

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Научно-исследовательский центр
«МашиноСтроение»**



Тихоокеанский государственный университет

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Волгоградский государственный технический университет

Тверской государственный технический университет

Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева

Казанский государственный энергетический университет

ISSN 2618-8953

МОДЕРНИЗАЦИЯ И ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№6

Санкт-Петербург, 2023

УДК 620.9 : 001.8

ББК 30.6

М74

М74 Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2023. – № 6. – 43 с. – DOI: 10.26160/2618-8953-2023-6.

Представлены материалы VI международной научно-практической конференции «Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса». Направления работы конференции: 1) Фундаментальные принципы и подходы к исследованию объектов и процессов ТЭК; 2) Машины и механизмы ТЭК; 3) Добыча и переработка природных ресурсов; 4) Ресурсосберегающие технологии; 5) Транспортировка и хранение энергоресурсов; 6) Угольная промышленность; 7) Нефтегазовая отрасль; 8) Электроэнергетика; 9) Общие проблемы топливной промышленности; 10) Результаты инновационной деятельности в области энергоэффективности.

Материалы могут быть полезными для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов и студентов, занятых исследованием процессов, оборудования, машин, агрегатов и комплексов в отраслях добычи, переработки и транспортировки различных энергоресурсов, а также в смежных промышленных отраслях.

Учредитель: *Жукова Елена Валерьевна.*

Ответственный редактор:

Жуков Иван Алексеевич – директор НИЦ «МашиноСтроение», заведующий кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета, д.т.н., доцент.

Редакционная коллегия:

Мешалкин Валерий Павлович – академик РАН, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ), РХТУ им Д.И. Менделеева, д.т.н., профессор;

Зверева Эльвира Рафиковна – профессор кафедры технологии воды и топлива КГЭУ, д.т.н., доцент;

Исаев Сергей Петрович – профессор кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства ТОГУ, д.т.н., профессор;

Кабалдин Юрий Георгиевич – профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д.т.н., профессор;

Балакина Екатерина Викторовна – профессор кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ, д.т.н., доцент;

Гараников Валерий Владимирович – заведующий кафедрой технической механики, ТвГТУ, д.т.н., профессор;

Унаспеков Берикбай Акибаевич – академик Национальной инженерной академии Республики Казахстан, профессор кафедры «Инженерные системы и сети» КазНИТУ, д.т.н., профессор.

ISSN 2618-8953

© Авторы, 2023

© НИЦ МС, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные принципы и подходы к исследованию объектов и процессов ТЭК

Жуйков А.В. Совершенствование топливно-энергетического комплекса путем перехода на совместное сжигание угля и биомассы в энергетических установках	4
---	---

Добыча и переработка природных ресурсов

Кашеков Д.Ю., Садыхов Г.Б., Гончаров К.В., Олюнина Т.В., Смирнова В.Б. Переработка ванадийсодержащих зол от сжигания мазута Мурманской ТЭС	7
Федотова М.В., Малофеева У.Н. Исторические сведения о развитии добычи и переработки нефти	10
Иванова Д.А., Гвоздева В.Д. Cupriavidus Necator и производство им полигидроксиалканоатов на мелассе сахарной свеклы.....	14

Ресурсосберегающие технологии

Макаров Н.А. Пластическая деформация тонколистового металла	18
--	----

Нефтегазовая отрасль

Химуля В.В., Барков С.О. Исследование структурных свойств коллектора ПХГ на базе снимков рентгеновской компьютерной томографии	28
Барков С.О., Химуля В.В. Комплексное изучение процессов в породах-коллекторах подземных хранилищ газа при реализации метода направленной разгрузки пласта с применением компьютерной томографии	31
Портнягин А.С., Иванова И.К. Образование гидратов природного газа в пористой среде, в присутствии пластовой воды и нефти	34

Электроэнергетика

Афанасьев А.А., Генин В.С., Васильева Л.Н., Иванова Н.Н., Ваткин В.А., Токмаков Д.А. Электромагнитные параметры и уравнения динамики магнитоэлектрического вентильного двигателя	38
---	----

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПУТЕМ ПЕРЕХОДА НА СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ УГЛЯ И БИОМАССЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Жуйков А.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Ключевые слова: уголь, биомасса, ресурсосбережение, экологическая безопасность, шлакование, агломерация слоя.

Аннотация. В работе проведен анализ возможности перехода на сжигание в котлах, непроектного топлива в виде твердотопливной смеси, состоящей из 50% угля марки 3Б и 50% опилок ели, взамен проектного угля марки 2Б. Представлены результаты технического и элементного анализа исследуемых топлив, а также содержание оксидов в их золе. Установлено, что добавление опилок ели к углю марки 3Б не увеличивает склонность смеси к шлакованию поверхностей нагрева в котлах при факельном сжигании и к агломерации слоя при слоевом сжигании.

IMPROVING THE FUEL AND ENERGY COMPLEX BY SWITCHING TO CO-COMBUSTION OF COAL AND BIOMASS IN POWER PLANTS

Zhuikov A.V.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Keywords: coal, biomass, resource saving, environmental safety, slagging, layer agglomeration.

Abstract. The work analyzed the possibility of switching to combustion in boilers of non-design fuel in the form of a solid fuel mixture consisting of 50% 3B grade coal and 50% spruce sawdust, instead of 2B grade grade coal. The results of technical and elemental analysis of the fuels under study, as well as the content of oxides in their ash, are presented. It has been established that the addition of spruce sawdust to grade 3B coal does not increase the tendency of the mixture to slagging of heating surfaces in boilers during flaring combustion and to agglomeration of the layer during layer combustion.

Одним из доступных способов для перехода к ресурсосберегающей и экологически безопасной угольной теплоэнергетике является переход на совместное сжигание угля и биомассы, зарекомендовавший себя более чем на 200 объектах теплоэнергетики за рубежом [1]. Основные достоинства совместного сжигания угля и биомассы заключаются в следующем: отсутствие необходимости в высоких капиталовложениях на реконструкцию котлов, так как углю можно добавлять не более 50% биомассы [1]; быстрый возврат к сжиганию угля в случае с возникновением перебоев с доставкой биомассы; большие запасы биомассы в виде отходов лесоперерабатывающей промышленности; снижение потребления угля; снижение вредных выбросов (минимальное содержание золы и серы в биомассе); снижение заполняемости золоотвалов (минимальное содержание золы в биомассе); низкая стоимость биомассы, так как под биомассой рассматриваются только отходы сельскохозяйственных, пищевых и лесоперерабатывающих предприятий, следовательно, стоимость будет зависеть только от дальности ее доставки.

При переводе угольных котлов на совместное сжигание угля и биомассы необходимо определение следующих основных показателей: технический и элементный состав топлива и анализ золы на склонность к шлакованию поверхностей нагрева котлов, при слоевом сжигании необходимо проводить анализ склонности топлива к агломерации слоя.

В работе рассмотрены следующие топлива: бородинский бурый уголь марки 2Б (далее 2Б), применяется как энергетическое топливо на промышленно-отопительных котельных и ТЭЦ Красноярского края; большесырский бурый уголь марки 3Б (далее 3Б); опилки ели (далее биомасса); топливная смесь, состоящая из 50% 3Б и 50% биомассы. В таблице 1 представлены результаты технического и элементного анализа.

Табл. 1. Данные технического и элементного анализа

№	Технический анализ			Элементный состав					Q_i^r , МДж/ кг
	W^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %	
Уголь 2Б	32,6	9,2	47,3	73,5	5,1	1,0	0,3	20,1	16,1
Уголь 3Б	20,8	6,2	44,6	74,1	5,0	0,9	0,3	19,7	20,5
Биомасса	16,7	0,2	80,5	50,2	5,8	0,5	0,1	43,4	14,6

Уголь 3Б по сравнению с 2Б имеет более высокую теплоту сгорания, низкую зольность и низкую влажность. Биомасса имеет низкую теплоту сгорания и зольность, а также высокое содержание летучих веществ (табл. 1). Основным показателем топлива, влияющим на технико-экономические показатели котла, является теплота сгорания, следовательно, добавляя биомассу к углю марки 2Б, теплота сгорания смеси будет ниже, чем у угля 2Б, что в свою очередь приведет к ухудшению технико-экономических показателей работы котла. Из этого следует, что целесообразно котел, сжигающий уголь марки 2Б, переводить на сжигание смеси на основе угля 3Б и биомассы. В этом случае при добавлении 50% опилок ели к большесырскому углю 3Б, теплота сгорания смеси составит 17,55 МДж/кг, что на 9% выше, чем у бородинского угля 2Б.

Для анализа склонности угля 3Б, биомассы и их смеси к образованию загрязнений была исследована минеральная часть топлив на предмет содержания основных оксидов в золе, результаты анализа представлены в таблице 2.

Табл. 2. Данные химического анализа

№	Содержание, %							
	SiO_2	CaO	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	Al_2O_3
Уголь 3Б	46,1	24,1	0,9	0,6	9,1	1,0	3,1	15,1
Биомасса	3,6	39,9	10,1	0,7	1,9	0,1	4,3	0,8

Примечание: SiO_2 – оксид кремния; CaO – оксид кальция; K_2O – оксид калия; Na_2O – оксид натрия; Fe_2O_3 – оксид железа; TiO_2 – оксид титана; MgO – оксид магния и Al_2O_3 – оксид алюминия.

Для угля характерно высокое содержание оксидов кремния, для биомассы характерно высокое содержание оксидов кальция (табл. 2). Анализ склонности

исследуемых топлив и их смесей к загрязнению поверхностей нагрева при факельном сжигании (железистые отложения (R_{Fe}); отложения на основе активных щелочей (R_{Na}); сульфатно-кальциевые отложения (R_{Ca}); шлакование топочных экранов (R_S)) был проведен по методике УралВТИ [2]. Расчет индекса агломерации слоя (BAI , допустимое значение не менее 0,15) для топлив выполнялся согласно формуле, апробированной за рубежом при слоевом совместном сжигании угля и биомассы [3, 4]:

$$BAI = Fe_2O_3 / (Na_2O + K_2O). \quad (1)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Табл. 3. Результат расчетов склонности угля, биомассы и их смеси к загрязнению поверхностей нагрева и к агломерации слоя

Топлива	R_{Fe}	R_{Na}	R_{Ca}	R_S	BAI
Уголь 3Б	0,64	0,29	0,71	0,80	6,1
50% + 50%	0,65	0,32	0,83	0,83	0,90
Биомасса	0,63	0,35	0,90	0,83	0,18

Анализируя таблицу 3, можно сделать следующие выводы: отложения R_{Fe} угля и биомассы имеют примерно одинаковые значения и находятся в ранге – высокий; отложения R_{Na} находятся в низком ранге и при сжигании смеси отложений не возникнет; отложения R_{Ca} находятся в высоком ранге; значения R_S находятся в очень высоком ранге; значения индекса BAI у биомассы чуть выше основного предела, следовательно, существует риск, что опилки ели склонны к агломерации слоя при индивидуальном сжигании. При сжигании в смеси с углем это значение приближено к 1, что говорит о том, что опасность в агломерации слоя при слоевом сжигании смеси минимальна. При совместном факельном сжигании смеси на основе угля марки 3Б и опилок ели необходимо предусмотреть дополнительные меры очистки поверхностей нагрева топки котла, так как эти топлива имеют очень высокую склонность к их загрязнению. Низкое содержание золы и серы в биомассе (табл. 1), повлияет на снижение этих показателей в смеси, следовательно, улучшатся экологические характеристики.

Список литературы

1. Al-Mansour F., Zuwala J. An evaluation of biomass co-firing in Europe // Biomass & bioenergy. 2010, vol. 34, pp. 620-629.
2. Алехнович А.Н., Талова В.М., Богомолов В.В., Гладков В.Е. Исследования энергетических углей методом химического фракционирования и оценка их загрязняющих свойств // Теплоэнергетика. – 2001. – №5. – С. 55-63.
3. Lachman J., Balas M., Lisy M., Lisa H., Milcak P., Elbl P. An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels // Fuel Processing Technology. 2021, vol. 217, p. 106804.

Сведения об авторе:

Жуйков Андрей Владимирович – к.т.н., заведующий лабораторией.

ПЕРЕРАБОТКА ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ЗОЛ ОТ СЖИГАНИЯ МАЗУТА МУРМАНСКОЙ ТЭС

*Кашеков Д.Ю., Садыхов Г.Б., Гончаров К.В., Олюнина Т.В., Смирнова В.Б.
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

Ключевые слова: зола, мазут, ванадий, никель, переработка, отходы, выщелачивание.

Аннотация. В данной работе приводится исследование по переработке зольных отходов от сжигания мазута, образующихся на Мурманской ТЭС. Высокое содержание ванадия и никеля в золах делает данные отходы ценным источником данных металлов. Установлено, что данные отходы являются экологически опасными из-за содержания большого количества водорастворимых соединений ванадия. Показана возможность их переработки с переводом ванадия и никеля в растворы.

PROCESSING OF VANADIUM-CONTAINING ASHES FROM THE COMBUSTION OF FUEL OIL AT THE MURMANSK TPP

*Kashekov D.Yu., Sadykhov G.B., Goncharov K.V., Olyunina T.V., Smirnova V.B.
A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science
of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

Keywords: ash, fuel oil, vanadium, nickel, processing, waste, leaching.

Abstract. This thesis provides a study on the processing of ash from the combustion of fuel oil at the Murmansk Thermal Power Plant. It has been established that this waste is environmentally hazardous due to the content of large amounts of vanadium. The possibility of their processing with the transfer of vanadium into solution has been shown.

При переработке нефти ванадий и никель накапливаются в мазуте, при сжигании которого образуется значительное количество ванадийсодержащих зол [1]. В настоящее время Мурманская область является единственным мазутозависимым регионом России. На Мурманской ТЭС образуется более 260 т зол в год с содержанием V_2O_5 5% и более [2]. При этом ванадий в золах частично находится в растворимой форме, что представляет серьезную экологическую угрозу для грунтовых вод и водоемов города [3-4]. Поэтому разработка технологии переработки ванадийсодержащих зол ТЭС является актуальной задачей с экономической и экологической точек зрения. Ранее были проведены исследования по золе от сжигания мазута, результаты которых показали потенциал золы как источника ванадия и никеля и возможность её переработки с целью извлечения ценных металлов [5, 6]. Данная статья посвящена переработке золы уноса Мурманской ТЭС.

Химический состав золы уноса, %: 2,67 V_2O_5 , 0,65 NiO, 6,37 Fe_2O_3 , 2,17 CaO, 11,71 SiO_2 , 27,25 SO_3 , 6,03 Al_2O_3 , 0,37 MgO, 0,83 Na_2O , 0,23 TiO_2 , 0,42 K_2O , 0,14 др., 41,1 ППП.

