

П. О. Залесов (асп.), А. Ю. Килякова (к.т.н., доц.), Б. П. Тонконогов (д.х.н., проф.)

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СМЕСИ
ВЫСШИХ АЛКИЛАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ
В КАЧЕСТВЕ БАЗОВОГО КОМПРЕССОРНОГО МАСЛА**

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина,
кафедра химии и технологии смазочных материалов и химмотологии
119991, г. Москва, Ленинский пр., 65/1; e-mail: zalesov.pavel@yandex.ru

P. O. Zalesov, A. Yu. Kilyakova, B. P. Tonkonogov

**ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING A MIXTURE
OF HIGHER ALKYLAROMATIC HYDROCARBONS
AS A BASE COMPRESSOR LUBRICANT**

Gubkin University

65/1, Leninskiy Prospekt Str., 119991, Moscow, Russia; e-mail: zalesov.pavel@yandex.ru

Представлены результаты сравнения масел на основе высших алкилароматических углеводородов (полиалкилбензола) с другими применяющимися на сегодняшний день базовыми смазочными материалами. Рассмотрены физико-химические и эксплуатационные характеристики подобных по реологическим свойствам основ: полиальфаолефиновой, сложноэфирной, нефтяной. Составлена матрица характеристик базовых масел. Верифицированы преимущества и недостатки применения полиалкилбензола в качестве основы для энергетических масел. Выявлено несоответствие реологических показателей, необходимых для достижения наиболее распространенных классов вязкости компрессорных смазочных материалов. Показаны возможности повышения вязкости полиалкилбензола. Сформирована линейка высокоэффективных базовых компрессорных смазочных материалов на основе смесей высших алкилароматических углеводородов и полиальфаолефиновых масел.

Ключевые слова: компрессорные масла; масла для винтовых компрессоров; нефтяное масло; полиальфаолефиновые углеводороды; полиалкилбензол; сложноэфирные масла.

Динамическое оборудование повсеместно применяется на объектах топливно-энергетического комплекса страны. Трудно представить себе любое нефтеперерабатывающее, химическое предприятие без современных средств автоматизации. На промышленных площадках находят применение клапаны-регуляторы и клапаны-от-

Oils based on alkylaromatic hydrocarbons (polyalkylbenzene) were compared with other base lubricants currently in use. The physicochemical and operational characteristics of bases similar in rheological properties are considered: polyalphaolefin, ester, petroleum. A matrix of characteristics of base lubricants has been compiled. The advantages and disadvantages of using polyalkylbenzene as a base for energy oils are verified. The discrepancy between the rheological parameters necessary to achieve the most common viscosity classes of compressor lubricants has been revealed. Possible ways of increasing the viscosity of polyalkylbenzene are indicated. Based on the results of the work, a range of highly efficient basic compressor lubricants based on mixtures of alkylaromatic hydrocarbons and polyalphaolefin oils has been formed.

Key words: compressor lubricants; ester lubricants; lubricants for screw compressors; petroleum lubricant; polyalkylbenzene; polyalphaolefin hydrocarbons

секатели, их численность лишь на одной технологической установке может достигать сотни, а в некоторых случаях (на более крупных объектах) тысячи. Для обеспечения подвижности рабочего органа любого клапана применяется сжатый воздух, который нагнетается из централизованных воздушных компрессорных посредством динамических машин, зачастую – винтовых, поршневых и иногда центробежных.

Дата поступления 02.06.25

В настоящее время на промышленных площадках предпочтение отдается именно винтовым воздушным маслозаполненным компрессорам в связи с рядом преимуществ, обусловленных их конструкцией: компактность, равномерность подачи среды (отсутствие пульсаций), выход воздуха при перекачивании и нагнетании 98% (у поршневых 80%), отсутствие стадий простоя в рамках рабочего цикла, относительная чистота среды (наличие зоны сепарации). Вышеизложенные тезисы привели в свою очередь также к вектору модернизации систем пневмоснабжения горно-обогаительных комбинатов. Все чаще такие стратегически важные объекты отходят от отдельно стоящих машинных залов к монтажу компрессоров по месту работ (например, в полевых условиях для приведения в действие кареток буровых машин). Такой подход позволяет снизить операционные затраты ввиду сокращения любых видов потерь воздуха – гидравлических, тепловых, объемных ¹. Отсутствует также необходимость в обслуживании сложных магистральных воздушных сетей.

Несмотря на ряд обозначенных преимуществ, основным существенным недостатком эксплуатации винтовых машин является их маслосистема. Здесь следует сделать акцент не на особой конструкционной сложности вспомогательной системы, а на необходимости грамотного подбора смазочного материала в связи с возложенными на него функциональными особенностями.

