtonom, əyləcləmə, verici.*

Dəmir yollarında mərkəzləşdirilmiş avtoidarə sistemləri sahədə böyük sayda qatarların avtomatik idarə olunması problemini tamamilə həll etməyə imkan verir. Ancaq teleidarə prinsipində işləyən belə sistemlərin qurulması üçün, çoxkanallı rabitə sistemi tələb olunur ki, bu da yalnız sahədə (məsələn metropolitendə) çoxlu sayıda eynitipli qatarların hərəkəti şəraitində iqtisadi cəhətdən özünü doğruldur. Böyük olmayan hərəkət həcmində qatarların avtonom avtoidarə sistemlərinin tətbiqi daha sərfəlidir [1].

Qatarların sürətli hərəkəti şəraitində EHT-lərin avtonom avtoidarə sistemlərinə böyük ehtiyac yaranır. Hərəkət sürətinin yüksəldilməsi qatarların təhlükəsiz idarə olunmasına qoyulan tələbləri daha da artırır. EHT-nin işinin avtomatlaşdırılması maşinist bir sırada idarə əməliyyatlarından azad edir və həmin funksiyalar avtomatik sistemlərə verilir.

Avtonom sistemlərdən istifadə edərkən, maşinist aşağıdakı funksiyaları yerinə yetirməlidir [2]:

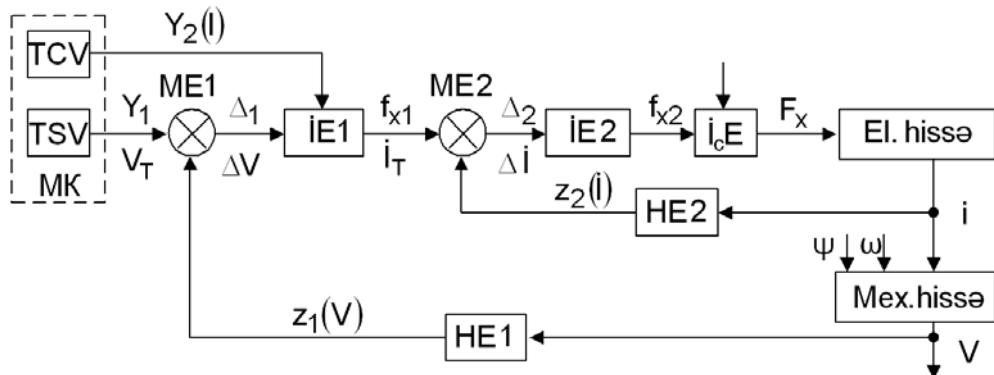
- FALI (fasıləsiz avtomatik lokomotiv işarəvericisi) siqnallarına nəzarət;
- təhlükəsiz hərəkət şəraitinə nəzarət;
- hərəkət qrafikinin yerinə yetirilməsinə nəzarət.

Avtoidarə sistemlərindən ən mükəmməlinin (avtomaşinist sistemi) yerinə yetirdiyi funksiyalar aşağıdakılardır:

- qatarların hərəkət qrafikinə riayət edilməsi;
- məqsədli əyləcləmənin həyata keçirilməsi;
- FALI siqnalları əsasında hərəkət prosesinə düzəliş edilməsi (hətta dayanmaya qədər sürətin dəyişdirilməsi);

- bir sıra göstəricilərə (məsələn, minimum enerji sərfi) görə EHT-nin iş rejiminin optimallaşdırılması.

EHT-nin avtonom avtoidarə sistemi, funksional sxemi şəkil 1-də göstərilən, cərəyanə və sürətə görə tənzim dövrəli ikikonturlu avtomatik tənzim sisteminin(ATS) əsasında qurulur



Şəkil 1. EHT-nin iki konturlu ATS-i

ATS sxemində idarə orqanlarından biri TSV tapşırıq sürəti vericisidir, bu funksiyani km/saatla dərəcələnmiş MK maşinist kontroller dəstəyi yerinə yetirir. MK-nin digər dəstəyi TCV tapşırıq cərəyanı vericisi funksiyasını icra edir. Maşinist onun vasitəsilə DEM-in lövbər cərəyanının maksimal qiymətini məhdudlaşdırır. Həmin qiymət İE1 idarəedici elementi tərəfindən cərəyanaya görə daxili tənzim konturu üçün təyin edilir. Faktiki olaraq, TCV-nin köməyilə maşinist qatarın konkret çəkisi və təkərlərin ılışmə şərtinə görə işəburaxmada təcillənməni məhdudlaşdırır.

Baxılan sistemdə tabeli tənzim prinsipindən istifadə olunur, cərəyanın tənzim konturu daxili, sürətin tənzim konturu isə xaricidir.

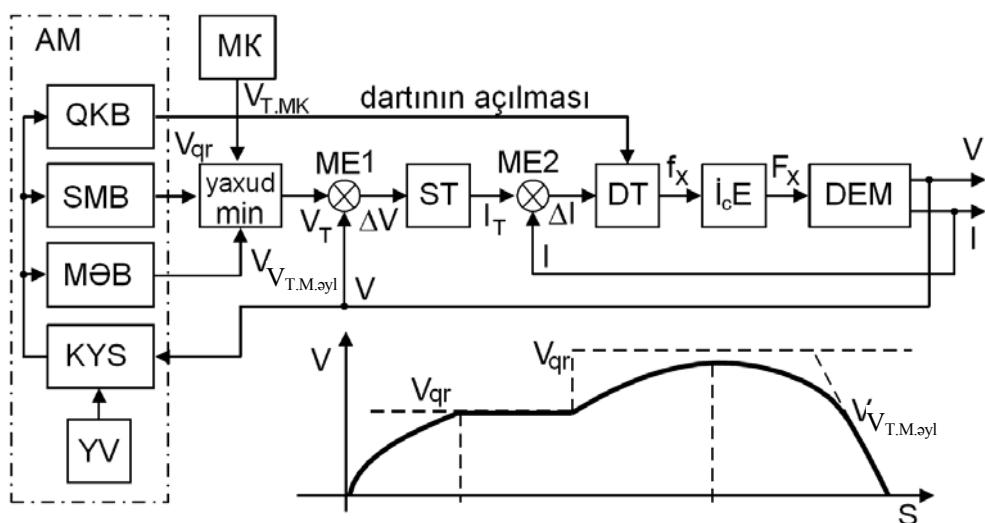
Sürətin tənzim konturunda İE1 idarəedici elementi daxili kontur üçün avtomatik tapşırıq cərəyanı vericisi funksiyasını yerinə yetirir. Maksimal cərəyanaya görə məhdudiyyət nəzərə alınmaqla, tapşırıq (V_T) və faktiki (V) hərəkət sürətlərinin fərqi kimi formalanan Δ_i qiymətinə görə İE1 elementi I_T tapşırıq cərəyanına uyğun f_{x1} kəmiyyətini müəyyən edir və sistemin daxili konturunun (ME2 müqayisə elementinin) girişinə ötürür.

Daxili kontur cərəyanaya görə stabillaşdırılmış prinsipində işləyir. Xarici kontur DEM-in gərginliyinin stabillaşdırılməsi prinsipində qurula bilər. Çünkü gərginliklə sürət arasında funksional asılılıq mövcuddur, ona görə də faktiki olaraq, sürətin stabillaşdırılməsi həyata keçirilir, həm də sürətlə müqayisədə gərginliyi ölçmək daha asandır.

