



УДК 622.684

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА КОМПРИМОВАННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ АК «АЛРОСА» В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

Дубов Г.М.<sup>1</sup>, Богомолов А.Р.<sup>1</sup>, Дворовенко И.В.<sup>1</sup>, Азиханов С.С.<sup>1</sup>, Зырянов И.В.<sup>2</sup>,  
Слепцова Е.В.<sup>2</sup>, Никифорова М.Н.<sup>2</sup>, Логвинов И.А.<sup>3</sup>, Попов Д.К.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

<sup>2</sup> Мирнинский политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный  
Федеральный университет им. М.К. Аммосова»

<sup>3</sup> Институт «Якутнипроалмаз», научно-исследовательский и проектный институт  
алмазодобывающей промышленности

<sup>4</sup> АК «АЛРОСА» (ПАО)



### Информация о статье

Поступила:

16 февраля 2024 г.

Рецензирование:

18 марта 2024 г.

Принята к печати:

25 марта 2024 г.

### Ключевые слова:

технологический транспорт;  
газобаллонное оборудование;  
газомоторное топливо;  
компримированный  
природный газ; компонентный  
состав; термобарические  
условия

### Аннотация.

Исследовано влияние переменных термобарических условий на компонентный состав компримированного природного газа, используемого в качестве газомоторного топлива на технологическом автотранспорте в Республике Саха (Якутия). Определены температуры кипения (конденсации) компонентов природного газа в зависимости от их парциального давления при различном общем давлении природного газа от 1 до 200 бар и температуры, которые свидетельствуют о способности к частичной конденсации ряда компонентов газа. Получены исходные данные, исследованы и проанализированы изменения компонентного состава природного газа в зимний, весенний и летний периоды времени при различных температурах окружающей среды при понижении давления в газовых баллонах (с 200 до 50 бар). Выявлены приемлемые термобарические условия, при которых сохраняется оптимальный энергетический заряд природного газа, подаваемый в качестве топлива в цилиндровую группу двигателя внутреннего сгорания. При этом исключаются изменения эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания технологического транспорта в условиях эксплуатации при экстремально низких температурах окружающей среды Якутии.

**Для цитирования:** Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Дворовенко И.В., Азиханов С.С., Зырянов И.В., Слепцова Е.В., Никифорова М.Н., Логвинов И.А., Попов Д.К. Исследование компонентного состава компримированного природного газа при переменных термобарических условиях его применения в качестве моторного топлива на технологическом транспорте АК «АЛРОСА» в условиях Якутии // Техника и технология горного дела. – 2024. – № 1(24). – С. 23-42. – DOI: 10.26730/2618-7434-2024-1-23-42, EDN: GMSBDJ

### Введение

По отношению к дизельному топливу альтернативный энергоноситель – природный газ – имеет ряд преимуществ, ключевыми из которых являются экологические и экономические



аспекты его применения [1-4]. Кроме того, доступность природного газа в местах дислокации ведущих горнодобывающих российских компаний, сконцентрированных в большей степени в Уральском, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах Российской Федерации, предопределяет перспективность данного вида моторного топлива как наиболее приемлемого энергоносителя. Целесообразность и эффективность использования природного газа в качестве моторного топлива на технологическом транспорте компаний, ведущих добычу минеральных ресурсов в условиях северных территорий РФ и Якутии, также подтверждается исследованиями ряда российских ученых [5-8].

Широкое внедрение газомоторного топлива подтверждается ведущимися на сегодняшний день разработками новых видов технологического автотранспорта, в том числе и карьерных самосвалов, потребляющих природный газ в качестве энергоносителя, находящегося на борту транспортного средства как в сжатом агрегатном состоянии (КПГ – компримированный природный газ), так и в сжиженном агрегатном состоянии (СПГ – сжиженный природный газ) [9-11].

Помимо очевидных преимуществ использования природного газа как моторного топлива по отношению к дизельному топливу имеют место быть и трудности при его применении в условиях экстремально низких температур окружающей среды, что очевидно обуславливается его физико-химическими свойствами. Так, в осенне-зимне-весенний периоды, т.е. в периоды экстремальных перепадов температур, при эксплуатации в условиях г. Мирного и пос. Айхал Республики Саха (Якутия) газомоторного технологического автотранспорта АК «АЛРОСА» (ПАО) наблюдались аномальные процессы. Данные аномальные процессы заключались в изменении эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания (далее – ДВС) и выходе из строя элементов газобаллонного оборудования (далее – ГБО), установленного на газомоторном технологическом транспорте.

Аномальные процессы, как показал предварительный анализ, очевидно, объясняются следующей гипотезой. При эксплуатации газомоторного транспорта в осенне-зимне-весенний период, работающего на газомоторном топливе, а именно КПГ, происходит частичная конденсация высококипящих компонентов природного газа и в последующем их испарение при некоторых соотношениях давления и температуры, что приводит к неравномерности величины энергетического заряда в цилиндровую группу, изменяющегося до двух раз.

При заправке транспортных средств природный газ поступает с положительной температурой (от +5 до +15 градусов), в период окончательной дозаправки (с 180 до 200 атм) в процессе сжатия происходит дополнительное повышение температуры на 10-15 градусов. При данных температурах и высоком давлении природный газ в баллонах имеет стабильный состав. По мере охлаждения природного газа в баллонах происходит разделение газа на легкие и тяжелые углеводороды (последние конденсируются, но в газовой части их присутствие несомненно остается в меньшей мере). В данном состоянии в топливную систему транспортного средства поступает природный газ с наибольшим метановым числом. По мере потребления газа происходит снижение давления в баллонах, что приводит к изменению состава природного газа – переходу тяжелых углеводородов из жидкого состояния в газообразное, что в свою очередь приводит к изменению компонентного состава газомоторного топлива, а также к снижению метанового числа и, как следствие, к нестабильной работе ДВС технологического транспорта, связанного с увеличением энергетического заряда, подаваемого в ДВС.

В связи с тем, что вышеизложенные физические процессы ранее никем не исследовались, в том числе с учетом экстремально низких температур окружающей среды, возникла потребность в проведении исследований компонентного состава газомоторного топлива – природного газа при переменных термобарических условиях его использования на технологическом транспорте АК «АЛРОСА» (ПАО) в разные периоды времени.

На сегодняшний день в ключевых документах РД 03112194-1095-03 «Руководство по организации эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе» и Распоряжении Минтранса России от 19.10.2012 N НА-124-р «Об утверждении Методических рекомендаций по технической эксплуатации газобаллонных колесных транспортных средств, находящихся в эксплуатации в Российской Федерации» отсутствуют



рекомендации по эксплуатации транспортных средств при различных температурах окружающей среды. Также отсутствуют и пояснения по физическим процессам, происходящим с природным газом в ГБО при переменных термобарических условиях [12,13].

### Цель работы

Исследовать влияние переменных термобарических условий на изменение компонентного состава природного газа, используемого в качестве моторного топлива на технологическом транспорте АК «АЛРОСА» (ПАО) в г. Мирный и в п. Айхал Республики Саха (Якутия).

### Методы исследования

Методы исследований базировались на теоретических расчетах, основанных на термодинамических законах поведения газовых смесей, в широком диапазоне температур фазового перехода при различных давлениях; экспериментальном определении компонентного состава газовой смеси при изменении температуры и давления с использованием отработанных стандартных методик; определении материальных балансов с учетом использования некоторой массы компонентов газовой смеси; применении качественных и количественных методов исследования.

При проведении исследований компонентного состава природного газа, применяемого в качестве моторного топлива на технологическом транспорте АК «АЛРОСА» (ПАО), использовалось метрологическое и технологическое оборудование, а также программный продукт, представленные в Таблице 1.

Таблица 1. Метрологическое, технологическое и программное обеспечение

Table 1. Metrological, technological and software support

№ п/п	Наименование	Количество
1	Газовый хроматограф GC-2010 Plus	1
2	Прибор комбинированный Тесто 622	1
3	Двухканальный измеритель ОВЕН в комплекте с термопарами	1
4	Комплект пробоотборников ППЭ – 3.0 (для отбора проб природного газа)	96
5	Пирометр Testo 830-T1	1
6	Газовые металлические баллоны для хранения КПП	2
7	Газовый редуктор с манометром	2
8	Резинотканевый рукав в комплекте с запорной арматурой и устройством заправки природного газа в пробоотборники ППЭ – 3.0	2
9	Программный продукт «Расчет состава природного газа при различных температурах и давлениях»	1

Методика исследований предполагала проведение натурных измерений компонентного состава природного газа с автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (далее – АГНКС) в г. Мирный и АГНКС 26 в пос. Айхал. Место проведения пошагового отбора природного газа из газовых баллонов осуществлялось в условиях ООО «Алмаздортранс» в г. Мирный (АК «АЛРОСА» (ПАО)). Количественный химический анализ компонентного состава природного газа осуществлялся в учебно-научной испытательной лаборатории комплексного анализа техногенных нарушений среды Мирнинского политехнического института (филиала) ФГАОУ ВО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова».

