

Аналитический контроль загрязненности силикагелевого адсорбента компонентами турбинного масла в процессе очистки природного газа

***Ю.А. Иванова, З.А. Темердашев, И.А. Колычев, А.В. Руденко**

*Кубанский государственный университет,
350040, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149*

**Адрес для переписки: Иванова Юлия Анатольевна, E-mail: uyliu@mail.ru*

Поступила в редакцию 3 июня 2020 г., после исправления – 29 июня 2020 г.

Предложена аналитическая схема контроля загрязненности модифицированного оксидом алюминия силикагелевого адсорбента в процессе очистки природного газа компонентами турбинного масла ТП-22С. Объектами исследования были образцы свежего и отработанного в процессе очистки природного газа адсорбента. Идентификацию компонентов турбинного масла на адсорбентах проводили методом тонкослойной хроматографии на пластинах Sorbfil путем разделения компонентов масла на тонком слое сорбента в восходящем потоке гексана с последующим установлением их наличия проявителем серная кислота : формалин. Определение присадок в образцах адсорбентов проводили методом обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии по методике, включающей двухстадийную экстракцию аналитов растворами гексана и ацетона, их перерастворение в ацетонитриле и анализ. Наибольшие содержания турбинного масла наблюдаются в верхнем и среднем слое модифицированного силикагеля. Оптимизированы условия экстракционного извлечения компонентов турбинного масла из отработанного адсорбента. Изучены различные экстрагенты, их объемы для наибольшего извлечения компонентов турбинного масла из адсорбента. Исследована устойчивость присадок турбинного масла на модифицированном силикагеле в процессе его высокотемпературной регенерации путем моделирования процесса регенерации адсорбента в условиях, близких к производственным. Показано, что некоторые компоненты турбинного масла являются устойчивыми к регенерации, например, присадки Д-157 и В-15/41, концентрации которых соизмеримы до и после регенерации. Проведена практическая апробация предложенной аналитической схемы для определения компонентов турбинного масла на реальном образце адсорбента. При определении термически устойчивых компонентов на отработанном модифицированном оксидом алюминия силикагеле рассчитана масса турбинного масла, накопленная в адсорбере за весь срок эксплуатации, которая составила 9,5 г на 1 кг адсорбента.

Ключевые слова: очистка природного газа, силикагель, регенерация, турбинное масло, присадки, ВЭЖХ.

For citation: *Analitika i kontrol' [Analytics and Control]*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 195-200

DOI: 10.15826/analitika.2020.24.3.002

Analytical control of silicagel adsorbent contamination by the turbine oil components in the process of purifying natural gas

***Yu.A. Ivanova, Z.A. Temerdashev, I.A. Kolychev, A.V. Rudenko**

Kuban State University (KubSU), ul. Stavropolskaia, 149, Krasnodar, 350040, Russian Federation

**Corresponding author: Yuliya Anatol'yevna Ivanova, E-mail: uyliu@mail.ru*

Submitted 03 June 2020, received in revised form 29 June 2020

An analytical scheme is proposed for monitoring the contamination of an alumina-modified silica gel adsorbent in the process of purifying natural gas with TP-22C components of turbine oil. The objects of the study were the samples of both the fresh adsorbent and the spent adsorbent in the process of purification of natural gas. The identification of turbine oil components on the adsorbents was carried out using the thin-layer chromatography on Sorbfil plates by separating the oil components on the thin layer of the sorbent in an upward

flow of hexane with the subsequent determination of their presence by the sulfuric acid : formalin developer. The determination of additives in the adsorbent samples was carried out by the method of reverse phase high performance liquid chromatography according to the technique that included two-stage extraction of analytes with the hexane and acetone solutions, their re-dissolution in acetonitrile, and the ensuing analysis. The highest content of turbine oil was observed in the upper and middle layers of the modified silica gel. The conditions for the extraction of turbine oil components from the spent adsorbent have been optimized. Various extractants and their volumes for the greatest extraction of turbine oil components from the adsorbent were studied. The stability of turbine oil additives on the modified silica gel was studied during its high-temperature regeneration by modeling the adsorbent regeneration process under the conditions close to production. It is shown that some components of turbine oil were resistant to the regeneration. For example, additives D-157 and V-15/41, the concentrations of which were comparable before and after the regeneration. The proposed analytical scheme for determining the components of turbine oil on the real adsorbent sample was tested. When determining the thermally stable components on the spent modified alumina silica gel, the mass of turbine oil accumulated in the adsorbent over the entire service life was calculated and amounted to 9.5 g per 1 kg of adsorbent.