Praktiki olaraq, sistemdə konturların sayı iki dən artıq da ola bilər, məsələn DEM-lərin müstəqil təsirlənməsində təsirlənmə cərəyanına görə də konturun əlavə edilməsi mümkündür. DEM-lərin sayının çox olduğu çoxvahidli sistemdə (CVS) hər bir müstəqil

DEM qrupu üçün özünün cərəyanə görə tənzim konturu istifadə olunur, ancaq xarici kontur dərti vahidlərinin hamısı üçün ümumi hazırlanır [3].

Lokomotivdə ikikonturlu ATS sxemi əsasında yaradılmış avtonom avtoidarə (avtoməşinist) sisteminin struktur sxemi və mənzildə tərkibin nümunə hərəkət qrafiki şəkil 2-də göstərilmişdir.



Şəkil 2. Avtoidarə sistemi.

EHT-nin avtoidarə sisteminin tərkibinə adətən hərəkət sürətinin (V) tabeli tənzimlənməsini təmin edən elementlər daxil olur. Funksional sxemdə sürət tənzimləyicisi (ST) DEM-lərin daxili cərəyan konturu (I) üçün tapşırıq siqnalı vericisi vəzifəsini yerinə yetirir. Sistemdə hərəkət sürətinin tapşırıq qiyməti mümkün üç variantdan təhlükəsizlik şərtinə görə ən kiçiyinin seçilməsilə təyin olunur. Bu qiymətlərdən biri (V_{TMK}), MK kontrollerinin köməyilə maşınist tərəfindən verilir. Digər iki qiymət isə avtoməşinist (AM) vasitəsilə müəyyənləşdirilir: V_{qr} (qrafik sürəti) sürətin məhdudlaşdırılma blokunda (SMB), $V_{T,M,ayl}$ isə məqsədli əyləcləmə blokunda ($MƏB$) hasil edilir. $MƏB$, müəyyən olunmuş yerdə (platformanın yanında və ya siqnal qarşısında) qatarın dayandırılması üçün, əyləc yolu ilə sürət arasında asılılığı müəyyənləşdirir.

Qidasız işləməyə keçid bloku (QKB), mənzildə gediş müddətinə uyğun olaraq, lazımi hallarda, məsələn dayanacaqqabağı və ya hərəkət sürətinin əhəmiyyətli dərəcədə məhdudlaşdırılmasının lazım geldiyi yol profili elementləri qarşısında, DT dərti tənzimləyicisi vasitəsilə DEM-lərin açılma anını müəyyənləşdirir.

$MƏB$, SMB və QKB keçilən yol saygacının (KYS) siqnalları ilə işləyir. Həmin saygac ATS-in sürət vericisindən daxil olan siqnalı integrallamaqla, qatarın keçdiyi yolu fasılısız

olaraq hesablayır və *YV* yol vericilərinin siqnalları ilə mənzildə lokomotivin yerini dəqiqləşdirir.

Sürətə görə məhdudiyyətlərdən asılı olmayaraq, lazım gəldikdə, maşinist öz qərarı ilə hərəkət sürətini azalda bilir. Bununla da qatarın hərəkət təhlükəsizliyi üzrə əsas tələblər yerinə yetirilmiş olur.

Nəticə. Funksional sxeminin işi analiz edilən cərəyana və sürətə görə ikikonturlu avtonom avtoidarəetmə sisteminin tətbiqilə qatarların hərəkət qrafikinə dəqiq riayət olunması, məqsədli əyləcləmənin aparılması, hərəkət prosesinə düzəlişlər edilməsi avtomatik olaraq həyata keçirilir və bir sıra göstəricilərə görə EHT-nin iş rejimləri optimallaşdırılır.

АВТОНОМНЫЕ МНОГОКОНТУРНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОУПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫХ СОСТАВАХ

Б.Э. БАГИРОВ, Э.К. МАНАФОВ

В статье проведено исследование функциональной схемы автономной двухконтурной системы автоуправления с регулирующими цепями по току и скорости. Система разработана для автоматического управления электропоездов, с введением этих систем по определенным показателям, в частности по минимальному расходу электроэнергии. Оптимизируются режимы работы ЭПС.

AUTONOMOUS MULTI-CONTOUR SYSTEMS OF AUTO-CONTROL INELECTRIC ROLLING STOCKS

B.E. BAGIROV, E.K. MANAFOV

The article examines the functional diagram of autonomous double-contour auto-control system with the regulating circuits on current and speed. The system has been developed for the automatic control of electrical trains, by placing these systems into the operation according to some indices, particularly the minimum expenditure of electrical energy. The operational conditions of electric rolling stocks are optimized.

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ В МОДЕЛЯХ УПРАВЛЕНИЯ АГРАРНЫМ СЕКТОРОМ В АЗЕРБАЙДЖАНЕ

Б.Г. АЛИЕВ, Э.Р. АТАБАБАЕВ, Р.Р. РЗАЕВ

Цифровое определение веса компонента на основе полной матрицы, которая составлена на базе диаграммы графа модели управления, представляется авторам эффективным инструментом в адекватном моделировании процесса управления. Классификация системы в постреформенный период как сложной с точки зрения теории управления системы дает методологическое обоснование выбора той или иной модели управления. Четкое параметрическое описание системы делает возможным провести корректную классификацию с последующим обоснованием выбора модели управления. Выраженный в цифрах вес компонента в модели позволяет индикативно определить приоритеты в инвестиционной политике.

Ключевые слова: аграрный сектор Азербайджана, модели управления аграрным сектором, структура и классификация моделей, полная матрица, диаграммы графов, ранжирование компонентов модели, адекватность инвестиций.

Краеугольным камнем эффективности инвестиционной политики правительства как организованного корпоративного управлена в аграрном секторе является правильное определение приоритетов в процессе обеспечения продовольственной безопасности.

Аграрное производство, как и любая среда, в которой происходят экономические процессы, – это конкурентная среда. Масштабность экологических и социальных факторов, определяющих вектор развития, требует четкой регламентации действий государства как самого организованного компонента корпоративного управления.

Ряд авторов определяют организацию сельскохозяйственного производства как систему мер, направленных на рациональное сочетание средств производства и труда в едином процессе сельскохозяйственного производства при определенных социально-экономических условиях [1].

Секторально предметом нашего освящения является аграрный сектор в пределах Азербайджанской Республики. Обозначим уровни существования аграрного вопроса:

- уровень осознания (с институциональной точки зрения);
- уровень продовольственной безопасности страны;

- уровень эффективности хозяйствственно-экономической деятельности сельской части населения отдельно взятой страны;
- уровень интегрированности страны в региональные и мировые хозяйствственно-экономические процессы, выбор той или иной модели устойчивого развития в конкурентной среде;
- уровень мобилизационной способности аграрного сектора страны в противостоянии экологическим вызовам столетия (всеобщее потепление, эрозия почв, ограниченность водных ресурсов, абсолютное сокращение агропригодных ресурсов).

Одним из факторов, принуждающих к регламентации действий при управлении (иначе говоря, к моделированию), является фактор масштабности. Цифры, которые являются входными параметрами той или иной модели, на национальном уровне выглядят следующим образом.