Для получения полноценной картины и достаточного количества статистических данных и их последующей теоретической обработки замеры проводились в зимний (февраль 2023 г.), весенний (март 2023 г.) и летний (июнь 2023 г.) периоды времени при температурах окружающей среды от -36° С до +15° С.

Для исследований использовались баллоны с компримированным природным газом, заправленные на АГНКС в г. Мирный и п. Айхал. Принималось, что температура природного газа при заполнении газовых баллонов составляла +23°С на обеих АГНКС. В ходе исследований



проводились отборы газа из баллонов при понижении давления газа от 200 до 50 бар шагом 10 бар и последующий анализ полученных проб на хроматографе. Отбор проб природного газа осуществлялся в соответствии с рекомендациями действующего ГОСТа 18917-82. В Таблице 2 представлен состав природного газа, подаваемого при компримировании его в газовые баллоны на АГНКС в г. Мирный и п. Айхал. [14].

Таблица 2. Состав природного газа г. Мирный и п. Айхал

Table 2. Composition of natural gas of Mirny city and Aikhal district

Компонент	г. Мирный	п. Айхал
He	0,407	0,419
H <sub>2</sub>	0,125	0,1043
CO <sub>2</sub>	0,0161	0,059
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4,786	4,590
O <sub>2</sub>	0,005	0,0024
N <sub>2</sub>	6,771	6,890
CH <sub>4</sub>	85,927	86,04
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,378	1,190
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0783	0,099
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,418	0,477
neo-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,000	0,000
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,039	0,056
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,042	0,057
n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,001	0,0071
n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	0,001	0,0038
n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0,000	0,000
Σ	100	100

Таблица 3. Допустимый состав природного газа и критические параметры его компонентов

Table 3. Permissible composition of natural gas and critical parameters of its components

Компонент	Диапазоны молярных долей	Газ	Молярная масса, кг/моль	$t_{кр}$ , °C	$p_{кр}$ , бар
Метан	$0,7 \leq x < 1,0$	метан	16,04	-82,5	46,41
Этан	$x \leq 0,10$	этан	30,07	32,27	49,13
Пропан	$x \leq 0,035$	пропан	44,09	96,84	42,64
Бутаны в сумме	$x \leq 0,015$	бутан	58,12	152,01	37,96
		изобутан	58,12	134,98	36,47
Пентаны в сумме	$x \leq 0,005$	пентан	72,14	196,62	33,74
		изопентан	72,14	187,8	33,33
Гексан	$x \leq 0,001$	гексан	86,17	234,7	30,31
Азот	$x \leq 0,20$	азот	28,016	-147	33,96
Диоксид углерода	$x \leq 0,20$	диоксид углерода	44,01	31,04	73,82
Гелий	$x \leq 0,005$	гелий	4,003	-267,96	2,29
Водород	$x \leq 0,10$	водород	2,016	-239,92	13,16

### Результаты и обсуждение

Расчет температур кипения (конденсации) компонентов природного газа осуществлялся по зависимостям температуры кипения (конденсации) от давления насыщения компонента природного газа. Зависимости были получены аппроксимацией справочных данных по



свойствам газов [15]. Парциальные давления компонентов природного газа определялись по уравнению состояния идеального газа для смеси с общим давлением в баллоне и молярными долями компонентов в смеси.

В основе расчета температур кипения (конденсации) компонентов природного газа в зависимости от их парциального давления при общем давлении природного газа принимался состав природного газа согласно ГОСТ 30319.1-2015 «Газ природный. Методы расчета физических свойств». Критические температуры ( $t_{кр}$ , °C) и давления ( $p_{кр}$ , бар) компонентов природного газа принимались по ГОСТ 31369-2008 «Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава». Данный комплекс стандартов использовался для расчета физических свойств газообразного природного газа с молярными долями компонентов, которые ограничивались диапазонами, приведенными в Таблице 3.

Таблица 4. Расчетные температуры конденсации компонентов при давлении природного газа в газовых баллонах в диапазонах: 200, 150 и 100 бар

Table 4. Calculated condensation temperatures of the components at natural gas pressure in gas cylinders in the ranges: 200, 150 and 100 bar

Газ	Максимальная доля в природном газе	Давление природного газа 200 бар		Давление природного газа 150 бар		Давление природного газа 100 бар	
		Парциальное давление компонентов, бар	$t$ , °C	Парциальное давление компонентов, бар	$t$ , °C	Парциальное давление компонентов, бар	$t$ , °C
Этан	0,100	20,00	-7,20	15,00	-18,10	10,00	-32,00
Пропан	0,035	7,00	13,60	5,25	3,50	3,50	-9,50
Бутан	0,015	3,00	31,80	2,25	22,30	1,50	-10,10
Изобутан	0,015	3,00	20,00	2,25	10,80	1,50	-1,20
Пентан	0,005	1,00	35,40	0,75	27,30	0,50	16,60
Изопентан	0,005	1,00	27,30	0,75	19,20	0,50	8,60
Гексан	0,001	0,20	24,60	0,15	18,10	0,10	9,70

Таблица 5. Расчетные температуры конденсации компонентов при давлении природного газа в газовых баллонах в диапазонах: 50, 10 и 1 бар

Table 5. Calculated condensation temperatures of the components at natural gas pressure in gas cylinders in the ranges: 50, 10 and 1 bar

Газ	Максимальная доля в природном газе	Давление природного газа 50 бар		Давление природного газа 10 бар		Давление природного газа 1 бар	
		Парциальное давление компонентов, бар	$t$ , °C	Парциальное давление компонентов, бар	$t$ , °C	Парциальное давление компонентов, бар	$t$ , °C
Этан	0,100	5,00	-52,70	1,00	-88,90	0,100	-122,70
Пропан	0,035	1,75	-29,00	0,35	-63,90	0,035	-97,60
Бутан	0,015	0,75	-8,40	0,15	-42,10	0,015	-76,20
Изобутан	0,015	0,75	-19,20	0,15	-52,20	0,015	-85,40
Пентан	0,005	0,25	0,30	0,05	-30,40	0,005	-62,80
Изопентан	0,005	0,25	-7,40	0,05	-37,60	0,005	-69,20
Гексан	0,001	0,05	-3,60	0,01	-29,0	0,001	-57,30





Данные, представленные в Таблице 3, подтверждают тот факт, что все углеводороды, входящие в состав природного газа, за исключением метана, могут даже при положительных температурах окружающей среды переходить в жидкое состояние – конденсироваться.

Для анализа возможной конденсации паров углеводородов были рассмотрены зависимости температуры насыщения паров от парциального давления газов в общем объеме природного газа. Содержание компонентов природного газа принято по максимальному значению диапазона долей компонентов (Таблица 3).

В Таблицах 4 и 5 представлены расчеты температур конденсации горючих компонентов природного газа в газовых баллонах при абсолютных давлениях газовой смеси 200, 150, 100, 50, 10 и 1 бар на основе данных [15]. В таблицах не приведен расчет температур конденсации метана ( $t_{кр} = -82,5^{\circ}\text{C}$ ), азота ( $t_{кр} = -147^{\circ}\text{C}$ ), гелия ( $t_{кр} = -267,96^{\circ}\text{C}$ ) и водорода ( $t_{кр} = -239,92^{\circ}\text{C}$ ) вследствие их низких критических температур, практически не достижимых в природных условиях. Также отсутствует температура конденсации негорючего газа – диоксида углерода.

Исходя из расчетных данных температур конденсации компонентов природного газа в диапазонах давления от 1 до 200 бар, представленных в Таблицах 4 и 5, можно увидеть, что на нагнетании компрессора при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$  все компоненты природного газа при давлении газа на АГНКС в г. Мирный 190 бар и в п. Айхал 198 бар находились в газообразном состоянии. Но при заполнении газовых баллонов природным газом уже при температуре  $+23^{\circ}\text{C}$  может происходить частичная конденсация некоторых компонентов при давлении 190-198 бар при максимальных концентрациях, в большей части бутана и пентана. В процессе охлаждения баллона с природным газом происходило снижение давления в баллоне до 150-160 бар и конденсация высококипящих компонентов  $\text{C}_2\text{-C}_7$ .

Таким образом, анализ данных, представленных в Таблицах 4 и 5, показывает, что только при давлениях, близких к атмосферному, все горючие компоненты природного газа будут находиться в газообразном состоянии. При высоких давлениях газовой смеси будут конденсироваться абсолютно все горючие компоненты. При давлении 200 бар пропан и более тяжелые углеводороды будут конденсироваться даже при положительных температурах при своих максимальных парциальных давлениях. При выработке топлива (природного газа) и, как следствие, снижении его давления в газовых баллонах, сконденсированные вещества будут переходить обратно в газообразное состояние. Это в свою очередь приведет к различному составу природного газа и скажется на эффективности работы ДВС технологического транспорта, использующего в качестве моторного топлива КПГ.

#### 1. Исследование и анализ изменения компонентного состава природного газа при переменных термобарических условиях в зимний период времени (февраль 2023 г.).

