



УДК 62-623.1.7

Метановое число природного газа и его влияние на эффективность рабочего процесса газового двигателя

О.Н.ДИДМАНИДЗЕ¹, А.С.АФАНАСЬЕВ²✉, Р.Т.ХАКИМОВ³

¹ Российский государственный аграрный университет им. К.А.Тимирязева, Москва, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Дидманидзе О.Н. Метановое число природного газа и его влияние на эффективность рабочего процесса газового двигателя / О.Н.Дидманидзе, А.С.Афанаьев, Р.Т.Хакимов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 730-737. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.12

Аннотация. Использование природного газа в качестве моторного топлива в горнодобывающей промышленности является одной из приоритетных задач государства. В статье уделяется особое внимание компонентному составу природного газа с точки зрения его тепловой эффективности в процессе сжигания в камере сгорания энергосиловой установки на большегрузном автомобиле в сложных карьерных условиях. Для этого рассматриваются отечественные и зарубежные методики определения основного показателя, характеризующие детонационную стойкость топлива в процессе сгорания, – метанового числа. Улучшение технико-экономических показателей будет осуществляться путем изменения состава газовой смеси на основе метана под конструктивные особенности газовой энергосиловой установки, определяющим показателем станет метановое число. Представлен теоретический анализ влияния метанового числа на такие показатели двигателя, как степень сжатия и максимум скорости распространения фронта пламени во второй фазе сгорания в цилиндре двигателя, выражаемый через угол поворота коленчатого вала. По результатам теоретических и экспериментальных исследований получены зависимости влияния метанового числа на эффективность рабочего процесса двигателя и его внешняя скоростная характеристика.

Ключевые слова: природный газ; газовая энергосиловая установка; метановое число; газовые смеси; энергоэффективность; многофакторный регрессионный анализ

Введение. Тепловые процессы, протекающие в энергосиловых установках горнодобывающей техники с применением сжатого или сжиженного природного газа в качестве моторного топлива, постоянно изучаются и совершенствуются. Наиболее сложной задачей остается влияние состава газовоздушной смеси на процесс сгорания, от которого и зависят эффективность, экологичность и экономичность транспортного средства, предназначенного для эксплуатации в сложных карьерных условиях и транспортировки больших масс различных природных материалов (камень, руда, уголь и т.д.) [5, 12, 13].

При исследовании рабочего процесса двигателя с применением газовой смеси на основе метана рассматриваются физико-химические свойства этих газов и их детонационная стойкость. Для оценки показателей качества топлива используются различные методы, предназначенные в том числе для определения октанового числа (ОЧ). Компонентный состав различных нефтяных топлив изучал в своих научных трудах И.И.Вибе еще в 1962 г., он рассматривал закономерности изменения скорости сгорания внутри цилиндра двигателя на основании общих уравнений химических реакций [9].

Методика исследования. На практике принято считать октановое число нефтяных топлив по уравнению

$$\text{ОЧ}_p = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i, \quad (1)$$

где n – число компонентов в топливной смеси; β_i – наличие i -го числа компонента в топливной смеси; x_i – октановое число i -го числа компонентов в топливе.

Октановое число нефтяных топлив показывает устойчивость к детонации в процессе сгорания рабочего тела в цилиндре двигателе. Анализ различных источников свидетельствует, что ОЧ для

природного газа находится в диапазоне 110-120 единиц, что характеризует высокое качество топлива, выражаемое через низшую теплоту сгорания. Считать энергоэффективность природного газа по методу нефтяных топлив не совсем корректно [1, 3, 6, 8]. В данном случае было бы разумно использовать метод, способный определять энергоэффективность газообразного топлива на основе его природного компонентного происхождения с учетом теории межмолекулярного взаимодействия [7, 14].

В отечественной науке достаточно глубоко изучены фазовые превращения различных газов с учетом внешних температурно-динамических воздействий [4, 19]. Было разработано множество номограмм на основе систем смесей газов, характеризующих фазовые равновесия одно-, двух- и многокомпонентных газов. Подобные исследования позволили детально понять картину изменения межмолекулярного взаимодействия отдельных газов (метана, пропана, этана, бутана, водорода, углекислого газа и т.д.) между собой с целью достижения в конечном итоге максимального теплового эффекта в процессе реакции окислителя и природного газа (газовых смесей). Все эти научные достижения были направлены на развитие нефтегазовых предприятий, но исследований в отношении свойств газообразных топлив для транспортных тепловых двигателей в России недостаточно.

