КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ВИНТОВЫХ НАСОСАХ

KINETICS OF THERMAL DESTRUCTION OF BUTADIENE-NITRILE ELASTOMERS APPLIED IN PROGRESSING CAVITY PUMPS

Э. О. Тимашев**Eduard O. Timashev**

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. Р. Брот**Aleksander R. Brot**

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa, Russian Federation

С. А. Грабовский**Stanislav A. Grabovskii**

Уфимский Институт химии
УФИЦ РАН,
г. Уфа, Российская Федерация

4Ufa Institute of Chemistry
UFRS RAS,
Ufa, Russian Federation

М. Г. Волков**Maxim G. Volkov**

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В. В. Носов**Vasilii V. Nosov**

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa, Russian Federation

С. П. Кулешов**Sergei P. Kuleshov**

ООО «Объединенный Центр
исследований и разработок»,
г. Москва, Российская Федерация

United Research
and Development Centre LLC,
Moscow, Russian Federation

А. Р. Гарифуллин**Azat R. Garifullin**

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa, Russian Federation

А. И. Волошин**Aleksander I. Voloshin**

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa, Russian Federation

В. А. Докичев**Vladimir A. Dokichev**

Уфимский Институт химии
УФИЦ РАН,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa Institute of Chemistry
UFRS RAS,
Ufa, Russian Federation

Для обеспечения добычи высоковязкой нефти широко используются винтовые насосы с поверхностным или погружным приводом. Надежность и эффективность работы винтовых насосов существенно зависит от применяемых эластомеров, в качестве которых в основном используют бутадиен-нитрильные резины. В статье методом динамического термогравиметрического анализа исследована термическая деструкция ряда бутадиен-нитрильных эластомеров. Установлены кинетические особенности деструкции эластомеров в инертной и окислительной (воздух) средах. Температура, соответствующая 5 % потери массы образцов, в контексте рассматриваемой деструкции определена как один из параметров, определяющих термическую стабильность эластомеров. Показано, что процесс потери массы эластомера в условиях линейного повышения

Ключевые слова

винтовые насосы;
бутадиен-нитрильные эластомеры;
динамический
термогравиметрический анализ;
термическая деструкция;
кинетические параметры
реакции деструкции

температуры включает 3 стадии, температурные диапазоны которых связаны с условиями проведения термодеструкции и содержанием нитрильных функциональных групп в эластомере. Определены параметры уравнения Аррениуса стадий термодеструкции, которые также могут быть использованы как параметры, характеризующие стабильность эластомеров. Показано, что кислород воздуха обладает более разрушительным действием на эластомеры, чем CO_2 . На основании полученных результатов и анализа литературных данных сделаны выводы о механизме деструкции.

To ensure the production of high-viscosity oil, progressing cavity pumps with a surface or submersible drive are widely used. The reliability and efficiency of progressing cavity pumps significantly depends on the elastomers used, which are mainly used as butadiene-nitrile rubbers. In the article, the thermal degradation of a number of butadiene-nitrile elastomers is investigated by the method of dynamic thermogravimetric analysis. The kinetic features of the destruction of elastomers in inert and oxidizing (air) media are established. The temperature corresponding to 5 % of the mass loss of the samples in the context of the destruction under consideration is defined as one of the parameters corresponding to the thermal stability of the elastomers. The process of mass loss of an elastomer under conditions of linear temperature increase includes 3 stages, the temperature ranges of which are related to the conditions of thermal degradation and the content of nitrile functional groups in the elastomer. The parameters of the Arrhenius equation of the thermodestruction stages are determined, which can also be used as parameters characterizing the stability of elastomers. It is shown that air oxygen has a more destructive effect on elastomers than CO_2 . Based on the results obtained and the analysis of the literature data, conclusions are drawn about the mechanism of destruction.