По данным 2011 г., из 9 235 000 населения Азербайджанской Республики 4 346 000 человек живут в сельской местности. Площадь земли, пригодной для сельскохозяйственной деятельности, составляет 4.768 тыс. га. На каждые 100 га пригодной земли приходится 194 человека, или, иными словами, на каждого человека приходится 0,52 га пригодной земли. Из 4.768 тыс. с/х угодий 1.421 тыс. га – орошаемые площади. Из 4 375 000 работоспособного населения 1 657 000 человек заняты в сельскохозяйственном секторе (т.е. около 38 %). ВВП на 2011 г. составляет 51.157 млн. AZN, из которых 2.736 млн. AZN создается в сельском хозяйстве, что составляет 5,3 % от общего ВВП. Средняя зарплата наемного работника в аграрном секторе составляет 196 AZN. По сравнению с 1990 годом индекс физического объема производства составляет 112 %. Следует добавить, что 94,8 % общего объема сельскохозяйственного производства приходится на частный сектор – предпринимателей, семейные и домашние хозяйства. В структуре основных фондов здания составляют 74,3 % стоимости, многолетние насаждения – 0,8 % стоимости основных фондов. На начало 2012 года сельскохозяйственный парк Азербайджана насчитывал 21.400 единиц тракторов суммарной мощности 1.464 тыс. лошадиных сил.

Определяющим внешнеэкономическим фактором развития аграрного сектора экономики АР является ужесточение конкурентной среды и, как результат, стремительное выдавливание Азербайджана с традиционных рынков, в основном из России, по двум главным причинам:

- переход основного центра продаж сельскохозяйственной продукции от традиционных рынков (базаров) и оптовых складов к сетевым маркетам со своей логистикой;
- поощрение экспорта на российский рынок со стороны традиционных экспортёров сельскохозяйственной продукции (Молдова, Украина, Польша, республики Средней Азии, Сербия).

Конкурентный характер среды порождает неизбежность обеспечения конкурентоспособности всей отрасли. Одним из инструментариев конкурентоспособности является создание механизмов обеспечения динамизма аграрного сектора в условиях постиндустриального периода развития. Сегодня до 60% добавленной стоимости в производстве

создается именно благодаря управленческим решениям. Поэтому прежде всего следует определиться с моделью аграрного управления как фундаментального компонента общей национальной стратегии, состоящей из:

- а) стратегии обеспечения национальной безопасности;
- б) стратегии обеспечения устойчивого экономического роста.

В XXI веке движущей силой развития сельского хозяйства выступают не технологии, а рынки капитала. Высококачественное управление инвестициями требует доступного индикативного информационного инструментария [2]. Перед нами система под названием агропродовольственный сектор. Земля остается основным средством производства.

Система относится к категории организационных, ибо есть фактор наличия группы людей [2]. Управление будет происходить в конфликтной ситуации, так как окружающая среда (в управленческом понимании) будет активно реагировать на результаты управления или даже противодействовать ему. В условиях неполной информации приходится применять методы адаптивного управления. Организационные системы, безусловно, относятся к сложным объектам. Основу современной теории управления сложными объектами составляют системный подход и реализующие его системные научные направления, к которым относятся кибернетика, системный анализ, общая теория систем, системотехника и т.д. [2]. Аграрный (продовольственный) сектор является прежде всего системой. Основными свойствами системы являются: целостность, ограниченность, членимость, интегративность и организованность.

Агропродовольственный сектор по степени обусловленности строения и поведения, безусловно, относится к стохастическим системам. Обладает активным целенаправленным поведением с учетом и прогнозированием результатов этого поведения. Так как при управлении системой учитывается фактический ход управляемого процесса, система является замкнутой. С учетом реакции среды на результаты управления (конкуренция вплоть до дезинформации), мы имеем дело с управлением в конфликтной ситуации.

Наличие моделей и механизмов управления привлекательно как с точки зрения управляющего органа – так как позволяет предсказать поведение управляемых субъектов, так и с точки зрения управляемых субъектов – так как делает предсказуемым поведение управляющего органа. То есть *снижение неопределенности* за счет использования механизмов управления является одним из существенных свойств любой организации как социального института [3].

Организационные системы (ОС) можно рассматривать и с точки зрения менеджмента. В этом случае придется ограничиться наблюдениями и систематизацией позитивного опыта.

Модели принятия решений определяются функциями участников ОС. Состав, структура и функции ОС определяют параметры системы с точки зрения системного анализа. На рис. 2 представлена диаграмма графа ОС сельхозпроизводства растениеводческой продукции. Состав ОС представлен вершинами: 1 - фермеры и предприятия, 9 -

государство. Компонент структуры определяют вершина 5 – технологическая связь между участниками; вершина 8 – финансовая связь между участниками. Ограничителем допустимых стратегий выступает вершина 7 – факторы экологии. Примером предпочтений участников ОС может выступить вершина 6 – тип культуры, его генотип. Вершина 10 – маркетинг и продажи – может служить параметром информированности ОС на момент принятия решений. Представленная диаграмма также отражает последовательность получения информации внутри ОС (на практике определяется через определение длины пути между вершинами).

Цена ресурсоемкости моделирования – свойства, характеризующего расход всех видов ресурсов при моделировании на получение целевого эффекта, – в несколько раз ниже цены неэффективного распределения потенциальных ресурсов агропродовольственного сектора.

Построенная модель графов однозначно показывает важность компонента «фермер» в цепи данных графов на основе показателей а/ - вершин, б/ - дуг.

В отличие от структурных схем, группа методов исследования на основе теории графов позволяет более широко применять математические методы.

Ресурсный анализ с/х системы АР показывает, что абсолютное большинство хозяйствующих субъектов – это фермеры. Соответственно, мы вправе рассматривать их как неделимые элементы данной сложной системы.

Модели.

Одной из важнейших характеристик системы является ее структура. Среди задач структурного моделирования – определение степени влияния структуры и параметров исследуемой системы на ее поведение, определение наилучшей по заданному критерию структуры и совокупности параметров системы. При построении структурных схем сложных систем используют графы как основу аппарата формализованного описания структур систем. В основе теории графов лежит положение о том, что граф G – это пара множеств $\langle X, U \rangle$, состоящая из множества X и подмножества U прямого произведения множества X самого на себя, т.е. $G = \langle X, U \rangle$, $U \subset X \times X$. Причем элементы $\langle x \rangle$ множества X составят вершины графа, а элементы $\langle x, y \rangle$ – множества U , где $x \in X$, $y \in X$, образуют дуги.

Общеизвестно, что графы могут быть заданы аналитическим, геометрическим и матричным способами. Следуя логике изучаемой темы, попытаемся создать схему функционирования агропродовольственного сектора на межведомственном уровне и на внутрисекторальном производственном уровне. Априори допускаем, что продовольствие как носитель обеспечения продовольственной безопасности проходит фазы выращивания, переработки, логистики и трансформации стоимости. Исходя из реально сложившейся ситуации после проведения земельной реформы и рыночных отношений, мы представили диаграмму графов сектора (рис 1).