На Рис. 1 (АГНКС 27, г. Мирный) и 2 (АГНКС 26, п. Айхал) представлены графики по изменению (в зависимости от давления в газовых баллонах) концентрации компонентов в составе природного газа в зимний период времени при температуре окружающей среды от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $-36^{\circ}\text{C}$ . Давление газа при заправке на АГНКС в г. Мирный составляло 190 бар, а в п. Айхал 198 бар.

Рассматривая состояние природного газа из АГНКС г. Мирный и п. Айхал при давлении 150 - 160 бар после охлаждения до  $-30^{\circ}\text{C}$ , давлении при заправке 190 - 198 бар и температуре  $+23^{\circ}\text{C}$  можно наблюдать, что углеводороды  $\text{C}_2\text{-C}_7$  будут находиться частично в жидком состоянии. При снижении давления до 100 бар и температуре  $-30^{\circ}\text{C}$  этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) будет испаряться и переходить в газообразное состояние (см. Таблицу 4), а при давлении менее 50 бар (см. Таблицу 5) и температуре  $-30^{\circ}\text{C}$  в газообразное состояние будет переходить пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ). Углеводороды  $\text{C}_4\text{-C}_6$  при последних перечисленных термодинамических параметрах будут находиться частично в жидком состоянии, а при давлении 10 бар и температуре  $-30^{\circ}\text{C}$  углеводороды  $\text{C}_2\text{-C}_6$  перейдут в газообразное состояние и уже будут находиться в этом состоянии.

Графические данные, представленные на Рис. 1 и 2, свидетельствуют о значительном разбросе концентраций метана и азота в процессе понижения давления и непостоянства температур, т.е. изменяющейся температуры в зависимости от погодных условий. Трендовые линии изменения состава по этим компонентам в зависимости от изменения термобарических



условий показывают, что при понижении давления в баллоне в диапазоне температур от  $-31^{\circ}\text{C}$  до  $-36^{\circ}\text{C}$  концентрации неконденсирующихся компонентов возрастают в связи с конденсацией других, более тяжелых (высококипящих) компонентов и снижением их доли в газовой фазе в зависимости от соответствующих парциальных давлений. Графики изменения компонентов (Рис. 1-2) при снижении давления от 100 - 110 бар до 50 бар и соответствующих температурах свидетельствуют о том, что пентановая, гексановая и гептановая фракции в газовой фазе ведут себя в испарительно-конденсационном режиме. При 50 бар в баллоне содержится остаток жидкой фазы.

Расчеты, представленные в Таблицах 4-5, показывают, что при давлении 50 бар и медленном повышении температуры газа в баллоне до  $+10^{\circ}\text{C}$  будет происходить постепенное испарение сконденсированной фазы. Приведенные условия позволят подавать газовую топливную фазу в двигатель внутреннего сгорания, сравнимую с метановым энергетическим зарядом. При таких условиях поршневая группа ДВС не имеет перегрева.

На основании полученных результатов при переменных термобарических условиях в зимний период времени можно сделать следующее заключение. После заправки газового баллона и охлаждения природного газа до температуры окружающей среды  $-30^{\circ}\text{C}$  давление в газовом баллоне снижается до 160 бар, при этом компоненты  $\text{C}_2\text{-C}_7$  переходят частично в жидкое состояние. При дальнейшем понижении температуры ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  компоненты  $\text{C}_2\text{-C}_7$  будут также находиться в конденсированном (жидком) состоянии.

При давлении 160 бар и температуре  $-30^{\circ}\text{C}$  компоненты  $\text{C}_2\text{-C}_7$ , находящиеся в жидком состоянии, при достаточно медленном повышении температуры будут переходить в газообразное состояние. Медленное повышение температуры приведет к незначительному повышению энергетического заряда газообразного топлива, подаваемого в цилиндговую группу, в результате поочередного испарения компонентов  $\text{C}_2\text{-C}_7$ , обладающих большей теплотой сгорания относительно метана. При значительном изменении температуры во времени, т.е. при высоком градиенте температур в области его повышения, может происходить бурное испарение высококипящих фракций природного газа, обладающих высокой теплотворной способностью. В результате энергетический заряд газообразного топлива, впрыскиваемого в цилиндговую группу ДВС транспортного средства, может превышать не менее чем в 2 (два) раза теплоту сгорания метана. При данных условиях будет очевидно происходить увеличение температуры в камере сгорания ДВС, что приведет к нештатным ситуациям, например, к прогару поршневой группы и др.

## 2. Исследование и анализ изменения компонентного состава природного газа при переменных термобарических условиях в весенний период времени (март 2023 г.).

На Рис. 3 (АГНКС 27, г. Мирный) и 4 (АГНКС 26, п. Айхал) представлены графики изменения (в зависимости от давления в газовых баллонах) концентрации компонентов в составе природного газа в весенний период времени.

Процессы изменения состава природного газа, полученного из АГНКС 27 (г. Мирный) при снижении давления в газовых баллонах, происходили в широких температурных диапазонах при температуре окружающей среды от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ . В процессе проведения забора природного газа из газовых баллонов в один из дней проведения эксперимента температура окружающего воздуха составляла  $-31^{\circ}\text{C}$ . Давление на нагнетании компрессора перед заправочным краном составляло 230 бар, а температура природного газа  $+23^{\circ}\text{C}$ .

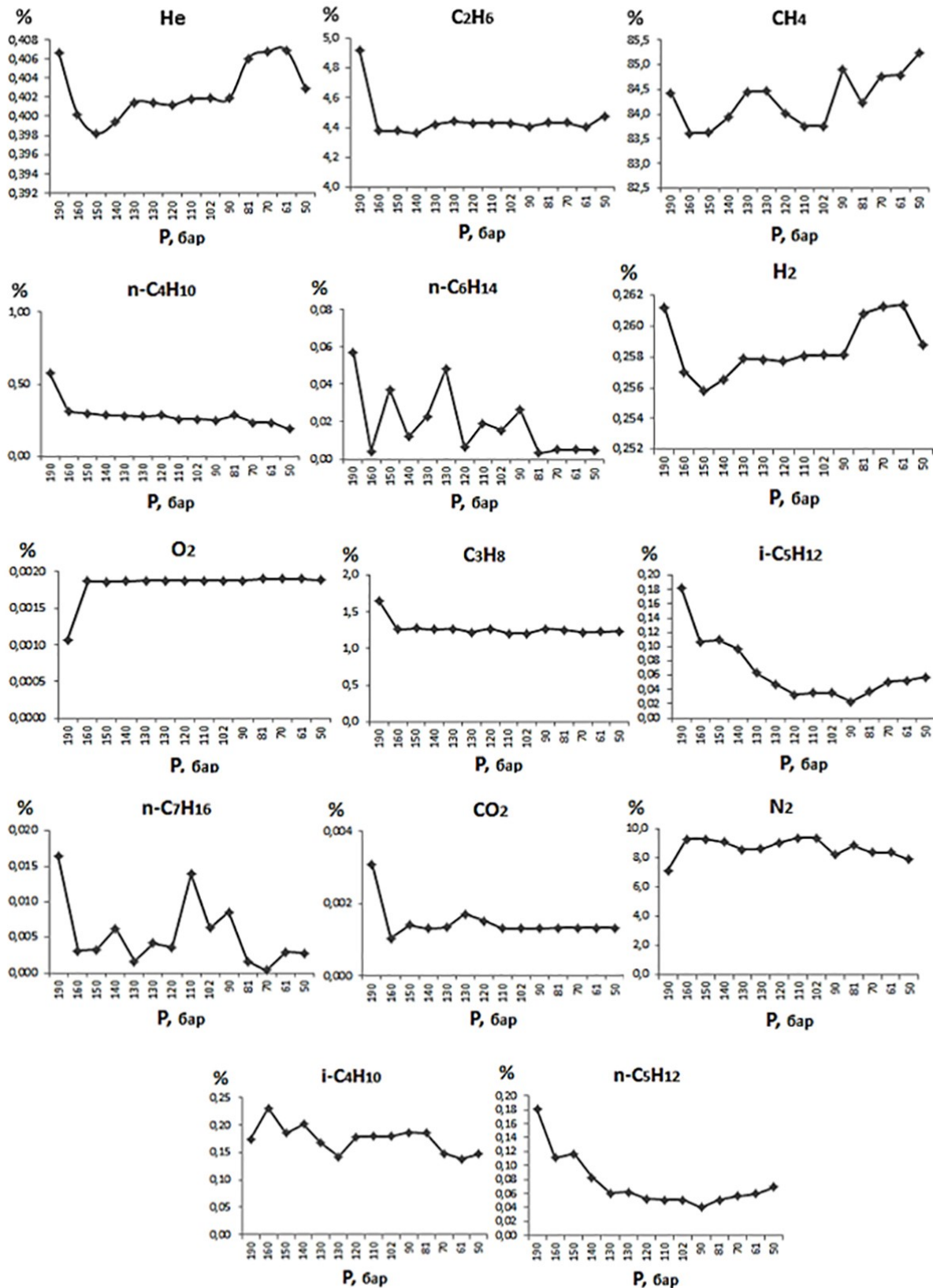


Рис. 1. Концентрация компонентов в составе природного газа в зимний период времени ( $t_{\text{окр.ср.}}$  от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $-36^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от давления в газовых баллонах (АГНКС 27, Мирный)