Фирмой AVL (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List) с 1960 г. проводились экспериментальные исследования в отношении свойств природного газа, состоящего на 92-98 % из метана. Согласно экспериментальным исследованиям границы качества как компримированного, так и сжиженного природного газа определяются его теплотой сгорания и значением детонационной стойкости при горении. Метановое число (МЧ) показывает, сколько объемных процентов метана (МЧ = 100) содержится в смеси метана и водорода (МЧ = 0), которая начинает детонировать при той же степени сжатия, что и проверяемый газ [10]. Согласно методу AVL оптимальное качество природного газа определяется нижним порогом значения детонационной стойкости (МЧ = 75).

Единой общепризнанной методики по определению МЧ в настоящее время нет, все существующие методики – это разработки отдельных компаний. Поэтому при использовании различных методик для определения МЧ возникает расхождение от 5 до 12 единиц. В настоящее время в России разрабатывается проектный ГОСТ, где предусматривается метод определения метанового числа, в основе которого лежит выражение:

$$\text{МЧ} = 1,445(\text{ОЧ}_m) - 103,42, \quad (2)$$

где ОЧ_m – октановое число по моторному методу.

Метод AVL предусматривает определение ОЧ следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{ОЧ}_m = & (137,78x\text{CH}_4) + (29,948x\text{C}_2\text{H}_6) + (-18,193x\text{C}_3\text{H}_8) + \\ & + (-167,062x\text{C}_4\text{H}_{10}) + (181,233x\text{CO}_2) + (26,994x\text{N}_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где x – молярная доля входящих в состав газа компонентов CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , CO_2 , N_2 .

Как известно, МЧ может влиять на основные эксплуатационные показатели энергосиловой установки горнодобывающей техники. Кратко рассмотрим известные методики определения МЧ природного газа и газовых смесей из различных месторождений.

Согласно совместным экспериментальным исследованиям компаний AVL и CARB (California air resources board) МЧ природных газов из различных месторождений меняется из-за содержания в составе метана иных газов, в том числе и инертных, следовательно относительная плотность такого газа из-за разницы молярной доли иных газов (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , CO_2 и N_2) изменяется и способствует снижение или увеличению МЧ. Рекомендуется вводить число Воббе, характеризующее состояние природного газа с учетом входящих в него инертных и иных газов,

$$W_s(p_{src}, T_{src}) = \frac{\bar{H}_{s,w}(p_{src}, T_{src})}{\sqrt{\rho_w(p_{src}, T_{src})}}, \quad (4)$$

где $\bar{H}_{s,w}$ – высшая теплота сгорания метана при условиях, равных окружающей среде; p_{src} – давление, равное окружающей среде, $p = 0,1$ МПа; T_{src} – температура, равная окружающей среде, $T = 20$ °C; ρ_w – относительная плотность метана.

В работе [18] уравнение определения МЧ по методу CARB выглядит следующим образом:

$$MCH = 1,624\{-406,14 + 508,04(H/C) - 173,55(H/C)^2 + 20,17(H/C)^3\} - 119,1, \quad (5)$$

где H/C – отношение количества атомов водорода к атомам углерода в углеводородных компонентах топлива.

При определении МЧ по методу CARB в качестве примера автор [18] использовал шахтный газ, МЧ шахтного газа по данному методу составило 108, по методу AVL МЧ = 100, расхождение в 7-8 ед. говорит о неточности определения МЧ при использовании различных методик. Метод CARB дает завышенные результаты МЧ, в то время как метод AVL – заниженные результаты. В связи с этим в [18] вводится уравнение, полученное методом наименьших квадратов,

$$MCH_{AVL} = 59,4 - 0,39MCH_{CARB} + 0,0071MCH_{CARB}^2. \quad (6)$$

Уравнение позволяет определить МЧ природного газа с небольшой погрешностью, расхождение составляет 2-3. При этом можно отметить, что для шахтного газа $MCH_{CARB} = 95$, а $MCH_{AVL} = 86$. Таким образом, по методу AVL фактическое МЧ тестируемого газа оказалось ниже указанного по методу CARB, что и явилось причиной возникновения детонации в работе двигателя на повышенных нагрузках.

Шведская компания «Промышленная инженерия и управление» [23] (KTH) представила свою формулу определения метанового числа:

$$MCH = 1,624MON - 119,1, \quad (7)$$

где MON – ОЧ, определяемое по моторному методу.

В мире известно несколько методов определения метанового числа природного газа и газовых смесей на его основе: AVL, CARB, GRI, MWM, Waukesha Knock Index, PKI MN, Cummins, Wartsila. Все методы разрабатывались для достижения эффективной работы газовой энергосиловой установки или конвертируемого стандартного двигателя под метановый рабочий процесс.