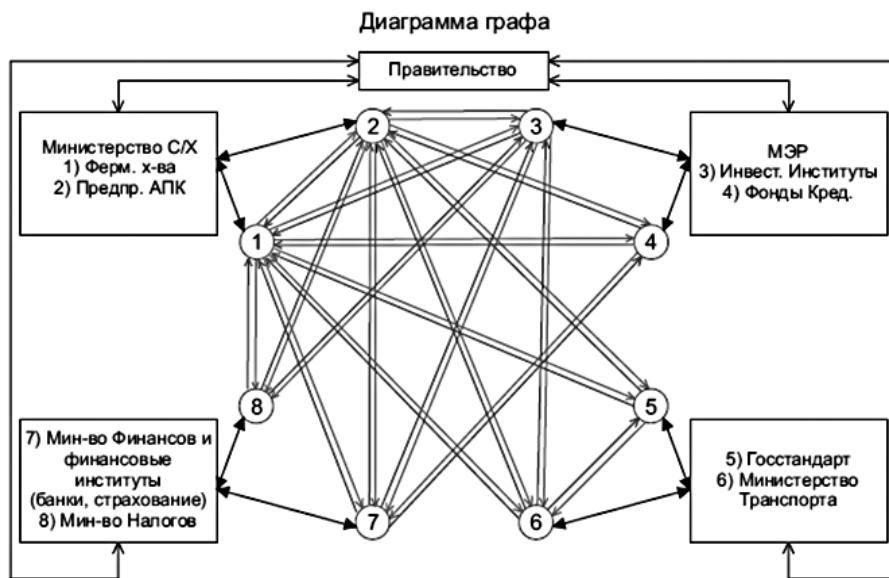


Рис. 1. Диаграмма графа межведомственного функционирования агропродовольственного сектора

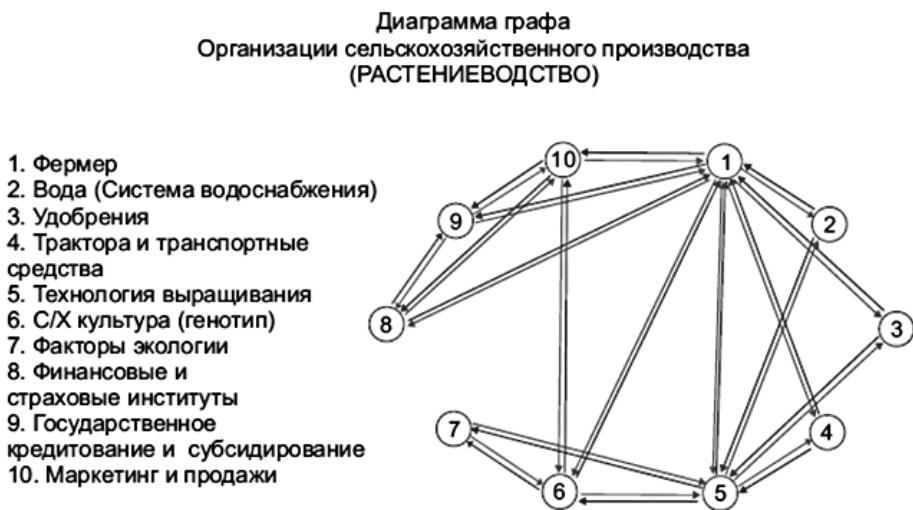


Рис. 2. Диаграмма графа внутрисекторальной организации сельскохозяйственного производства (растениеводство)

Диаграмма внутрипроизводственных графов, представленная на рис 2, необходима как шаг для формализации описания структур в процессе моделирования. Рангам элементов рассматриваемой системы сопоставлены вершины графа. Определим так назы-

ваемую полную матрицу путей графа. Для этого по диаграмме графа составим матрицу смежности вершин $R_{[10]}$, а затем и матрицу непосредственных путей $U_{[10]}$ графа:

$$R_{[10]} = \left\| r_{ij} \right\|_{10}^{10} =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
6	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
7	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
10	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0

$$U_{[10]} = \left\| u_{ij} \right\|_{10}^{10} =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	0	u_{18}	u_{19}	$u_{1,10}$
2	u_{21}	0	0	0	u_{25}	0	0	0	0	0
3	u_{31}	0	0	0	u_{35}	0	0	0	0	0
4	u_{41}	0	0	0	u_{45}	0	0	0	0	0
5	u_{51}	u_{52}	u_{53}	u_{54}	0	u_{56}	0	0	0	0
6	u_{61}	0	0	0	u_{65}	0	u_{67}	0	0	$u_{6,10}$
7	0	0	0	0	u_{75}	u_{76}	0	0	0	0
8	u_{81}	0	0	0	0	0	0	0	u_{89}	$u_{8,10}$
9	u_{91}	0	0	0	0	0	0	u_{99}	0	$u_{9,10}$
10	$u_{10,1}$	0	0	0	0	$u_{10,6}$	0	$u_{10,8}$	$u_{10,9}$	0

Для определения элементов полной матрицы был использован пакет известных прикладных программ.

Здесь надо четко оговорить особенности аграрного сектора. После приватизации такие компоненты, как техническое обеспечение, финансовое обслуживание, продвижение на рынке, стали самостоятельными компонентами со всеми вытекающими последствиями. Ресурсное изучение [4] указывает на превалирование фермерских хозяйств с наделом 1-5 га с практически отсутствующим механизмом кооперации. С другой стороны, есть системообразующие предприятия (сахарная промышленность, переработка молока, птицеводство), инвестиционный капитал которых – зачастую не аграрного происхождения.

Изучая проблемы структурного моделирования агропромышленного комплекса в Азербайджанской Республике, М. Ибрагимов [5] приходит к выводу о необходимости моделирования оптимизации межотраслевой производственной структуры аграрного сектора таким образом, чтобы производство продукции сельского хозяйства было бы «подчинено единой системе управления по обеспечению населения продовольствием».

Сетевое моделирование целенаправленных процессов.

Агропродовольственное производство представляет собой сложную систему, охватывающую большое количество операций с определенно сложными взаимосвязями внутри системы.

Если мы представим структуру управляемого процесса в виде специального ориентированного графа без контуров и кратных дуг с сопоставлением элементам системы набора чисел – фактически мы создадим основу сетевого моделирования – сетевую модель (сеть). Другими словами, сетевая модель (сеть) – это ориентированный граф без контуров и кратных дуг с заданной на нем функцией. Сетевая модель управляемого процесса составляет основу сетевого планирования и управления (СПУ). СПУ, в свою очередь, это прежде всего кибернетические системы управления, причем управляемой системой является коллектив исполнителей. Данный коллектив располагает определенными ресурсами, выполняет комплекс операций, стремится достичь намеченного конечного результата. Управляющей системой выступает руководящая группа, осуществляющая планирование и управление выполнением комплекса операций на основе его сетевой модели. Основными элементами сетевой модели являются операции (целенаправленные действия) и события (факт достижения результата).

Фермеры. Модель принятия решений.

Выше мы указали, что в результате земельной реформы мы имеем 875.000 самостоятельных фермеров. В переводе на нашу тему это означает, что модель управляемой системы включает 875.000 агентов, принимающих самостоятельные решения. Другими словами, модель ОС должна включать алгоритм принятия решений данными самостоятельными агентами.

Пусть агент способен выбирать *действия* (стратегии, состояния и т.д.) из множества A допустимых действий данного агента. Действие будем обозначать y ($y \in A$). В результате выбора действия $y \in A$ под влиянием обстановки реализуется результат деятельности агента, который будем обозначать $z \in A0$, где $A0$ – множество допустимых результатов деятельности. Возможное несовпадение действия агента и результата его деятельности может быть обусловлено влиянием обстановки – внешней среды, действий других участников ОС и т.д. Связь между действием агента $y \in A$ и результатом $z \in A0$ его деятельности может иметь сложную природу и описываться распределениями вероятности, нечеткими информационными функциями и др. (см. ниже).

Будем считать, что агент обладает *предпочтениями* на множестве результатов $z \in A0$, то есть имеет возможность сравнивать различные результаты деятельности. Предпочтения агента обозначим $RA0$, множество возможных предпочтений – $\mathfrak{R}A0$.