Fig. 1. Concentration of components in natural gas composition in winter period ( $t_{\text{a.c.}}$  from  $-30^{\circ}\text{C}$  to  $-36^{\circ}\text{C}$ ) depending on pressure in gas cylinders (CNG filling station 27, Mirny)



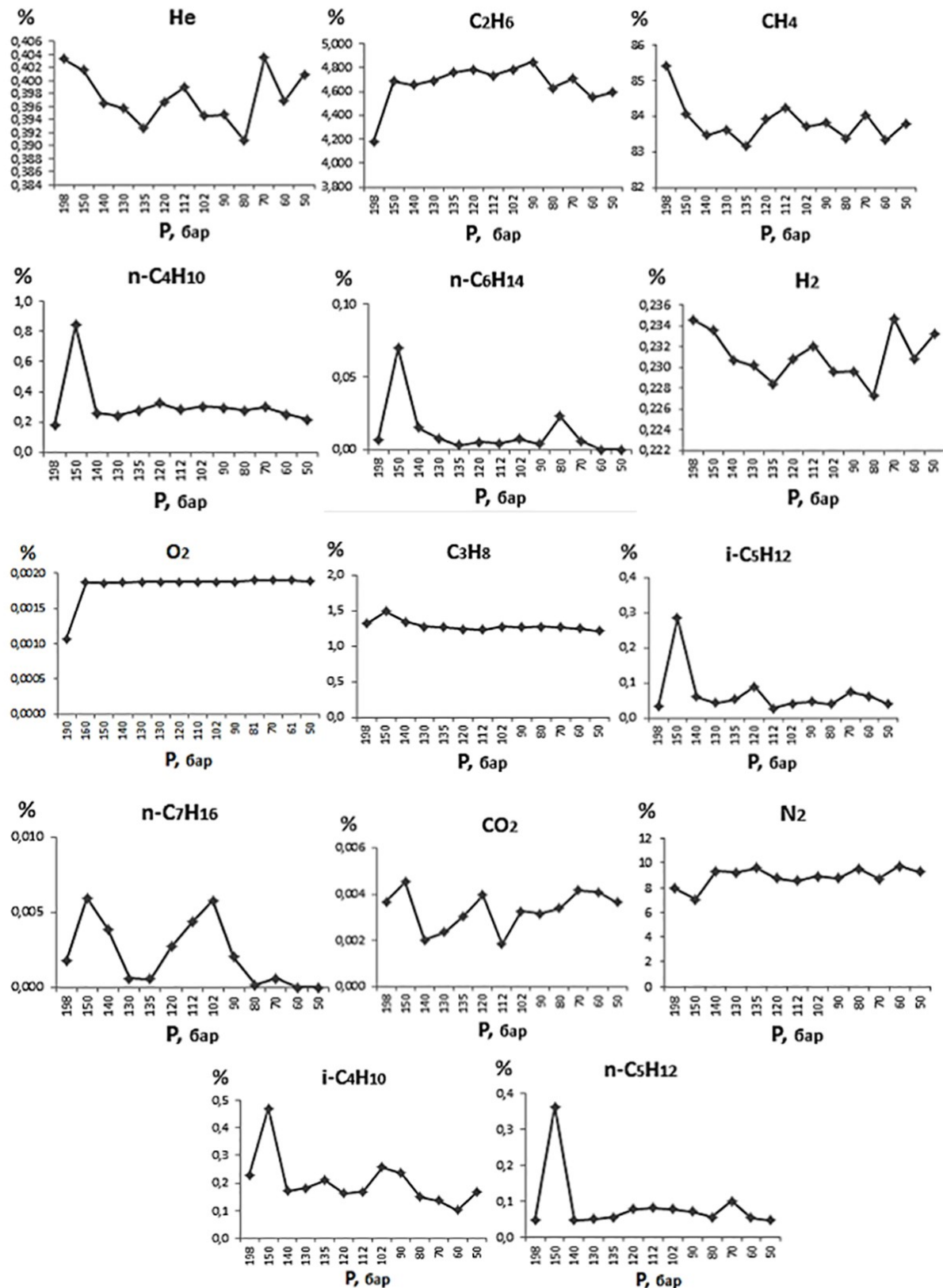


Рис. 2. Концентрация компонентов в составе природного газа в зимний период времени ( $t_{\text{окр. ср.}}$  от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $-36^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от давления в газовых баллонах (АГНКС 26, п. Айхал)

Fig. 2. Concentration of components in natural gas composition in winter period ( $t_{a.c.}$  from  $-30^{\circ}\text{C}$  to  $-36^{\circ}\text{C}$ ) depending on pressure in gas cylinders (CNG filling station 26, Aikhal).



Из графических данных по динамике изменения содержания компонентов в природном газе, находящемся в газовых баллонах (Рис. 3, АГНКС 27, г. Мирный), можно увидеть, что углеводороды  $C_2-C_7$  при понижении начальных параметров 230 бар и  $+23^\circ C$  до параметров 200 бар и температуры  $-20^\circ C$  переходят в жидкое состояние, вследствие чего их концентрация в газовой части уменьшается.

Опираясь на расчетные данные, представленные в Таблицах 4 и 5, можно утверждать, что при давлении 70 бар и температуре  $-31^\circ C$  (которая была однократно) в жидком состоянии будут находиться углеводороды групп  $C_3-C_7$ , а при температуре  $-5^\circ C$  и давлении 50 бар в жидком состоянии могут оставаться только пентан и гексаны.

Процессы изменения состава природного газа из АГНКС 26 (п. Айхал) при снижении давления в газовых баллонах происходили в узком диапазоне температурных условий окружающей среды: от  $-2^\circ C$  до  $-9^\circ C$ . При давлении 175 бар и температуре  $-9^\circ C$  все присутствующие углеводороды, кроме метана и этана, находятся частично в жидком состоянии (см. Таблицу 5). При понижении давления до 115 бар при постоянной температуре  $-9^\circ C$  из данных, представленных в Таблице 5, видно, что углеводороды группы  $C_3-C_7$  останутся в жидком состоянии. При повышении температуры до  $-2^\circ C$  без потребления топлива происходило повышение давления до 130 бар (см. Рис. 4). В данном случае происходило испарение пропана.

При давлении 100 бар и температуре  $-3^\circ C$  (см. Рис. 4) происходит испарение изобутана. При постоянной температуре  $-5^\circ C$  и понижении давления со 100 до 50 бар (см. Таблицы 4 и 5) происходит последовательное поочередное испарение изобутана, бутана, изопентана и гексана.

### 3. Исследование и анализ изменения компонентного состава природного газа при переменных термобарических условиях в летний период времени (июнь 2023 г.).

На Рис. 5 (АГНКС 27, г. Мирный) и 6 (АГНКС 26, п. Айхал) представлены графики по изменению (в зависимости от давления в газовых баллонах) концентрации компонентов в составе природного газа в летний период времени. Пробы, полученные при отборе газа с линии нагнетания компрессоров на АГНКС 27, г. Мирный и АГНКС 26, п. Айхал при давлении 230 бар и температуре не менее  $+40^\circ C$ , имели такой компонентный состав, при котором все углеводороды находились в газообразном состоянии.

Процессы изменения состава природного газа из АГНКС 27 (г. Мирный) при снижении давления в газовых баллонах происходили при температуре окружающей среды от  $+8^\circ C$  до  $+18^\circ C$ . Состав компонентов, находящихся в газообразном состоянии в газовом баллоне в диапазоне давлений 200 - 50 бар и соответствующих температур, имели некоторый разброс. В первую очередь это относилось к метану.

В указанных пределах температур и давлений концентрация метана варьировалась от 84,7% до 85,5%. Концентрация гелия изменялась от 0,388% до 0,401%, углекислого газа  $-0,0064 - 0,0072\%$  и кислорода от 0,014% до 0,34%. Незначительный разброс концентраций перечисленных компонентов в составе газовой смеси связан с изменением фазового состояния углеводородов, начиная с  $C_4$  и, возможно, с погрешностью измерений газоанализатора. Все перечисленные выше компоненты в указанных условиях находились в газообразном состоянии. Наибольший интерес к анализу фазового состояния вызывает поведение углеводородов, начиная с  $C_4$ .

Как можно увидеть из графиков, представленных на Рис. 5, при давлении 200 бар и температуре  $+15^\circ C$  бутан, пентан и гексан после выдержки баллона в окружающей среде частично сконденсировались и находились в жидком состоянии, углеводороды пропан, этан и метан – в газообразном состоянии.