В результате исследования влияния концентрации серной кислоты установлено, что при водном выщелачивании степень извлечения V_2O_5 составляет 81,0%, а повышение концентрации не приводит к значительному

росту извлечения V_2O_5 . Степень извлечения NiO в воде составляет 38,4%, а в сернокислотных растворах увеличивается с 46,7% до 69,9%.

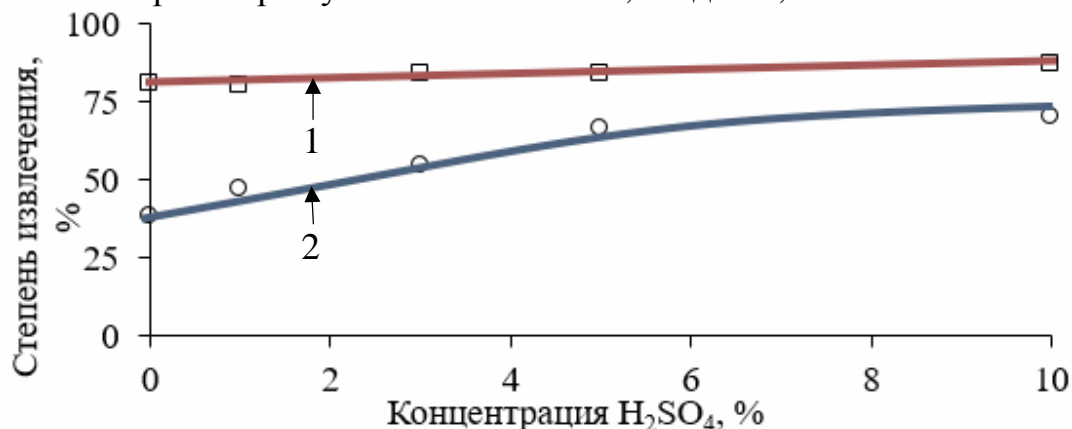


Рис. 1. Зависимость степени извлечения ванадия от добавки карбоната натрия от концентрации серной кислоты: 1 – V_2O_5 , 2 – NiO

Для повышения извлечения V_2O_5 провели окислительный обжиг с карбонатом кальция с целью перевода ванадия в кислоторастворимые ванадаты кальция:



Стехиометрическое количество $CaCO_3$ по реакции (1) составляет 5,28%. Навеску золы с добавкой 6-15% $CaCO_3$ обжигали в муфельной печи при 750-1100°C в течение 60 мин. Огарок выщелачивали 3%-ной серной кислотой при комнатной температуре и соотношении Т:Ж=1:10 в течение 60 минут.

Установлено, что при 9% $CaCO_3$ в интервале температур 750-950°C извлечение ванадия растёт V_2O_5 с 83,5% до 93,4%, а при дальнейшем повышении до 1100°C падает до 67,7%. При добавке 15% $CaCO_3$ результаты похожи – рост с 84,9% при 750°C до 90,9% при 950°C и дальнейшее падение до 63,8% при 1100°C. Никель переходит в труднорастворимый феррит никеля $NiFe_2O_4$ и практически не извлекается в раствор.

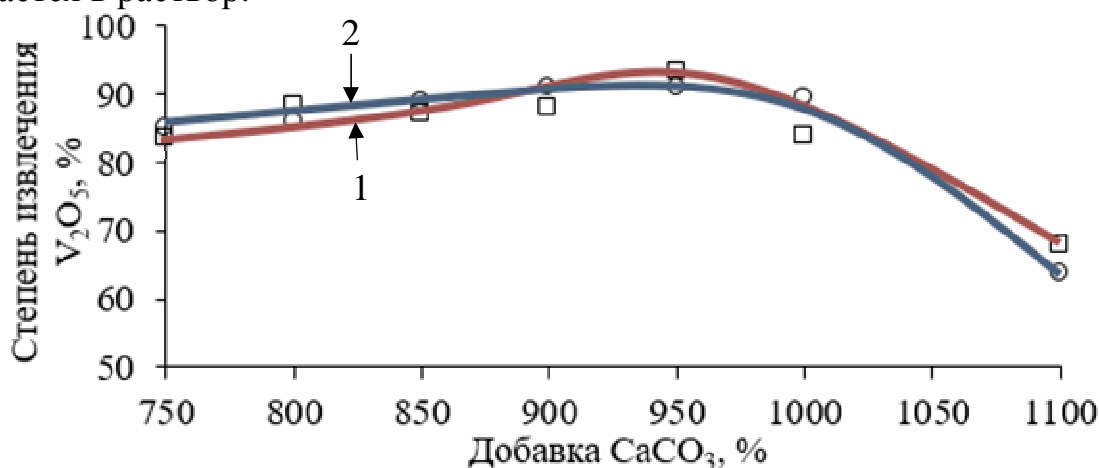


Рис. 2. Зависимость степени извлечения ванадия от температуры окислительного обжига при различной добавке карбоната кальция: 1 – 9% $CaCO_3$, 2 – 15% $CaCO_3$

В результате проведённых исследований установлено, окислительный обжиг позволяет селективно извлекать в раствор около 93,4% V_2O_5 .

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «УМНИК» по договору № 14916ГУ/2019 от 19.12.2019.

Список литературы

1. Шпирт М.Я., Хаджиев С.Н. Микроэлементы в нефтях и продуктах их переработки. – М.: Наука, 2012. – 219 с.
2. Годовой отчёт Мурманской ТЭЦ за 2018 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.murmantec.com URL: https://www.murmantec.com/investors/reports_1.
3. Мизин В.Г., Рабинович Е.М., Сирина Т.П., Дробош В.Г., Рабинович М.Е., Красненко Т.И. Комплексная переработка ванадиевого сырья. – Екатеринбург: Российская академия наук. Уральское отделение, 2005. – 415 с.
4. Сирина Т.П., Мизин В.Г., Рабинович Е.М., Слободин Б.В., Красненко Т.И.. Извлечение ванадия и никеля из отходов теплоэлектростанций. – Екатеринбург: Российская академия наук. Уральское отделение, 2001. – 234 с.
5. Kashekov D.Yu, Goncharov K.V., Sadykhov G.B., Olyunina T.V. Processing of fuel oil ash from thermal power plant with extraction of vanadium and nickel // Non-ferrous Metals. 2020, vol. 48, iss. 1, pp. 3-7.
6. Патент №2775452 РФ. Способ извлечения ванадия из зол ТЭС от сжигания мазута. / Садыхов Гусейнгулу Бахлул оглы, К.В. Гончаров, Д.Ю. Кашеков. – Заявка №2775452 от 29.12.2021; опубл. 01.07.2022, Бюл. №19.

Сведения об авторах:

Кашеков Денис Юрьевич – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории №1;

Садыхов Гусейн Бахлулович – д.т.н., заведующий лабораторией №1;

Гончаров Константин Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории №1;

Олюнина Татьяна Владимировна – старший научный сотрудник лаборатории №1;

Смирнова Валентина Борисовна – старший научный сотрудник лаборатории №6.

УДК 66.0

ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗВИТИИ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Федотова М.В., Малофеева У.Н.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Ключевые слова: черное золото, нефть, энергия, добыча, источник энергии, экономический рост, энергопотребление, сырая нефть, нефтегазоносный бассейн, разведанные запасы.

Аннотация: в статье приводится краткий экскурс по развитию нефтедобычи и влиянию нефти как основного источника энергии на развитие общества. Приведены данные по крупнейшим нефтегазовым бассейнам с выделением основных регионов, с указанием лидеров добычи в каждом выделенном регионе. А также указано общее количество добычи нефти в указанный в статье период.

HISTORICAL INFORMATION ABOUT THE DEVELOPMENT OF OIL PRODUCTION AND REFINING

Fedotova M.V., Malofeeva U.N.

Kuban State Technological University, Krasnodar

Keywords: black gold, oil, energy, production, energy source, economic growth, energy consumption, crude oil, oil and gas basin, proven reserves.

Abstract. The article provides a brief overview of the development of oil production and the impact of oil as the main source of energy on the development of society. The data on the largest oil and gas basins with the allocation of the main regions, indicating the leaders of production in each selected region. And also the total amount of oil production in the period specified in the article is indicated.

Термин «нефть», пришедший к нам из персидского языка через турецкое слово «neft», в современном мировом лексиконе стал синонимом общепринятого словосочетания «черное золото» [1]. Объяснение этому термину складывается из понимания что наряду с природным газом нефть является основным источником энергии так необходимому человечеству для развития своей цивилизации.

С того момента, когда добыча нефти встала на промышленную основу, она стала ведущим фактором развития мировой экономики.

Черное золото без преувеличения можно назвать мощным фундаментом благополучия, так как именно нефть в большинстве случаев является одним из ведущих критериев в развитии современного общества. В связи с высокой металлоёмкостью нефтедобычи, она является ведущей отраслью в развитии и совершенствовании технического прогресса, от нее также зависит и дальнейшее развитие всех секторов промышленности, топливно-энергетического комплекса, работа наземного, морского и воздушного транспорта, а также как следствие всего степень комфортабельности человеческой жизни [2].

Как следствие, востребованности нефти в виде нового источника энергии, ее стали искать во всех странах мира, что привело к увеличению числа нефтедобывающих стран. В 20-х годах 20-го века в мире было порядка 24 нефтедобывающих страны, наиболее крупные страны, добывающие нефть на

своей территории – это США, Мексика, Россия, Индонезия, Иран, Румыния. К середине 60-х годов 20-го века в число основных мировых нефтедобывающих стран вошли Венесуэла, Кувейт, Саудовская Аравия, Ирак и Ливия. К 2000 г. число нефтедобывающих стран увеличилось до 93 [2]. Ценность нефти заставляло правительства разных стран вкладываться в разведку и поиск нефти на своей территории, что позволяло бы этим странам сократить закупку нефти, а в некоторых случаях начать ее продажу и переработку, со всеми вытекающими выгодами для данной страны.

К началу 70-х годов 20-го века было добыто около 2 млрд. т сырой нефти, с усовершенствованием технологий добычи и транспортировки нефти к концу 20-го века было добыто уже 3,1 млрд. т сырой нефти. С наступлением 21 века в мире сложилась следующая картина среди стран крупных добытчиков «черного золота» – Россия около 379,6 млн. т, Саудовская Аравия – 366,3 млн. т, США – 286,4 млн. т, Иран – 171,3 млн. т, Китай – 168,8 млн. т, Мексика – 157,9 млн. т, Норвегия – 156,4 млн. т и Венесуэла – 120,0 млн. т.

В XX веке в мире в 10 раз увеличилось энергопотребление. Население на планете Земля увеличилось до 8-и млрд. человек в 2023 году. За 2022 в мире основными странами добывалось 93847,5 тыс. барр. в сутки [3], на мировой рынок жидких углеводородов поступает ежегодно более 2,4 млрд. тонн сырой нефти. Из всего поставленного количества сырой нефти 90% сжигаются в виде различных видов топлива.

В последние годы темпы роста нефтедобычи снизились по результатам политических решений некоторых стран. А также в связи с развитием так называемой восстанавливаемой «зеленой» энергетики. Повышением цен на нефть заставило страны мира проводить политику энергосбережения. Ужесточение экологических и экономических тенденций в мире заставили увеличить использование природного газа в тех отраслях, где это возможно.

На сегодняшний день в различных источниках приводятся разные цифры по доказанным извлекаемым запасам нефти в мире в среднем более 200 млрд. тонн.

На сегодняшний день в мире геологи выявили более 600 нефтегазоносных бассейнов и обследовали большую их часть [4]. На основе проведенных исследований реально перспективные на нефть (и природный газ) территории занимают, по разным оценкам, от 10 до 60 млн. км². Что позволяет провести оценку по запасам сырой нефти в мире в пределах от 250 до 500 млрд. т. В некоторых источниках приводятся большие цифры около 800 млрд. т, но в этом случае в расчете учитываются все виды нефти (обычная + тяжелая нефть). Тяжелая нефть – содержащаяся в битуминозных песках и нефтяных сланцах, на сегодняшний день не освоена в промышленных масштабах, как обычная нефть [4].

Расположение разведанных запасов нефти в мире показано на рисунке 1. Данная карта не раз менялась, и ее создание еще продолжается, т.к. поиски нефти не прекращаются. Она еще не раз поменяется по мере открытия крупнейших нефтегазоносных бассейнов в таких регионах как Юго-Западная Азия, Северная и Западная Африка, Латинская Америка, Восточная Европа и странах СНГ, Азии и Океании.

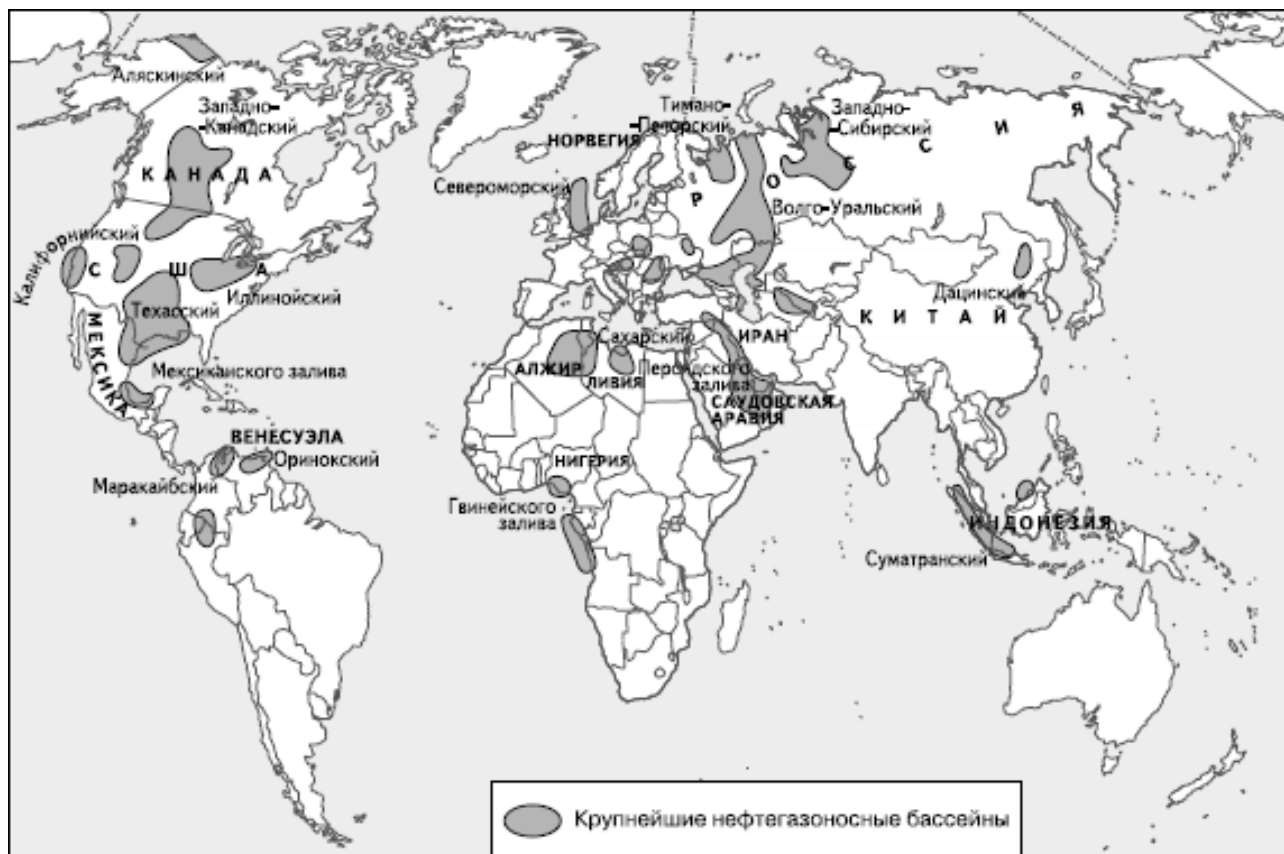


Рис. 1. Крупнейшие нефтегазоносные бассейны мира

На сегодняшний день первое место занимают богатейшие нефтегазоносные бассейны, расположенные в Персидском заливе и прилегающих частях Аравийского полуострова и Иранского нагорья. При подтвержденных разведанных запасах сырой нефти в объеме более 100 млрд. т, одна эта территория содержит более половины мировых запасов, создав тем самым самое крупное месторождение нефти на нашей планете.