Часто предпочтения из множества $\mathfrak{R}A0$ можно параметризовать переменной r , принимающей значения из подмножества W действительной оси, $W \subseteq \mathfrak{R}1$. То есть каждому возможному предпочтению агента $A0 R \in \mathfrak{R}A0$ ставится во взаимно однозначное соответствие значение параметра $r \in W$, называемого *типовом* агента. Содержательно тип агента во многих прикладных задачах интерпретируется либо как эффективность его деятельности, либо как оптимальное для данного агента количество ресурса (план, назначаемый центром) [3].

При выборе действия $y \in A$ агент руководствуется своими предпочтениями и тем, как выбранное действие влияет на результат деятельности $z \in A0$, то есть руководствуясь некоторым законом $WI(\times)$ изменения результата деятельности в зависимости от действия и обстановки, информация о которой отражена переменной I . Выбор действия агентом определяется *правилом индивидуального рационального выбора* $PWI(\mathfrak{R}A0, A, I) \subseteq A$, которое выделяет множество наиболее предпочтительных, с точки зрения агента, действий.

Для сегодняшней аграрной реальности Азербайджана вышеописанный алгоритм означает, что около 50 % фермеров при выборе предпочтений будут исходить из наличия в среднем 1-5 га земли как основного средства производства. Применение пакета прикладных программ показало первоочередность компонента «фермер» при ранжировании вершин предложенного графа и абсолютное превосходство удельного веса данного компонента при предложенном конфигурации графа (естественно, при соблюдении условия, что $\sum = 1$). Данное положение особо актуально при построении модели управления, которое предполагает выявление первоочередности управляемого компонента и определение адекватности инвестиций в соответствии с удельным весом компонента.

В свое время достаточно известный специалист по инвестиционной политике в Азербайджанской Республике [6] выдвинул идею разработки доктрины внутренних инвестиций, включая их стратегию и тактику. На наш взгляд, учет особенностей компонента «фермер» может помочь максимально отразить реальность в реализуемой доктрине, в частности, в области внутренних инвестиций в ненефтяной сектор.

Алгоритм коллективного поведения.

Общеизвестно, что одним из путей повышения устойчивости организационной системы является расширение ее ресурсной базы.

В современных условиях агропродовольственного сектора Азербайджана расширение ресурсной базы может произойти путем усиления кооперативных связей (аграрной кооперации). С управлеченческой точки зрения, создается некая многоэлементная организационная система с N количеством агентов. С учетом взаимного влияния агентов возникает игра. Набор рациональных стратегий каждого агента, то есть устойчивых и

прогнозируемых исходов игры, является решением игры (равновесием). Информация игрока и те предположения, которые он использует о поведении других игроков, отражают его принцип устранения неопределенности [3]. В свою очередь, совокупность принципов устранения неопределенности порождает тип равновесия игры. Затронутые особенности алгоритмизации моделей многоэлементных ОС имеют прикладное значение в свете неизбежности процессов кооперации в агропродовольственном секторе.

Урожайность. Алгоритм мотивационного управления.

Несмотря на то, что в книге «Переходные процессы в сельском Азербайджане» Цви Лерман и Дэвид Серик [7] со ссылкой на издание Всемирного Банка оценивают индекс земельной реформы в 9 баллов из 10 возможных, в реальных условиях Азербайджана в течение последних 20 лет мы не наблюдаем сколь либо ощутимого роста урожайности зерновых (другими словами, производительности труда фермеров). В этом случае проработка модели стимулирования, вернее, построение алгоритма действий управляющего центра, позволила бы наметить последовательность действий и приоритетность решаемых задач в рамках обеспечения продовольственной безопасности и конкурентоспособности товаров агропродовольственного сектора.

При создании моделей управления аграрным сектором Азербайджана алгоритм данных моделей должен учитывать прежде всего результаты земельной реформы и постреформенное появление в агропроизводственной сфере порядка 875.000 потенциальных субъектов хозяйствования. В свою очередь, наличие такого числа участников процесса управления классифицирует модель управления как сложную систему со всеми вытекающими последствиями.

Наличие большого числа участников процесса управления порождает необходимость применения алгоритма адаптивного управления.

Существующие границы экономических районов есть ничто иное как агропроизводственные кластеры. Данное обстоятельство фактически порождает функционирование двух мегаоператоров, обеспечивающих продовольственную безопасность (МЭР и МСХ). Во избежание управленческого дублирования нами предлагается принципиальная схема зон управления на циклическом пути движения агропродовольственного товара (рис.3).

Для обеспечения максимальной эффективности государственных вложений в аграрный сектор нами предложено применение диаграмм графа с последующим составлением матрицы и вычленения веса компонента в моделях. Ранжирование по весу дает основание определить приоритеты с адекватной оценкой инвестиционной необходимости.

Наша модель однозначно определяет фермера как доминантный компонент агропроизводственного процесса.

Не подвергая ревизии результаты земельной реформы, нами в качестве механизма усиления потенциала хозяйствующих субъектов предлагается применение всех преимуществ сельскохозяйственной кооперации.

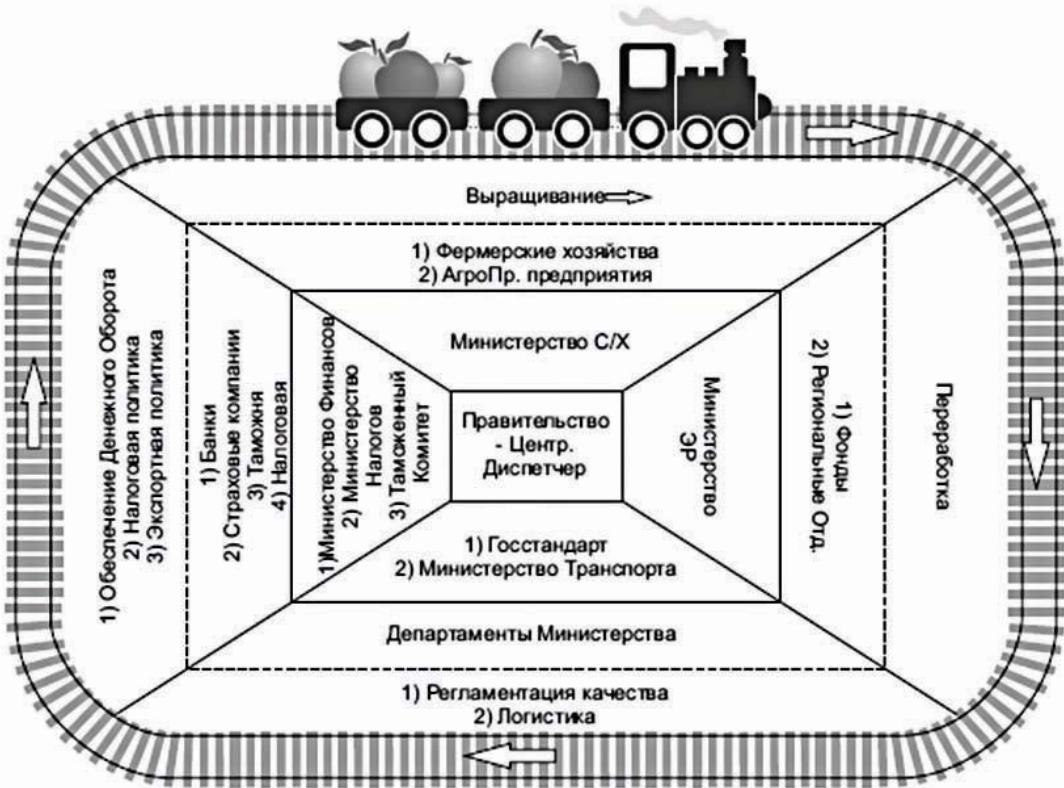


Рис. 3. Схема зон управления на циклическом пути движения агропродовольственного товара

Оценка чувствительности модели, безусловно, потребует ввода дополнительных входных параметров, что, естественно, выходит за рамки данной работы.