Во-первых, масло в винтовом компрессоре подается непосредственно в высокотемпературный триботехнический узел, что при агрессивности перекачиваемой среды (воздух) обуславливает повышенную окисляемость и частую замену. В связи с чем, уже при набеге около 2000 ч смазочный материал на нефтяной основе образует смолоподобные агломераты, способные забивать фильтры маслосистемы, а также блокировать коалесцер сепаратора. Данный факт напрямую обуславливает риск возникновения серьезной нештатной ситуации с возможным «подрывом» пружинного предохранительного клапана и выходом взрывоопасной среды по линии на факел или непосредственно в атмосферу. Между тем, низкий ресурс горюче-смазочного материала приводит к необходимости его частой замены силами оперативного персонала с промывкой системы соответственно. Таким образом, масло в воздушном компрессоре должно обладать превосходными антиокислительными свойствами.

Во-вторых, конструкция камеры сжатия предусматривает технологический зазор, и как следствие, не исключена вероятность прорыва газа с нагнетания в область всасывающего трубопровода. В этой связи смазочный материал играет роль

герметизирующего агента и напрямую влияет на КПД компрессорной установки.

В-третьих, современная винтовая пара компрессора характеризуется точным подгоном винтов друг к другу, что повышает возможность повреждения металлических поверхностей при их движении. Масло в такой системе обеспечивает снижение степени изнашивания узлов, способствует надежности и долговечности работы динамического оборудования в целом. Поэтому важно уделять особое внимание трибологическим характеристикам подбираемого смазочного материала.

Рассматривая исторические вехи развития смазочных материалов, можно выделить основные типы базовых масел, применяемых в области эксплуатации компрессоров: нефтяные, полиальфаолефиновые, сложноэфирные и полиалкилглицерольные ². Каждый из них обладает своим рядом преимуществ, однако общим основным недостатком масел, ограничивающим их применение, является относительная дороговизна.

Интерес представляет вовлечение в смазочные композиции компонентов, стабильных к окислению и характеризующихся низкой стоимостью. К перспективным соединениям можно отнести высшие алкилароматические соединения, в частности полиалкилбензол.

Цель настоящей работы заключалась в разработке высокоэффективной линейки базовых компрессорных масел (наиболее популярных классов вязкости ISO 32, ISO 46, ISO 68), обладающей необходимым уровнем характеристик для применения в воздушных компрессорах различного типа (в том числе, винтовых).

Материалы и методы

В качестве объектов выбраны различные по химической природе базовые смазочные материалы, подобные по реологическим свойствам:

- полиалкилбензол (ПАБ, смесь высших алкилароматических углеводородов), г. Кириши (ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез»);
- нефтяное промышленное масло И-20А, г. Ярославль (ПАО «Славнефть-Янос»);
- сложный эфир диоктилтерефталат (ДОТФ), г. Пермь (ПАО «Сибур Холдинг»);
- полиальфаолефиновое масло (ПАОМ) класса вязкости 4, г. Нижнекамск (TAIF lubricants).

На заключительном этапе для получения популярных классов вязкости базовых компрессорных масел в работе использованы полиальфаолефиновые масла классов вязкости 12, 40, 100 (г. Нижнекамск, TAIF Lubricants).

Поддерживая вектор внутренней политики России в области всеобъемлющего развития технологического суверенитета, в работе использованы объекты только отечественного производства.

Остановимся более подробно на ключевом компоненте исследования – полиалкилбензоле. Полиалкилбензол (ПАБ, тяжелый алкилат) – смесь алкилароматических углеводородов различного строения. Структурно-групповой состав по результатам высокоэффективной жидкостной хроматографии представлен в табл. 1.

Таблица 1
Структурно-групповой состав полиалкилбензола по данным ВЭЖХ

Группа углеводородов		Содержание, % мас.
Моноциклические ароматические	Линейные	6.21
	Диалкилбензолы	78.13
	Дифенилалканы	5.82
Парафино-нафтеновые		7.40
Бициклические ароматические		2.14
Полициклические		0.02
Смолы		0.28
Полярные смолы		отс.

ПАБ является побочным продуктом синтеза линейных алкилбензолов (ЛАБ), выделяемым на стадии фракционирования в вакуумной колонне³. Производство ПАБ осуществляется на промышленной площадке ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез» в объеме около 2-3 тыс. т/год в зависимости от общей загрузки установки «Пакол-Дифайн». Несмотря на отсутствие ценности в рамках дальнейшей переработки на предприятии, продукт является уникальным с точки зрения исходных характеристик.