Самые богатые нефтью страны Ближнего и Среднего Востока – 66,5% ее мировых запасов. В Саудовской Аравии – 35,51 млрд. т, в Ираке – 15,41 млрд. т, в Кувейте – 12,88 млрд. т, в Абу-Даби – 12,63 млрд. т, в Иране – 12,15 млрд. т. Суммарные запасы нефти в этих странах стран оцениваются в 95% от всех запасов региона в целом.

Второе место по запасам сырой нефти занимает Северная и Латинская Америка. На данных территориях находится порядка 14,57% мировых запасов «черного золота». Лидерами по запасам «черного золота» являются такие страны, как Венесуэла – 10,53 млрд. т, Мексика – 3,87 млрд. т и США – 2,98 млрд. т.

Третье место занимает Африка, здесь расположено более 7,3% мировых запасов. Лидеры данного региона по запасам сырой нефти Ливия – 4,04 млрд. т, Нигерия – 3,08 млрд. т и Алжир – 1,26 млрд. т.

Восточная Европа и страны СНГ располагаются на 4-е месте в мире по запасам нефти с 5,7% мировых запасов. Лидером региона является Россия – 6,65 млрд. т, Казахстан – 740 млн. т, Румыния – 200 млн. т нефти.

На Азию и Океанию приходится порядка 4,3% мировых запасов сырой нефти. Лидером региона является Китай со своими 55%.

На Западную Европу приходится около 2% от мировых запасов нефти. Лидер региона Норвегия – 1,29 млрд. т, второе место – Великобритания со своими 25%.

Однако по мере сокращения доказанных запасов цены на нефть возрастают. Появляются новые, более прогрессивные технологии нефтедобычи. Поэтому история добычи нефти пишется и будет писаться еще долгие годы пока человечество не найдет такой же источник энергии или более лучший.

Список литературы

1. Стефанович Н. Горящее золото [Электронный ресурс] // Вокруг света. – 2006. – Режим доступа: <https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/156/>
2. Добыча сырой нефти в странах с 1965 по 2022 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://topic.ru/dashboards/energy/hydrocarbons/crude-oil-production/>
3. Алифирова Е. ЕІА: спрос на нефть в мире в конце 2022 г. и начале 2023 г. усилится в связи с замещением газа в генерации в Европе. 08.09.2022 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/finance/750056-eia-spros-na-neft-v-mire-v-kontse-2022-g-i-nachale-2023-g-usilitsya-v-svyazi-s-zameshcheniem-gaza-v-/>
4. Динамика мировой нефтегазодобычи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://helpiks.org/8-7952.html>.

Сведения об авторах:

Федотова Марина Владимировна – старший преподаватель;
Малофеева Ульяна Николаевна – студент.

CUPRIAVIDUS NECATOR И ПРОИЗВОДСТВО ИМ ПОЛИГИДРОКСИАЛКАНОАТОВ НА МЕЛАССЕ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

Иванова Д.А., Гвоздева В.Д.

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

Ключевые слова: Cupriavidus Necator, пластик, полигидроксиалканоаты (ПГА), патока свекловичная.

Аннотация. В работе рассматривается штамм бактерии вида Cupriavidus Necator B-10646 и меласса сахарной свеклы как ведущий углеродный субстрат для производства биоразлагаемых полигидроксиалканоатов (ПГА). Рассматривается возможность продуктивного синтеза разлагаемых ПГА из свекловичной мелассы–сложного сахаросодержащего субстрата, являющегося крупнотоннажным отходом сахарной промышленности. Исследуются свойства ПГА, синтезированных Cupriavidus Necator B-10646 из гидролизата мелассы сахарной свеклы.

CUPRIAVIDUS NECATOR AND ITS PRODUCTION OF POLYHYDROXYALKANOATES ON SUGAR BEET MOLASSES

Ivanova D.A., Gvozdeva V.D.

Tambov State Technical University, Tambov

Keywords: Cupriavidus Necator, plastic, polyhydroxyalkanoates (PHA), beet molasses.

Abstract. The paper considers the bacterial strain of the species Cupriavidus Necator B-10646 and sugar beet molasses as the leading carbon substrate for the production of biodegradable polyhydroxyalkanoates (PHA). The possibility of productive synthesis of decomposable PHAs from beet molasses, a complex sugar-containing substrate that is a large-tonnage waste of the sugar industry, is considered. The properties of PHA synthesized by Cupriavidus Necator B-10646 from sugar beet molasses hydrolysate are investigated.

В течение последних нескольких десятилетий, благодаря быстрому экономическому росту и непрерывному улучшению качества жизни, значительно возрос спрос на пластмассовые изделия. Подобные обычные пластиковые продукты в основном изготавливаются из нефтепродуктов, что объясняется их невысокой стоимостью производства и отлично оптимизированным процессом изготовления. Однако, учитывая, что на производство пластмасс из нефти приходилось 12% от мирового потребления нефти, стандартное производство пластмасс стало сталкиваться с глобальными экологическими вызовами [1], такими как истощение невозобновляемых ресурсов и масштабное загрязнение окружающей среды. Кроме того, вследствие продолжительного периода естественного разложения пластиков из нефти (который может составлять от десятилетий до столетий), активное использование пластиковых продуктов из нефти приводит к нарушению стабильности природных экосистем и ряду серьезных проблем, включая явление «белого загрязнения» и проблему микропластика, как в наземных, так и в водных средах. Вследствие этого назрела острая необходимость в поиске подходящей альтернативы пластиковым продуктам из нефти для обеспечения устойчивого производства и применения пластика. Разлагаемые полигидроксиалканоаты рассматриваются как реальный

кандидат на постепенную замену неразлагаемых синтетических полимеров, которые в настоящее время широко используются.

По сравнению с обычными пластиками, получаемыми из нефти, полигидроксиалканоаты разрушаются в аэробных/анаэробных условиях и являются биосовместимыми и биоразлагаемыми. Таким образом, эти биополимеры являются перспективными материалами XXI века для самых разных применений: от сельского хозяйства до фармакологии и биомедицины [2].

Однако сравнение ПГА с другими эквивалентными коммерциализированными материалами (например, синтетические полимеры или нефтехимические пластики) показывает, что ПГА достаточно дорогие материалы. Хотя технология культивирования и процесс экстракции полимера с каждым годом совершенствуются, в промышленном масштабе производство ПГА пока не может соревноваться с синтетическими пластиками из-за высокой стоимости субстратов для культивирования.

Полигидроксиалканоаты (ПГА) – термопластические полиэфиры, синтезируемые различными бактериями в качестве внутриклеточного запасного материала в условиях имитирования ростопитательными элементами (например, азотом, фосфором) и при избыточном содержании источника углерода. Это семейство полимеров с разным химическим составом, разными основными свойствами, получаемыми из различных углеродных субстратов, в том числе из отходов [3]. Такие свойства, как устойчивость к ультрафиолетовым лучам, термопластичность, позволяют доступными методами перерабатывать ПГА в специализированные продукты из различных фазовых состояний (растворы, эмульсии, порошки и расплавы).

Cupriavidus necator (также известный в литературе как *Wautersia eutrofa*) считают одним из наиболее исследуемых видов бактерий среди ПГА-продуцирующих микроорганизмов—это грамотрицательная, факультативно хемоавтотрофная бактерия, которую обычно выделяют из почвы и пресной воды. *C. necator* хорошо адаптирован к постоянным изменениям окружающей среды. Эта бактерия может жить как "гетеротроф", когда питается органическими веществами, так и как "автотроф", когда питается неорганическими веществами, например, водородом. *C. necator* может дышать кислородом или без кислорода, преобразуя нитраты и нитриты в азотный газ. В автотрофных условиях *C. necator* фиксирует углерод через редуکتивный пентозофосфатный путь.

Определены следующие морфокультуральные характеристики *Cupriavidus necator*.

Клетки представляли собой подвижные палочки размером $0,3-0,5 \times 1,2-2,0$ мкм, образующие на пептонном агаре гладкие колонии кремового цвета. Колонии имели очевидную одноцентровую морфологию, а края колоний были гладкими. Диаметр 7-дневных колоний составлял 3-5 мм, их количество на чашку Петри не более 10.

Представители таксона *Cupriavidus* характеризуются высоким содержанием ПГА, что связано с мощной внутриклеточной системой синтеза резервных полигидроксиалканоатов и особенностями физиологии роста.

Потенциально сырьем для производства ПГА могут служить субстраты с различной степенью восстановления, энергетической ценностью и стоимостью.

Отходы сахарного производства (тростниковая и свекловичная патока)-недорогой источник углерода, содержащий помимо сахаров витамины и целый ряд минеральных элементов. Основным сахаром в патоке является дисахарид сахароза, и не все продуценты могут превращать ее в доступные клеткам соединения. Поэтому перед использованием патоку необходимо подвергнуть дальнейшей обработке.

В результате переработки происходит гидролиз сахарозы и изменяется содержание компонентов, входящих в состав исходной патоки (табл. 1). Помимо глюкозы и фруктозы, в зависимости от способа гидролиза (кислотный, щелочной, ферментативный) и условий (жесткий или мягкий) в патоке могут образовываться токсичные примеси, что отрицательно влияет на процесс биосинтеза. В результате очень высокого содержания соединений азота в патоке, что отрицательно влияет на ее накопление в клетках ПГА, необходимо корректировать концентрацию азота, а также количество минеральных элементов [4].

Табл. 1. Химический состав свекловичной мелассы и гидролизата

Тип патоки	Макроэлементы, г/л						
	Na	K	Ca	Fe	Mg	S	N Bcepo
Исходная патока	17.295	44.324	0.107	0.077	0.216	1.563	25.825
Осветленный гидролизат мелассы	17.126	44.324	0.107	0.046	0.216	1.563	25.825
Тип патоки	Микроэлементы, мг/л						
	B	Ko	Cu	Mn	Cнк	Mo	Ni
Исходная патока	6.118	1.050	0.518	15.862	11.424	0.420	4.074
Осветленный гидролизат мелассы	2.856	0.756	0.518	11.704	11.424	0.252	2.758

Для снижения избыточного содержания сахаров и азота, а также устранения дефицита фосфора, отрицательно влияющего на концентрацию биомассы и содержание ПГА, предложены и реализованы контролируемые режимы пополнения периодической культуры бактерий фосфором и глюкозой, обеспечивающие высокую продуктивность, расценки на процедуру [5].

В доступной литературе имеется ограниченное количество публикаций по изучению продукции ПГА на производных патоки представителями *Cupriavidus*. В одной из первых работ этого плана на культуре *Cupriavidus necator* DSM 545 было показано, что небольшая добавка негидролизованной патоки сахарного тростника (3 г/л) к среде, содержащей глюкозу в качестве основного источника углерода, обеспечивает концентрацию биомассы и содержание полимера до 23 г/л и 39% соответственно [6]. Гидролизаты патоки сахарного тростника, полученные различными методами, в том числе щелочным или кислотным гидролизом обеспечивали накопление полимера до 27% в культуре *C. necator* [7]. В культуре природного штамма *Cupriavidus necator* ATCC 25207 оценивали

возможность применения необработанной свекловичной патоки и патоки, гидролизованной кислотой или инвертазой, для продукции ПГА в различных режимах культивирования [8]. При культивировании в колбах на необработанной патоке концентрация биомассы составляла 2,1-3,9 г/л, содержание полимера – 4,4-4,9%. Значения для гидролизованной патоки были выше: 5,5 г/л и 43,2% соответственно.

В целом, учитывая перспективность патоки как потенциального источника углерода при производстве ПГА, а также неоднозначность и большой разброс имеющихся данных, необходимое изучение процессов биосинтеза ПГА в сочетании с методами предварительной обработки патоки приведено в статье [5].

Полученные результаты этой работы и литературные данные позволяют сделать вывод, что патока является перспективным субстратом для производства ПГА, в том числе у высокопродуктивных представителей таксона *Cupriavidus*.

Исследования показали возможность продуктивного синтеза разлагаемых полигидроксиалканоатов из свекловичной патоки – сложного сахаросодержащего субстрата, являющегося крупнотоннажным отходом сахарной промышленности.

Анализ химического состава гидролизата свекловичной патоки показал необходимость корректировки некоторых элементов для баланса с физиологическими потребностями изучаемого бактериального штамма *C. necator*. Б-10646.

Список литературы

1. Lebreton L., Andrady A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal // *Palgrave Commun.* 2019, vol. 5, p. 6.
2. Ansari S. et al. Biomedical applications of environmental friendly poly-hydroxyalkanoates // *Int. J. Biol. Macromol.* 2021, 183, pp. 549-563.
3. Chen G.Q. Plastics completely synthesized by bacteria: Polyhydroxyalkanoates. In *Plastics from Bacteria. Natural Functions and Applications* // Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2010, pp. 17-37.
4. Naheed N., Jamil N. Optimization of biodegradable plastic production on sugar cane molasses in *Enterobacter* // *sp. SEL2. Braz. J. Microbiol.* 2014, vol. 45, pp. 417-426.
5. Kiselev E.G., Demidenko A.V., Shishatskaya E.I. Sugar beet molasses as a potential c-substrate for pha production by *Cupriavidus necator* // *Bioengineering.* 2022, vol. 9, p. 154. doi.org/10.3390/bioengineering9040154.
6. Beaulieu M., Mélinard J., Pandian S., Goulet J. Influence of ammonium salts and cane molasses on growth of *Alcaligenes eutrophus* and production of polyhydroxybutyrate // *Appl. Environ. Microbiol.* 1995, 61, pp. 165-169.
7. Sen K.Y., Hussin M.H., Baidurah S. Biosynthesis of poly (3-hydroxybutyrate) (PHB) by *Cupriavidus Necator* from various pretreated molasses as carbon source // *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2019, 17, pp. 51-59.
8. Ertan F., Keskinler B., Tanriseven A. Exploration of *Cupriavidus necator* ATCC 25207 for the production of poly(3-hydroxybutyrate) using acid treated beet molasses // *J. Polym. Environ.* 2021, 29, pp. 2111-2125.