Keywords: natural gas purification, silica gel, regeneration, turbine oil, additives, HPLC.

ВВЕДЕНИЕ

Для предотвращения загрязнения, коррозии оборудования и трубопроводов на компрессорных станциях магистральных газопроводов используют установки подготовки газа к транспорту (УПГТ) для очистки природного газа [1]. В них применяют пылеуловители, фильтры-сепараторы и адсорберы. Для очистки и осушки газа в качестве адсорбентов применяют твердые пористые вещества, имеющие большую удельную поверхность. К таким относят активированные угли, силикагели, цеолиты и пермутиты различного состава. Модифицированный оксидом алюминия силикагель является активным катализатором, который способствует эффективному протеканию крекинга углеводородов [2, 3]. Для обеспечения непрерывной подготовки газа к транспорту используется несколько адсорберов, которые поочередно работают в режимах адсорбции и регенерации. При адсорбции из природного горючего газа извлекаются вода, метанол, сероводород, меркаптаны, ароматические и предельные углеводороды [4]. Тяжелые углеводороды и вода удерживаются в порах адсорбента, при этом точка росы обработанного газа, выходящего из слоев модифицированного силикагеля, оказывается заметно ниже. Процесс адсорбции воды и тяжелых углеводородов продолжается до насыщения модифицированного силикагеля, после чего они технологически удаляются нагретым газом регенерации. Насыщенный модифицированный силикагелевый слой регенерируют при 280 °С, т.к. в этих условиях происходит оптимальная десорбция компонентов [5, 6].

Кроме воды и тяжелых углеводородов адсорбент может быть загрязнен мелкодисперсным аэрозолем турбинного масла, используемого в центробежных нагнетателях с газотурбинным приводом на магистральных газопроводах. Турбинное масло попадает в систему очистки газа через уплотнители нагнетателей газоперекачивающих агрегатов, использующих систему уплотнения «масло-газ». Для изучения устойчивости турбинного масла в процессе эксплуатации применяются методы ИК–

спектрометрии с Фурье преобразованием [7, 8] и ВЭЖХ [9-12]. Все они, в основном, базируются на определении присадок, устойчивых в процессе эксплуатации масел. Авторами [13] для решения вопросов контроля загрязнителей различных сред маслами и его компонентами предложена методика ГХ-МС определения перекрестного загрязнения гидравлических жидкостей турбинным маслом, разработанная на основе исследования нескольких образцов масла, в том числе отработанных. Недостатком этой методики является ограниченное применение при определении веществ с высокой молекулярной массой и температурой кипения. Она также не может быть использована для исследования анализируемой нами системы. При технологической эксплуатации турбинные масла претерпевают качественные изменения структуры, свойств. В работах [14-15] приводятся результаты исследований по оценке содержания продуктов окисления турбинного масла, образующихся в процессе его эксплуатации, т.к. некоторые из них могут иметь высокую токсичность.

В газоперекачивающих агрегатах и на установках подготовки газа к транспорту турбинное масло находится в среде природного газа, многие компоненты которого (метан, этан, пропан, бутан, водород и др.) являются сильными восстановителями, поэтому продукты окисления турбинного масла не образуются. На объектах ООО «Газпром» на газотурбинных установках наиболее часто применяют турбинное масло ТП-22С, в состав которого входят присадки, улучшающие антиокислительные, антикоррозионные и дезэмульгирующие свойства [16]. Эти присадки хорошо адсорбируются на силикагеле, кроме того, они являются термически стабильными соединениями, и поэтому высокотемпературная регенерация может оказаться неэффективной для очистки адсорбентов от них. С другой стороны, в литературных источниках отсутствуют сведения по контролю загрязненности модифицированных силикагелевых адсорбентов компонентами турбинного масла.