При давлении 170 бар и температуре  $+15^\circ C$  испаряется изобутан. В общем потоке газа концентрация изобутана в 0,16% не повлияет на увеличение энергетического заряда в камеру сгорания двигателя.

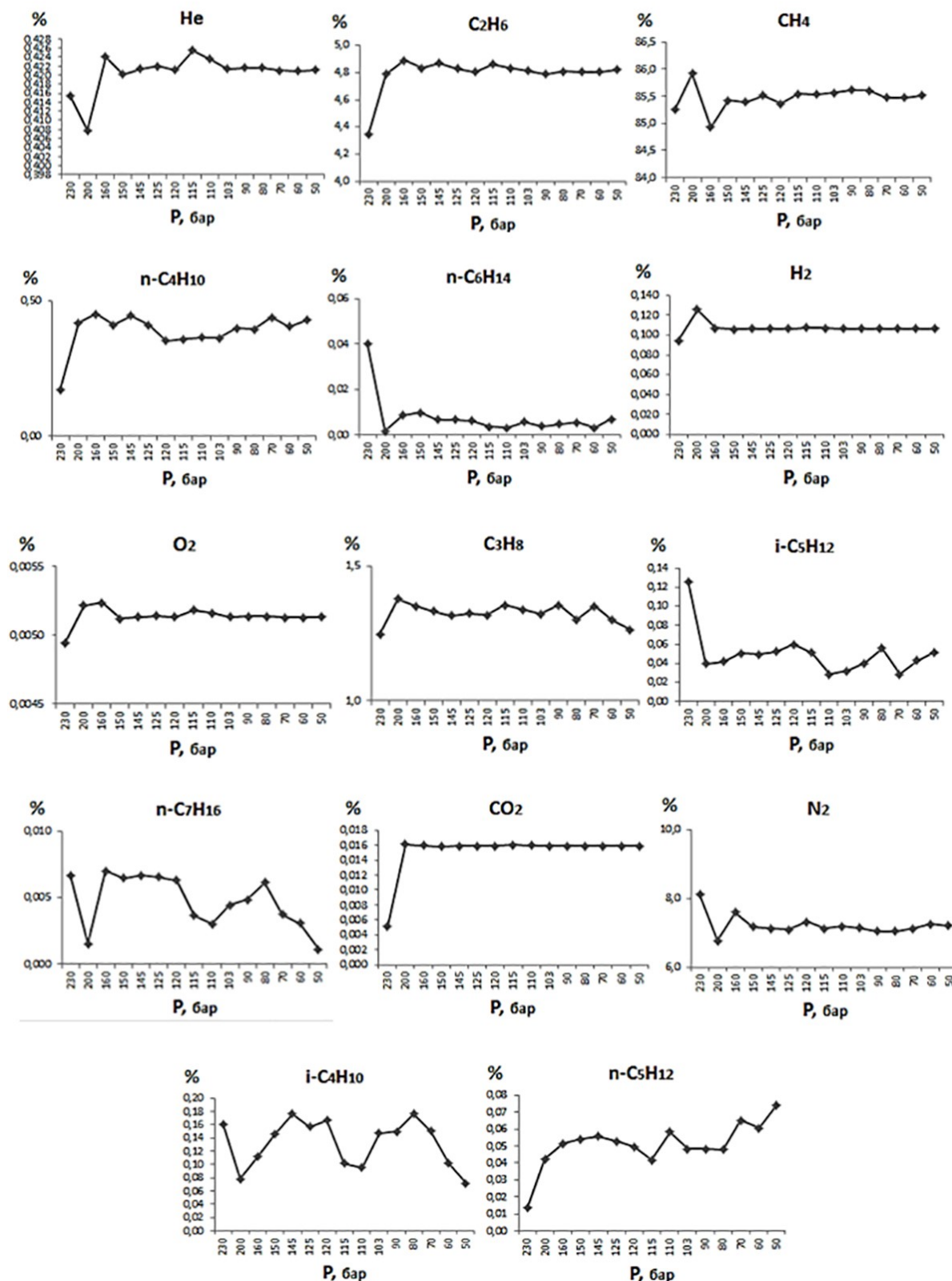


Рис. 3. Концентрация компонентов в составе природного газа в весенний период времени ( $t_{\text{окр.ср}}$  от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от давления в газовых баллонах (АГНКС 27, г. Мирный)  
Fig. 3. Concentration of components in natural gas composition in spring period ( $t_{\text{a.c.}}$  from  $-5^{\circ}\text{C}$  to  $-20^{\circ}\text{C}$ ) depending on pressure in gas cylinders (CNG filling station 27, Mirny).

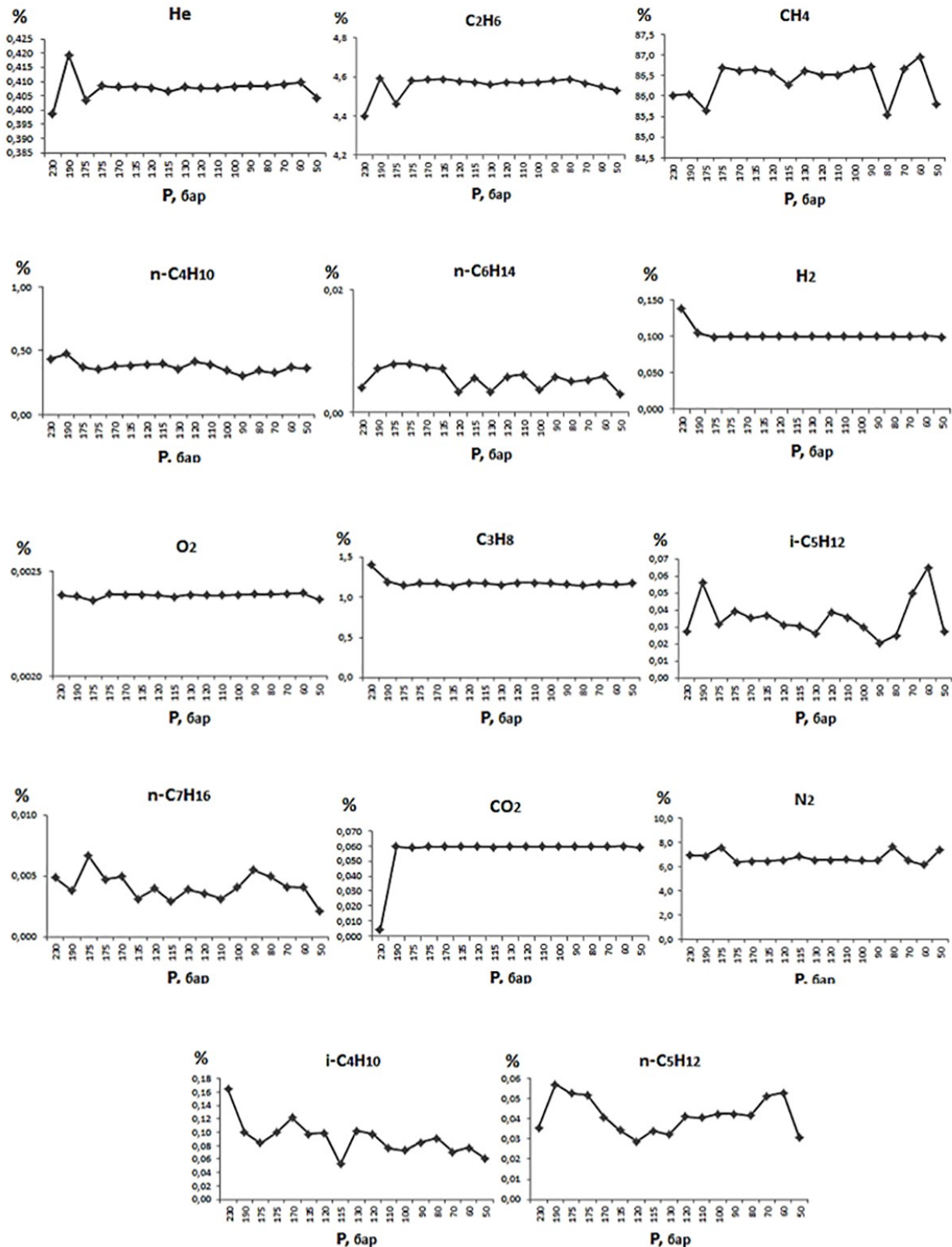


Рис. 4. Концентрация компонентов в составе природного газа в весенний период времени ( $t_{\text{окр. ср.}}$  от  $-2^{\circ}\text{C}$  до  $-9^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от давления в газовых баллонах (АГНКС 26, п. Айхал)

Fig. 4. Concentration of components in natural gas composition in spring period ( $t_{\text{a.c.}}$  from  $-2^{\circ}\text{C}$  to  $-9^{\circ}\text{C}$ ) depending on pressure in gas cylinders (CNG filling station 26, Aikhal).