Сведения об авторах:

Иванова Дарья Александровна – бакалавр;
Гвоздева Валерия Дмитриевна – бакалавр.

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

Макаров Н.А.

Тверской государственной технической университет, Тверь

Ключевые слова: профилировка, пластичность, тонкий лист, кинематически допустимое поле скоростей.

Аннотация. Предложена методика расчета энергосиловых параметров пластической деформации тонколистовой заготовки энергетическими методами с использованием построения кинематически допустимых полей скоростей. Построено два варианта полей скоростей профилировки: непрерывное и поле, состоящее из жестких зон. Инструменты для профилировки лент не определяют жестко величину зоны деформации, а только конечную форму заготовки. При решении вариационными методами этот размер следует выбрать по экспериментальным данным или из условия экстремума мощности. Показано, что мощность, полученная расчетами на 20-40% выше мощности, измеренной экспериментально.

PLASTIC DEFORMATION OF SHEET METAL

Makarov N.A.

Tver State Technical University, Tver

Keywords: profiling, plasticity, thin sheet, kinematically permissible velocity field.

Abstract. A method is proposed for calculating the energy-strength parameters of plastic deformation of a thin-sheet billet by energy methods using the construction of kinematically permissible velocity fields. Two variants of the profiling velocity fields are constructed: a continuous field and a field consisting of rigid zones. Tape profiling tools do not rigidly determine the size of the deformation zone, but only the final shape of the workpiece. When solving by variational methods, this size should be chosen according to experimental data or from the power extremum condition. It is shown that the power obtained by calculations is 12% higher than the power measured experimentally.

Введение. Основным методом решения задач при определении напряжений в области пластической деформации является метод решения дифференциальных уравнений равновесия совместно с условиями пластичности, которые должны соответствовать виду напряженного состояния. В рамках деформационной теории Г. Генки и А.А. Ильюшина связь между компонентами тензоров деформаций и напряжений. При больших степенях деформаций не учитывают упругие деформации, материал считают жесткопластичным и применяют уравнения Леви-Мизеса. Уравнения Прандтля-Рейсса учитывают упругие деформации и с их помощью решались более точные задачи, в которых учтено влияние упрочнения, частичных разгрузок.

Для решения объемных задач необходимо обеспечить выполнение трех уравнений равновесия, условия пластичности и шести уравнений, связывающих компоненты тензоров напряжений и скорости деформации. Объемные задачи решают вариационными методами, методами конечных элементов, граничных интегральных уравнений, методом разложения по параметру нагружения. В последние годы в теории пластичности начали применять методы теории групп Ли.

Определение мощности профилировки. Для расчета энергосиловых параметров профилировки в работе использован метод построения кинематически допустимых полей скоростей, при этом мощность не меньше, чем мощность, соответствующая точному решению, т.е. определяет ее верхнюю границу.

Если происходит изгиб участка листа одновременно по всей его длине (рис. 1), то можно построить поля скоростей [1, 2], соответствующее вращению участка AO вокруг оси O , в то время как зона OB неподвижна. Все деформируемое тело состоит из двух жестких зон, мощность формоизменения равна нулю, а затраты энергии происходят на скольжение по дуге окружности радиусом $(0,5h)$, где h – толщина листа.

При угловой скорости ω мощность равна

$$N = k \cdot (0,5 \cdot h \cdot \omega) \cdot l \cdot \left(\frac{\pi \cdot h}{2} \right); \quad (1)$$

где l – длина деформируемого листа, $0,5\pi \cdot h$ – длина полуокружности, по которой происходит срез.

$$N = 0,25\pi k \omega l h^2 = 0,785k \omega h^2 l \quad \text{или} \quad N = 0,455\delta_T h^2 \omega l \approx 0,46\delta_T h^2 \omega l.$$

Работа A , затрачиваемая для изгиба на угол α , равна $A = 0,46\delta_T \alpha h^2 l$.

В этом случае деформация локализована вблизи зоны изгиба и мощность не зависит от размера « b » (поскольку здесь материал остается жестким). Отметим, что статически допустимое поле напряжений с предельным моментом в пластическом шарнире, равном $M = 0,25 \cdot \delta_T \cdot l \cdot h^2$ дает работу и мощность соответственно формуле (1), но с коэффициентом равным не 0,46, а 0,25, что определяет заниженную величину мощности – ее нижнюю границу.

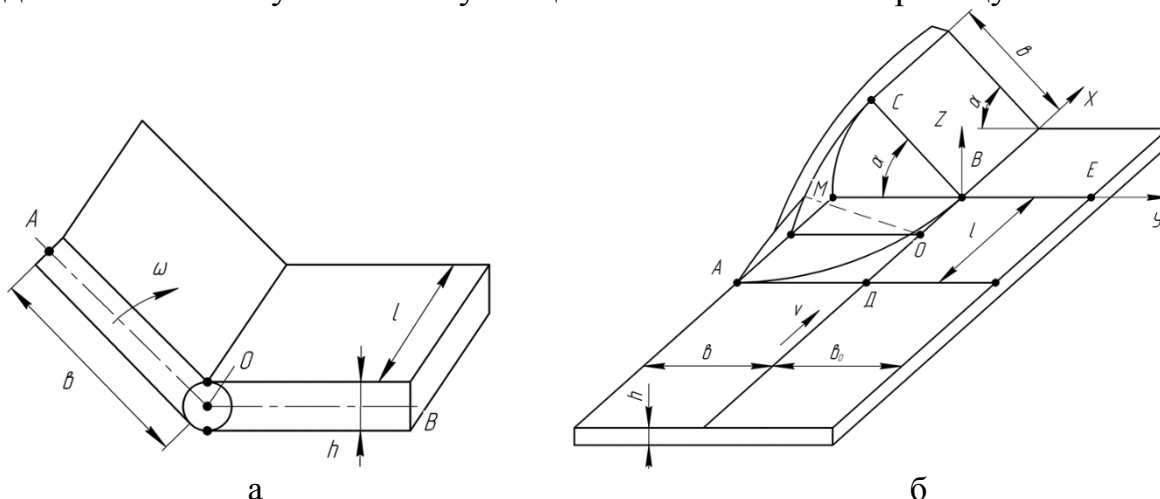


Рис. 1. Схемы деформации листов при изгибе: а – при изгибе по всей длине листа, б – при последовательном изгибе

Такой процесс изгиба листа с вращением жесткой зоны вокруг одной оси по всей длине заготовки применяют на практике, но он существенно отличается от процесса непрерывного формообразования при профилировке. В этом случае лист последовательно перемещается в направлении оси x (рис. 1) со скоростью V , и его элементы в зоне деформации длиной l деформируются последовательно

так, что зона пластической деформации ABC перекрывает все сечение размерами $b \times h$. Точное решение должно определять поле скоростей, последовательно переводящее профиль плоского листа AD в профиль CBE , состоящий из двух плоских участков CB и BE , повернутых относительно друг друга на угол α .

Поскольку точное решение для схемы деформации на рисунке 1,б найти сложно, примем поле скоростей, определяемое тем, что участок листа длиной « b » (AB – рис. 1) при прохождении зоны деформации длиной « l » целиком последовательно поворачивается. Поскольку обжатия листа по толщине не происходит, то принимаем скорость движения вдоль оси x , т.е. V_x постоянной величиной, а скорости V_y и V_z должны быть такими, что по мере перемещения участка прямой от BE до BC происходит его поворот относительно оси x . Промежуточное положение показано на рисунке 1,б пунктирной линией OM . В цилиндрической системе координат можно записать для такого поля скоростей

$$V_x = V = const; V_\rho = 0; V_\theta = \frac{2V}{l} \alpha \rho (x + l), \quad (2)$$

где $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$; l – длина зоны деформации.

Схема принятого поля скоростей и годограф скоростей представлены на рисунке 2.

Для данной задачи краевые условия имеют вид $V_x = V$ – в плоскости $x = -l$, $V_\rho = V_\theta = 0$ и в пластической и жесткой зонах, т.е. поле скоростей непрерывно при $x = -l$.

В другой граничной плоскости при $x = 0$

$$V_\rho = 0; V_\theta = 2V \cdot \alpha \cdot \rho \text{ в пластической зоне.}$$

В жесткой зоне скорости равны

$$V_x = const; V_y = V_z = 0,$$

т.е. нормальная компонента скорости V_x в плоскости $x = 0$ непрерывна, а тангенциальная V_θ – терпит разрыв, равный $V \cdot \alpha \cdot \rho$. Здесь показана схема деформации, при которой линия одновременно с перемещением вдоль оси x со скоростью $2V \cdot \alpha \cdot \rho$ вращается с угловой скоростью $\omega = 2V \cdot \alpha$ вокруг оси x . Проекция скоростей всех точек на ось x постоянны и равны V , поэтому точки годографа расположены на отрезке ED , перпендикулярном OE . Отрезок DE равен скорости вращения точки D (и максимальному разрыву тангенциальной компоненты скорости). Точка M , расположенная в центре отрезка DE , соответствует в плоскости годографа середине отрезка с теми же обозначениями. Вся зона ABC соответствует отрезку ED в плоскости годографа (рис. 2,б). Принятое поле обеспечивает поворот участка длиной « b » из положения BC в положение DE за время прохождения им вдоль l . Поле, определяемое формулами, соответствует компонентам тензора скоростей деформации.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_\rho = \varepsilon_\theta = 0; \gamma_{\rho\theta} = \gamma_{\rho x} = 0; \gamma_{\theta x} = \frac{2V\alpha\rho}{l^2},$$

а мощность формоизменения равна

$$N_1 = \int_{-l}^0 \int_0^b kHh dx = 0,58 \frac{\sigma_T V b^2 h a}{l},$$

где H – интенсивность тензора скорости деформации, равная в данном случае $\gamma_{\theta x}$.

На границе одной из жестких зон при $x = -l$; $V_{\theta} = V_{\rho} = 0$ и поле непрерывно, а на границе второй жесткой зоны при $x = 0$ имеет место разрыв тангенциальной компоненты скорости V_{θ} (вдоль BC – рис. 2) и мощность среза равна

$$N_2 = \int_0^b kV_{\theta} d\rho$$

Расчеты показывают, что $N_2 = N_1$. Границей двух жестких зон шириной b и b_0 может являться только круговой цилиндр с осью вдоль BD (ось x , рис. 2) – радиусом ρ_0 , мощность среза на его поверхности равна

$$N_3 = \int_{-l}^0 \pi k \rho_0 V_{\alpha} dx = \frac{\sigma_T \pi V \alpha h^2}{4\sqrt{3}}.$$

Эта мощность минимальная при наименьшем возможном значении $\rho_0 = 0,55h$ [4]. Полная мощность деформации равна

$$N = 0,58 \sigma_T b h V \alpha \left(2 \frac{b}{l} + 0,78 \frac{h}{b} \right).$$

Как правило, инструменты для профилировки лент не определяют жестко величину l , а только (с некоторой точностью) конечную форму заготовки, так что при решении вариационными методами этот размер следует выбрать по экспериментальным данным или из условия экстремума мощности. Обычно принимают $l = k_l b$, при этом коэффициент $k_l = 2 - 8$ см [3], но здесь примем заниженную величину $k_l = 2,0$ для того, чтобы получить завышенную величину мощности, и тогда получим $N = 0,58 \sigma_T b h V \alpha \left(1 + 0,78 \frac{h}{b} \right)$, а момент на валке

$$M = 0,58 \sigma_T b h V \alpha \left(1 + 0,78 \frac{h}{b} \right).$$

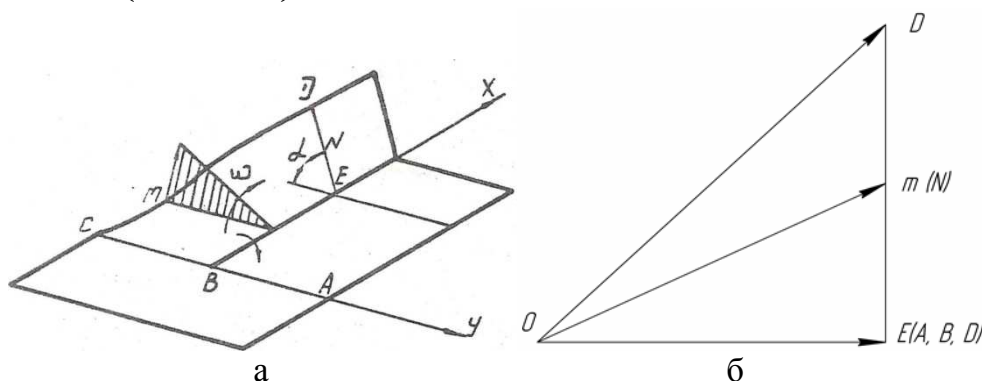


Рис. 2. Схема деформации при профилировке: а – принятое поле скоростей; б – годограф

Если $k_l = 4,0$, то

$$N = 0,29\sigma_T b h V \alpha \left(1 + 1,56 \frac{h}{b} \right),$$

где R – средний радиус рабочих валков.

Приняв, что исходный лист подают в положении, соответствующем середине формируемой полки BC (рис. 2), получим горизонтальную проекцию длины контакта с валками $l_K = \sqrt{R \cdot b \cdot \sin \alpha}$. Тогда можно оценить величину силы

$$P \text{ в виде } P = \frac{M}{2l_k \psi_0}.$$

Приняв коэффициент положения равнодействующей $\psi_0 = 0,5$, получаем

$$P = 0,58\sigma_T h \sqrt{Rb} \frac{\alpha}{\sqrt{\sin \alpha}} \left(0,5k_l + 0,78 \frac{h}{b} \right).$$

Был проведен также анализ кинематически допустимого поля скоростей, состоящего только из жестких зон, так что мощность деформации является суммой мощностей среза вдоль поверхностей, на которых имеют место разрывы тангенциальных компонент скорости.

Кинематически допустимое поле скоростей, состоящее только из жестких зон, приведено на рисунке 3,а. При движении вплоть до линии AB , расположенной вдоль оси y , скорость V направлена вдоль оси x , а скорость V_z в зоне ABC равна V и направлена вдоль оси z . Здесь же на рисунке 3 показан годограф с полюсом в точке O .