Целью настоящего исследования стала разработка аналитической схемы контроля загрязненности модифицированного оксидом алюминия силикагелевого адсорбента в процессе очистки природного газа компонентами турбинного масла ТП-22С.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты исследований. Использовали образцы свежего и отработанного адсорбента – модифицированного оксидом алюминия силикагеля различных марок: адсорбент микропористый АСМ, СТО 61182334-004-2011 (содержание оксида алюминия – 3 %); адсорбент КС-Тrockenperlen Н (BASF, Германия) (содержание оксида алюминия – 3 %), предоставленные ООО «Газпром трансгаз Краснодар».

Материалы и оборудование. Для проведения экспериментальных исследований использовали образцы свежего турбинного масла ТП-22С, предоставленного ООО «Газпром трансгаз Краснодар», антикоррозионной (В15/41) и деэмульгирующей (Д – 157) присадки. Для проведения анализов применяли: гексан, сорт 2 «Криохром, Россия», ацетон, «х.ч.» «Экос, Россия», ацетонитрил, сорт 5 «Криохром, Россия», бензойная кислота, «ч.д.а.» «Реахим, Россия», $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, «ч.д.а.» «Реахим, Россия», KH_2PO_4 , «ч.д.а.» «Реахим, Россия», серная кислота «ос.ч.» «Реахим, Россия», формалин техн. ГОСТ 1625-89.

Методики проведения эксперимента. Идентификацию компонентов турбинного масла на адсорбентах проводили методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) на пластинах Sorbfil (ЗАО «Сорбполимер, Россия») путем разделения компонентов масла на тонком слое сорбента в восходящем потоке гексана с последующим установлением их наличия проявителем серная кислота : формалин (5 : 0.1 по объему).

Определение присадок в образцах адсорбентов проводили методом обращено-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ОФ-ВЭЖХ) по методике [12], включающей двухстадийную экстракцию анализов растворами гексана и ацетона, их перерастворение в ацетонитриле и ОФ-ВЭЖХ анализ. Хроматографические исследования проводили на жидкостном хроматографе «SHIMADZU LC-20AD/T LPGE KIT» с УФ-детектором. Условия анализа: колонка Silasorb C18 с диаметром частиц 5 мкм (120 × 2), элюент ацетонитрил – фосфатный буферный раствор с pH 7.5 (60 : 40 по объему), скорость потока 150 мкл/мин, температура колонки 25 °С.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Идентификация компонентов турбинного масла на отработанном адсорбенте

Факт наличия турбинного масла на отработанном адсорбенте устанавливали методами ТСХ и ВЭЖХ. Для этого образцы отработанного адсорбента из нескольких УПГТ предварительно измельчали, далее из них проводили экстракцию компонентов

турбинного масла ацетоном. Одним из экспрессных и простых в исполнении методов анализа смазочных материалов считается ТСХ [12, 17, 18], поэтому предварительный скрининг экстрактов на наличие смазочных материалов проводили по методике с использованием ТСХ [17]. Экстракты с образцов наносили на пластины для ТСХ, где проводили разделение компонентов турбинного масла. В качестве элюента использовали гексан, позволивший элюировать компоненты базового масла (алканы, арены, нафтены и др.), по достижению растворителем верхнего края пластины вынимали и сушили при комнатной температуре до исчезновения запаха растворителя. Затем пластину обрабатывали смесью серной кислоты и формалина (5 : 0.1 по объему). На пластинах были идентифицированы компоненты базового масла – парафины, нафтены и ароматические углеводороды. Сравнение хроматограмм, полученных для модифицированного силикагеля, отобранного с разных установок и на разных слоях, показало, что наибольшее содержание компонентов турбинного масла наблюдаются на адсорбентах марки АСМ. Наибольшие концентрации масла обнаружены в верхнем и среднем слое модифицированного силикагеля, причем, в образцах верхнего слоя интенсивность окрашивания пластины ТСХ выше. Предположительно, это может быть связано с медленной диффузией масла через адсорбер вместе с потоком газа или с перемещением силикагеля в слоях в процессе работы.