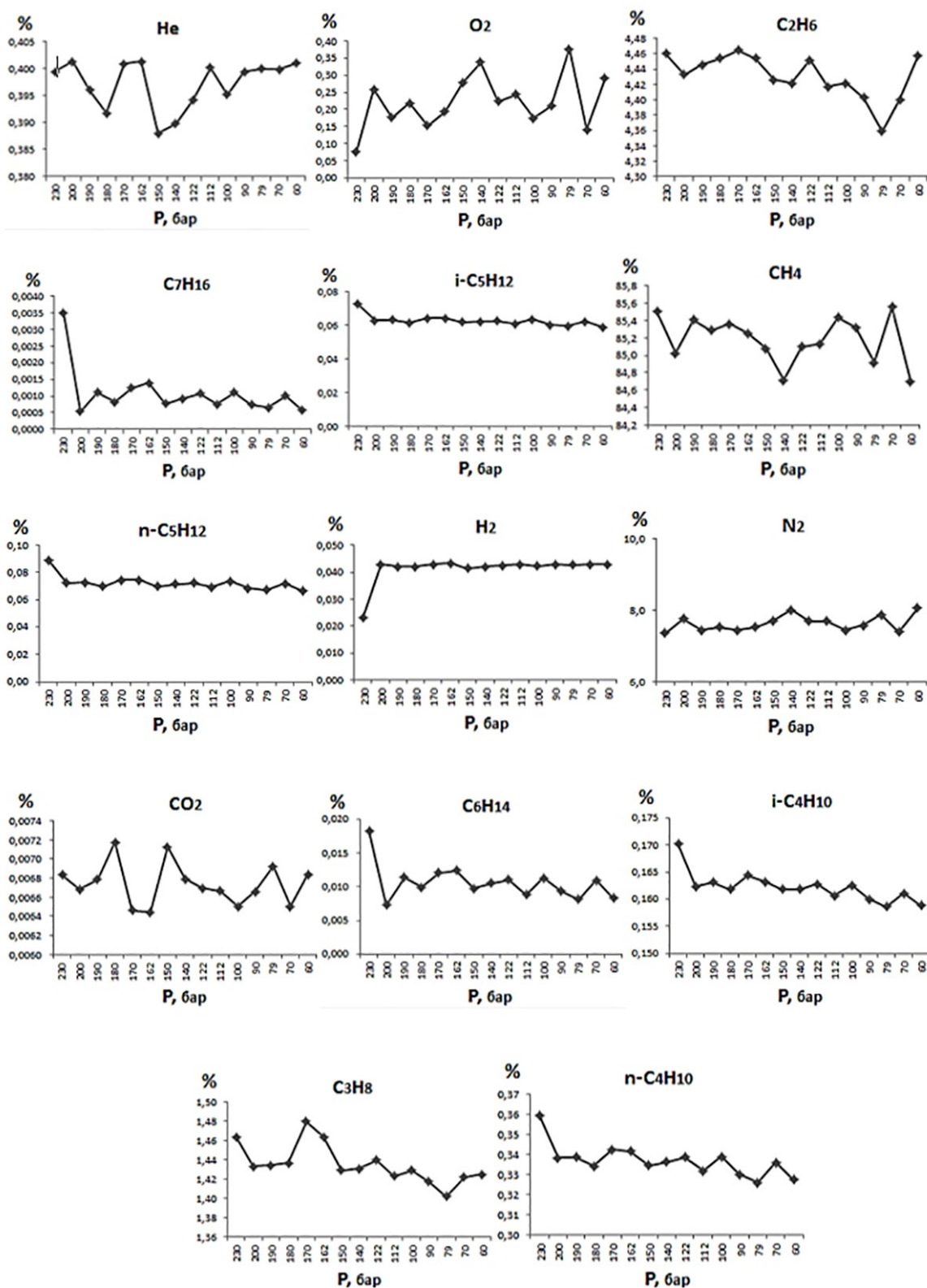


Рис. 5. Концентрация компонентов в составе природного газа в летний период времени ( $t_{\text{окр.ср}}$  от  $+8^{\circ}\text{C}$  до  $+18^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от давления в газовых баллонах (АГНКС 27, г. Мирный)

Fig. 5. Concentration of components in natural gas composition in summer period ( $t_{\text{a.c.}}$  from  $+8^{\circ}\text{C}$  to  $+18^{\circ}\text{C}$ ) depending on pressure in gas cylinders (CNG filling station 27, Mirny)



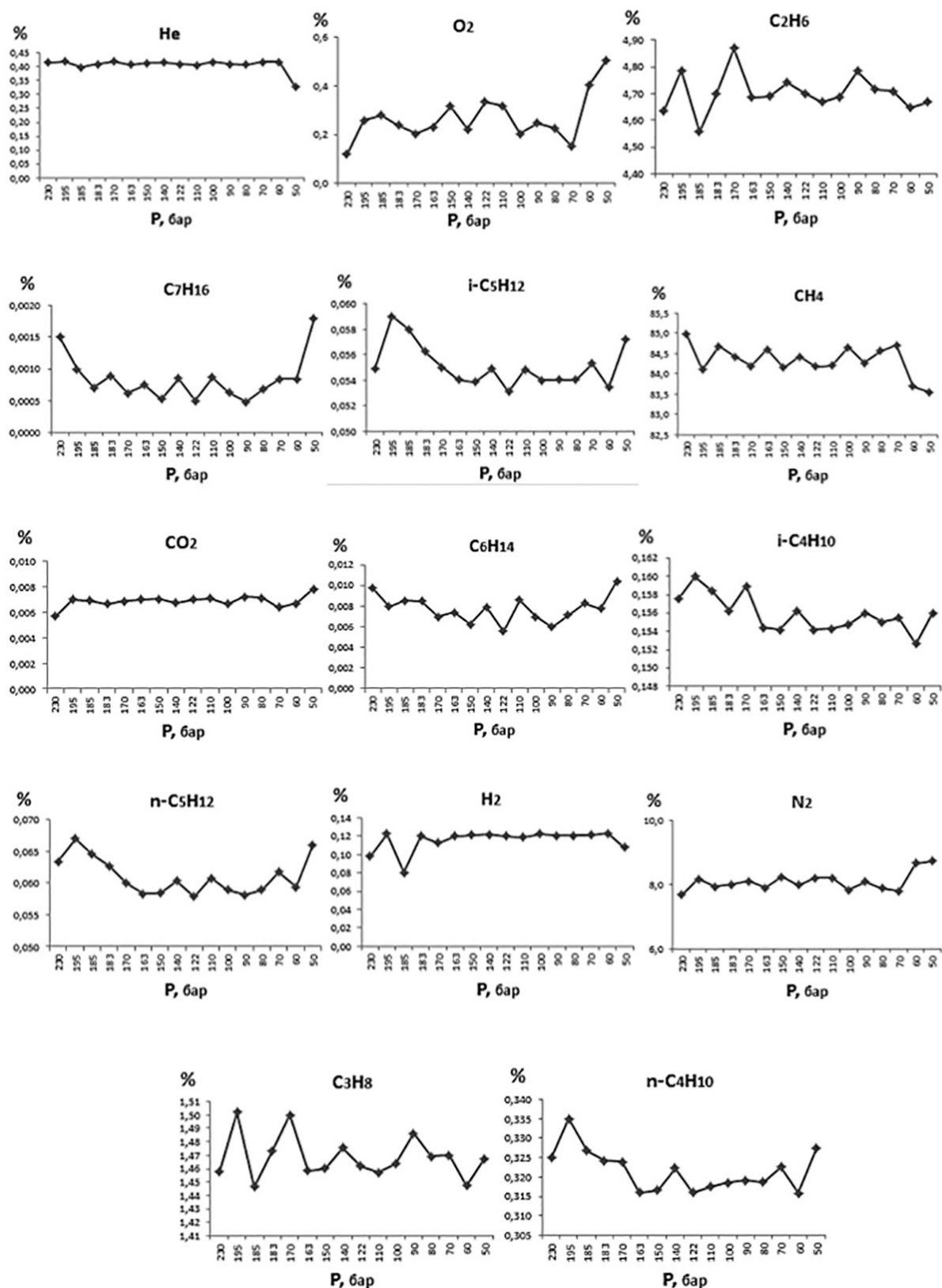


Рис. 6. Концентрация компонентов в составе природного газа в летний период времени ( $t_{\text{окр. ср.}}$  от  $+8^{\circ}\text{C}$  до  $+18^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от давления в газовых баллонах (АГНКС 27, п. Айхал)

Fig. 6. Concentration of components in natural gas composition in summer period ( $t_{a.c.}$  from  $+8^{\circ}\text{C}$  to  $+18^{\circ}\text{C}$ ) depending on pressure in gas cylinders (CNG filling station 27, Aikhal)



Условия в 150 бар и температура +18°C позволили испариться гексану, который имеет концентрацию в газовой смеси 0,018% и не оказывает влияния на повышение температуры в цилиндре ДВС автотранспортного средства. При неизменной температуре при давлении 140 бар испарится изопентан, имеющий концентрацию 0,07%. При понижении температуры до +8°C и одновременном падении давления от 140 до 122 бар испарившийся изопентан и гексан, не полностью поданный в камеру сгорания, вновь частично переходят в жидкое состояние.