Ухудшение свойств эластомеров в процессе эксплуатации винтовых насосов в добыче нефти является одной из основных причин их отказа. Анализ результатов эксплуатации винтовых насосов показывает, что 78 % риска отказов связано со снижением физико-химических свойств эластомеров [1, 2]. Это связано с тем, что резиновая обойма работает в неблагоприятных скважинных условиях и находится под одновременным воздействием высокой температуры, давления, агрессивных газов, водонефтяной эмульсии, абразивных механических примесей [2, 3]. В работе [4] показано, что одним из основных свойств, обеспечивающих работоспособность резиновых диафрагм в погружных электронасосах, является длительное сохранение материалом высокой эластичности (т.е. достаточно высокого разрывного удлинения). Для изготовления резиновых обоев в основном используют бутадиен-нитрильный синтетический каучук, применение которого обусловлено сочетанием таких свойств, как эластичность в широком температурном интервале, термостабильность, стойкость к углеводородным жидкостям и т.д. [5–8].

Производители выпускают множество марок этого эластомера с различными свой-

ствами, которые могут сильно отличаться по структуре и молекулярной массе [9]. Широкий набор применяемых эластомеров продиктован разнообразием свойств перекачиваемой жидкости и условиями эксплуатации винтового насоса. В этой связи даже среди бутадиен-нитрильных эластомеров, например, условно различают «стандартный нитрил», «мягкий нитрил», «высокий нитрил», «гидрогенизированный нитрил», которые имеют отличающуюся механическую стойкость и химическую стойкость к CO_2 , H_2S , ароматическим и насыщенным углеводородам.

Винтовые насосы с обоймами из бутадиен-нитрильных эластомеров часто эксплуатируются в условиях повышенных температур (60 °C и выше). При относительно высоких температурах в полимерах могут происходить различные физические процессы (полиморфные превращения и конформационные переходы) и химические превращения, а именно: деструкция (гомолитический разрыв химических связей с образованием фрагментов макромолекулы), поперечное сшивание, циклизация и т.д. Указанные процессы сопровождаются как поглощением, так и выделением тепла, а также изменением физико-химических и физико-механических характеристик

Keywords

progressing cavity pump,
butadiene-nitrile elastomers;
dynamic thermogravimetric analysis;
thermal destruction;
kinetic parameters
of the destruction reaction

[10–12]. При изучении термической стабильности полимеров в заданных условиях широко используется динамический термогравиметрический анализ (ТГА), являющийся разновидностью термического анализа [13, 14]. Динамический ТГА позволяет определить не только температуру начала и степень деструкции, максимальную скорость и окончание физико-химического процесса в условиях испытания образца полимера, но и дает возможность рассчитать кинетические параметры разложения полимера – эффективное значение порядка реакции, константы скорости и энергии активации всех этапов деструкции. Величина эффективной энергии активации термического разложения является одним из важнейших показателей, характеризующих устойчивость полимера, и используется для уточнения механизма термической деструкции, старения и стабилизации полимерного материала.

В настоящей работе с целью прогнозирования и регулирования сроков службы эластомеров обойм винтовых насосов, а также кинетического моделирования их деструкции проведено исследование термических превращений ряда образцов бутадиен-нитрильных эластомеров.

Экспериментальная часть

В работе изучались образцы бутадиен-нитрильных эластомеров марок 299, 332 и 510, используемых в производстве винтовых насосов.

ИК-спектры эластомеров в виде таблеток с бромидом калия снимали на спектрометре Фурье «Nicolet iS 10» с математическим обеспечением «OMNIC» в интервале частот 400–4000 см⁻¹. ИК-спектры резин 299, 332 и 510 содержат характерные полосы поглощения для бутадиен-нитрильных эластомеров при 735, 970, 1265, 1650, 2240, 3150–3540 в, см⁻¹ [15].

Данные элементного анализа, приведенные в таблице 1, получали на CHNS-анализаторе Euro EA3000 HEKAtech GmbH. Согласно данным элементного анализа (соотношение водорода к азоту), содержание акрилонитрила в бутадиен-нитрильном каучуке составляет для образцов №№ 299, 332 и 510 соответственно ~ 47 %, ~ 32 % и ~ 41 %.

Влияние CO₂ на термостабильность бутадиен-нитрильного эластомера 510 изучали, предварительно выдержав эластомер в стальном автоклаве в водной среде, содержащей CO₂ (0.3 % CO₂) при 70 °C в течение 7 сут и

при давлении 3 МПа (1.6 % CO₂) при 70 °C в течение 8 сут.