Методика, разработанная CARB и KTH, представляет следующее уравнение для определения МЧ природного газа:

$$MCH = 1,624\{-406,14 + 508,04(H/C) - 173,55(H/C)^2 + 20,17(H/C)^3\} - 119,1. \quad (8)$$

Используя методы определения МЧ природного газа для использования его в качестве моторного топлива, необходимо разделить газы по МЧ ($MCH = 90$, $MCH = 95$ и т.д.) подобно бензиновому топливу, имеющему различные ОЧ, рекомендуемые для использования в соответствующих типах ДВС. Как правило, в России в энергосиловых установках грузовых автомобилей используют природный газ без изучения его компонентного состава, так как он уже предусмотрен ГОСТом, отсюда и возникают проблемы оптимизации рабочего процесса конвертированного газового двигателя при использовании природного газа по ГОСТ 27577-2000 и ГОСТ Р 56021-2014.

По данным компании «Грузомобиль» (Санкт-Петербург) газовый двигатель компании Cummins, работающий на европейском природном газе, выдает эффективную мощность выше, чем двигатель той же компании, работающий на российском природном газе. Это свидетельствует о том, что в России больше исследований, направленных на совершенствование конструкции двигателя для работы на природном газе и меньше работ по изучению физических свойств природного газа для поршневых ДВС с учетом их конструктивных особенностей.

Для снижения дисбаланса между работами, направленными на совершенствование конструкции двигателя и исследования физических свойств различных газов, необходимо разработать алгоритм подбора и использования газов по МЧ в соответствующих поршневых двигателях. В данном случае необходимо создавать искусственные газовые смеси на основе метана, которые позволят повысить энергию тепловыделения за счет оптимального подбора МЧ, при этом будет обеспечиваться детонационная стойкость работы газовой энергосиловой установки в широком диапазоне нагрузок.

Производители газовых силовых установок, ориентированных в основном на грузовой автомобильный транспорт, на стадии проектирования закладывают определенные конструктивные особенности, учитывая при этом компонентный состав используемого природного газа [2, 21, 24, 28]. Европейский союз не имеет больших запасов месторождений природного газа, за исключением

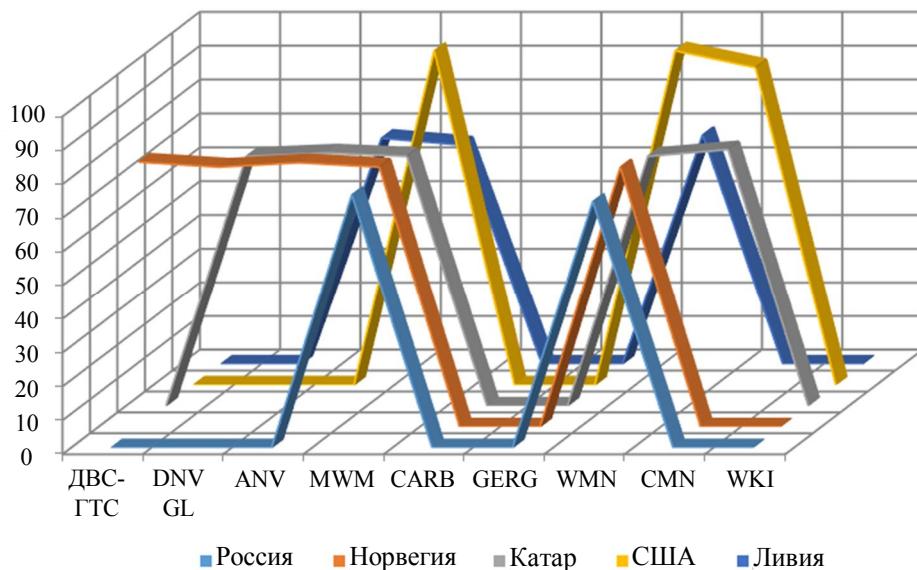


Рис.1. Сравнение методик расчета метанового числа

Норвегии, следовательно, на территорию Европы поставляется природный газ из различных стран (Россия, Норвегия, Катар, США, Ливия, Египет, Алжир и т.д.).

По известным методикам определения МЧ природного газа были проведены исследования всех поставляемых в Европу природных газов из разных месторождений. Проведенные исследования показали неоднозначные результаты (рис.1), как известно оптимальное МЧ > 70 . Заранее отметим, что не все методики достаточно точно определяют МЧ, наиболее точным является метод AVL.

Из данных, полученных методом AVL, следует, что у большинства стран, в том числе и российского природного газа, МЧ ≥ 70 . Однако, даже высокий показатель МЧ не считается благоприятным газом для транспортных двигателей, что вызвано наличием в составе природного газа большого количества инертных газов (H_2 , N_2 , CO_2 и т.д.), которые снижают эффективность тепловыделения в процессе горения топлива в камере сгорания двигателя. Таким образом, не все природные газы с высоким МЧ могут быть использованы в качестве основного моторного топлива для газовых двигателей, так как в процессе сгорания могут вызывать детонацию, а это дополнительно усложняет регулирование топливовоздушной смеси во впускной системе.