Заключение. Элементарное обоснование приоритетности тех или иных аспектов может позволить избежать необоснованных инвестиционных ошибок в агропродовольственном секторе.

Следуя итоговому документу Проекта Форсайт в разделе «Основные первоочередные действия для лиц, ответственных за разработку политики» [8], первоочередной задачей аграрного сектора является улучшение базы данных, на основании которой принимаются решения, и разработка системы показателей для оценки прогресса. В данном документе даны специфические рекомендации по созданию глобальной, пространственно четко сформулированной базы данных из открытых источников для анализа сельского хозяйства, продовольственной системы, окружающей среды и подготовительных действий для проведения Международного форума по моделированию продовольственной системы, чтобы способствовать более систематическому сравнительному анализу различных моделей, поделиться результатами и лучше интегрировать свою работу.

LITERATURE

1. **Rumyantsev A.M., Yakovenko E.G., Janaev S.I.** Tools of economic science and practice. - Moskow: "Znaniye", 1985. - 304 p.
2. **Zabolotski V.P., Ovodenko A.A., Stepanov A.G.** Mathematical models in managing the. - St. Petersburg: SAC, 2001. - 196 p.
3. **Novikov D.A.** Control theory of organizational systems. - IMP them. V.A. Trapeznikova, 2005. - 584 p.
4. **Aliyev B.G., Aliyev I.I., Musayev A.D.** Reference keeping system of agriculture and its resource base in Azerbaijan. - Baku: "ZIYA- CPI Nurlan", 2001. - 193 p.
5. **Ibragimov M.** Structural reform of the agricultural sector : theory, methodology and practice on the example of the Azerbaijan Republic . - Germany: Izd LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 431 p.
6. **Gulyev R.A.** Investment policy in Azerbaijan: realities, challenges and prospects of . - Baku, "Elm ", 2005. - 199 p.
7. **Zvi Lerman, David Sediq.** Transients in rural Azerbaijan. - Budapest: The publication of the UN FAO, 2012. - 258 p.
8. Final Report Project Foresight "The future of the global food and agriculture". - London. Foresight. The Future of Food and Farming (2011) Executive Summary. The Government Office for Science.

AZƏRBAYCANDA AQRAR SEKTORUN İDARƏETMƏ MODELLƏRİNİN ALQORİTMLƏRİNİN XÜSUSİYYƏTLƏRİ

B.H. ƏLİYEV, E.R. ATABABAYEV, R.R. RZAYEV

İdarəçilik modelinin qraf diaqramı əsasında tərtib edilmiş və tam matrisa vasitəsi ilə müəyyən edilmiş komponentin nisbi çəkisinin rəqəmsal hesablanması müəlliflər tərəfindən idarəçilik prosesinin adekvat modelləşdirilməsində kifayət qədər səmərəli alət kimi dəyərləndirilir. Müəlliflər torpaq islahatları nəticəsində yaradılmış sistemi mürəkkəb sistem kimi (idarəçilik nəzəriyyəsinə görə) təsnifatlandırır və bu təsnifatlandırma hər hansı bir idarəçilik modelinin seçilməsində əsaslandırılmış metodoloji baza yaradır. Başqa sözlə desək, sistemin dəqiq parametrik təsəvvürü düzgün təsnifatlaşdırılmaya imkan yaradır və müvafiq idarəçilik modelinin seçilməsinə zəmin yaradır. Rəqəmlə ifadə olunmuş komponentin modeldə olan nisbi çəkisi investisiya siyasətində prioritətlərin indikativ müəyyənləşmə imkanı yaradır.

FEATURES OF MANAGEMENT ALGORITHMS IN THE AGRICULTURAL SECTOR OF AZERBAIJAN

B.H. ALIYEV, E.R. ATABABAYEV, R.R. RZAYEV

The numerical determination of the component weight based on the complete matrix, which is constructed on the basis of the management model diagram, seems by authors as an effective tool in the modeling of the adequate management system. The system classification in the post-reforming period, as a difficult period from the system management point of view, provides the methodological ground to choose any appropriate management model. A clear parametric description of the system makes it possible to perform the correcting classification, followed by the optimal selection of the management model. Expressed in numbers, the component weight allows an indicative prioritization of the investment policy.

Xronika

Bakı, 29 may (AzərTAc).

23 May 2014 – cü ildə Moskva şəhərində “Beynəlxalq Mühəndislik Akademiyasının işinin yekunları”na (2013-cü il) dair akademianın prezidenti, akademik B.V.Qusev ümumi yığıncaqda məruzə ilə çıxış etdi.

Ümumi yığıncaqda 11 ölkədən 657 nəfər akademianın üzvləri iştirak edirdi.

Ümumi yığıncaq öncəsi “Инженерная газета” da Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Prezidenti, akademik **Arif Paşayevin** “Наш главный ресурс – одаренность людей” adlı böyük məqaləsi dərc olunmuşdur və ümumi yığıncağın iştirakçıları arasında paylanmışdır. A.Paşayevin məqaləsi iştirakçılar tərəfindən rəğbətlə qarşılandı.

Ümumi yığıncaqda, Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının işi haqqında (2013-cü il) akademianın Vitse-prezidenti Əhəd Canəhmədov məlumat verdi.

Sonra Beynəlxalq Mühəndislik Akademiyasının (BMA) yeni həqiqi və müxbir üzvlərinin seçilməsi başlandı. Azərbaycandan BMA-ya aşağıdakılardan seçildi:

- ❖ həqiqi üzv (akademik): Yavər Camalov;
- ❖ müxbir üzvlər: Etibar Pirverdiyev, Kamal Əsgərov,
Sahib Musayev və Aydin Musayev.

Ümumi yığıncaqda daha sonra qeyd edildi ki. 2015-ci ildə Rusiya Mühəndislik Akademiyasının (RMA) təsis olunmasının 25 illiyi qeyd olunacaqdır. RMA-nın Prezidenti, akademik B.V.Qusevin təşəbbüsü ilə xarici vətəndaşların Arif Paşayev, Arif Mehdiyev, Əhəd Canəhmədov və Arif Quluyevin Rusiya Mühəndislik akademiyasına həqiqi üzv seçilməsini və eyni zamanda, onların adlarının akademianın 25 illik yubileyi ərəfəsində nəşr olunacaq “Rusiya Mühəndislik Akademiyası” Ensiklopediyasına salınması təklifi ilə ümumi yığıncağa müraciət etdi. Ümumi yığıncaq Rusiya Mühəndislik Akademiyasının Prezidentinin təklifini yekdilliliklə təsdiq etdi.

Хроника

Баку, 29 мая (АзерТАдж).

23 мая 2014 г. в Москве состоялось общее собрание Международной инженерной академии (МИА), на котором выступил Президент МИА академик Б.В. Гусев с отчетным докладом на тему «Итоги работы Международной инженерной академии (МИА) за 2013 год». В работе приняли участие 657 членов академии из 11 государств.

Накануне в «Инженерной газете» была опубликована большая статья Президента Азербайджанской инженерной академии академика Арифа Пашиева «Наш главный ресурс – одаренность людей» и распространена среди участников общего собрания. Статья А.Пашиева была воспринята участниками восторженно.

На общем собрании с информацией о работе Азербайджанской инженерной академии за 2013 г. выступил Вице-президент академии академик Ахад Джанахмедов.