Термогравиметрические исследования проводили на термоанализаторе «Setaram» в атмосфере аргона или воздуха (шкала температур 20–1000 °C, шкала DTA — 250 мкВ, шкала DTG — 1000 мкВ), нагревая навеску эластомера 100 мг со скоростью 5.0 град/мин.

Для обработки результатов термической деструкции анализа использовали метод, приведенный в работе [16], используя уравнение Аррениуса:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)f(\alpha), \quad (1)$$

где α — степень конверсии реакции деструкции;

t — время реакции, мин;

T — температура, К;

$f(\alpha)$ — кинетическая функция реакции термической деструкции полимера;

A — предэкспоненциальный множитель, с⁻¹;

E — энергия активации, кДж/моль;

R — газовая постоянная, Дж/(моль · К).

Величина α определялась из следующего уравнения:

$$\alpha = \frac{m_i - m}{m_i - m_f}, \quad (2)$$

где m — масса образца полимера в момент времени t , мг;

m_i и m_f — начальная и конечная массы образца полимера, соответственно, мг. Уравнение (1) может быть преобразовано в интегральную форму:

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = -\frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right), \quad (3)$$

где β — скорость нагрева образца, °C/мин.

$$g(\alpha) = \frac{[(1-\alpha)^{-(n-1)} - 1]}{n-1}, \quad (4)$$

где n — порядок реакции деструкции полимера, определяемый из линеаризации зависимости $\ln(g(\alpha)/T^2)$ от $1/T$.

Кинетические параметры E и A , определённые из линеаризации исходных данных, по уравнению (3), приведены на рисунках 1 — 5 и в таблице 2.

Обсуждение результатов

В качестве объектов исследования в данной работе выбраны бутадиен-нитрильные эластомеры 299, 332 и 510.

Термограммы снимали в динамическом режиме в атмосфере воздуха или аргона при нагревании образцов до полного выгорания эластомера от 20 °C до 1000 °C со скоростью нагрева 5 °C/мин.

Таблица 1. Составы эластомеров (данные элементного анализа)

Бутадиен-нитрильный эластомер	Содержание, %			
	Углерод	Водород	Азот	Атомарное соотношение Н : N
299	77.50	4.74	6.72	~ 9.9 (AN 47 %*)
332	79.07	6.63	5.91	~ 15.7 (AN 32 %*)
510	78.95	4.93	6.02	~ 11.5 (AN 41 %*)

Примечание:

* — содержание акрилонитрильных фрагментов в бутадиен-нитрильном эластомере, определенное на основании соотношения водорода и азота.

На рисунках 1–5 представлены термогравиметрические кривые потери массы эластомеров 299, 332 и 510 в атмосфере воздуха, а также эластомера 510, выдержанного в водной

среде, содержащей CO₂, при 70 °С, давлении 0.1 (0.3 % CO₂) и 3 МПа (1.6 CO₂), термические превращения которого проводили в атмосфере аргона.

Рисунок 1. Термический анализ бутадиен-нитрильного эластомера 299 в атмосфере воздуха **Рисунок 2.** Термический анализ бутадиен-нитрильного эластомера 332 в атмосфере воздуха

Рисунок 3. Термический анализ бутадиен-нитрильного эластомера 510 в атмосфере воздуха

Рисунок 4. Термический анализ бутадиен-нитрильного эластомера 510 (выдержанный в водной среде, содержащей 0.3 % CO₂, 0.1 МПа) в атмосфере аргона

Рисунок 5. Термический анализ бутадиен-нитрильного эластомера 510 (образец выдержанный в водной среде, содержащей 1.6 % CO₂, 3 МПа) в атмосфере аргона

По данным динамического ТГА (рисунки 1–5), в начале процесса термических превращений потеря массы для всех образцов до температуры 150 °С незначительна, и все термограммы практически имеют один вид.

Деструкция эластомеров начинается при 172 °С и включает в себя три стадии разложения, вне зависимости от условий:

- первая стадия деструкции — 172–380 °С;
- вторая стадия деструкции — 337–470 °С;
- третья стадия деструкции выше 420 °С.