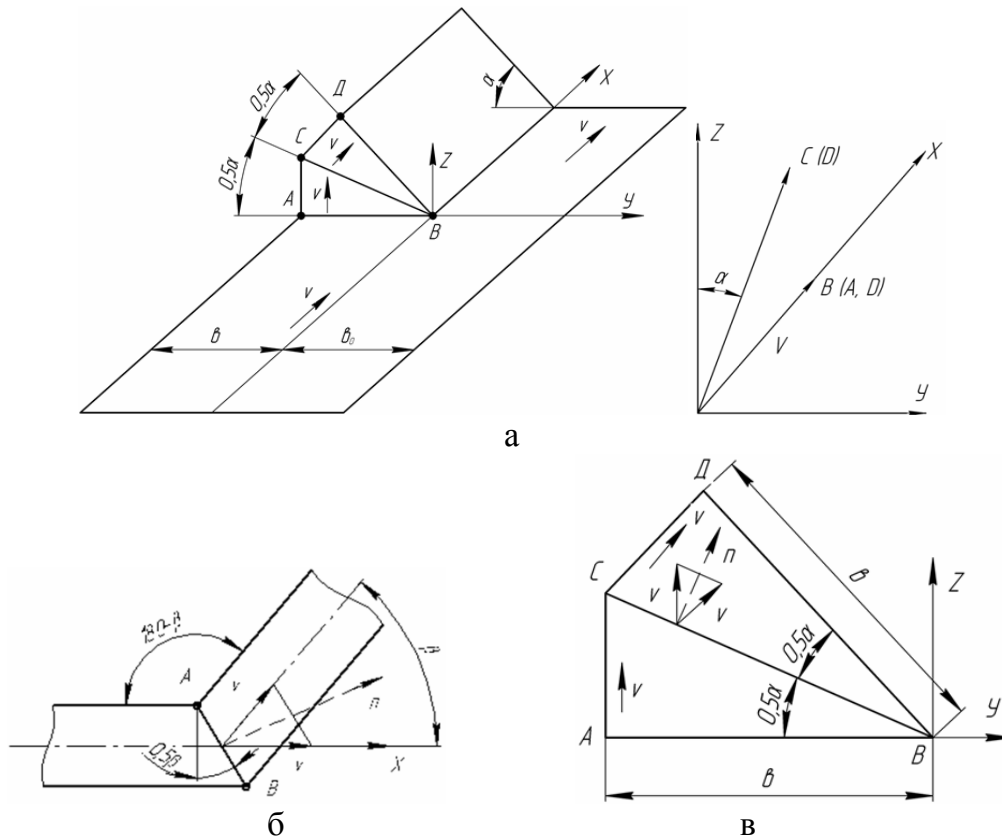


Рис. 3. Схема кинематически допустимого поля скоростей: а – состоящего из жестких зон; б – схема границ жестких зон; в – схема изменения скоростей на границе жестких зон

При изменении направления движения листа на угол β , рисунок 3, проекции скорости на нормаль « n » к плоскости скольжения с AB , должны быть равны, т. е. плоскость AB должна быть такой, чтобы нормаль к ней (« n » рис. 3б, в) совпадала с биссектрисой угла β между векторами V точнее между их положениями до и после прохождения граничной линии AB . Скорость на годографе после прохождения плоскости AB направлена вдоль оси z .

Разрыв тангенциальной компоненты скорости на плоскости раздела равен $\Delta V = 2V \sin \frac{\beta}{2}$, а длина участка AB равна $\frac{h}{\cos(0,5\beta)}$ (рис. 3), так что мощность среза вдоль AB составит

$$N = \frac{2KbhV \sin(0,5\beta)}{\cos(0,5\beta)} = 2kVbh \tan \frac{\beta}{2}.$$

В данном случае, когда происходит поворот на угол $\beta = 90^\circ$, $N = 2kVbh$.

В зонах изгиба на 90° твердость увеличивается на 36-38% (а при изгибе на 180° – на 43-46%). Предел прочности σ_b возрастает на 16% по ширине стенки, а в местах изгиба на 26-31% при радиусе 5 мм.

Предел текучести возрастает в среднем на 23-26%, а на участках локального сильного изгиба на 77-90%.

Упрочнение происходит тем сильнее, чем меньше исходное упрочнение металла. В [4] приведены также данные по увеличению предела прочности для алюминиевых сплавов на 4-15%, а предела текучести на 30-55%, а для углеродистой стали σ_b на 14-34% и σ_T на 17-37%.

Предел текучести возрастает сильнее, чем предел прочности. Обычно зависимость $\sigma_T(\epsilon)$ представляется степенной функцией [4]:

$$\sigma_T = \sigma_o \epsilon^n + \sigma_{T_o},$$

где σ_o , n , σ_{T_o} – постоянные величины.

Для углеродистых конструкционных сталей, согласно этим данным, $\sigma_o = 16$ МПа, $n = 0,76$, так что увеличение предела текучести

$$\frac{\sigma_T - \sigma_{T_o}}{\sigma_o} = \frac{\sigma_o}{\sigma_{T_o}} \epsilon^{0,76}.$$

Возрастание σ_T в среднем на 20-30% при этом соответствует деформации (при $\sigma_{T_o} = 250$ МПа) $\epsilon = 5,7 \div 8,8\%$.

Средние по длине полки величины ϵ достигают 9%, а в локальных зонах изгиба до 22-32%, что следует учитывать при расчетах.

В работе [4] приведены данные о возможности увеличения предела текучести с 320 МПа на 51,5% и от 250 МПа на 78,5% при изгибе образцов из Ст3 на угол 90° и о среднем увеличении σ_T , σ_b на 17-28%, что не противоречит данным, приведенным выше.

В области BCD (рис. 3) скорость V направлена параллельно линии CD , так что поле является стационарным. Подобное решение может иметь место, только если BC является биссектрисой угла ABD , так как только в этом случае

равны проекции на нормаль и плоскости разрыва скоростей двух векторов скоростей. Если этот угол равен α , рисунок 3 а, в, то разрыв тангенциальной компоненты скорости равен $\Delta V = 2V \sin \frac{\alpha}{2}$ а плоскость скольжения проходит через линию BC и параллельна x (перпендикулярна плоскости чертежа, рис. 3,в). Площадь среза равна $hl_{BC} = \frac{b \cdot h}{\cos(0,5\alpha)}$, а мощность

$$N = 2kVbhtq \frac{\alpha}{2}.$$

Наконец, на линии BD (рис. 3 а,в) происходит поворот вектора скорости на угол 90^0 и после этого скорость вновь параллельна оси x .

Плоскость среза перпендикулярна биссектрисе угла между векторами скорости. Как показано выше, мощность при этом равна

$$N = 2k \cdot V \cdot b \cdot h.$$

Следует учесть и мощность среза на площадке по плоскости xz (среза относительно недеформируемой жесткой части листа при $y > 0$, рис. 3,б) площадью $(0,5h^2)$, и при $\Delta V = 2V \sin 45^\circ$; $N = 0,71KVh^2$.

Полная мощность для принятого поля скоростей равна

$$N = 2kVbh \left(2 + tq \frac{\alpha}{2} + 0,36 \frac{h}{b} \right).$$

В другом виде можно записать мощность

$$N = c\sigma_T Vbh,$$

где c – функция двух безразмерных аргументов $\left(\frac{h}{b}\right)$ и α .

При этом в большинстве практических задач величиной $0,36\left(\frac{h}{b}\right)$ можно пренебречь.

При формовке профиля с поворотом листа на угол $\alpha = 90^\circ$, $c = 2 \cdot \sqrt{3} \approx 3,46$ $N = 3,46\sigma_T Vbh$ и мощность $N = 3,46\sigma_T Vbh$. При $\alpha = 45^\circ$, $c = 2,8$. Если профилируют прямоугольный угловой профиль с поворотом его обоих (равных « b ») полок на углы $\alpha = 45^\circ$, то мощность

$$N = 5,6\sigma_T Vbh.$$

Для величины мощности не безразлично, как сформировать уголок из листа – поворотом обоих полок на 45^0 или одной из них на 90^0 , в первом случае мощность в 1,62 раза больше. Это является отличием от схемы одновременной формовки по всей длине, показанной на рисунке 1, где работа зависит только от изменения угла между полками, а мощность только от угловой скорости, а какую полку (или обе) вращать не имеет значения.

Сравнение формул показывает существенное различие между процессом формообразования с изгибом по всей длине одновременно и последовательным изгибом листов. В первом случае мощность пропорциональна величине h^2 , а во втором h . В первом случае мощность не зависит от величины b , а во втором

является функцией этой величины. При последовательной формовке из листа уголка с разными полками b и b_o (пусть $b < b_o$), мощность при изгибе полки меньшей ширины будет в $\left(\frac{b_o}{b}\right)$ раз меньше, а при одновременной формовке уголка по всей длине профилировки это не имеет значения – величины мощности равны, т.к. в формулу не входят ни b , ни b_o , а только величина l [3].

При деформации концов заготовок произойдет переход к схеме деформации по всей длине, и мощность по формуле будет меньше. Это произойдет при длине конца заготовки l_K

$$l_K \leq \frac{cVb}{0,46\omega h}.$$

Время деформации составляет $\tau = \frac{b}{V}$ и $\omega = \frac{\alpha}{\tau} = \frac{\alpha V}{b}$, получим $\frac{l_K}{b} \leq \alpha \left(\frac{b}{h}\right)$.

При изгибе на прямой угол $l_K = 4,78 \left(\frac{b^2}{h}\right)$, т.е. это довольно значительная

величина, например, при $\frac{b}{h} = 10$, $l_K = 47,8b$ и при прокатке коротких заготовок длиной менее l_K схема одновременного изгиба даст меньшую мощность. При деформации задних концов заготовок, при их длине менее l_K , мощность будет плавно уменьшаться (пропорционально величине l) до нуля, изменится и схема деформации, которая будет локализована у зоны изгиба, а не по всей ширине зоны листа, равной b [5].

Важным является вопрос о выборе среднего значения сопротивления деформации (предела текучести), которое в общем случае зависит от степени, скорости деформации (ε и $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\tau}$) и температуры.

При высоких температурах надо учитывать все эти три фактора. При холодной профилировке, обычно, принимают σ_T , как функцию степени деформации. Выберем; среднюю величину ε на основе имеющихся экспериментальных данных, приведенных в работе [4]. В этой работе экспериментально показано, что при изгибе полок на 45° образуется прямоугольный угловой профиль, в котором упрочнение, связанное с увеличением параметров σ_b и σ_T , происходит по всей его ширине, что подтверждает тот факт, что пластическая деформация имеет место по всей ширине заготовки, а не только вблизи угла, как при одновременном изгибе по длине, поворотом их на угол 90° относительно двух недеформируемых участков b_1 . Аналогично осуществляется и деформация центрального участка с его поворотом на угол 45° (рис. 4). При этом, используя формулы получаем

$$N = 0,91\sigma_T V b_1 h \left(2 + \frac{b_2}{b_1} + 3,14 \frac{h}{b} \right).$$

Для основного сечения заготовок $b_1 = 0,12$ см, $b_2 = 0,14$ см, $h = 0,04$ см, $V = 0,8$ м/с, $\sigma_T = 300$ МПа, $(300 \cdot 10^6) \text{ Н} \times \text{м}^2$.

$$N = 0,91 \cdot 300 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 10^{-4} \left(2 + \frac{0,14}{0,12} + 3,14 \frac{0,4}{1,2} \right) = 440 \text{ Вт.}$$

Мощность профилировки составляет $N_q = 0,44$ кВт. Момент на валках при $R = 5,0$ см равен $M = 440 \cdot \frac{5 \cdot 10^2}{0,8} = 27,5 \text{ Н} \times \text{м}^2$. При средней величине КПД, равной 0,785, требуемая мощность двигателя составляет 0,56 кВт.

Экспериментальные исследования позволили получить зависимости $M(h)$ для профилировки заготовок с величинами: $\sigma_T = 300$ МПа и $\sigma_T = 500$ МПа. Эти данные представлены на рисунке 5, где диапазоны, соответствующие экспериментальным данным, заштрихованы. Пунктиром здесь показаны линии, полученные на основании теоретических расчетов. Полученные данные, в основном, подтверждают близость зависимостей $M(h)$ к линейным. Незначительные отклонения возникают при $h > 0,7$ мм. В целом, опытные данные на 20-40% ниже теоретических, что согласуется с тем, что избранный метод расчета определяет верхнюю границу величин и моментов деформации.

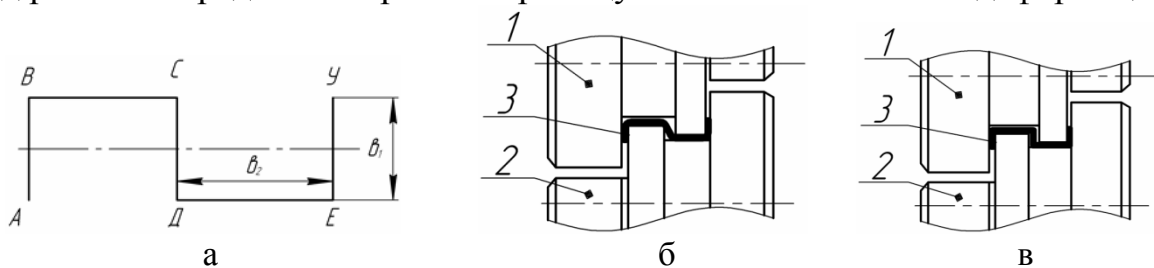


Рис. 4. Схема калибровки валков профилировочного стана: а – сечение профиля металлорукава; б – калибр в клетке 1; в – калибр в клетке 2

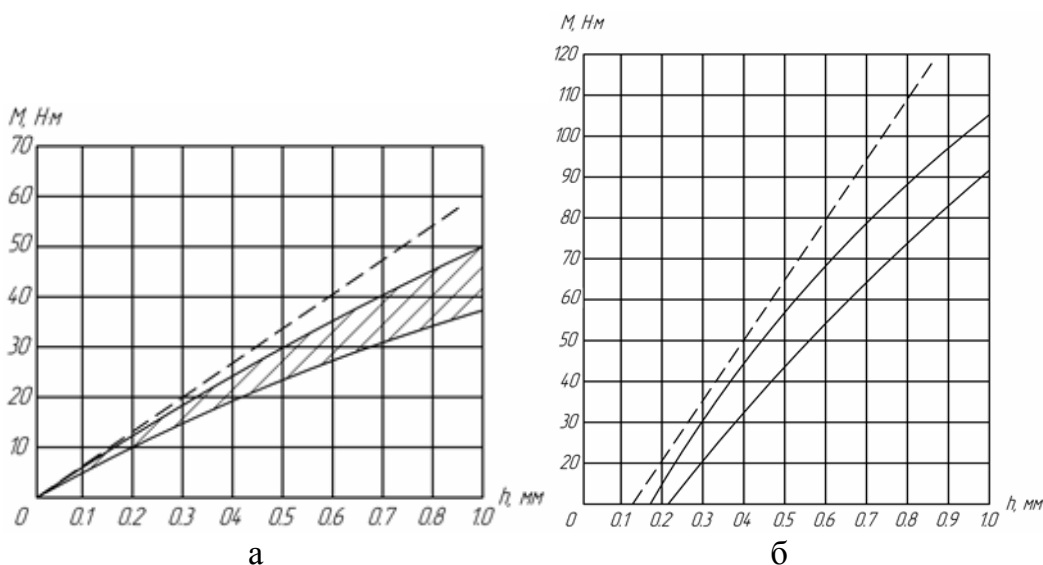


Рис. 5. Графики функций $M(h)$: а – для ленты при $\sigma_T = 300$ МПа ; б – для ленты при $\sigma_T = 500$ МПа

Заключение. Метод расчета энергосиловых параметров профилировки лент с учетом влияния жестких внешних зон подтвердил, что на величину мощности влияет способ формирования уголка из листа: при повороте обоих полок на 45^0 мощность в 1,62 раза больше, чем одной из них на 90^0 . Работа сил деформации при одновременной формовке по всей длине заготовки зависит только от изменения угла между полками, а мощность - от угловой скорости.