Затем состоялись выборы новых действительных членов и членов-корреспондентов в МИА. Из Азербайджана в МИА были избраны:

- ❖ в действительные члены (академики): Явер Джамалов;
- ❖ в члены-корреспонденты: Этибар Пирвердиев, Кямал Аскеров,
Сахиб Мусаев и Айдын Мусаев.

На общем собрании было отмечено, что в 2015 году исполняется 25 лет со дня основания Российской инженерной академии (РИА). По инициативе Президента РИА академика Б.В.Гусева на общем собрании было внесено предложение об избрании иностранными членами академии РИА Арифа Пашиева, Арифа Мехтиева, Ахада Джанахмедова и Арифа Кулиева и внесении их имен в энциклопедию «Российская инженерная академия», которая выйдет в печать накануне 25-летнего юбилея. Общее собрание единогласно утвердило предложение президента РИА.

MƏQALƏLƏRİN TƏRTİBATI QAYDALARI

“Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri” jurnalının redaksiyasına göndərilən məqalələr aşağıdakı tələblərə cavab verməlidir:

1. Məqalənin mövzusu və məzmunu jurnalın profiliň uyğun olmalı və fikirlər çox aydın yazılımalıdır.

2. Məqalə azərbaycan, rus və ingilis dillərində yazıla bilər. Ciddi redaktə olunmalı və A4 formatda aq kağızda çap olunmalı, səhifələnməli və bir nüsxədə təqdim edilməlidir. Eyni zamanda, məqalə elektron variantda CD diskində, Word for Windows (6.0/95/97/2003) mətn redaktoru formata təqdim edilə, elektron poçtla göndərilə bilər.

3. Məqalənin birinci səhifəsinin yuxarı sol küncündə YDK indeksi olmalı, aşağıda baş hərf-lərə məqalənin adı, müəllifin (müəlliflərin) adı, soyadı və iş yerinin, çalışdığı təşkilatın tam ünvanı olmalıdır. Sonrakı səhifədə 0,5 səhifəlik həcmədə makina yazısı ilə rus dilində referat və əsas sözlük, məqalənin mətni, qeydlərin, ədəbiyyatın siyahısı; ingilis dilində müəllifin adı və soyadı, məqalənin adı və referati əks olunmalıdır. Referat tədqiqatın mövzusu əldə edilən nəticələr haqqında dolğun məlumat verməlidir. (“Nəticə” bölməsini təkrar etməmelidir.) Məqalə bölmələrdən ibarət olmalıdır, məsələn: “Giriş”, “Məsələnin qoyuluşu”, “Sınaq üsulları”, “Sınağın nəticələri və onların müzakirəsi”, “Nəticə”.

Birinci səhifədəki qeyddə hansı müəlliflə yazışmanı aparmaq lazımlı göstərilməlidir.

4. Şəkillər və qrafiklər ayrıca vərəqlərdə təqdim edilib, aşağıdakı kimi tərtib olunmalıdır; ya aq kağızda qara tuşla (6x9 sm ölçüsündən kiçik və 10x15 sm – dən böyük olmamaqla) və ya “Excel” cədvəl prosessorunun köməyi ilə.

Yarımton fotosəkillər (orijinallar mütləq) parlaq kağızda təqdim olunur və kontrast əksi olmalıdır. Fotosəklərin ölçüsü 6x6 sm-dən kiçik, 10x15 sm-dən böyük olmamalıdır.

5. Cədvəller bilavasitə məqalənin mətnində yerləşdirilməlidir. Hər cədvəlin öz başlığı olmalıdır. Cədvəllərdə mütləq ölçü vahidi göstərilməlidir.

Əlyazma mətndə şəkillər və cədvəllərin yeri göstərilir. Eyni bir məlumatı mətndə, cədvəldə və əlyazmada təkrarlamaq yolverilməzdür. Məqaləyə şəkilaltı sözlərin siyahısı da əlavə edilir.

6. Məqalədə istifadə olunan işarələr bilavasitə mətndə açıqlanır və bundan əlavə, ayrıca bir səhifəyə çıxarılmalıdır.

7. Mətndə xarici soyadlar qeyd olunduqda, onların rus dilində yazılışından sonra mötərəzədə orijinalda olduğu dildə vermək lazımdır (ensiklopediyada olan məşhur soyadlar və ədəbiyyat siyahısında qeyd olunan soyadlar istisna olmaqla). Xarici müəssisələrin, firmaların, firma məhsullarının və s. adlarının rus dilində transliteriyası zamanı mötərəzədə onların adları orjinalda yazıldığı kimi verilməlidir.

8. Məqalədə istifadə olunan ölçü vahidləri beynəlxalq ölçü vahidləri sisteminə uyğun olmalıdır. Qəbul olunmuş sözlərdən başqa və s, və i.a., qısalılmış sözlərdən istifadə etmək olmaz.

9. Ümumi ədəbiyyat siyahısı məqalənin sonunda ayrıca bir səhifədə göstərilməli və tam bibliografik məlumatları əhatə etməlidir.

10. Məqalə bütün müəlliflər tərəfindən imzalanmalıdır. Müəlliflər özləri haqqında ayrıca səhifədə aşağıdakı məlumatları göstərməlidirlər: soyadı, adı, atasının adı, yaşışmaq üçün poçt indeksi və dəqiq ünvan, iş yeri və tutduğu vəzifə, elmi dərəcəsi, hansı sahə üzrə mütəxəssisidir, həmçinin telefon (ev, xidməti) nömrələri, faxsimel rabitə və elektron poçt ünvanı.

11. Müəssisədə yerinə yetirilən tədqiqatın nəticələrini açıqlayan məqalənin çap edilməsi üçün müvafiq yazılı razılıq olmalıdır.

12. Redaksiya məqalənin əsas məzmununa xələl gətirməyən redaktə dəyişiklikləri və ixtisarları etmək hüququnu özündə saxlayır.

13. Məqalə çapa verilmədikdə redaksiya heyətinin qərarı barədə müəllifə məlumat verilir və əlyazma müəllifə qaytarılmır. Redaksiyanın məqaləni yenidən işləmək haqqında müraciəti, onun çapa veriləcəyini ehtiva etmir, belə ki, ona əvvəl resenziyaçılar sonra isə redaksiya heyəti yenidən baxır. Çap üçün məqbul sayılmayan məqalə müəllifinin məqalənin çapına yenidən baxılması xahişi ilə redaksiya heyətinə müraciət etmək hüququ var.

14. Məqalənin korrekturası müəllifə göndərilmir. Məqalə çap olunandan sonra redaksiya otiskləri yazışma üçün göstərilən ünvana göndərir.

15. Məqalə sadalanan tələblərə cavab verməzsə baxılmaq üçün qəbul edilmir və müəllifə qaytarılır. Əlyazmanın daxil olduğu vaxt redaksiyanın mətnin son variantının redaksiyaya daxil olduğu gündən sayılır.

16. Bütün korrespondensiyaları sadə və ya sıfarişli məktub (banderol) kimi göndərmək lazımdır. Qiymətli məktub (banderol) qəbul edilmir.

GUIDE FOR AUTHORS

Papers should meet the following requirements.

1. Contents of a paper should be written in line with the scope of the journal and clearly expressed.

2. The paper may be written in Azeri, Russian and English edited thoroughly and submitted in one copy to the Editorial Office. The manuscript should be printed on A4 white paper with all pages numbered. In addition, the authors must submit the electronic version of their manuscript either on a floppy (CD) or by e-mail in Word for Windows (6.0/95/97/2000) format.