Использование природного газа в качестве моторного топлива на большегрузных транспортных средствах, работающих в горных и карьерных условиях с учетом неблагоприятной экологической обстановки, снижает риск выброса токсичных компонентов в 3-4 раза [22, 26-28]. Эффективность реализации поставленной задачи является достигнутой, если рассматривать не прямое сжигание добывого газа в тепловых двигателях, а сжигание подобранной по качественному составу смеси газов, в основе которой лежит метан, обладающий высоким тепловыделением и устойчивый к образованию детонации. Компонентный состав различных метановых газов хорошо иллюстрирует шкала распределения МЧ на рис.2.



Рис.2. Шкала распределения метанового числа газов

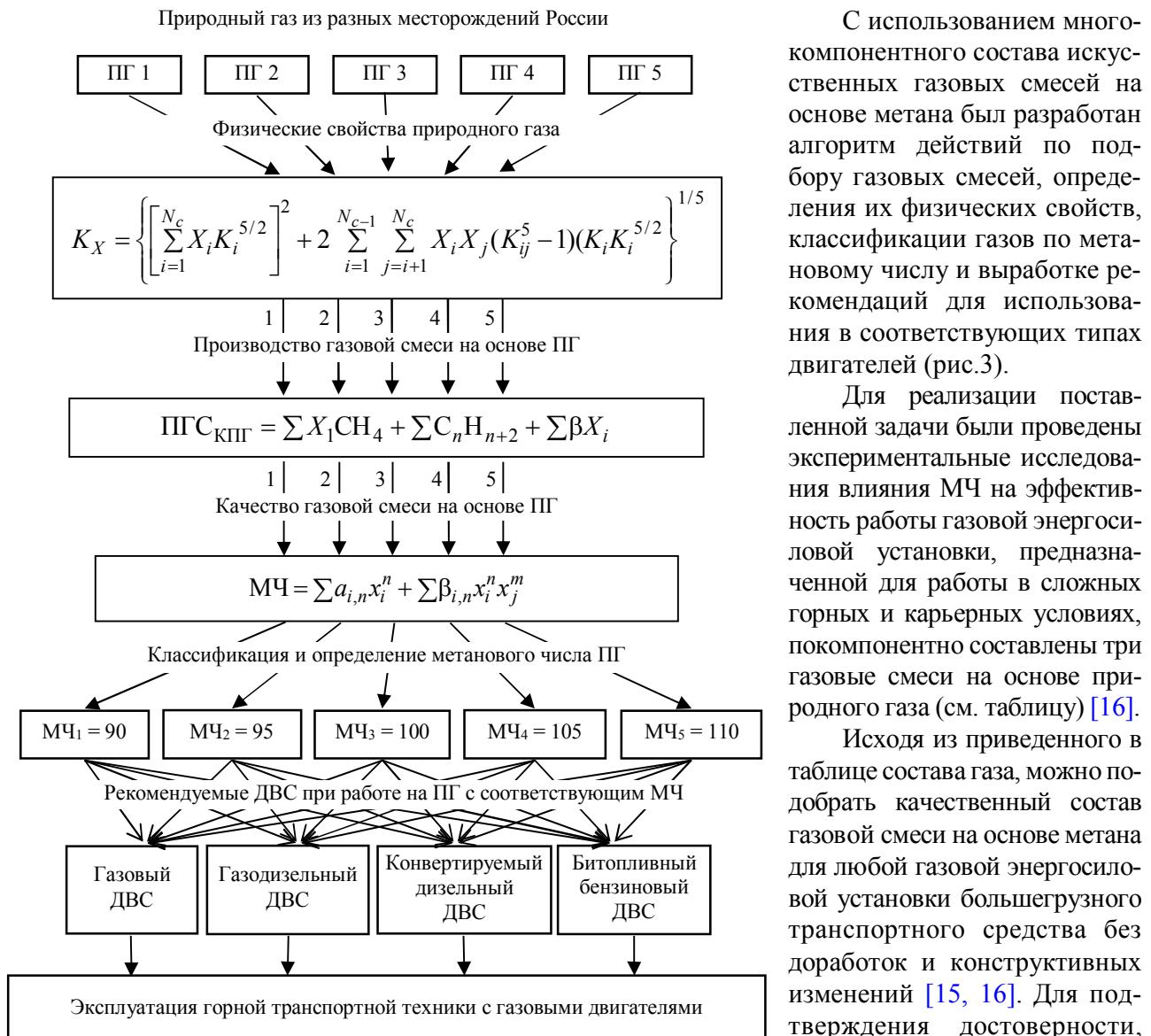


Рис.3. Алгоритм подбора и использования газа по МЧ в поршневых двигателях

полнен многофакторный регрессионный анализ влияния МЧ на эффективность рабочего процесса газового ДВС.