Порядок реакции деструкции на всех стадиях составляет 3.9–4.1. Потеря начальной массы на ~ 10 % в воздушной атмосфере для эластомеров 299, 332 и 510 происходит без заметного выделения тепла при достижении температуры 172 °С, 256 °С и 187 °С соответственно. Для эластомера 299 с наиболее высокой массовой долей звеньев нитрила акриловой кислоты (47 %) процесс деструкции на-

чинается при более низкой температуре (таблица 2). Известно, что бутадиен-нитрильные каучуки и эластомеры на их основе разлагаются с выделением тепла, начиная с 220 °С [10]. При температурах 337–428 °С для всех вариантов резин наблюдается заметное снижение массы. Максимальная скорость термоокислительной деструкции отмечена при 428 °С для эластомера 332, содержащего 32 % акрилонитрила.

На первой стадии в инертной среде, вероятно, протекает процесс образования внутри- и межмолекулярных связей из радикальных частиц, которые образуются при отщеплении легкоподвижного водорода от атома углерода в α -положении по отношению к нитрильной группе [6, 8, 17–21]. При нагревании эластомера на воздухе наблюдается окислительное дегидрирование циклов, которое приводит к образованию конденсированных нафтиридиновых структур.

Таблица 2. Кинетические параметры реакции термической деструкции эластомеров 299, 332, 510

№	Условия испытаний эластомера	T_c^* , °С	Логарифм предэкспоненциального множителя, $\log A$	Энергия активации E , кДж/моль
299	термодеструкция исходного образца в воздушной среде	324	Первый участок кривой 172–360 °С	
			2.1 ± 0.4	52.8 ± 1
			Второй участок кривой 380–470 °С	
			10.4 ± 0.5	186 ± 5
			Третий участок кривой 420–483 °С	
			3.6 ± 0.2	130 ± 4
332	термодеструкция исходного образца в воздушной среде	325	Первый участок кривой 256–380 °С	
			3.6 ± 0.4	72.5 ± 0.9
			Второй участок кривой 390–463 °С	
			22 ± 0.4	326 ± 10
			Третий участок кривой 510–677 °С	
			4.8 ± 0.4	124 ± 6
510	термодеструкция исходного образца в воздушной среде	249	Первый участок кривой 188–270 °С	
			11.1 ± 0.8	110 ± 1
			Второй участок кривой 348–388 °С	
			17 ± 3	224 ± 5
			Третий участок кривой 420–483 °С	
			15.2 ± 0.3	207 ± 3
510	образец, выдержанный в воде (0.3 % CO_2), 70 °С, 0.1 МПа, 7 сут; термодеструкция в инертной среде	350	Первый участок кривой 258–324 °С	
			7.6 ± 0.8	89 ± 1
			Второй участок кривой 337–390 °С	
			16.2 ± 0.8	201 ± 1
			Третий участок кривой 420–536 °С	
			14.2 ± 0.8	197 ± 1
510	образец, выдержанный в воде (1.6 %, CO_2), 70 °С, 3 МПа, 8 сут; термодеструкция в инертной среде	363	Первый участок кривой 246–347 °С	
			5.2 ± 0.4	66 ± 1
			Второй участок кривой 349–391 °С	
			16 ± 1	210 ± 3
			Третий участок кривой 420–550 °С	
			13.7 ± 0.2	191 ± 2

Примечание: * – температура, соответствующая 5 %-ой потере массы.

При изучении термических превращений бутадиен-нитрильного эластомера 510, прошедшего испытания в водной среде, содержащей CO_2 при 70 °С при давлениях 0.1 (0.3 % CO_2) и 3 МПа (1.6 % CO_2), в сравнении с термоокислительной деструкцией установлено, что кислород воздуха обладает более разрушительным действием на свойства эластомера, чем CO_2 . Потеря начальной массы на 5 % при окислительной термодеструкции происходит при достижении температуры (T_c) 249 °С, а для образцов эластомеров, подвергнутых углекислотной обработке, при температурах около 350 °С и 363 °С (таблица 2). Эластомер 510, содержащий 41 % акрилонитрильных звеньев, характеризуется наинизшей термостойкостью в воздушной среде по сравнению с резинами 299 и 332.