3. The paper title printed in capitals on the first page is followed by the name(s) of the author(s), authors' affiliations and full postal addresses next to which are an abstract of no more than a half-page, keywords, the text itself, nomenclature, and references. At the end of the manuscript give, please, authors' names, the paper title, and the abstract in English. The abstract should outline the subject of the study and results obtained (please, do not duplicate the Conclusions). The text should be divided into sections, e.g. Introduction, Problem Formulation, Experimental Methods, Results and Discussion, Conclusions. The corresponding author should be identified in the footnote on the first page.

4. Each figure should be presented on a separate page as a drawing 6x9 to 10x15 cm in size or a printout made in the Excel, Quattro Pro or MS Graph processors.

Halftone photographs (only originals) should be glossy and contrast (6x6 to 10x15 cm in size).

Illustrations should be necessarily presented in electronic form as separate files of tif, pcx, bmp, psc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, and wmf formats.

5. Tables should be inserted into the text and have titles. Units are required to be indicated in tables.

The authors should mark in margins the location of illustrations and tables in the text. Please, do not duplicate data in the text, tables, and figures. Captions should be supplied on a separate sheet.

6. Notations should be explained when mentioned first in the text and listed on a separate sheet.

7. When citing foreign names in the text the authors should print them in the original in parenthesis after Russian transliteration except for generally known names included in encyclopedia and names cited in references. If names of foreign institutions, companies, products etc. are given in Russian their original spelling should be printed in parenthesis.

8. All measurements and data should be given in SI units, or if SI units do not exist, in an international accepted unit. The authors are advised to avoid abbreviations except for generally accepted ones.

9. Publications cited in the text should be presented in a list of references following the text of the manuscript. References should be given in their original spelling, numbered in the order they appear in the text and contain full bibliography. Please, do not cite unpublished papers.

10. The manuscript should be signed by all authors. They should provide the following information on a separate sheet; name, surname, zip code and correct postal address for correspondence, organization or company name and position, title, research field, home and office phone numbers, fax number, and e-mail address.

11. The Editorial Board has the right to edit the manuscript and abridge it without misrepresenting the paper contents.

12. The Editorial Office informs the authors of paper denial and the reviewer's conclusion without returning the manuscript. A request to revise the manuscript does not imply that the paper is accepted for publication since it will be re-reviewed and considered by the Editorial Board. The authors of the rejected paper have the right to apply for its reconsideration.

13. Proofs are not sent to the authors. Three offprints of each paper will be supplied free of charge to the corresponding author.

14. Papers not meeting the above requirements are denied and returned to the authors. The date of receipt of the final version by the Editorial Office is considered as the submission date.

15. In case of questions relating to paper submission and acceptance and the status of accepted papers, please, contact the Editorial Office.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

- Статьи, направляемые в редакцию журнала**
"Вестник Азербайджанской Инженерной Академии", должны удовлетворять следующим требованиям.
1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.
 2. Статья может быть написана на азербайджанском, русском и английском языках, тщательно отредактирована и представлена в одном экземпляре, распечатанном на белой бумаге формата А4 с пронумерованными страницами. Одновременно электронный вариант статьи представляется на CD, либо по электронной почте в формате текстового редактора Word for Windows (6.0/95/97/2003).
 3. В левом верхнем углу первой страницы статьи должен стоять индекс УДК, ниже располагаются название статьи, напечатанное прописными буквами, инициалы и фамилия автора (авторов) и полный адрес организации, в которой он работает. Далее следуют на русском языке реферат статьи объемом до 0,5 стр. машинописного текста и ключевые слова, текст статьи, список обозначений, литература; на английском языке фамилия и инициалы авторов, название и реферат статьи. Реферат должен давать представление о предмете исследования и полученных результатах (не дублировать с разделом "Заключение"). Статья должна содержать разделы, например; "Введение", "Постановка задачи", "Методы испытаний", "Результаты эксперимента и их обсуждение", "Заключение". В ссылке на первой странице необходимо указать автора.
 4. Рисунки и графики представляются на отдельных листах и должны быть выполнены: либо черной тушью на белой бумаге (размер не менее 6x9 и не более 10x15 см), либо при помощи табличных процессоров "Excel" и др. Полутоновые фотографии (обязательно оригиналы) представляются на глянцевой бумаге и должны иметь контрастное изображение. Минимальный размер фотографий – 6x6, максимальный -10x15 см. Обязательно представление иллюстративного материала в электронном виде (формат tif, psx, bmp, rcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf) на диске в виде отдельных файлов.
 5. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок. В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин. В тексте рукописи на полях указывается место для рисунков и таблиц. Повторение одних и тех же данных в тексте, таблицах и рисунках недопустимо. К статье прилагается список подрисуночных подписей.
 6. Обозначения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, и, кроме того, должны быть вынесены на отдельную страницу.
 7. При упоминании иностранных фамилий в тексте необходимо давать их на языке оригинала в скобках после русского написания (за исключением общезвестных фамилий, встречающихся в энциклопедии, и фамилий, на которые даются ссылки в списке литературы). При упоминании иностранных учреждений, фирм, фирменных продуктов и т. д. в русской транслитерации в скобках должно быть дано их оригинальное написание.
 8. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.).
 9. Литература должна быть приведена в конце статьи в виде списка на отдельной странице и содержать полные библиографические данные. Ссылки даются в оригинальной транслитерации. Список литературы должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.
 10. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторам необходимо на отдельной странице сообщить о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, почтовый индекс и точный адрес для переписки, место работы и занимаемая должность, ученая степень, специалистом в какой области является автор, а также номера телефонов (домашний, служебный), факсимильной связи и адрес электронной почты.
 11. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование.
 12. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения и сокращения, не исключающие основное содержание статьи.
 13. В случае отклонения статьи редакция сообщает автору решение редколлегии и заключение рецензента, рукопись автору не возвращается. Просьба редакции о доработке статьи не означает, что статья принята к печати, так как она вновь рассматривается рецензентами, а затем редакционной коллегией. Автор отклоненной статьи имеет право обратиться к редколлегии с просьбой повторно рассмотреть вопрос о возможности опубликования статьи.
 14. Корректура авторам не высыпается. После опубликования статьи редакция высылает оттиски по адресу, указанному для переписки.
 15. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.
 16. Всю корреспонденцию следует направлять простыми или заказными письмами (бандеролями). Ценные письма (бандероли) не принимаются.

**Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının
XƏBƏRLƏRİ**

**HERALD
of the Azerbaijan Engineering Academy**

**ВЕСТНИК
Азербайджанской Инженерной Академии**

*Beynəlxalq elmi-texniki jurnal
The international science-technical journal
Международный научно-технический журнал*

Cild 6, № 2
Vol. 6, № 2
Том 6, № 2

BAKİ – 2014

İnformasiya şöbəsinin müdürü
N.Z. Əskərova

Nəşriyyat və yayım şöbəsinin müdürü
A.M. Dənziliyev

**“Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının
XƏBƏRLƏRİ”**

jurnalı redaksiyanın kompyüterlərində yığılmış və
“A P O S T R O F F” mətbəəsində
ofset üsulu ilə çap olunmuşdur.
(akif0706@mail.ru / 050-313-07-06)

*Çapa imzalanmış 17.06.2014,
formatı 60x84 1/8,
kağız təbaşirli,
f.ç.v. 16,5.
tirajı 1400 əd.
Qiyməti müqavilə ilə*