Результаты измерений в производственных условиях подтвердили, что мощность профилировки на 20-40% ниже теоретических, что согласуется с тем, что избранный метод расчета определяет верхнюю границу величины моментов деформации.

Список литературы

1. Brovman T.V. Nonstationary process plastic deformation in bending of workpieces // The scientific heritage. Budapest, Hungary. 2019, no 36, pp. 55-59.
2. Бровман Т.В. Механизация технологического процесса изготовления металлорукавов // Тяжелое машиностроение. – 1991. – № 12. – С. 27-29.
3. Бровман Т.В. Гибкая производственная система для изготовления металлорукавов // Механизация и автоматизация производства. – 1987. – №8. – С. 8-9.
4. Бровман Т.В. Определение сопротивления деформации при прокатке // Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». – 2023. – №1. – С. 17-21.
5. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.

Сведения об авторе:

Макаров Никита Александрович – аспирант.

УДК 552.08, 539.217

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРА ПХГ НА БАЗЕ СНИМКОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Химуля В.В., Барков С.О.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Ключевые слова: подземные хранилища газа, рентгеновская томография, пористость, площадь контактов зерен, матрица породы.

Аннотация. В данной работе представлена методика и результаты неразрушающих исследований геометрических и структурных свойств ядра на примере породы-коллектора ПХГ. На основе полученных снимков рентгеновской компьютерной томографии созданы 3D модели породы. С помощью цифрового анализа получены такие характеристики, как пористость, площадь контактов и объем зерен матрицы породы, необходимые для заполнения гидродинамической и геомеханической моделей ПХГ. Знание данных характеристик коллектора важно для описания процессов в пласте, влияющих на эффективность добычи газа и его хранение, а также для разработки новых методов увеличения добычи или повышения безопасности хранения углеводородов.

STUDY OF STRUCTURAL PROPERTIES OF THE UGS RESERVOIR BASED ON X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY IMAGES

Khimulia V.V., Barkov S.O.

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

Keywords: underground gas storage facilities, X-ray tomography, CT analysis, porosity, grain contact area, rock matrix.

Abstract. This paper presents the methodology and results of non-destructive studies of geometric and structural properties of core on the example of UGS reservoir rock. 3D models of the rock were created on the basis of X-ray computed tomography images. Using digital analysis such characteristics as porosity, contact surface area and grain volume of the rock matrix were obtained, which are necessary for filling the hydrodynamic and geomechanical models of UGS. Knowledge of these reservoir characteristics is important for describing processes in the reservoir that affect the efficiency of gas production and storage, as well as for developing new methods to increase production or improve the safety of hydrocarbon storage.

Подземные хранилища газа (ПХГ) позволяют обеспечивать территории страны газом независимо от времени года и прочих условий. ПХГ играют огромную роль из-за особенностей климата и значительной протяженности территории страны, что усложняет транспортировку газа конечным потребителям. Одним из самых главных критериев отбора коллекторов под создание ПХГ являются их высокие фильтрационно-емкостные показатели. Зачастую такие породы обладают низкой прочностью и подвержены значительному деформированию и пескопроявлению. В связи с этим, для эффективного и безопасного создания объектов ПХГ в низкопрочных пластах необходимо проведение широкого спектра предварительных исследований пород-коллекторов. Для создания точных гидродинамической и геомеханической моделей месторождения требуется знание таких характеристик пород как

пористость, проницаемость, прочность, связность порового пространства, распределение пор по размерам, гранулометрический состав, площадь контакта зерен матрицы и т.д. Многие из этих свойств могут быть изучены неразрушающими лабораторными методами, такими как рентгеновская компьютерная томография.

Применение рентгеновской компьютерной томографии (КТ) для анализа керн позволяет изучить внутреннюю структуру породы без разрушения образца. Рентгеновские лучи, проходя через породу, теряют интенсивность в зависимости от ее плотности и улавливаются детектором, создавая пиксельное изображение. После сканирования получается большой объем данных, состоящий из тысяч проекций исследуемого образца, которые затем реконструируются в трехмерную модель [1].

Изображения КТ были получены на высокоразрешающем микротомографе ProCon CT-MINI Института проблем механики РАН [2]. Полученный набор данных реконструировался с помощью ПО VGstudio, после чего обработка и бинаризация снимков проводилась в ПО GeoDict [3]. На рисунке 1,а представлена часть исходного изображения КТ, на рисунке 1,б показан результат обработки снимка (применение корректировки оттенков серого, NLM-фильтрации), на рисунке 1,в показан результат сегментации (красным – материал, белым – поры).

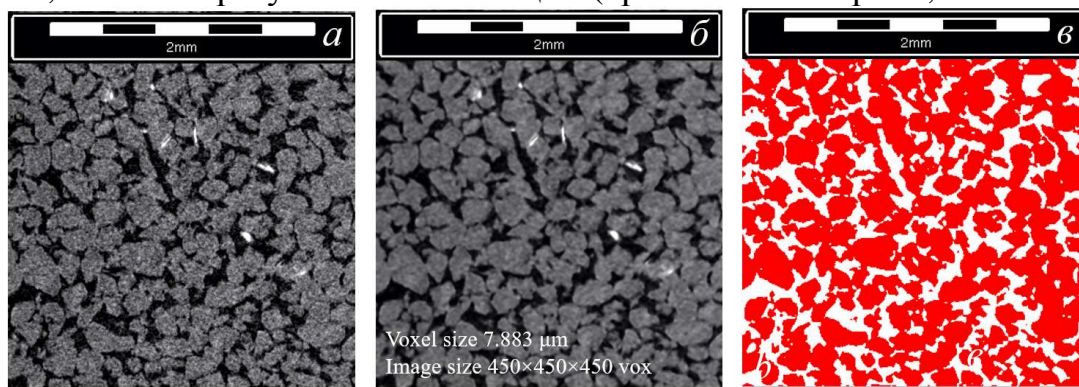


Рис. 1. Результаты проведенного КТ исследования и получения 3D модели

Для измерения пористости производится подсчет вокселей материала и пор, после чего находится их отношение. Для исследуемых пород пористость составила около 30%, что находится в хорошем соответствии с натурными данными и показателями водоносных пластов. С целью измерения площади поверхности контакта зерен и изучения характеристик отдельных зерен, слагающих матрицу породы, применялся алгоритм Identify Pores пакет PoroDict [4]. Результаты выделения отдельных зерен из состава матрицы на базе созданных моделей показаны на рисунке 2.

По итогам анализа получены значения объемов, площади поверхности, периметра, формы каждого зерна. Далее новая модель с разделенными зернами используется для анализа контактной поверхности. На основе информации о количестве контактов (28814 шт) между зернами и площадях контактов для каждого зерна, находится общая площадь поверхности контакта зерен, которая составила $158.65 \times 10^{-6} \text{ м}^2$.

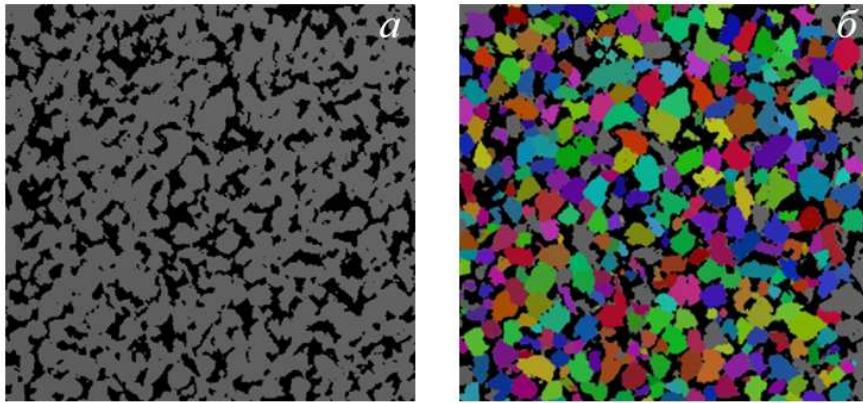


Рис. 2. Результат выделения зерен матрицы

В данной работе представлено описание методики и результаты исследований геометрических и структурных свойств керна на примере породы-коллектора ПХГ. На основе полученных снимков рентгеновской компьютерной томографии созданы 3D модели породы. С помощью цифрового анализа получены такие характеристики как пористость, площадь контактов и объем зерен матрицы породы, необходимые для наполнения гидродинамической и геомеханической моделей ПХГ. Знание данных характеристик коллекторов важно для описания процессов в пласте. Они составляют основу для определения проницаемости, связности пор, прочности и других параметров, которые влияют на эффективность добычи углеводородов и их хранение и необходимы при разработке новых методов увеличения добычи или повышения безопасности хранения углеводородов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ проект № 22-11-00273.

Список литературы

1. Zhang Pengfei, Lu Shuangfang, Li Junqian, Zhang Ping, Xie Liujuan, Xue Haitao, Zhang Jie. Multi-component segmentation of X-ray computed tomography (CT) image using multi-Otsu thresholding algorithm and scanning electron microscopy // Energy Exploration & Exploitation. 2017, vol. 35, no. 3, pp. 281-294. DOI: 10.1177/0144598717690090.
2. Химуля В.В., Барков С.О. Анализ изменения внутренней структуры низкопроницаемых пород-коллекторов средствами компьютерной томографии при реализации метода направленной разгрузки пласта // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2022. – № 4(39). – С. 27-42.
3. GeoDict – The Digital Material Laboratory [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.math2market.de/>
4. Danicic L. Sensitivity Analysis of the Trapping Potential of Different Rock Types using Digital Rock Physics: diss. – University of Leoben, 2022.

Сведения об авторах:

Химуля Валерий Владимирович – к.ф.-м.н., младший научный сотрудник;
Барков Святослав Олегович – аспирант, младший научный сотрудник.

КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПОРОДАХ-КОЛЛЕКТОРАХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ПЛАСТА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Барков С.О., Химуля В.В.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Ключевые слова: подземные хранилища газа, рентгеновская томография, истинно трехосные испытания, упругость, проницаемость, компьютерное моделирование.

Аннотация. В данной работе представлены результаты комплексных исследований горных пород Арбузовского ПХГ, включающих физическое моделирование процессов деформирования и фильтрации в породах в условиях реально возникающих напряженных состояний на стенках скважины при реализации метода направленной разгрузки пласта, а также изучение изменений внутренней структуры образцов средствами рентгеновской компьютерной томографии. Получены кривые деформирования и кривые ползучести пород в условиях неравнокомпонентного трехосного нагружения. Исследованы деформационные, фильтрационные и реологические характеристики пород в зависимости от напряжений. Выполнен порометрический анализ породы по результатам томографии. Проведен количественный и качественный анализ образовавшейся в образцах системы макротрещин. Проведено численное моделирование потока фильтрации на полученных по результатам съемки структурах для оценки изменения трещинной проницаемости образцов. Полученные результаты указывают на то, что метод направленной разгрузки пласта может быть успешно применен с целью увеличения проницаемости в окрестности скважин ПХГ за счет создания необходимого уровня напряжений.

COMPREHENSIVE STUDY OF PROCESSES IN RESERVOIR ROCKS OF UNDERGROUND GAS STORAGE WHEN IMPLEMENTING THE DIRECTIONAL UNLOADING METHOD WITH COMPUTED TOMOGRAPHY APPLICATION

Barkov S.O., Khimulia V.V.

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

Keywords: underground gas storages, X-ray tomography, true triaxial tests, elasticity, permeability, computer modeling.

Abstract. This paper presents the results of comprehensive studies of rocks of the Arbuzovskoye UGSF, including physical modeling of deformation and filtration processes in rocks under the conditions of real stress states on the walls of the well when implementing the directional unloading method, as well as the study of changes in the internal structure of specimens by means of X-ray computed tomography. Deformation and creep curves of rocks under unequal triaxial loading were obtained. Deformation, filtration and rheological characteristics of rocks as a function of stresses were investigated. Porometric analysis of rocks based on tomography results was performed. Quantitative and qualitative analysis of the macrocrack system formed in the specimens was carried out. Numerical modeling of filtration flow on the structures obtained from the survey results was carried out to assess the change in fracture permeability of the specimens. The results obtained indicate that the directional unloading method can be successfully applied to increase permeability in the vicinity of UGS wells by creating the necessary level of stress.

Подземное хранение газа активно развивается во всем мире, так как оно необходимо для сглаживания сезонного потребления. В России оно особенно актуально из-за переориентации экспорта энергоресурсов на Азию и необходимости использовать ПХГ для функционирования Единой системы газоснабжения. Это связано с климатическими особенностями страны и ее большой территорией.

Наибольшее количество ПХГ создается в водоносных пластах и в истощенных газовых, газонефтяных или газоконденсатных месторождениях. Главной проблемой при эксплуатации ПХГ в истощенных месторождениях [1] является изменение фильтрационно-емкостных свойств резервуара при периодических циклах закачки и отбора газа, т.е. при периодических изменениях давления в скважине и пласте. Данный режим работы неизбежно вызывает изменения в напряженно-деформированном состоянии породы пласта-коллектора. Происходит возникновение остаточных деформаций, что сказывается на емкостных и фильтрационных характеристиках пород массива – пористости и проницаемости. Высокие значения этих характеристик являются необходимым условием для создания ПХГ на базе истощенных месторождений. Однако, при циклической эксплуатации ПХГ часто наблюдается закупорка пор и фильтрующих каналов призабойной зоны скважины глинистой и мелкодисперсной составляющей скелета пласта, что оказывает негативное влияние на фильтрационные характеристики околоскважинной зоны [2, 3]. Следует также отметить, что безопасное и эффективное функционирование любого типа ПХГ зависит от правильного выбора режима его эксплуатации [4].

Одним из перспективных способов решения проблемы снижения проницаемости в окрестности скважин в ходе эксплуатации является разработанный в ИПМех РАН метод направленной разгрузки пласта (НРП). Идея данного подхода заключается в том, чтобы за счет создания необходимого напряженного состояния вызвать появление системы микро- и макротрещин в окрестности скважины, которые увеличивают проницаемость породы [5]. Растрескивание, разрыхление породы можно вызвать, используя упругую энергию, запасенную в массиве горных пород.