Качественный состав исследуемых газовых смесей на основе метана

Газ 1 (МЧ-75)	Газ 2 (МЧ-98)	Газ 3 (МЧ-104)
CH ₄ – 83,2	CH ₄ – 89	CH ₄ – 99,7
C ₂ H ₆ – 8	C ₂ H ₆ – 5,2	C ₂ H ₆ – 0,3
C ₃ H ₈ – 3,6	C ₃ H ₈ – 2,8	C ₃ H ₈ – 0
C ₄ H ₁₀ – 1,5	C ₄ H ₁₀ – 1,1	C ₄ H ₁₀ – 0
CO – 3	CO ₂ – 1,5	H ₂ – 0
N ₂ – 0,7	N ₂ – 0,4	N ₂ – 0

Многофакторный регрессионный анализ был выполнен по методике, представленной в работе [25]. При последовательном планировании эксперимента предполагается, что общее уравнение модели [25]:

$$Y = b_0 + \sum_{k=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} X_i X_j + \dots + \sum_{i=1}^k b_{ij} X_{ij}^2, \quad (9)$$

С использованием многокомпонентного состава искусственных газовых смесей на основе метана был разработан алгоритм действий по подбору газовых смесей, определения их физических свойств, классификации газов по метановому числу и выработке рекомендаций для использования в соответствующих типах двигателей (рис.3).

Для реализации поставленной задачи были проведены экспериментальные исследования влияния МЧ на эффективность работы газовой энергосиловой установки, предназначенный для работы в сложных горных и карьерных условиях, покомпонентно составлены три газовые смеси на основе природного газа (см. таблицу) [16].

Исходя из приведенного в таблице состава газа, можно подобрать качественный состав газовой смеси на основе метана для любой газовой энергосиловой установки большегрузного транспортного средства без доработок и конструктивных изменений [15, 16]. Для подтверждения достоверности, выводов и рекомендаций была разработана критериальная математическая модель и вы-

где Y – значение отклика экспериментальных наблюдений; b_0 – оценка коэффициента регрессии; X_{ij} – натуральный i -й уровень j -го фактора; k – число контролируемых факторов.

Наиболее рациональными считаются планы по количеству проведенных опытов, главным достоинством которых является близость к D-оптимальным планам и принципиальный подход к композиционному построению. Как и все центральные композиционные планы, они включают ядро, точки и опыты в центре плана. Все это позволяет получить взаимосвязь между тремя основными показателями – МЧ, степень сжатия ε и угол поворота коленчатого вала φ_2 [17].

Влияние МЧ на степень сжатия очевидна, так как меняется скорость распространения фронта пламени, которая может как улучшать, так и ухудшать динамику работы двигателя. При этом наиболее привлекательным считается подбор газовой смеси на основе природного газа с МЧ = 90-105 и степенью сжатия $\varepsilon = 11-14$, при этом оптимальная степень сжатия определяется, исходя из соответствующего типа двигателя.

Для определения достоверности теоретических исследований в лабораторных условиях проводился эксперимент с использованием многокомпонентной газовой смеси и природного газа в качестве моторного топлива для газовой энергосиловой установки. Испытания проводились с применением трех исследуемых газовых смесей и двух существующих газомоторных топлив, используемых в России, каждый с соответствующим метановым числом.

Подробная методика расчета влияния МЧ на показатели рабочего процесса газового двигателя представлена в работе [16], по итогам расчета выполнено сравнение значения из доверительного интервала с соответствующими значениями параметров модели. Преобразовав все значения согласно полученного доверительного интервала, представим окончательную модель с численными значениями оценочных показателей коэффициентов регрессии:

$$Y = 120 - 3x_1 + 7x_2 + 4x_3 - 0,5(x_1x_2 + x_1x_3) - 3x_2x_3 + 485x_1^2 + 490x_2^2 + 495x_3^2. \quad (10)$$

где x_1 – угол поворота коленчатого вала во 2-й фазе сгорания φ_2 ; x_2 – степень сжатия ε ; x_3 – метановое число МЧ.