Количественную оценку содержания присадок в образцах проводили хроматографически по методике [12]. На хроматограммах идентифицированы компоненты турбинного масла, в частности антикоррозионная (В15/41) и деэмульгирующая (Д – 157) присадки (рис. 1).

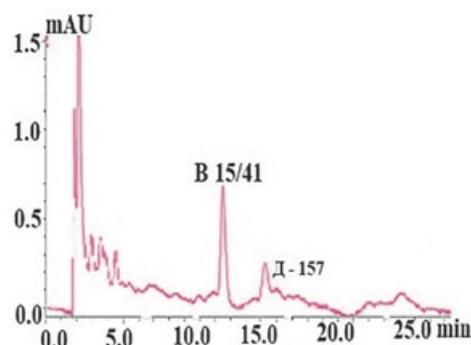


Рис. 1. ВЭЖХ-хроматограмма ацетонового экстракта турбинного масла с отработанного адсорбента, длина волны детектора 240 нм.

Fig. 1. HPLC chromatogram of acetone extract of turbine oil from spent adsorbent, detector wavelength of 240 nm.

Оптимизация условия экстракционного извлечения компонентов турбинного масла из отработанного адсорбента

Максимально возможная экстракция компонентов масла с отработанного адсорбента обычно достигается с использованием ацетона [12] и хлороформа [19]. Для оптимизации условий экстракционного извлечения компонентов турбинного масла из отработанного адсорбента проводили сопоставительный анализ эффективности применения этих экстрагентов. Для этого из проб измельченного адсорбента, бывшего в работе на УПГТ, экстрагировали компоненты масла хлороформом и ацетоном. Полученные экстракты высушивали при комнатной температуре в токе азота, растворяли в ацетонитриле и анализировали методом ОФ ВЭЖХ (рис. 2). Анализ полученных хроматограмм показывает, что экстракция компонентов масла из отработанного силикагеля ацетоном является более предпочтительной, так как в случае с хлороформом она является неполной. Можно также отметить, что для аналитических целей полнота извлечения присадок из турбинного масла

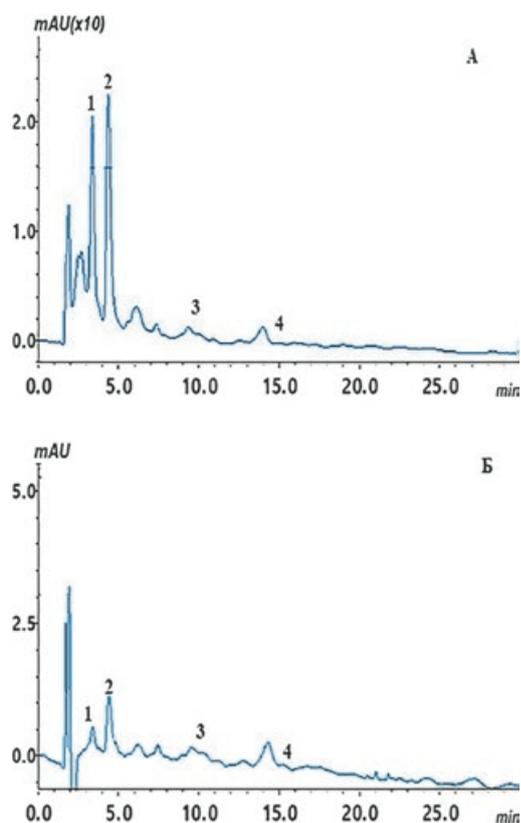


Рис. 2. ВЭЖХ-хроматограммы ацетонового (А) и хлороформового (Б) экстрактов с отработанного силикагеля, длина волны детектора 240 нм: 1, 2 – продукты окисления масла, 3 – присадка В15/41, 4 – присадка Д-157.