На основании полученных данных термогравиметрии были рассчитаны кинетические параметры реакции термической деструкции эластомеров 299, 332, 510 как в присутствии кислорода воздуха, так и подвергнутых воздействию CO_2 [16]. Так, энергии активации термовулканизации на первой стадии деструкции увеличиваются при переходе от эластомера 299 с массовой долей звеньев акрилонитрила 47 % к эластомеру 510 с 41 % звеньев с 52.8 до 110 кДж/моль. В то же время энергия активации термовулканизации эластомера 332 с массовой долей звеньев акрилонитрила 32 % составляет 72.5 кДж/моль (таблица 2).

Сравнение кинетических данных эластомера 510 для окислительной и инертной сред показали, что константа скорости термического разложения ($\log A = 17$) и энергия активации (224 кДж/моль) на второй стадии в окислительной среде выше констант скоростей ($\log A = 16$) и энергий активации (201 и 210 кДж/моль) термического разложения после углекислотного воздействия. Выше 420 °С для всех образцов в инертной среде наблюдается интенсивная деструкция эластомеров с

близкими значениями констант скоростей разложения и энергий активаций.

Исследование термической деструкции бутадиен-нитрильных эластомеров показало, что они обладают достаточно высокой стойкостью к термическому воздействию как в присутствии кислорода воздуха, так и при воздействии водной среды, содержащей углекислоту.

Выводы

1. Методом динамического термогравиметрического анализа исследована термодеструкция образцов эластомеров в воздушной и инертной атмосферах. Установлено, что потеря массы эластомера в условиях линейного повышения температуры включает 3 стадии, температурные диапазоны которых связаны с условиями проведения термодеструкции и содержанием акрилонитрильных функциональных групп в эластомере. Показано, что эластомер 510, содержащий 41 % акрилонитрильных групп, наименее стоек к окислительной термодеструкции. Определены кинетические параметры деструкции эластомеров, которые могут быть использованы как критерии стабильности эластомеров в окислительной среде и в условиях эксплуатации эластомеров в качестве обойм винтовых насосов.

2. Показано, что кислород воздуха обладает более разрушительным действием на эластомеры, чем CO_2 . На основании полученных результатов предложен механизм деструкции эластомеров.

3. Температура T_c , соответствующая 5 % потери массы, рассматривается как параметр, характеризующий стойкость эластомера к термодеструкции. Найдено, для эластомеров 299 (AN 47 %) – $T_c = 324$ °С, 332 (AN 32 %) – $T_c = 325$ °С, 510 (AN 41 %) – $T_c = 249$ °С в атмосфере воздуха. Для эластомера 510, предварительно выдержанного в водной среде, содержащего CO_2 при 70 °С и давлении 0.1 МПа (содержание CO_2 0.3 %) – $T_c = 350$ °С; при 3 МПа (1.6 % CO_2) – $T_c = 363$ °С.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 55849-2013. Нефтяная и газовая промышленность. Система винтовых насосов для механизированной добычи. Часть 1. Насосы. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2014. 90 с.
2. Тимашев Э.О., Ямалиев В.У. Анализ причин разрушения эластомеров обойм винтовых насосов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2005. № 2. URL: [http://ogbus.ru/article/view/analiz-prichin-](http://ogbus.ru/article/view/analiz-prichin-razrusheniya-elastomerov-oboym-vintovykh-nasosov/23316)

[razrusheniya-elastomerov-oboym-vintovykh-nasosov/23316](http://ogbus.ru/article/view/analiz-prichin-razrusheniya-elastomerov-oboym-vintovykh-nasosov/23316) (дата обращения: 02.02.2021).

3. Епихин А.В., Шестеров В.П., Губарев М.И. Исследование влияния химических реагентов на резину эластомера винтового забойного двигателя при различных температурах // Экспозиция Нефть Газ. 2017. № 2 (55). С. 73–75.
4. Соколовский А.А., Ревакин Б.И., Григорян Е.Е. Резиновая диафрагма гидрозащиты для погружных

электронасосов (ПЭН) // Химическая техника. 2008. № 4. С. 16–18.