Уравнение (10) позволило построить зависимость влияния основных показателей (МЧ, ε , φ_2) на мощность газовой энергосиловой установки при работе на исследуемых газовых смесях с различными МЧ. Выражение (10) определяет взаимосвязь МЧ и показателей двигателя, степени сжатия ε и угла поворота коленчатого вала φ_2 . При этом дополнительно проводить расчеты рабочего процесса двигателя не требуется, так как они уже экспериментально подтверждались [16]. На основе

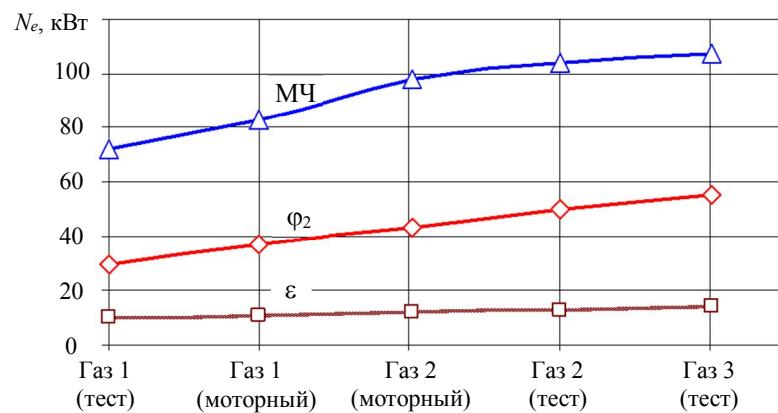


Рис.4. Зависимость влияния метанового числа эффективного рабочего процесса газовой энергосиловой установки (ЭСУ); газ 1, 2, 3 (тест) – испытуемый газ на основе метана для ЭСУ (см. таблицу); газ 1 и 2 (моторный) – используемые в России природные газы в качестве моторных для ЭСУ

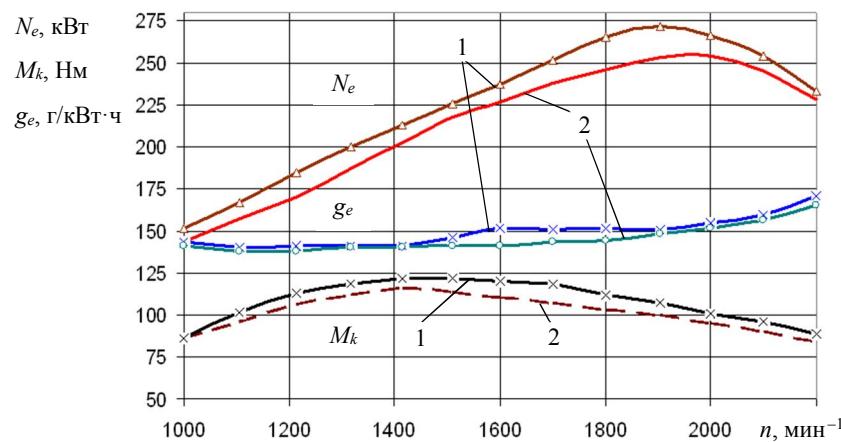


Рис.5. Внешняя скоростная характеристика газовой энергосиловой установки 8ГЧН12/13 карьерного самосвала

1 – исследуемая ЭСУ на смесевом ПГ; 2 – ЭСУ – прототип на ПГ

экспериментальных данных [6] были определены пределы оптимальных значений степени сжатия $\varepsilon = 12\text{-}14$ и угла поворота коленчатого вала $\theta = 12\text{-}15^\circ$. Полученная зависимость (рис.4), хорошо иллюстрирует взаимосвязь МЧ, степени сжатия и регулировочных характеристик качества газо-воздушной смеси на впуске в цилиндр двигателя.

Результаты исследования. Для подтверждения адекватности разработанной модели планируемого эксперимента и влияния метанового числа на эффективность рабочего процесса газовой энергосиловой установки горного большегрузного транспортного средства был использован численный расчет, выполнена поэлементная обработка полученных результатов и получена зависимость влияния МЧ на мощностные показатели газового двигателя.

Для подтверждения теоретического исследования влияния метанового числа на показатели двигателя ε, φ_2 , определяющие его энергоэффективность, был проведен эксперимент, построена внешняя скоростная характеристика (рис.5) исследуемой энергосиловой установки карьерного газомоторного самосвала, где прослеживается увеличение эффективной мощности на 10-15 %.

Экспериментальные результаты газовой ЭСУ 8ГЧН12/13 подтвердили достоверность полученных теоретических исследований. Получена зависимость взаимосвязи между МЧ, степенью сжатия и углом поворота коленчатого вала φ_2 . Полученная зависимость влияния взаимосвязи между МЧ, степенью сжатия и максимумом скорости распространения пламени в цилиндре двигателя, выраженная через угол φ_2 , позволила экспериментально подтвердить увеличение эффективной мощности в пределах 10-15 %. Изменение метанового числа природного газа МЧ = 75-97 при степени сжатия $\varepsilon = 12$ и угле опережения зажигания $\theta = 12\text{-}15^\circ$, увеличение мощности, степени сжатия до $\varepsilon = 14$ при сохранении МЧ = 75-97 снижают детонационную стойкость. Рекомендуется увеличивать МЧ до 98-104 при $\theta = 12^\circ$.