Fig. 2. HPLC chromatograms of acetone (А) and chloroform (Б) extracts from spent silica gel, detector wavelength of 240 nm: 1, 2 – oil oxidation products, 3 – additive В 15 / 41, 4 – additive Д-157.

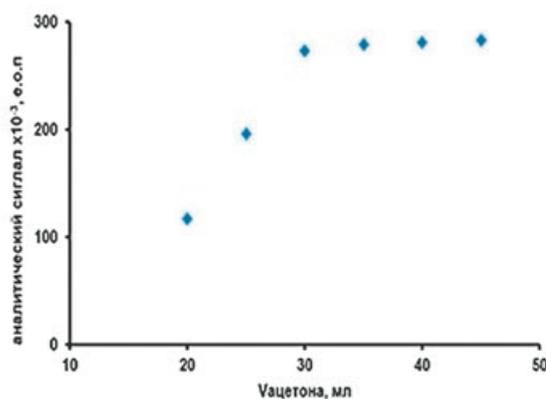


Рис. 3. Зависимость аналитического сигнала присадки В 15/41, извлеченной из 3 г адсорбента, от объема ацетона.

Fig. 3. Dependence of the analytical signal of the В 15/41 additive, extracted from 3 g of adsorbent, on the volume of acetone.

методом твердофазной экстракции достигается с применением ацетона [12].

Важным параметром процесса экстракции компонентов турбинного масла с модифицированного силикагелевого адсорбента является объем растворителя. Проведены исследования по оптимизации объема элюента, который обеспечивает полноту извлечения присадок с поверхности отработанного адсорбента. Для этого использовали модельные растворы образцов термически стабильной присадки В15/41 в гексане, которой предварительно насыщали адсорбент (3 г), затем проводили последующее элюирование аналита ацетоном. Аналитический контроль содержания присадки в экстрактах проводили методом ОФ ВЭЖХ. Экстракты присадки высушивали в токе азота до полного удаления ацетона, полученный сухой остаток растворяли в 1 мл ацетонитрила, после чего проводили анализ. Анализ полученной зависимости аналитического сигнала присадки от объема ацетона, пошедшего на элюирование (рис. 3), показывает, что максимальное извлечение термически устойчивых компонентов турбинного масла из 3 г отработанного сорбента достигается 30 мл ацетона, степень извлечения компонентов турбинного масла при этом составила 98 %

Оценка устойчивости присадок турбинного масла на модифицированном силикагеле в процессе регенерации

Для оценки устойчивости присадок турбинного масла на модифицированном силикагеле в процессе регенерации моделировали процесс регенерации адсорбента. Для этого раствор турбинного масла в гексане известной концентрации наносили на модифицированный силикагель, который затем сушили при комнатной температуре. Затем навеску высушенного адсорбента нагревали и выдерживали в течение 4 часов в условиях, приближенных к про-

Таблица

Устойчивость компонентов турбинного масла к регенерации

Table

Resistance of turbine oil components to the regeneration.

Компонент	Аналитический сигнал до регенерации $\times 10^4$, у.е.	Аналитический сигнал после регенерации $\times 10^4$, у.е.
Присадка В-15/41	186 ± 30	176 ± 30
Присадка Д-157	$1,3 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$

изводственным, отбирая образцы для проведения анализа через каждый час. Из полученных образцов экстрагировали ацетоном компоненты турбинного масла. Экстракты с адсорбента анализировали по методике [12], результаты определений сведены в таблице. Как видно из этой таблицы, некоторые компоненты масла являются устойчивыми к регенерации, в частности, присадки Д-157 и В-15/41 имеют соизмеримые концентрации (аналитические сигналы) до и после регенерации адсорбента.

Таким образом, для обеспечения контроля загрязнения адсорбента компонентами турбинного масла необходима аналитическая схема, включающая отбор образца адсорбента с последующей экстракцией компонентов турбинного масла ацетоном и ОФ ВЭЖХ анализ полученного экстракта.