При последующем понижении давления до 112 бар и повышении температуры до +11°C происходит повторное испарение изопентана и гексана, не влияющее на значительное изменение энергетического заряда в силу их незначительных объемных концентраций.

При устоявшейся температуре окружающей среды +14°C и давлении 90 бар происходит испарение последнего компонента в смеси газа: пентана содержанием 0,09%.

При последующем снижении давления от 90 бар до 50 бар и ниже, при температурах окружающего воздуха и в баллоне 10-14°C, при расходе газа на работу ДВС природный газ, подаваемый в двигатель, будет находиться в газообразном состоянии и иметь энергетический заряд, близкий к теплоте сгорания метана.

Анализ результатов изменения концентраций водорода и азота, представленных на Рис. 5, как неконденсируемых компонентов в условиях заправки газообразного топлива и в режиме термобарической эксплуатации автомобильного транспорта свидетельствует о постоянстве их концентрации при динамическом равновесии изменения фазового состава углеводородов.

В условиях проведения эксперимента происходили изменения температуры в узком диапазоне (от +8 до +18°C) и в широком – давления (200–50 бар). Отмечено, что при постоянстве температур на уровне выше +18°C при снижении давления от 200 до 50 бар происходит последовательное и поочередное испарение, как отмечено в анализе экспериментальных данных в весеннем (март) отборе проб в условиях окружающей среды.

В случае изменения давления от 200 до 50 бар и при более низком уровне изменения температур, например, от -8 до +10°C, может происходить одновременное испарение тяжелых углеводородов (C<sub>5</sub>–C<sub>7</sub>), приводящее к подаче топлива повышенного энергетического заряда и повышению температур в камере сгорания, что приводит к нештатным ситуациям работы двигателя.

Процессы исследования изменения компонентного состава природного газа из АГНКС 26 п. Айхал (Рис. 6) при снижении давления в баллоне от 195 до 50 бар и при тех же температурах практически идентичны данным, представленным на Рис. 5 (АГНКС 27 г. Мирный), и соответственно показывают подобную картину изменения концентраций и фазового состава компонентов C<sub>5</sub>–C<sub>7</sub>.

## Выводы

Результаты проведенных экспериментальных и аналитических исследований показали, что:

1. Компоненты, входящие в состав компримированного природного газа, находящиеся в частичном конденсированном состоянии при температуре -30°C, при дальнейшем понижении температуры будут также находиться в жидком состоянии в равновесии с паровой фазой.

2. При снижении давления в газовом баллоне (при незначительном потреблении топлива транспортным средством) и одновременном повышении температуры окружающей среды происходит медленное испарение высококипящих (подверженных большей конденсации) углеводородов, оказывающих незначительное влияние на повышение энергетического заряда топлива, подаваемого в двигатель внутреннего сгорания.

3. При достаточно высоком расходе (высоком потреблении топлива) транспортным средством, способствующем быстрому снижению давления в газовых баллонах, при одновременном повышении температуры окружающей среды происходит переход тяжелых углеводородов, частично находящихся в жидкой фазе, в газообразное состояние. При этих условиях энергетический заряд потребляемого газового топлива может значительно превысить теплоту сгорания метановой группы и привести к нештатной работе поршневой группы ДВС.

4. При изменении температуры окружающей среды в узком диапазоне с одновременным снижением давления в газовых баллонах от 200 бар (по причине потребления газового топлива



ДВС) происходит последовательное поочередное испарение жидких углеводородов, сконденсированных при начальном высоком давлении. Поочередное и последовательное испарение жидких углеводородов при постоянстве температуры и снижении давления оказывает благоприятные условия работы двигателя.

### **Заключение**

При эксплуатации газомоторного технологического транспорта в условиях Якутии, а также северных регионов Российской Федерации при аномально низких температурах окружающей среды необходимо создать условия на борту транспортного средства (конструктивные, технологические и т.д.), обеспечивающие подогрев наружных поверхностей газовых баллонов с компримированным природным газом до температур  $+20 - 30^{\circ}\text{C}$ . Обеспечение постоянной температуры газомоторного топлива (природного газа) при его потреблении позволит устранить концентрацию жидких углеводородов в газовых баллонах. Внедрение данного решения позволит поддерживать подачу газомоторного топлива – природного газа в двигатель внутреннего сгорания технологического автотранспорта с энергетическим зарядом, изменяющимся в узком диапазоне. Это приведет к более стабильной работе поршневой группы ДВС и позволит избежать нештатных ситуаций, связанных с заправкой газомоторным топливом при отрицательных температурах окружающей среды, а также минимизировать изменение эксплуатационных характеристик двигателя внутреннего сгорания.

Помимо этого, предварительная сепарация тяжелых углеводородов ( $\text{C}_5\text{-C}_7$ ) перед компримированием природного газа исключит возможность их конденсации (кипения) в газовых баллонах собственного парка технологического автотранспорта АК «АЛРОСА» (ПАО) в г. Мирный и п. Айхал Республики Саха (Якутия). Это, в свою очередь, позволит в дальнейшем полностью исключить проблемы, связанные с эксплуатацией технологического транспорта (автотранспорта), оснащенного газобаллонным оборудованием и эксплуатирующегося в условиях экстремально низких температур.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### **Информация об авторах**

**Дубов Георгий Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и комплексов  
e-mail: dubovgm@kuzstu.ru

**Богомолов Александр Романович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики  
e-mail: barom@kuzstu.ru

**Дворовенко Игорь Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики  
e-mail: div.pmh@kuzstu.ru

**Азиханов Сергей Сейфутдинович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики  
e-mail: ass.pmahp@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

**Зырянов Игорь Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Горное дело»



e-mail: zyryanoviv@inbox.ru

**Слепцова Елена Владимировна**, кандидат биологических наук, доцент базовой кафедры «Нефтегазовое дело»

e-mail: ev.sleptcova@s-vfu.ru

**Никифорова Марина Николаевна**, инженер учебно-научной испытательной лаборатории комплексного анализа техногенных нарушений среды

e-mail: m.petrova021288@gmail.ru

Мирнинский политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Восточного Федерального университета им. М.К. Аммосова», 678170, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Тихонова, д. 5, корп. 1

**Логвинов Иван Александрович**, заведующий лабораторией транспортных систем на горных предприятиях  
e-mail: logvinovia@alrosa.ru

Институт «Якутнипроалмаз», научно-исследовательский и проектный институт алмазодобывающей промышленности, 678174, Россия, Республика Саха (Якутия) г. Мирный, ул. Ленина, 39

**Попов Денис Кириллович**, главный специалист Центра развития производственной системы

e-mail: popovdek@alrosa.ru

АК «АЛРОСА» (ПАО), 678174, Россия, Республика Саха (Якутия) г. Мирный, ул. Ленина, 6.

### Список литературы

1. Акопова Г.С. Перспективы замены дизельного топлива природным газом на транспорте/ Г.С. Акопова, Н.Л. Власенко, Р.В. Тетеревлев // Вести газовой науки. – 2013. – № 2 (13). – С. 56-62.
2. Марков В.А. Природный газ как наиболее выгодное моторное топливо/ В.А. Марков, Е.Ф. Поздняков // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 1. – С. 11-15.
3. Бойченко С.В. Экологические аспекты использования моторных топлив (обзор)/ С.В. Бойченко, И.А. Шкильнюк // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 5–6. – С. 35-44.
4. Грязнов М.Б. Применение газомоторного топлива в Российской Федерации: проблемы и перспективы // Вестник финансового университета. – 2013. – № 4. – С. 21-31.
5. Хазин М.Л. Перевод карьерных самосвалов на газ в условиях севера // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т.19, №1. – С. 56-72. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.
6. Тарасов П.И. Факторы, предопределяющие выбор энергоносителя для силовых агрегатов горной и транспортной техники карьеров Якутии/ П.И. Тарасов, М.Л. Хазин, В.В. Фурзиков // Горная Промышленность. – 2017. – №3. – С. 56-59.
7. Тарасов П.И. Природный газ – перспективное моторное топливо карьерного автотранспорта для районов Севера/ П.И. Тарасов, М.Л. Хазин, В.В. Фурзиков // Горная промышленность. – 2016. – № 6. – С. 51-61.
8. Кузнецов Д.В. Особенности выбора технологического автотранспорта для разработки глубоких карьеров Севера/ Д.В. Кузнецов, Д.Г. Одаев, Я.Е. Линьков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 54-65.
9. Сергель А.Н. Карьерные самосвалы БелАЗ на газовом топливе // Горная Промышленность. – 2019. – №5. – С. 29-32.
10. Снижение техногенного воздействия на окружающую среду посредством использования альтернативных видов энергоносителей при эксплуатации тяжелых карьерных самосвалов/ Г.М. Дубов, Д.С. Трухманов, А.А. Чегошев, С.А. Нохрин, И.Е. Ельцов // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 5. – С. 19-28. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-19-28.
11. Сжиженный природный газ, как перспективный вид моторного топлива для карьерных самосвалов/ Г.М. Дубов, С.А. Нохрин, С.К. Ходоровский, А.В. Черниченко // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 23. – С. 205-213. – DOI:10.26160/2658-3305-2023-23-205-213.