В данной работе представлены результаты комплексных исследований горных пород Арбузовского ПХГ, включающих физическое моделирование процессов деформирования и фильтрации в породах в условиях реально возникающих напряженных состояний на стенках скважины при реализации метода направленной разгрузки пласта, а также изучение изменений внутренней структуры образцов средствами рентгеновской компьютерной томографии. Геомеханическая часть исследований была проведена на уникальной Испытательной системе трехосного независимого нагружения Института проблем механики РАН. Для этого были составлены программы нагружения образцов на основе методов теории упругости. Получены кривые деформирования и кривые ползучести пород в условиях неравнокомпонентного трехосного нагружения. Исследованы деформационные, фильтрационные и реологические характеристики пород в зависимости от напряжений.

Исследование изменений внутренней структуры образцов выполнено с использованием высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon

СТ-MINI. По результатам проведенного сканирования образцов созданы 3D-структуры исследуемых пород (рис. 1).

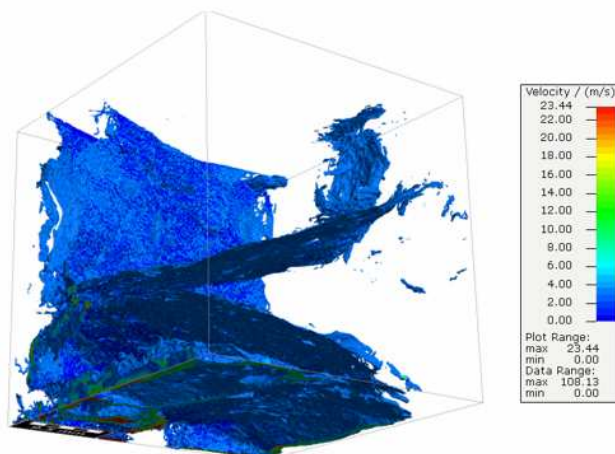


Рис. 1. Внутренняя 3D-структура системы трещин и распределение поля скоростей потока вдоль путей фильтрации

Выполнен порометрический анализ породы по результатам томографии. Проведен количественный и качественный анализ образовавшейся в образцах системы макротрещин. С помощью модуля FlowDict проведено численное моделирование потока фильтрации на полученных по результатам съемки структурах для оценки изменения трещинной проницаемости образцов. Полученные результаты указывают на то, что метод направленной разгрузки пласта может быть успешно применен с целью увеличения проницаемости в окрестности скважин ПХГ за счет создания необходимого уровня напряжений.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ проект № 22-11-00273.

Список литературы

1. Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П. Геоэкологические проблемы подземных хранилищ газа (состояние проблемы) // Южно-Российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. – 2006. – №8. – С. 361-373.
2. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Физическое моделирование метода направленной разгрузки пласта // Газовая промышленность. – 2021. – №7. – С. 66-73.
3. Басов С.А., Игнатьев В.Н., Султанов Д.Р. Водоизоляционные работы с изменением конструкции фильтра скважин подземных хранилищ газа (ПХГ) // Бурение и нефть. – 2008. – №10. – С. 26-29.
4. Орловский С.Л. Анализ эффективности проведенных ГРП на Северо-Лабатьюганском месторождении // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: Сборник научных трудов. – Уфа: Изд-во научно-технической литературы "Монография", 2016. – Т. 7(12)– С. 205-209.
5. Karev V., Kovalenko Yu., Ustinov K. Geomechanics of Oil and Gas Wells. – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 166 p.

Сведения об авторах:

Барков Святослав Олегович – аспирант;

Химуля Валерий Владимирович – к.ф.-м.н., младший научный сотрудник.

УДК 622.279.72

ОБРАЗОВАНИЕ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, В ПРИСУТСТВИИ ПЛАСТОВОЙ ВОДЫ И НЕФТИ

Портнягин А.С., Иванова И.К.

Институт проблем нефти и газа СО РАН, ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск

Ключевые слова: газовые гидраты, природный газ, пористая среда, растворы полимеров, пластовая вода, нефть.

Аннотация. В работе представлены результаты исследований равновесных условий процессов образования гидрата природного газа в пористой среде в присутствии модели пластовой воды и нефти. Установлено, что при выбранных параметрах эксперимента в изучаемых системах преимущественно образуется гидрат по равновесным условиям образования близкий гидрату метана. Присутствие нефти в реакционной системе не приводит к смещению равновесных условий образования получаемых гидратов. Установлено, что в пористой среде ингибирующие свойства соли CaCl_2 снижаются относительно расчетных условий гидратообразования для метана и по мере увеличения концентрации соли приближаются к условиям образования гидратов природного газа. При этом в системах с нефтью такого эффекта не выявлено.

FORMATION OF NATURAL GAS HYDRATES IN POROUS MEDIA, IN THE PRESENCE OF FORMATION WATER AND OIL

Portnyagin A.S., Ivanova I.K.

Institute of Oil and Gas Problems of the SB RAS, FRC YSC of the SB RAS, Yakutsk

Keywords: gas hydrates, natural gas, porous media, formation water, oil.

Abstract. The paper presents the results of studies of the equilibrium conditions of the processes of formation of natural gas hydrate in a porous medium in the presence of a model of formation water and oil. It has been established that, under the selected experimental parameters, a hydrate is predominantly formed in the systems under study, according to the equilibrium conditions of formation, which is close to methane hydrate. The presence of oil in the reaction system does not lead to a shift in the equilibrium conditions for the formation of the resulting hydrates. It has been established that in a porous medium, the inhibitory properties of CaCl_2 salt decrease relative to the calculated conditions of hydrate formation for methane and, as the salt concentration increases, they approach the conditions for the formation of natural gas hydrates. However, in systems with oil, such an effect was not detected.

Месторождения нефти Республики Саха (Якутия) являются месторождениями с трудноизвлекаемыми запасами нефти, так как обладают сложными горно-геологическими условиями ее залегания. Залежи нефти представляют собой тонкие нефтяные оторочки с газовыми шапками, добыча нефти из которых является сложной и нетривиальной задачей. Полнота извлечения нефти из подобных залежей во многом зависит от стратегии и методов извлечения. Так, при интенсивном отборе газа из газовой шапки таких месторождений возможно полное расформирование нефтяной залежи [1]. Для недопущения развития такой ситуации разработан ряд методов извлечения нефти, одним из которых является барьерное заводнение, то есть создание высоковязкого барьера в зоне газо-нефтяного контакта. Однако закачка в

нефтяную залежь месторождений нефти Якутии водополимерных растворов может спровоцировать образование газогидратов в породе коллектора.

Поэтому настоящая работа посвящена исследованию процессов образования и разложения гидратов природного газа в пористых средах, насыщенных растворами полимеров и засоленными растворами хлорида кальция.

Изучение фазовых переходов при гидратообразовании в пористой среде проводилось методом дифференциального термического анализа. Экспериментальная установка для проведения исследований состоит из автоклава высокого давления, оснащенного двумя датчиками температуры и датчиком давления. Подробная схема, описание установки и методика проведения эксперимента приведены в работах [2-3].

Объектами исследования являлись – гидраты природного газа Средневилюйского газоконденсатного месторождения (ГКМ), полученные в системах «природный газ – песок – вода – пластовая вода – нефть». В роли пористой среды использовался монодисперсный кварцевый песок с размером зерен 0,3/0,4 мм. В качестве пластовой воды применялась ее модель из раствора хлорида кальция (CaCl_2) с концентрацией 400 г/л, а также нефть Иреляхского ГНМ. Влажность песка задавалась таким образом, чтобы количество чистой воды в системе во всех случаях равнялось 15 мас. %.

Исследование равновесных условий гидратообразования гидратов в системах «Природный газ - вода» и «Природный газ – песок – вода» показали, что полученные равновесные кривые для этих систем не совпадают (рис. 1).

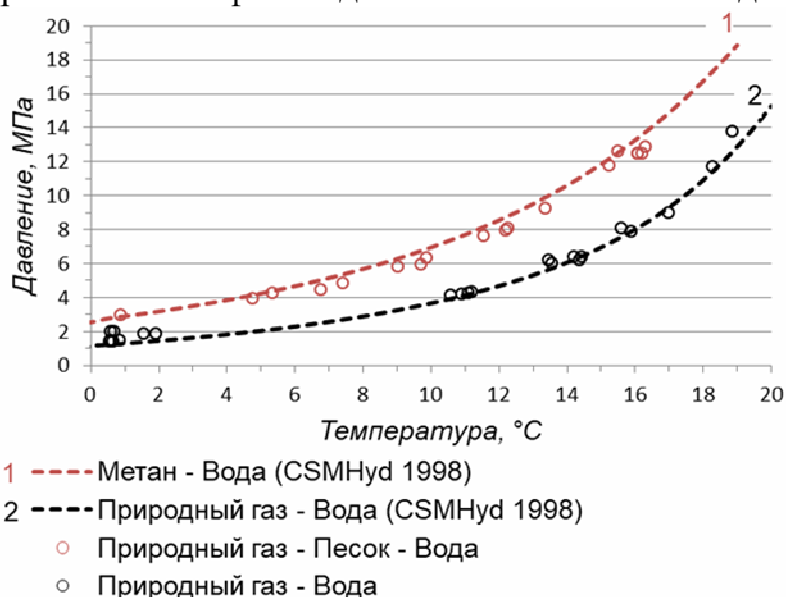


Рис. 1. Экспериментальные точки, полученные при разложении гидратов, образованных в системах Природный газ – вода и Природный газ – песок – вода и расчетные кривые гидратообразования метана и природного газа в объеме воды (CSMHyd [4])

Так, условия образования гидратов в «свободной» воде соответствуют расчетным равновесным условиям для природного газа, тогда как в дисперсной среде образуется гидрат условия, образования которого близки к расчетным равновесным условиям образования гидрата метана.

Изучение влияния нефти на равновесные условия образования гидратов природного газа в пористой среде показало, что внесение в исследуемые системы

нефти не приводит к значительному изменению условий образования гидратов природного газа.

Известно, что пластовая вода месторождений нефти Якутии предотвращает образование газовых гидратов [5], однако существует возможность образования гидратов при локальном разбавлении пластовых вод растворами водорастворимых полимеров, приготовленных из пресной или слабоминерализованной воды. Так, на примере систем «Природный газ – песок – раствор ПЭГ, 30 г/л – пластовая вода» и «Природный газ – песок – раствор ПЭГ, 30 г/л – пластовая вода – нефть» показано, что наличие модели пластовой воды в исследуемых системах по разному влияет на условия гидратообразования в системах с нефтью (рис. 6Б) и без нее (рис. 6А).

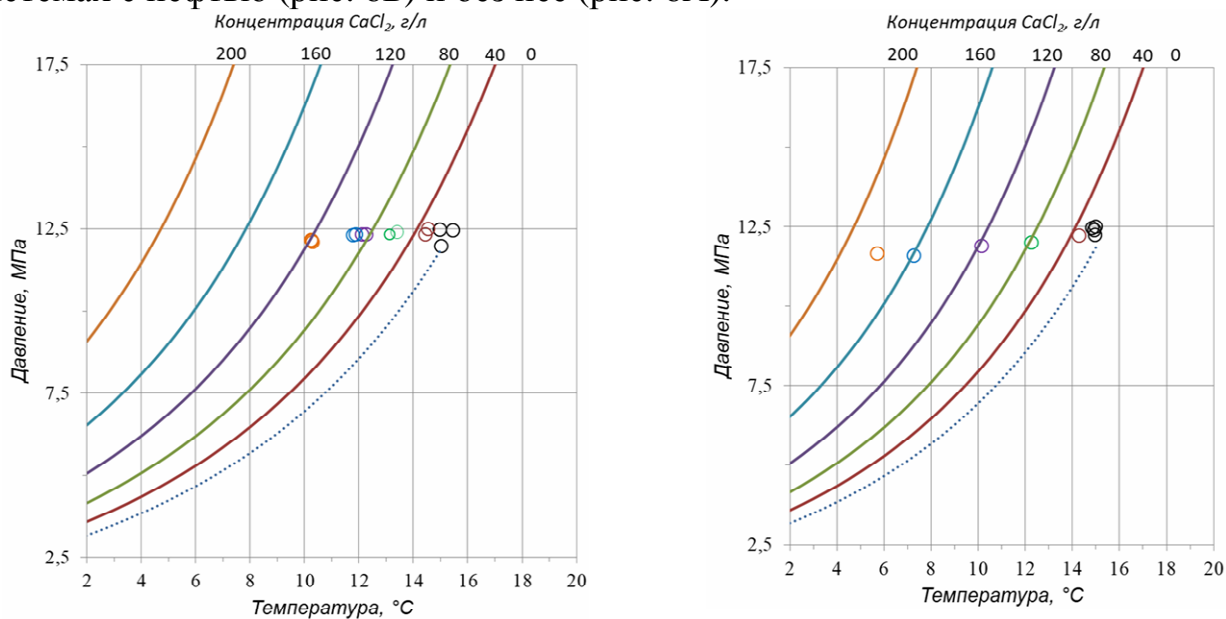


Рис. 6. Экспериментальные точки, полученные при разложении гидратов, образованных в системах: А – природный газ – песок – вода/раствор ПЭГ, 30 г/л – пластовая вода; Б – природный газ – песок – вода/раствор ПЭГ, 30 г/л – пластовая вода – нефть, а также расчетные кривые гидратообразования метана в растворе CaCl_2 соответствующих концентраций (CSMHyd [4])

Видно, что без нефти условия образования гидратов смещаются в область высоких температур по мере увеличения концентрации соли в системе, по сравнению с расчетными условиями образования гидратов метана в растворах хлорида кальция аналогичных концентраций. Это показывает, что с ростом концентрации соли, увеличивается содержание этана и пропана в газе образующем гидрат. При достижении концентрации CaCl_2 равной 120 г/л и выше, условия образования рассматриваемых гидратов близки к условиям образования гидратов природного газа в аналогичных растворах соли.

При этом, в системах с присутствием нефти такого смещения условий образования не наблюдается. Возможно, это связано с барьером из нефтяной пленки в зоне газовой контакта, препятствующему проникновению в реакционную среду более тяжелых гомологов метана.

Таким образом, показано, что в пористой среде в статических условиях природный газ образуют гидраты равновесные условия, образования которых смещены в область низких температур по сравнению с условиями образования

гидратов природного газа в «свободной» воде и близки к условиям образования гидратов метана.

Установлено, что в пористой среде ингибирующие свойства соли CaCl_2 снижаются относительно расчетных условий гидратообразования для метана и по мере увеличения концентрации соли приближаются к условиям образования гидратов природного газа. При этом в системах с нефтью такого эффекта не выявлено.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ (Рег. №122011100157-5) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН и гранта №13.ЦКП.21.0016.