Определение компонентов турбинного масла на реальном объекте -образце адсорбента

С учетом оптимизированных и описанных выше условий определяли компоненты турбинного масла методом ОФ ВЭЖХ на отработанном модифицированном оксидом алюминия силикагеле.

Навеску отработанного адсорбента (3 г) измельчали, после чего проводили экстракцию анализа

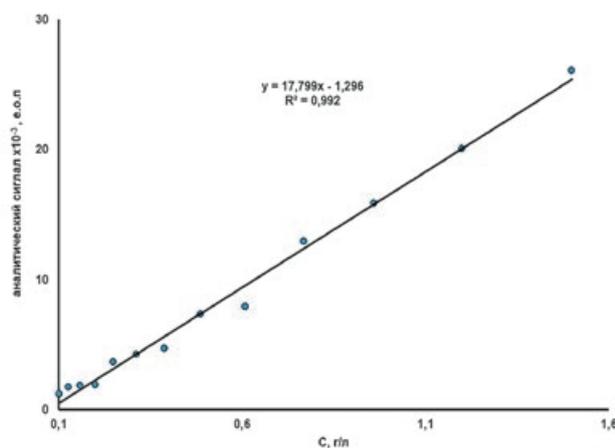


Рис. 4. Градуировочная зависимость аналитического сигнала от концентрации присадки В 15/41.

Fig. 4. Dependence of the analytical signal on the concentration of the В 15/41 additive.

30 мл ацетона. Полученный экстракт пропускали через патрон для твердофазной экстракции, проводили очистку от компонентов базового масла по методике [12]. Для вычисления содержания турбинного масла на отработанном адсорбенте готовили серию градуировочных растворов, для этого использовали экстракт турбинного масла с известным содержанием присадки В 15/41. Далее экстракт и градуировочные растворы анализировали методом ОФ ВЭЖХ. По полученным хроматограммам рассчитывали площади пиков и строили градуировочную зависимость в координатах аналитический сигнал – концентрация присадки В15/41 (рис. 4). С учетом содержания присадки В15/41 в турбинном масле рассчитывали концентрацию смазочного материала в экстракте. Время анализа образца составляет 1 час. Рассчитанная масса турбинного масла, накопленная в адсорбере за весь срок эксплуатации, составила 9.5 г на 1 кг адсорбента.

Проведенные исследования показали, что адсорбент на основе модифицированного оксидом алюминия силикагеля в установках подготовки газа к транспорту в процессе эксплуатации загрязняется компонентами турбинного масла, что снижает эффективность работы адсорберов. Предложенная аналитическая схема обеспечивает контроль загрязненности компонентами турбинного масла ТП-22С, модифицированного силикагелевого адсорбента, в процессе очистки природного газа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проводились в рамках выполнения гранта РФФИ (№19-33-90175) с использованием научного оборудования ЦКП “Эколого-аналитический центр” Кубанского государственного университета.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Fundamental Research, project no. 19-33-90175. The experiments were carried out with the use of scientific equipment of the Ecological and Analytical Center of the Kuban State University.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козаченко А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. М.: Нефть и газ, 1999. 463 с.
2. Перспективы использования адсорбционных технологий для подготовки газа к транспорту / С.Ю. Кондауров [и др.] // Газовая промышленность. 2010. № 10. С. 52-55.
3. ГОСТ Р 53521-2009. Переработка природного газа. М., Стандартинформ, 2019. 16 с.
4. Темердашев З.А., Руденко А.В., Кольчев И.А., Костина А.С. Утилизация метанола из природного газа на силикагелевом адсорбенте, модифицированном оксидом алюминия // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 11. С. 4-9.
5. Mechanical experiments and constitutive model of natural gas hydrate reservoirs / С. Yan [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. V.42, № 31. P. 19810-19818.
6. Weisz P. B. Molecular shape selective catalysis // Pure and Appl. Chem. 1980. V.52, № 9. P. 2091-2103.