12. Руководство по организации эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200034846> / (дата обращения 24.01.2024).
13. Распоряжение Минтранса России от 19.10.2012 N НА-124-р «Об утверждении Методических рекомендаций по технической эксплуатации газобаллонных колесных транспортных средств, находящихся в эксплуатации в Российской Федерации». Консультант Плюс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_137770/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_137770/) (дата обращения 26.01.2024).
14. ГОСТ 18917-82. Газ горючий природный. Методы отбора проб. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003310> / (дата обращения 01.02.2024).
15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей // М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы. – 1972. – 708 с.

## RESEARCH OF THE COMPONENT COMPOSITION OF COMPRESSED NATURAL GAS UNDER VARIABLE THERMOBARIC CONDITIONS OF ITS APPLICATION AS A MOTOR FUEL IN TECHNOLOGICAL TRANSPORT OF JSC «ALROSA» IN THE CONDITIONS OF YAKUTIA

**George M. Dubov<sup>1</sup>, Alexander R. Bogomolov<sup>1</sup>, Igor V. Dvorozenko<sup>1</sup>,  
Sergey S. Azikhanov<sup>1</sup>, Igor V. Zyryanov<sup>2</sup>, Elena V. Sleptsova<sup>2</sup>, Marina N. Nikiforova<sup>2</sup>,  
Ivan A. Logvinov<sup>3</sup>, Denis K. Popov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

<sup>2</sup>Mirny Polytechnic Institute (branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

<sup>3</sup>Institute «Yakutniproalmaz», Research and Design Institute of the Diamond Mining Industry

<sup>4</sup>JSC «ALROSA» (PJSC)



### Article info

Received:

16 February 2024

Revised:

18 March 2024

Accepted:

25 March 2024

**Keywords:** technological transport; gas filling equipment; gas motor fuel; compressed natural gas; component composition; thermobaric conditions

### Abstract.

The influence of variable thermobaric conditions on the component composition of compressed natural gas used as gas motor fuel in technological motor vehicles in the Republic of Sakha (Yakutia) has been studied. Boiling (condensation) temperatures of natural gas components were determined depending on their partial pressure at different total pressure of natural gas from 1 to 200 bar and temperature, which indicate the ability to partial condensation of a number of gas components. Initial data were obtained, changes in the component composition of natural gas in winter, spring and summer periods of time at different ambient temperatures at lowering the pressure in gas cylinders (from 200 to 50 bar) were studied and analyzed. Acceptable thermobaric conditions have been revealed, under which the optimal energy charge of natural gas supplied as fuel to the cylinder group of an internal combustion engine is preserved. At the same time, changes in the performance characteristics of internal combustion engines of technological transport in operating conditions at extremely low ambient temperatures of Yakutia are excluded.

---

**For citation** Dubov G.M., Bogomolov A.R., Dvorozenko I.V., Azikhanov S.S., Zyryanov I.V., Sleptsova E.V., Nikiforova M.N., Logvinov I.A., Popov D.K. (2024) Research of the component composition of compressed natural gas under variable thermobaric conditions of its application as a motor fuel in technological transport of

---





## References

1. Akopova G.S. Perspektivy zameny dizel'nogo topliva prirodnym gazom na transporte/ G.S. Akopova, N.L. Vlasenko, R.V. Teterevlev // *Vesti gazovoy nauki*. – 2013. – № 2 (13). – S. 56-62.
2. Markov V.A. Prirodnyy gaz kak naibolee vygodnoe motornoe toplivo/ V.A. Markov, E.F. Pozdnyakov // *Avtomobil'naya promyshlennost'*. – 2017. – № 1. – S. 11-15.
3. Boychenko S.V. Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniya motornykh topliv (obzor)/ S.V. Boychenko, I.A. Shkil'nyuk // *Energotekhnologii i resursosberezenie*. – 2014. – № 5–6. – S. 35-44.
4. Gryaznov M.B. Primenenie gazomotornogo topliva v Rossiyskoy Federatsii: problemy i perspektivy // *Vestnik finansovogo universiteta*. – 2013. – № 4. – S. 21-31.
5. Khazin M.L. Perevod kar'ernykh samosvalov na gaz v usloviyakh severa // *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. – 2019. – T.19, №1. – S. 56-72. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.
6. Tarasov P.I. Faktory, predopredelyayushchie vybor energonositelya dlya silovykh agregatov gornoy i transportnoy tekhniki kar'erov Yakutii/ P.I. Tarasov, M.L. Khazin, V.V. Furzikov // *Gornaya Promyshlennost'*. – 2017. – №3. – S. 56-59.
7. Tarasov P.I. Prirodnyy gaz – perspektivnoe motornoe toplivo kar'ernogo avtotransporta dlya rayonov Severa/ P.I. Tarasov, M.L. Khazin, V.V. Furzikov // *Gornaya promyshlennost'*. – 2016. – № 6. – S. 51-61.
8. Kuznetsov D.V. Osobennosti vybora tekhnologicheskogo avtotransporta dlya razrabotki glubokikh kar'erov Severa/ D.V. Kuznetsov, D.G. Odaev, Ya.E. Lin'kov // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. – 2017. – № 5. – S. 54-65.
9. Sergel' A.N. Kar'ernye samosvaly BelAZ na gazovom toplive // *Gornaya Promyshlennost'*. – 2019. – №5. – S. 29-32.
10. Snizhenie tekhnogen'nogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu posredstvom ispol'zovaniya al'ternativnykh vidov energonositeley pri ekspluatatsii tyazhelykh kar'ernykh samosvalov/ G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, A.A. Chegoshchev, S.A. Nokhrin, I.E. El'tsov // *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. – 2021. – № 5. – S. 19-28. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-19-28.
11. Shzhizhennyy prirodnyy gaz, kak perspektivnyy vid motornogo topliva dlya kar'ernykh samosvalov/ G.M. Dubov, S.A. Nokhrin, S.K. Khodorovskiy, A.V. Chernichenko // *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo*. – 2023. – № 23. – S. 205-213. – DOI:10.26160/2658-3305-2023-23-205-213.
12. Rukovodstvo po organizatsii ekspluatatsii gazoballonnykh avtomobiley, rabotayushchikh na komprimirovannom prirodnom gaze. Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/1200034846> / (data obrashcheniya 24.01.2024).
13. Rasporyazhenie Mintransa Rossii ot 19.10.2012 N NA-124-r «Ob utverzhdenii Metodicheskikh rekomendatsiy po tekhnicheskoy ekspluatatsii gazoballonnykh kolesnykh transportnykh sredstv, nakhodyashchikhsya v ekspluatatsii v Rossiyskoy Federatsii». Konsul'tant Plyus [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_137770/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_137770/) (data obrashcheniya 26.01.2024).
14. GOST 18917-82. Gaz goryuchiy prirodnyy. Metody otbora prob. Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/1200003310> / (data obrashcheniya 01.02.2024).
15. Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey // M.: Gos. izd-vo fiz.-mat. literatury. – 1972. – 708 s.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## Information about the authors

**George M. Dubov**, PhD (Tech.), associate professor of the department of mining machines and complexes  
e-mail: [dubovgm@kuzstu.ru](mailto:dubovgm@kuzstu.ru)



**Alexander R. Bogomolov**, Dr.Sc. (Tech.), Associate Professor, Head of Heat Power Engineering Department  
e-mail: barom@kuzstu.ru

**Igor V. Dvorozenko**, PhD (technical sciences), associate professor, heat power engineering department.  
e-mail: div.pmh@kuzstu.ru

**Sergey S. Azikhanov**, PhD (Tech.), associate professor, heat power engineering department.  
e-mail: ass.pmahp@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation.

**Igor V. Zyryanov**, Dr.Sc. (Tech.), Professor, Head of Department "Mining Engineering".  
e-mail: zyryanoviv@inbox.ru

**Elena V. Sleptsova**, PhD (Biological), associate professor of the basic department "Oil and Gas Exploitation".  
e-mail: ev.sleptcova@s-vfu.ru

**Marina N. Nikiforova**, engineer of educational and scientific testing laboratory of complex analysis of anthropogenic disturbances of environment  
e-mail: m.petrova021288@gmail.ru

Mirny Polytechnic Institute (branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 678170, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Tikhonov str. 5, bldg. 1

**Ivan A. Logvinov**, Head of the Laboratory of Transportation Systems at Mining Enterprises.  
e-mail: logvinovia@alrosa.ru

Yakutniproalmaz Institute, Research and Design Institute of Diamond Mining Industry, 678174, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Lenin str.

**Denis K. Popov**, Chief Specialist of the Center for Development of Production System  
e-mail: popovdek@alrosa.ru

PJSC ALROSA, 678174, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Lenina str. 6.