Основные методы исследования для упорядочивания представлены в табл. 2.

Таблица 2
Методы исследования физико-химических и эксплуатационных характеристик

Наименование показателя	Метод исследования
Анилиновая точка	ГОСТ 12329
Бромное число	ISO 3839
Диаметр пятна износа	ГОСТ 9490
Индекс вязкости	ГОСТ 25371
Испаряемость по NOACK	ASTM D5800
Кинематическая вязкость	ГОСТ 33
Плотность	ГОСТ 3900
Показатель преломления	ГОСТ 18995.2
Содержание воды	ГОСТ 2477
Содержание механических примесей	ГОСТ 6370
Содержание серы	ASTM D 4294
Структурно-групповой состав	IP 469 (ВЭЖХ)
Температура вспышки в открытом тигле	ГОСТ 4333
Температура застывания	ГОСТ 20287
Термоокислительная стабильность	ГОСТ 981
Цвет	ГОСТ 20284

Результаты и их обсуждение

На начальном этапе работы проведен анализ структурно-группового состава исходной смеси высших алкилароматических углеводородов. С целью оценки влияния состава на свойства полиалкилбензола (ВЭЖХ, IP 469) определены основные группы углеводородов, а также их содержание в смеси тяжелого алкилата (табл. 1).

Опираясь на химический состав ПАБ, представляется возможным с достаточной долей вероятности судить о превосходной термоокислительной стабильности и теплоемкости, высоком уровне трибологических и низкотемпературных свойств, поэтому была произведена оценка основных характеристик полиалкилбензола (табл. 3).

Таблица 3
Физико-химические и эксплуатационные характеристики полиалкилбензола

Наименование показателя		Значение
Внешний вид		прозрачная жидкость
Плотность при 20 °С, кг/м ³		871
Кинематическая вязкость, мм ² /с	при 100 °С	4.03
	при 40 °С	22.12
Индекс вязкости		60
Показатель преломления		1.4897
Температура застывания, °С		–62
Температура вспышки в открытом тигле, °С		195
Диаметр пятна износа, мм		0.42
Цвет, ед. ЦНТ		0.5
Испаряемость по NOACK, %		13.7
Бромное число, Br ₂ /100 г		2.5
Содержание серы, % мас.		отс.
Содержание воды, % мас.		отс.
Содержание механических примесей, % мас.		отс.

Свойства ПАБ доказывают уникальность данного продукта с точки зрения применимости его в смазочных материалах. Использование смеси алкилароматических углеводородов в качестве базового компрессорного масла позволит уже на первоначальном этапе производства сформировать высокоэффективную основу, характеризующуюся высоким уровнем противоизносных и низкотемпературных свойств.

С целью подтверждения уникальности полиалкилбензола и рациональности его выбора в качестве будущей основы линейки компрессорных масел для сравнения рассмотрены иные по химической природе (но подобные по реологическим свойствам) базовые компоненты энергетических смазочных материалов. Основные физико-химические и эксплуатационные характеристики рассмотренных объектов представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Физико-химические и эксплуатационные характеристики базовых масел
(И-20А, ДОТФ, ПАОМ, ПАБ)**

Наименование показателя		И-20А	ПАОМ-4	ДОТФ	ПАБ
Внешний вид		жидкость светло- желтого цвета	бесцветная жидкость	бесцветная жидкость	прозрачная жидкость янтарного цвета
Плотность при 20 °С, кг/м ³		882	821	983	871
Кинематическая вязкость, мм ² /с	при 100 °С	5.32	4.01	4.75	4.03
	при 40 °С	32.76	18.45	29.68	22.12
	при -40 °С	–	3589	16 213	6430
Индекс вязкости		92	115	64	60
Температура застывания, °С		–21	–68	–64	–62
Температура вспышки в открытом тигле, °С		210	215	227	195
Диаметр пятна износа, мм		0.68	0.99	0.95	0.42
Термо- окислительная стабильность	Кислотное число до, мг КОН/г	0.01	0.06	0.15	0.11
	Кислотное число после, мг КОН/г	0.87	0.43	0.45	0.32

Таблица 5

Матрица свойств базовых компрессорных масел

Параметр	Нефтяное масло	ПАОМ	Сложные эфиры	Алкилароматические углеводороды
Термоокислительная стабильность	У	Х	Х	П
Пожаробезопасность	Х	Х	П	У
Низкотемпературные свойства	У	П	Х	Х
Противоизносные свойства	Х	У*	У	П
Вязкостно-температурные свойства	У	П	У**	У