5. ГОСТ Р 54556-2011. Каучуки бутадиен-нитрильные (NBR). Приготовление и испытание резиновых смесей. М.: Стандартинформ, 2013. 12 с.

6. Девириц Э.Я. Бутадиен-нитрильные каучуки. Свойства и применение. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1972. 112 с.

7. Большой справочник резинщика: Ч. 1. Каучуки и ингредиенты / Под ред. С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова. М.: «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 744 с.

8. Папков В.Н., Гусев Ю.К., Ривин Э.М., Блинов Е.В. Бутадиен-нитрильные каучуки. Синтез и свойства. Воронеж: ВГУИТ, 2014. 218 с.

9. Bohm G., Mouri H. Новые материалы и технологии для новых шин и других резиновых изделий // Мир шин. 2008. № 1. С. 33–36.

10. Коптелов А.А., Милехин Ю.М., Шлёнский О.Ф. Тепловые эффекты термического разложения полимеров // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2005. Т. 47. № 9. С. 1628–1634.

11. Соколовский А.А., Вайнштейн Э.Ф. Старение резин в напряженном состоянии. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1988. 84 с.

12. Зуев Ю.С., Дегтева Т.Г. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях. М.: Химия, 1986. 262 с.

13. Усачев С.В., Филиппов А.А., Малышева Т.Б., Палачева С.В. Термоокислительная деструкция композиций бутадиенстирольного и бутадиеннитрильного каучуков // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2006. Т. 49. Вып. 3. С. 39–42.

14. Yue D., Wei X., Wang X., Wang W., Zhang L. Hydrogenated Butadiene-Acrylonitrile-Butylacrylate Rubber and its Properties // Rubber Chemistry and Technology. 2013. Vol. 86. Issue 2. P. 165–174. DOI: 10.5254/rct.13.88997.

15. Малышев А.И., Помогайбо А.С. Анализ резин. М.: Химия, 1977. 232 с.

16. Hu S., Jess A., Xu M. Kinetic Study of Chinese Biomass Slow Pyrolysis: Comparison of Different Kinetic Models // Fuel. 2007. Vol. 86. Issues 17–18. P. 2778–2788. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.02.031.

17. Захаров Н.Д. Влияние содержания нитрильных групп на термовулканизацию бутадиен-нитрильного каучука // Высокомолекулярные соединения. 1963. Т. 5. № 8. С. 1190–1193.

18. Драбкин И.А., Розенштейн Л.Д., Гейдерих М.А., Давыдова Б.Э. О механизме термического превращения полиакрилонитрила // Доклады АН СССР. 1964. Т. 154. № 1. С. 197–199.

19. Догадкин Б.А., Донцов А.А., Шершнев В.А. Химия эластомеров. М.: Химия, 1981. 374 с.

20. Мадорский С. Термическое разложение органических полимеров. М.: Мир, 1967. 328 с.

21. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. М.: Мир, 1988. 246 с.

REFERENCES

1. GOST R 55849-2013. *Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Sistema vintovykh nasosov dlya mekhanizirovannoi dobychi. Chast' 1. Nasosy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard R 55849-2013. Petroleum and Natural Gas Industries. Progressing Cavity Pump Systems for Artificial Lift. Part 1. Pumps. General Technical Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 90 p. [in Russian].

2. Timashev E.O., Yamaliev V.U. Analiz prichin razrusheniya elastomerov oboim vintovykh nasosov [Analysis of the Causes of Destruction of Elastomers of Cages of Screw Pumps]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2005, No. 2. URL: <http://ogbus.ru/article/view/analiz-prichin-razrusheniya-elastomerov-obojm-vintovykh-nasosov/23316> (accessed 02.02.2021). [in Russian].

3. Epikhin A.V., Shesterov V.P., Gubarev M.I. Issledovanie vliyaniya khimicheskikh reagentov na rezinu elastomera vintovogo zaboinogo dvigatelya pri razlichnykh temperaturakh [Research of Drilling Chemicals Influence on the Rubber of Elastomer Bottomhole Motor under Different Temperature Conditions]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz — Exposition Oil Gas*, 2017, No. 2 (55), pp. 73–75. [in Russian].