Разработанный алгоритм адаптации и использования многокомпонентных газовых смесей позволил на основе экспериментальных и расчетных данных квалифицировать газ по МЧ = 75-104. Наиболее подходящим составом природного газа в качестве моторного в ЭСУ 8ГЧН12/13 является газ 2 с МЧ = 98 (состав: CH₄ – 89; C₂H₆ – 5,2; C₃H₈ – 2,8; C₄H₁₀ – 1,1; CO₂ – 1,5; N₂ – 0,4 мол.%) и газ 3 с МЧ = 104 (CH₄ – 99,7; C₂H₆ – 0,2; H₂ – 0,1 мол.%), при этом наблюдается повышение эффективной мощности на 10-15 %.

Заключение. Наиболее оптимальным метановым числом газовых смесей является МЧ = 97 при степени сжатия $\varepsilon = 12$ и угле $\varphi_2 = 18^\circ$, при этом наблюдается увеличение эффективной мощности на 10-15 %. При степени сжатия $\varepsilon = 13$ мощность ЭСУ увеличивается на 17-22 % при использовании газовой смеси и природного газа с МЧ = 104. Разработанный алгоритм позволяет подобрать газовые смеси под соответствующие типы ЭСУ горнодобывающей техники без сложных конструктивных изменений. Проведенный эксперимент показал, что наиболее подходящие газовые смеси для газовой ЭСУ 8ГЧН12/13 карьерного самосвала – газ 2 с МЧ = 98 и газ 3 с МЧ = 104.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев А.С. Влияние режимов использования дизеля на дымность отработавших газов / А.С.Афанасьев, Р.Т.Хакимов, С.М.Загорский // Технико-технологические проблемы сервиса. 2014. № 2 (28). С. 56-58.
2. Барсук Н.Е. «Зеленый» газ в газотранспортной системе Европы / Н.Е.Барсук, М.П.Хайдина, С.А.Хан // Газовая промышленность. 2018. № 10. С. 104-109.
3. Выбор работы малолитражного двигателя работающего на смеси природного газа и водорода / Ф.И.Абрамчук, А.Н.Кабанов, Р.Маамри и др. // Автомобильный транспорт. 2011. № 29. С. 152-159.
4. Газомоторные топлива на основе метана. Анализ требований к качеству и исходному сырью / Л.А.Гнедова, К.А.Гриценко, Н.А.Лапушкин и др. // Вести газовой науки. Современные технологии переработки и использования газа. 2015. № 1 (21). С. 86-97.
5. Гилязиеев М.Г. Учет совместного влияния потерь давления во входном и выхлопном трактах газоперекачивающих агрегатов на мощность и расход топливного газа газотурбинной установки // Новые направления инновационной деятельности на предприятиях газовой промышленности. М.: Конверт, 2018. С. 175-184.
6. Дидманидзе О.Н. Исследования показателей тепловыделения газовых двигателей / О.Н.Дидманидзе, А.С.Афанасьев, Р.Т.Хакимов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 50-55. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.50
7. Жоу Д. Расширенная необратимая термодинамика / Д.Жоу, Х.Касас-Баскес, Дж.Лебон. Ижевск: Научно-исследовательский центр «Регулярия и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. 528 с.
8. Зайченко В.М. Пиролиз углеводородов на углеродных матрицах / В.М.Зайченко, И.Л.Майков. М.: Недра, 2014. 235 с.
9. Иванов С.С. Требования к подготовке растворенного газа для питания газопоршневых двигателей / С.С.Иванов, М.Ю.Тарасов // Нефтяное хозяйство. 2011. № 1. С. 102-105.