У – удовлетворительно; Х – хорошо; П – превосходно

* без введения присадок (с вводом свойства становятся превосходными);

** у большинства сложнэфирных соединений П.

Исходя из полученных в ходе исследования значений заметно, что все синтетические основы обладают превосходными низкотемпературными свойствами. Несмотря на то, что полиалкилбензол характеризуется более высокой температурой застывания по сравнению с полиальфаолефиновым базовым маслом, он обладает уникальными противоизносными характеристиками. Между тем, кинематическая вязкость смеси алкилароматических углеводородов при отрицательных температурах практически сопоставима с таковой для ПАОМ. Вышеизложенное утверждение позволяет сформировать на основе ПАБ смазочные композиции, способные работать в условиях экстремально низких температур.

Исходя из характеристик базовых масел, представляется возможным сформировать общую матрицу свойств (табл. 5).

Матрица характеристик на этапе разработки смазочного материала для компрессоров позволит выбрать преимущественную базу для достижения необходимого набора приоритетных свойств.

Не менее важным в рамках разработки и производства товарных энергетических масел является оценка растворяющей способности базового масла в отношении полярных соединений (присадок различных классов). В этой связи наиболее оптималь-

ным показателем может выступать анилиновая точка (табл. 6).

Таблица 6

Анилиновая точка базовых масел, °С

И-20А	ПАОМ-4	ДОТФ	ПАБ
99.8	118.1	81.2	77.4

Анилиновая точка, косвенно характеризуя содержание ароматических углеводородов, в ряде источников рассматривается как показатель, способный также описывать растворяющую способность. Этот факт обусловлен повышением сил ориентационного и индукционного взаимодействия между молекулами, связанным с ростом ароматичности смазочного материала. Ввиду этого полиалкилбензол не только способен растворять полярные химические соединения, но и растворяться в иных синтетических компонентах.

Последний факт является ключевым в решении принципиального недостатка полиалкилбензола, а именно, низкой вязкости. В данном контексте следует упомянуть тот факт, что наиболее распространенными классами вязкости (по ISO при 40 °С) на рынке компрессорных масел являются 32 (28.8–35.2 сСт), 46 (41.4–50.6 сСт), 68 (61.2–74.8 сСт). В конечном итоге реологические свой-

ства ПАБ оказываются недостаточными (ISO 22) для формирования популярных линеек продукции. Выявленная проблема может быть решена несколькими способами: путем введения вязкостных присадок в объем ПАБ, либо путем смешения ПАБ с другими синтетическими/нефтяными компонентами.

Введение загущающих присадок в ПАБ является простым и действенным методом повышения вязкости ⁴. Однако в условиях эксплуатации винтового компрессора полимерные соединения подвергаются деструкции (механическое воздействие винтовой пары, термическое воздействие при сжатии газа), в связи с чем уже в первые часы работы на свежем загущенном масле резко изменяются реологические показатели и, как следствие, несущая способность композиции. В связи с вышеизложенным, применение данного метода является нерациональным.

Не менее действенным методом увеличения вязкости полиалкилбензола является компаундирование его с другими синтетическими компонентами – полиальфаолефиновыми углеводородами. Для этого в работе были использованы следующие базовые полиальфаолефиновые масла классов вязкости 12 (ПАОМ-12); 40 (ПАОМ-40) и 100 (ПАОМ-100).

Исходные характеристики этих объектов аналогично изучены в лабораторных условиях (табл. 7).

По окончании рассмотрения исходных свойств приступили к формированию линейки компрессорных масел на основе смесей ПАБ/ПАОМ. Найдена наиболее оптимальная рецептура композиций, в этой связи необходимо поддерживать соотношение 70:30 (ПАБ:ПАОМ).

Для производства образцов путем термомеханического диспергирования в химические стаканы с ПАБ постепенно приливали ПАОМ-12 (формирование масла ISO 32), ПАОМ-40 (формирование масла ISO 46), ПАОМ-100 (формирование масла ISO 68). Характеристики полученных смесей представлены в табл. 8.

Применение метода смешения ПАБ с ПАОМ благодаря превосходной растворяющей способности каждого компонента позволяет сформировать широкую базовую линейку компрессорных масел. Стоит отметить, что выбранные синтетические основы в смеси нивелируют недостатки друг друга путем синергетического эффекта в рамках взаимодействия. Образцы "ПАБ-ПАОМ" характеризуются высоким уровнем противоизносных и низкотемпературных свойств, между тем при смешении ПАБ с высоковязкими полиальфаолефиновыми компонентами замечен значительный рост индекса вязкости смазочных композиций.