7. Zzeyani S., Mikou M., Naja J., Elachhab A. Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil // *Tribology Int.* 2017. V. 114. P. 27-32.
8. Obiols J. Lubricant oxidation monitoring using FTIR analysis - application to the development of a laboratory bulk oxidation test and to in-service oil evaluation // *SAE Technical Papers.* 2003. V. 112, № 4. P. 1903-1907.
9. РД 34.43.208-95. Методика количественного химического анализа. Определение содержания присадок в энергетических маслах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. М.: ОРГРЭС, 1997. 8 с.
10. Review of antiwear additives for crankcase oils / Khorramian B.A. [et al.] // *Wear.* 1993. V. 169, № 1. P. 87-95.
11. Hardy D. R., Black B. H., Wechter M. A. Quantitative determination of corrosion inhibitors in Middle distillate jet fuels by gel permeation chromatography // *J. Chromatogr. A.* 1986. V. 366. P. 351-361.
12. Хроматографическое разделение и определение функциональных присадок в турбинном масле / З.А. Темердашев [и др.] // *Журн. аналит. химии.* 2019. Т.74, № 12. С. 922- 929.
13. Webster R.L., Evans D.J., Rawson P.M. A method for the identification and quantitation of hydraulic fluid contamination of turbine engine oils by gas chromatography-chemical ionisation mass spectrometry // *Lubric. Sci.* 2012. V. 24. P. 373-381.
14. Study on sludge formation during the oxidation process of turbine oils/ Yano A. [et al.] // *Tribol. Trans.* 2004. V. 47. P. 111-122.
15. Study on sludge formation during the oxidation process of turbine oils / Yano A. [et al.] // *Trib. Lubr. Tech.* 2009. V. 65. P. 57-66.
16. ТУ 38.101821-83. Масло турбинное ТП-22С. Технические условия. Министерство нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР, 1983. 22 с.
17. Тагиров Т.К. Методика определения присадок в смазочных материалах методом тонкослойной хроматографии. М.: Рос. Федер. центр судебн. экспертизы, 2007. 27 с.
18. Иванова Ю.А., Темердашев З.А., Кольчев И.А. Спектрофлуориметрическое определение антиокислительной присадки (алкилированного дифениламина) в неуглеводородной смазочно-охлаждающей жидкости // *Аналитика и контроль.* 2019. Т. 23, № 4. С. 563-569.
19. Косулина Т. П., Литвинова Т.А., Черных В.Ф. Использование отработанного силикагеля при производстве бетонов // *Экология и промышленность России.* 2010. № 2. С. 30-32.
5. Yan C., Cheng Yu., Li M, Han Z, Zhang H, Li O., Teng F, Ding J. Mechanical experiments and constitutive model of natural gas hydrate reservoirs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 31, pp. 19810-19818. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.135
6. Weisz P. B. Molecular shape selective catalysis. *Pure and Appl. Chem*, 1980, vol.52, no. 9, pp. 2091-2103. doi: 10.1351/pac198052092091
7. Zzeyani S., Mikou M., Naja J., Elachhab A. Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil. *Tribology Int.* 2017, vol. 114, pp. 27-32. doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.011
8. Obiols J. Lubricant oxidation monitoring using FTIR analysis - application to the development of a laboratory bulk oxidation test and to in-service oil evaluation. *SAE Technical Papers*, 2003, vol. 112, no. 4, P. 1903-1907.
9. *RD 34.43.208-95. Metodika kolichestvennogo khimicheskogo analiza. Opredelenie sodержaniia prisadok v energeticheskikh maslakh metodom vysokoeffektivnoi zhidkostnoi khromatografii [RD 34.43.208-95. Quantitative chemical analysis technique. Determination of additive content in energy oils by high performance liquid chromatography]* М.: ОРГРЭС, 1997. 8 p. (in Russian).