10. Ильина М.Н. Требования к подготовке попутного нефтяного газа для малой энергетики // Известия Томского политехнического университета. Энергетика. 2007. Т. 310. № 2. С. 167-171.
11. Проблемы оценки детонационной стойкости КПГ / Л.А.Гнедова, К.А.Гриценко, Н.А.Лапушкин и др. // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 5 (23). С. 53-56.
12. Разработка технологии глубокой перекачки газа из ремонтируемых участков магистральных газопроводов с использованием мобильной компрессорной станции / Р.А.Кантюков, И.М.Тамеев, С.А.Зимняков и др. // Наука и техника в газовой промышленности. 2011. № 1 (45). С. 49-52.
13. Разработка математической модели участка газотранспортной системы / Р.Р.Кантюков, М.С.Тахавиев, М.Г.Гилязиев и др. // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2015. № 2. С. 3-7.
14. Тарасов М.Ю. Подготовка нефтяного газа для питания газо-поршневых электростанций / М.Ю.Тарасов, С.С.Иванов // Нефтяное хозяйство. 2009. № 2. С. 46-49.
15. Утилизация нефтяного попутного газа на промыслах / А.Г.Гумеров, С.Г.Бажайкин, Е.З.Ильясова, Л.А.Авдеева. Уфа: Институт проблем транспорта энергоресурсов Республики Башкортостан, 2010. 111 с.
16. Хакимов Р.Т. Методы определения метанового числа компонентного состава природного газа / Р.Т.Хакимов, О.Н.Дидманидзе, М.И.Шереметьева // Сборник трудов III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов «Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения», 22 марта 2019, Челябинск, Россия. Южно-Уральский институт управления и экономики, 2019. С. 74-84.
17. Хакимов Р.Т. Влияние характеристик выгорания на показатели рабочего цикла газового двигателя при использовании электронной системы управления // Грузовик. 2008. № 4. С. 27-29.
18. Шахтный газ – моторное топливо для двигателей внутреннего сгорания / В.А.Пылев, А.А.Прохоренко, С.А.Кравченко и др. // Общие проблемы двигателестроения. 2007. № 1. С. 10-15.
19. Anthropogenic and natural radiative forcing // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2013. P. 659-740.
- DOI: 10.1017/CBO9781107415324
20. Backman M. Biomethane use in Sweden / M.Backman, M.Rogulska // The Archives of Automotive Engineering. 2016. Vol. 71. № 1. P. 7-19. DOI: 10.14669/AM.VOL71.ART1
21. Billig E. Renewable methane – A technology evaluation by multi-criteria decision making from a European perspective / E.Billig, D.Thraen // Energy. 2017. Vol. 139. P. 468-484. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.164
22. Coupled weather research and forecasting-stochastic timeinverted lagrangian transport (WRF-STILT) model / T.Nehrkorn, J.Eluszkiewicz, S.C. Wofsy et al. // Meteorol Atmos Phys. 2010. Vol. 107. P. 51-64. DOI: 10.1007/s00703-010-0068-x
23. Effects of hydraulic resistance and heat losses on deflagration-to-detonation transition / L.Kagan, D.Valiev, M.Liberman et al. // Pulsed and continuous detonation. 2010. P. 108-112.
24. Fallde M. Towards a sustainable socio-technical system of biogas for transport: the case of the city of Linköping in Sweden / M.Fallde, M.Eklund // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 98. P. 17-28. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.089
25. Malenshek M. Methane number testing of alternative gaseous fuels / M.Malenshek, D.B.Olsen // Fuel. 2009. Vol. 88. P. 650-656. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.08.020
26. Mathematical Model and 3D Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in Metal-hydride Reactors / V.I.Artemov, O.V.Borovskih, D.O.Lazarev et al. // 17th World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2008), 15-19 June 2008. Brisbane, Australia. WHEC, 2008. P. 628-631.
27. Quantifying sources of methane using light alkanes in the Los Angeles basin, California / J.Peischl, T.B.Ryerson, J.Brioude et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. Vol. 118. Iss. 10. P. 4974-4990. DOI: 10.1002/jgrd.50413
28. Study on Performance and Exhaust Gas Characteristics of Directly Injected CNG Engine / S.W.Lee, Doo-Sung Baik, T.Rogers, P.Petersen // International Journal of Bio-Science and Bio-Technology. 2014. Vol. 6. № 2. P. 179-186. DOI: 10.14257/ijbsbt.2014.6.2.18
29. Schart J. ERGaR: Tool for Cross Border Transfer and Mass Balancing Biomethane within the European Natural Gas Network / J.Schart, A.Kovacs // Workshop: Biomethane in the Natural Gas Network. Brussels, 2017. URL: <http://www.ergar.org/wp-content/uploads/2016/11/Jesse-Schart-ERGaR-Greenweek.pdf> (дата обращения: 17.11.2021).

Авторы: О.Н.Дидманидзе, д-р техн. наук, академик РАН, <https://orcid.org/0000-0003-2558-0585> (Российский государственный аграрный университет им. К.А.Тимирязева, Москва, Россия), А.С.Афанасьев, канд. воен. наук, заведующий кафедрой, a.s.afanasev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0272-2387> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Р.Т.Хакимов, д-р техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4858-3586> (Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья принята к публикации 18.10.2021.
Выход в свет 16.12.2021.