4. Sokolovskii A.A., Revyakin B.I., Grigoryan E.E. Rezinovaya diafragma gidrozashchity dlya pogruzhnykh elektronasosov (PEN) [Rubber Diaphragm for Hydraulic Protection for Submersible Electric Pumps (SEP)]. *Khimicheskaya tekhnika — Chemical Engineering Journal*, 2008, No. 4, pp. 16–18. [in Russian].

5. GOST R 54556-2011. *Kauchuki butadien-nitril'nye (NBR). Prigotovlenie i ispytanie rezinovykh smesei* [State Standard R 54556-2011. Acrylonitrile-Butadiene Rubbers (NBR). Preparation and Testing of Rubber Compounds]. Moscow, Standartinform Publ. 2013. 12 p. [in Russian].

6. Devirts E.Ya. *Butadien-nitril'nye kauchuki. Svoystva i primeneniye* [Nitrile Butadiene Rubbers. Properties and Application]. Moscow, TsNIITeneftkhim Publ., 1972. 112 p. [in Russian].

7. *Bol'shoi spravochnik rezinshchika: Ch. 1. Kauchuki i ingredienty* [Large Reference Book of the Rubber Worker: Part 1. Rubbers and Ingredients]. Ed. by S.V. Reznichenko, Yu.L. Morozova. Moscow, «Izdatel'skii tsentr «Tekhinform» MAI» Publ., 2012. 744 p. [in Russian].

8. Papkov V.N., Gusev Yu.K., Rivin E.M., Blinov E.V. *Butadien-nitril'nye kauchuki. Sintez i svoystva* [Nitrile Butadiene Rubbers. Synthesis and Properties]. Voronezh, VGUIT Publ., 2014. 218 p. [in Russian].

9. Bohm G., Mouri H. Novye materialy i tekhnologii dlya novykh shin i drugikh rezinovykh izdelii [New Materials and Technologies for New Tires and other Rubber Products]. *Mir shin. — World of Tires*, 2008, No. 1, pp. 33–36. [in Russian].

10. Koptelov A.A., Milekhin Yu.M., Shlenskii O.F. Teplovye efekty termicheskogo razlozheniya polimerov [Heat Effects in Thermal Degradation of Polymers]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A — Polymer Science. Series A*, 2005, Vol. 47, No. 9, pp. 1628–1634. [in Russian].

11. Sokolovskii A.A., Vainshtein E.F. *Starenie rezin v napryazhennom sostoyanii* [Aging of Rubbers under Stress]. Moscow, TsNITeneftkhim Publ., 1988. 84 p. [in Russian].
12. Zuev Yu.S., Degteva T.G. *Stoikost' elastomerov v ekspluatatsionnykh usloviyakh* [Durability of Elastomers Under Operating Conditions]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 262 p. [in Russian].
13. Usachev S.V., Filippov A.A., Malysheva T.B., Palacheva S.V. Termookislitel'naya destrukttsiya kompozitsii butadienstiroil'nogo i butadiennitril'nogo kauchukov [The Thermooxidative Degradation of Butadiene-Styrene-Butadiene-Nitrile Rubber Blends]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya — ChemChemTech*, 2006, Vol. 49, Issue 3, pp. 39–42. [in Russian].
14. Yue D., Wei X., Wang X., Wang W., Zhang L. Hydrogenated Butadiene-Acrylonitrile-Butylacrylate Rubber and its Properties. *Rubber Chemistry and Technology*, 2013, Vol. 86, Issue 2, pp. 165–174. DOI: 10.5254/rct.13.88997.
15. Malyshev A.I., Pomogaibo A.S. *Analiz rezin* [Rubber Analysis]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 232 p. [in Russian].
16. Hu S., Jess A., Xu M. Kinetic Study of Chinese Biomass Slow Pyrolysis: Comparison of Different Kinetic Models. *Fuel*, 2007, Vol. 86, Issues 17–18, pp. 2778–2788. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.02.031.
17. Zakharov N.D. Vliyanie soderzhaniya nitril'nykh grupp na termovulkanizatsiyu butadien-nitril'nogo kauchuka [Influence of the Content of Nitrile Groups on the Thermal Vulcanization of Nitrile Butadiene Rubber]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya — Polymer Science*, 1963, Vol. 5, No. 8, pp. 1190–1193. [in Russian].
18. Drabkin I.A., Rozenshtein L.D., Geiderikh M.A., Davydova B.E. O mekhanizme termicheskogo prevrashcheniya poliakrilonitrila [On the Mechanism of Thermal Conversion of Polyacrylonitrile]. *Doklady AN SSSR — Soviet Physics. Doklady*, 1964, Vol. 154, No. 1, pp. 197–199. [in Russian].
19. Dogadkin B.A., Dontsov A.A., Shershnev V.A. *Khimiya elastomerov* [Chemistry of Elastomers]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 374 p. [in Russian].
20. Madorskii S. *Termicheskoe razlozhenie organicheskikh polimerov* [Thermal Decomposition of Organic Polymers]. Moscow, Mir Publ., 1967. 328 p. [in Russian].
21. Grassi N., Skott Dzh. *Destruktsiya i stabilizatsiya polimerov* [Destruction and Stabilization of Polymers]. Moscow, Mir Publ., 1988. 246 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Тимашев Эдуард Олегович, канд. техн. наук, докторант Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация

Eduard O. Timashev, Candidate of Engineering Sciences, Doctoral Student, USPTU, Ufa, Russian Federation
e-mail: eotimashev@msk.rn.ru

Волков Максим Григорьевич, канд. техн. наук, заместитель генерального директора по технологическому развитию и инновациям, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Maxim G. Volkov, Candidate of Engineering Sciences, Deputy General Director for Technological Development and Innovation, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation
e-mail: m_volkov@bnipi.rosneft.ru

Гарифуллин Азат Рифович, заместитель генерального директора по инжинирингу добычи, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Azat R. Garifullin, Deputy General Director for Production Engineering, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation
e-mail: ARGarifullin@bnipi.rosneft.ru

Брот Александр Робертович, главный специалист отдела развития технологий нефтегазодобычи, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Alexander R. Brot, Chief Specialist of Oil and Gas Production Technologies Development Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation
e-mail: BrotAR@bnipi.rosneft.ru

Носов Василий Викторович, начальник управления химизации производственных процессов, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Vasilii V. Nosov, Head of the Department of Chemicalization of Production Processes, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation
e-mail: NosovVV-ufa@bnipi.rosneft.ru

Волошин Александр Иосифович, д-р хим. наук, старший эксперт, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Alexander I. Voloshin, Doctor of Chemical Sciences, Senior Expert, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: voloshinai@bnipi.rosneft.ru

Грабовский Станислав Анатольевич, канд. хим. наук, старший научный сотрудник лаборатории окислительных процессов, Уфимский институт химии УФИЦ РАН, г. Уфа, Российская Федерация

Stanislav A. Grabovskii, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Oxidation Chemistry, Ufa Institute of Chemistry UFSC RAS, Ufa, Russian Federation

e-mail: stas_g@anrb.ru

Кулешов Сергей Павлович, заместитель генерального директора по инженерно-технологическому сопровождению и внедрению, ООО «Объединенный Центр исследований и разработок», ПАО «НК «Роснефть», г. Москва, Российская Федерация

Sergei P. Kuleshov, Deputy General Director for Engineering and Technological Support and Implementation, United Research and Development Centre, LLC, Rosneft Oil Company, Moscow, Russian Federation

e-mail: KuleshovSP@rn-rdc.ru

Докичев Владимир Анатольевич, д-р хим. наук, заведующий лабораторией биоорганической химии и катализа, Уфимский институт химии УФИЦ РАН, г. Уфа, Российская Федерация.

Vladimir A. Dokichev, Doctor of Chemical Sciences, Head of Laboratory of Bioorganic Chemistry and Catalysis, Ufa Institute of Chemistry UFSC RAS, Ufa, Russian Federation

e-mail: dokichev@anrb.ru