10. Khorramian B.A., Iyer G.R., Kodali S., Natarajan P., Tupil R. Review of antiwear additives for crankcase oils. *Wear*, 1993, vol. 169, no. 1, pp. 87-95. doi.org/10.1016/0043-1648(93)90394-2
11. Hardy D. R., Black B. H., Wechter M. A. Quantitative determination of corrosion inhibitors in Middle distillate jet fuels by gel permeation chromatography. *J. Chromatogr. A*, 1986, vol. 366, pp. 351-361. doi: 10.1016/S0021-9673(01)93483-1
12. Temerdashev Z. A., Ivanova Yu. A., Kolychev I. A., Averina E. S., Rudenko A. V., Zanozina I. I. Chromatographic Separation and Determination of Functional Additives in Turbine Oil. *Journal of Analytical Chemistry*, 2019, vol. 74, no. 12, pp. 1194–1200. doi: 10.1134/S106193481912013X
13. Webster R.L., Evans D.J., Rawson P.M. A method for the identification and quantitation of hydraulic fluid contamination of turbine engine oils by gas chromatography-chemical ionisation mass spectrometry. *Lubric. Sci.* 2012, vol. 24. pp. 373-381. doi: 10.1002/ls.1194
14. Yano A., Watanabe S., Miyazaki Y., Tsuchiya M., Yamamoto Y. Study on sludge formation during the oxidation process of turbine oils. *Tribol. Trans.* 2004, vol. 47. pp. 111-122. doi: 10.1080/05698190490278985
15. Yano A., Watanabe S., Miyazaki Y., Tsuchiya M., Yamamoto Y. Study on sludge formation during the oxidation process of turbine oils. *Trib. Lubr. Tech.* 2009, vol. 65. pp. 57-66. doi: 10.1080/05698190490278985
16. *TU 38.101821-83. Maslo turbinnoe TP-22S. Tekhnicheskie usloviia [TU 38.101821-83. Turbine oil. Technical specifications]*. USSR Ministry of Oil Refining and Petrochemical Industry, 1983. 22 p. (in Russian).
17. Тагиров Т.К. *Metodika opredeleniia prisadok v smazochnykh materialakh metodom tonkosloinoi khromatografii [Method for determination of additives in lubricants by thin layer chromatography]*. Moscow, Ros. Feder. tsentr sudebn. ekspertizy, 2007. 27 p. (in Russian).
18. Иванова Ю.А., Темердашев З.А., Кольчев И.А. [Спектрофлуориметрическое определение антиокислительных присадок (алкилированного дифениламина) в неуглеводородной смазочно-охлаждающей жидкости] // *Аналитика и контроль [Analytics and Control]*, 2019, vol. 23, no 4. pp. 563-569. doi: 10.15826/analitika.2019.23.4.005 (in Russian).
19. Косулина Т. П., Литвинова Т.А., Черных В.Ф. [Use of spent silica gels in concrete production] // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and industry of Russia]*, 2010, no. 2, pp. 30-32. (in Russian).

REFERENCES

1. Kozachenko A.N. *Ekspluatatsiia kompressornykh stantsii magistral'nykh gazoprovodov [Operation of compressor stations of gas pipelines]*. Moscow, Oil and gas, 1999. 463 p. (in Russian).
2. Kondaurov S. Iu., Artemova I.I., Kruchinin M.M., Pavlenko P.P., Shajhutdinov A.Z., Zolotovskij B.P. [Prospects for the use of adsorption technologies for the preparation of gas for transport]. *Gazovaya promyshlennost' [Gas industry]*, 2010, no. 10, pp. 52-55 (in Russian).
3. *GOST R 53521-2009. Pererabotka prirodnogo gaza [State Standard 53521-2009 natural gas processing]*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 16 p. (in Russian).
4. Temerdashev Z.A., Rudenko A.V., Kolychev I.A., Kostina A.S. [Utilization of methanol from natural gas on silica gel adsorbent modified with alumina]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and industry of Russia]*, 2019, vol. 23, no. 11, pp. 4-9. doi: 10.18412/1816-0395-2019-11-4-9 (in Russian).