Опираясь на вышеизложенные утверждения следует отметить, что компаундирование синтетических углеводородов с полиалкилбензолом позволяет в короткие сроки решить основной недостаток алкилароматики в части низкой вязкости. Сформированные базовые масла для компрессоров уже на начальном этапе характеризуются превосходными показателями. В этой связи наиболее оптимальным вектором последующих научно-исследовательских работ может стать подбор различных типов присадок для доведения линейки композиций до товарного вида. Интерес также представляет проведение стендовых испытаний на полноразмерных компрессорах различных типов.

Таблица 7

Физико-химические и эксплуатационные характеристики полиальфаолефиновых масел ПАОМ-12, ПАОМ-40, ПАОМ-100

Наименование показателя		ПАОМ-12	ПАОМ-40	ПАОМ-100
Плотность при 20 °С, кг/м ³		838	849	859
Кинематическая вязкость, мм ² /с	при 100 °С	12.1	40.37	98.7
	при 40 °С	88.9	389.72	1180.0
Индекс вязкости		129	154	172
Температура застывания, °С		–51	–40	–31
Температура вспышки в открытом тигле, °С		258	279	289

Таблица 8

Физико-химические и эксплуатационные характеристики смесей состава «ПАБ-ПАОМ»

Наименование показателя		ПАБ/ПАО-12	ПАБ/ПАО-40	ПАБ/ПАО-100
Плотность при 20 °С, кг/м ³		854	860	866
Кинематическая вязкость, мм ² /с	при 100 °С	5.55	7.79	11.38
	при 40 °С	33.58	46.75	68.7
Индекс вязкости		101	136	159
Диаметр пятна износа, мм		0.70	0.58	0.53
Температура застывания, °С		–58	–55	–51
Класс ISO		32	46	68

Литература

1. Липчанский А.Ю., Жаткин А.Н. Анализ эффективности снабжения пневматической энергией потребителей сжатого воздуха подземного рудника ПАО «Гайский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №1. – С.76-82.
2. Залесов П.О., Килякова А.Ю., Тонконогов Б.П. Подбор составов синтетических масел для винтовых маслозаполненных компрессоров с улучшенными трибологическими характеристиками // Мир нефтепродуктов. – 2024. – №5. – С.42-44.
3. Ивашкина Е.Н., Юрьев Е.М., Кравцов А.В., Иванчина Э.Д. Совершенствование процесса дегидрирования высших парафинов на основе нестационарной кинетической модели // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т.310, №2. – С.151-154.
4. Шевцова В.Д., Татур И.Р., Леонтьев А.В. Исследование деструкции растворов высокомолекулярных полиизобутиленов в нефтяном масле // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2019. – №4(297). – С.211-224.

References

1. Lipchanskiy A.Yu., Zhatkin A.N. *Analiz effektivnosti snabzheniya pnevmaticheskoy energiei potrebitелей szhatoogo vozdukhа podzemnogo rudnika PAO «Gayskiy GOK»* [Analysis of the efficiency of pneumatic energy supply to compressed air consumers of the underground mine of PJSC «Gaisky GOK»]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2018, no.1, pp.76-82.
2. Zalesov P.O., Kilyakova A.Yu., Tonkonogov B.P. *Podbor sostavov sinteticheskikh masel dlya vintovykh maslozapolnennykh kompressorov s uluchshennymi tribologicheskimi kharakteristikami* [Selection of synthetic oil formulations for oil-injected screw compressors with improved tribological characteristics]. *Mir nefteproduktov* [World of petroleum products], 2024, no.5, pp.42-44.
3. Ivashkina E.N., Yur'ev E.M., Kravtsov A.V., Ivanchina E.D. *Sovershenstvovanie protsessа degidrirovaniya vysshikh parafinov na osnove nestatsionarnoy kineticheskoy modeli* [Improvement of the process of dehydrogenation of higher paraffins based on an unsteady kinetic model]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the tomsk polytechnic university], 2007, vol.310, no.2, pp.151-154.
4. Shevtsova V.D., Tatur I.R., Leont'ev A.V. *Issledovanie destruktсии rastvorov vysokomolekulyarnykh poliizobutilenov v neftyanom masle* [Investigation of the degradation of high molecular weight polyisobutylene solutions in petroleum]. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza im. I.M. Gubkina* [Proceedings of Gubkin University], 2019, no.4(297), pp.211-224.