Список литературы

1. Буракова С.В., Изюмченко Д.В., Минаков И.И., Истомин В.А., Кумейко Е.Л. Проблемы освоения тонких нефтяных оторочек газоконденсатных залежей Восточной Сибири // Вести газовой науки. – 2013. – №5(16). – С. 124-133.
2. Портнягин А.С., Калачева Л.П., Иванова И.К. Изучение процессов образования гидратов природного газа в системах «пластовая вода – пористая среда – раствор полимера» // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2022. – Т. 17, №4. – http://www.ngtp.ru/rub/2022/35_2022.html.
3. Портнягин А.С., Иванова И.К., Калачева Л.П., Портнягина В.В. Изучение процессов образования гидрата природного газа в пористой среде из смеси растворов полимеров с нефтью // Химия и технология топлив и масел. – 2023. – №4. – С. 24-28.
4. Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. Second Edition. – CRC Press, 1998. – 705 p.
5. Троицкий В.М., Григорьев Б.А., Рассохин С.Г., Соколов А.Ф., Ковалёв А.Л. Применение методов физического и математического моделирования для оценки эффективности использования технологии водогазового воздействия на Чаяндинском нефтегазоконденсатном месторождении // Вести газовой науки. – 2018. – № 5(37). – С. 140-155.

Сведения об авторах:

Портнягин Альберт Серафимович – научный сотрудник ИПНГ СО РАН;

Иванова Изабелла Карловна – д.х.н., главный научный сотрудник ИПНГ СО РАН.

УДК 621.313

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Афанасьев А.А.¹, Генин В.С.¹, Васильева Л.Н.¹, Иванова Н.Н.¹, Ваткин В.А.²,
Токмаков Д.А.²*

¹Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова;

²АО ЧЭАЗ, Чебоксары

Ключевые слова: скалярные магнитные потенциалы, нормальные составляющие индукции, магнитные листы, намагниченности ферромагнитных сред, индуктивные параметры обмоток, уравнения состояния, переходные процессы.

Аннотация. На основе подходов к математическому описанию магнитоэлектрических вентильных двигателей методом разделения переменных Фурье предлагается технология определения индуктивных параметров, которые необходимы для расчёта неустойчивых режимов двигателя. Находятся потокосцепления обмотки статора, вызванные в отдельности постоянными магнитами и током самой обмотки в функции изменения взаимного положения магнитных осей обмотки и магнитов ротора.

ELECTROMAGNETIC PARAMETERS AND DYNAMICS EQUATIONS OF A MAGNETOELECTRIC VALVE MOTOR

*Afanasiev A.A.¹, Genin V.S.¹, Vasileva L.N.¹, Ivanova N.N.¹, Vatkin V.A.²,
Tokmakov D.A.²*

¹Chuvash State University named after I.N. Ulyanov;

²Cheboksary Electrical Apparatus Plant, AO, Cheboksary

Keywords: scalar magnetic potentials, normal induction components, magnetic sheets, magnetization of ferromagnetic media, inductive parameters of windings, equations of state, transients.

Abstract. Based on approaches to the mathematical description of magnetoelectric valve motors by the method of separation of Fourier variables, a technology for determining inductive parameters that are necessary for calculating unsteady engine modes is proposed. There are flow couplings of the stator winding caused separately by permanent magnets and currents of the winding itself in the function of changing the relative position of the magnetic axes of the winding and the rotor magnets.

Математическая модель магнитоэлектрического вентильного двигателя, разработанная на основе технологии разделения переменных Фурье с разбиением активной области на однородные участки с границами в виде магнитных листов [1, 2], позволяет определить электромагнитные параметры взаимоиндукции статора и ротора, необходимые для расчёта переходных процессов двигателя.

На границах выделяемых участков (полос или колец) выполняются условия сопряжения магнитных полей: скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции не претерпевают скачка (разрыва).

В качестве источников магнитного поля вентильного двигателя выступают МДС обмотки статора, коэрцитивная сила магнитов H_{CB} и намагниченности магнитомягких (ферромагнитных) сред [3]. Намагниченность M_i i -ой такой среды

$$M_i = \frac{B_i}{\mu_0} - H_i \tag{1}$$

может находиться с помощью известных кривых намагничивания.

Скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции в выделенных полосах, согласно методу разделения переменных Фурье, могут описываться выражениями [1]

$$\begin{cases} u_n(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} (B_{nk} e^{k\sigma y} + C_{nk} e^{-k\sigma y}) \sin k\sigma x, \\ B_{ny}(x, y) = \mu_0 \left(-\frac{\partial u_n}{\partial y} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{nyk} \sin k\sigma x \right) = \\ = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} (-k\sigma B_{nk} e^{k\sigma y} + k\sigma C_{nk} e^{-k\sigma y} + M_{nyk}) \sin k\sigma x, \end{cases} \tag{2}$$

где n – номер полосы; $\sigma = \pi/\tau$, τ – полюсное деление; $\sum_{k=1}^{\infty} M_{nyk} \sin k\sigma x$ – средняя намагниченность n -ой полосы, представленная в виде тригонометрического ряда; B_{nk}, C_{nk} – неизвестные постоянные, определяемые из условий равенства магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах полос.

На границах полосы с постоянными магнитами располагаются магнитные листы с током

$$F_m = \frac{4}{\pi\alpha} H_{cB} h_m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2k-1)\alpha}{(2k-1)^2} \sin(2k-1)\sigma x, \tag{3}$$

где $\alpha = \frac{\tau - b_m}{\tau}$; h_m, b_m – соответственно высота и ширина магнитов.

На границе полос воздушного зазора и зубцов статора фиксируется магнитный лист с МДС обмотки статора.

Для повышения точности расчёта следует увеличивать количество полос (дискретизацию) активной области.

Предлагаемый метод позволяет найти магнитные индукции для любых координатных точек x, y активной области двигателя. Следовательно, первоначально заданный набор индукций, и одновременно намагниченностей, в полосах с ферромагнитными участками будет уточняться в последующие итерации.

Будем, для примера, определять электромагнитные параметры вентильного двигателя 12ДВМ 250 мощностью 150 кВт, выпускаемого Чебоксарским электроаппаратным заводом.

Индуктивности взаимоиндукции двигателя будут находиться применительно к величинам магнитного потока в воздушном зазоре (полосе 5, вся активная область двигателя поделена на 9 полос, относящихся ярмовым, зубцовым, воздушным участкам), связанным в отдельности с магнитами ротора и МДС обмотки статора.

Для нормальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре в соответствии с выражением (2) будет справедливо

$$B_{5y}(x, y) = \mu_0 \sigma \sum_{k=1}^{\infty} \left(-k B_{5k} e^{k\sigma y} + k C_{5k} e^{-k\sigma y} \right) \sin k\sigma x. \quad (4)$$

Эта магнитная индукция, вызванная только магнитами ротора, будет вызывать с фазой А обмотки статора потокосцепление

$$\Psi_A(\gamma) = l w_k \sum_{n=1}^q \left[\int_{t_z(n-1)}^{t_z(n-1)+\tau} B_{5y}(x-\gamma, y) dx + \int_{t_z(n-1)+\tau-y}^{t_z(n-1)+2\tau-y} B_{5y}(x-\gamma, y) dx \right], \quad (5)$$

где w_k – число витков в катушке обмотки статора; y – шаг катушки; q – число катушек в катушечной группе обмотки; l – активная длина сердечника статора; γ – сдвиг продольной оси ротора d относительно магнитной оси фазы А статора.

Индуктивность взаимоиндукции фазы А обмотки статора с магнитами ротора будет равна

$$L_{Af}(\gamma) = \Psi_A(\gamma) / H_{cB} h_m. \quad (6)$$

График зависимости (6) показан на рисунке 1. Он имеет стандартный вид с периодом 2τ .

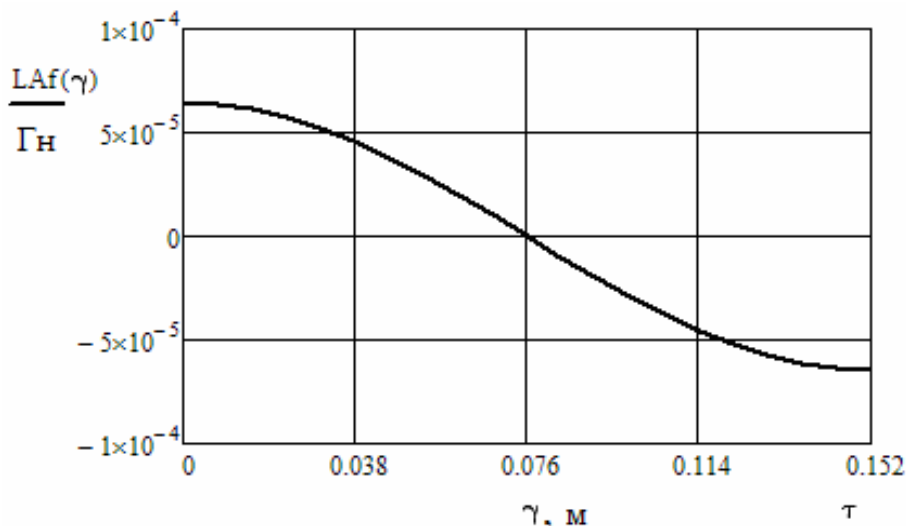


Рис. 1. Зависимость индуктивности взаимоиндукции ротора с фазой А статора от расстояния сдвига продольной оси ротора

Выражение (5) может использоваться для нахождения потокосцепления фазы А, вызванного собственным током этой фазы. Тогда для индуктивности самоиндукции фазы будем иметь

$$L_{AA}(\gamma) = \Psi_A(\gamma) / I_m. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) можем распространить на фазы В и С, сдвинув интервал

γ соответственно на расстояния $\frac{2}{3}\tau$ и $\frac{4}{3}\tau$.

График зависимости (7) показан на рисунке 2 для случая, когда ток статора вентильного двигателя является поперечным ($I = I_q$) и ось его МДС совпадает с направлением поперечной оси ротора. Период зависимости $L_{AA}(\gamma)$ будет равен τ .

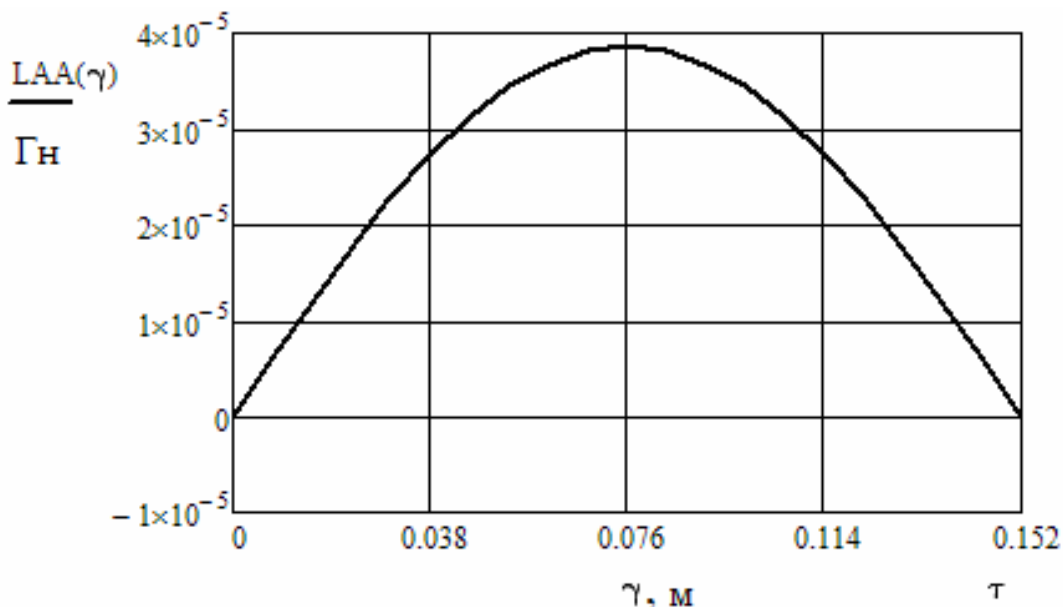


Рис. 2. Зависимость индуктивности взаимной индукции фазы А статора от сдвига продольной оси ротора

Для продольных и поперечных индуктивностей обмотки статора можем принять

$$L_d = L_q = L_\sigma + \frac{3}{2} L_{AA} \left(\frac{\tau}{2} \right), \quad (8)$$

где L_σ – индуктивность рассеяния обмотки статора.

Найденные параметры позволяют описать переходные электромеханические процессы двигателя в разных системах координат. Показано, что уравнения состояния второго порядка являются достаточным инструментарием для наиболее эффективного управления двигателем, при котором отсутствует продольный ток статора, а коэффициент мощности близок к единице. Эта система уравнений позволяет также наблюдать в переходном режиме изменения как фазных токов и напряжений, так и их составляющих в координатах d, q .

Таким образом, мы можем сделать следующие выводы:

1. Математические модели вентильных двигателей, построенные на основе метода разделения переменных Фурье, позволяют определить индуктивные параметры обмоток, необходимые для расчёта переходных процессов в соответствующих системах координат.

2. Наиболее желательным является управление вентильным двигателем, при котором фазные токи находятся в противофазе с ЭДС холостого хода. В этом режиме с отсутствием продольного тока и коэффициентом мощности близким к единице уравнения состояния двигателя имеют второй порядок.

Список литературы

1. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники, Ч. 3. Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
2. Афанасьев А.А., Генин В.С., Ваткин В.А., Ефимов В.В., Малинин А.И., Токмаков Д.А. Аналитическое и численное моделирование магнитоэлектрических вентильных двигателей // Электричество. – 2021. – № 6. – С. 72-78.

3. Поливанов К.М. Ферромагнетики. – М.-Л.: ГЭИ, 1957. – 256 с.

Сведения об авторах:

Афанасьев Александр Александрович – д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматике и управления в технических системах;

Генин Валерий Семёнович – д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматике и управления в технических системах;

Васильева Лидия Николаевна – к.п.н., доцент кафедры автоматике и управления в технических системах;

Иванова Надежда Николаевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем;

Ваткин Владимир Александрович – к.т.н., главный конструктор отдела электрических машин АО «ЧЭАЗ»;

Токмаков Дмитрий Анатольевич – директор по развитию АО «ЧЭАЗ».

Научное периодическое издание

Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№6

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 2,5.

Подписано в печать 05.10.23г. Заказ №23-18.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/miirtek.html>

<https://doi.org/10.26160/2618-8953-2023-6>

Учредитель, издатель и распространитель: Жукова Елена Валерьевна
(ИП Жукова Е.В., ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778,
г.Санкт-Петербург).

Ответственный редактор: Жуков Иван Алексеевич.

Редакция: Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»,
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.

<http://srcms.ru>

E-mail: spbf@srcms.ru