

Научная статья
УДК 621.433

Способы оптимизации рабочего процесса газового двигателя, работающего на обеднённой смеси

Константин Александрович Никифоров

Государственный научный центр Российской Федерации, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Россия

nikikos@list.ru

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы повышения эффективности газовых двигателей, работающих на обеднённой топливовоздушной смеси. Проведён комплексный анализ ключевых факторов, влияющих на процесс сгорания, экологические и экономические показатели данных газовых двигателей. Особое внимание уделено инновационным подходам к оптимизации рабочего процесса, включая прецизионное регулирование состава смеси, применение комбинированных систем наддува, рециркуляцию отработавших газов (EGR) и использование перспективных систем зажигания с высокой энергией. Представлен детальный обзор последних научных исследований и экспериментальных данных, подтверждающих эффективность предложенных технических решений. На основании проведённого анализа сформулированы рекомендации по выбору оптимальных параметров рабочего процесса для различных режимов эксплуатации. Также приведены результаты экспериментов и математическая модель газового двигателя, созданная с опорой на экспериментальные данные.

Ключевые слова: газовый двигатель, обеднённая смесь, оптимизация рабочего процесса, EGR, турбонаддув, комбинированный наддув, система зажигания, экологические показатели, топливная экономичность, цикловая нестабильность

Для цитирования: Никифоров К.А. Способы оптимизации рабочего процесса газового двигателя, работающего на обеднённой смеси // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 2 (48).

Original article

Ways to optimize the workflow of a gas engine running on a depleted mixture

Konstantin A. Nikiforov

The Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute, Moscow, Russia

nikikos@list.ru

© Никифоров К.А., 2026

Abstract. The article discusses modern methods for improving the efficiency of gas engines running on a depleted fuel-air mixture. A comprehensive analysis of the key factors influencing the combustion process, environmental and economic indicators has been carried out. Special attention is paid to innovative approaches to optimizing the workflow, including precision control of the mixture composition, the use of combined boost systems, exhaust gas recirculation (EGR) and the use of advanced high-energy ignition systems. A detailed review of the latest scientific research and experimental data confirming the effectiveness of the proposed technical solutions is presented. Based on the analysis, recommendations have been formulated on the selection of optimal workflow parameters for various operating modes. Experimental results and a mathematical model of a gas engine based on experimental data are also presented.

Keywords: gas engine, lean mixture, workflow optimization, EGR, turbocharging, combined boost, ignition system, environmental performance, fuel efficiency, cyclic instability

For citation: Nikiforov K.A. Ways to optimize the workflow of a gas engine running on a depleted mixture. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. No. 2 (48).

Введение

Современные тенденции развития двигателестроения характеризуются ужесточением экологических требований и необходимостью повышения топливной экономичности. В этом контексте газовые двигатели, работающие на обеднённой топливовоздушной смеси ($\lambda > 1,2$), представляют особый интерес благодаря их способности обеспечивать существенное снижение выбросов оксидов азота (NO_x) при сохранении приемлемых мощностных показателей [1].

Однако эксплуатация таких двигателей сопряжена с рядом технических сложностей, включая проблемы устойчивости воспламенения, повышенную цикловую изменчивость и снижение удельной мощности. Эти факторы существенно ограничивают потенциал применения обеднённых смесей в коммерческих и промышленных энергетических установках. В связи с этим разработка эффективных методов оптимизации рабочего процесса газовых двигателей данного типа представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Целью настоящего исследования является систематизация современных подходов к оптимизации рабочего процесса газовых двигателей на обеднённой смеси, включая анализ конструктивных решений, систем управления и перспективных технологий сгорания. В работе использованы данные последних экспериментальных исследований, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Полученная информация в дальнейшем будет использована для оптимизации работы компьютерной модели газового двигателя внутреннего сгорания.

Физико-химические основы работы двигателя, работающего на обеднённой смеси

Работа двигателя на обеднённой смеси принципиально изменяет термодинамические параметры рабочего цикла. Как показали исследования [2], при $\lambda > 1,2$ наблюдается снижение максимальной температуры цикла на +150-200 °С, уменьшение скорости распространения фронта пламени на 30-40% и увеличение продолжительности фазы основного сгорания. Эти изменения обусловлены уменьшением концентрации топлива в рабочей смеси и соответствующим снижением энергии активации химических реакций горения.

Данные термодинамические сдвиги приводят к двум основным последствиям: с одной стороны, снижение пиковых температур способствует уменьшению образования термических NO_x , с другой стороны, увеличение длительности сгорания и снижение скорости горения ухудшают полноту сгорания и могут привести к росту выбросов несгоревших углеводородов (НС) и монооксида углерода (СО). Таким образом, необходим баланс между экологическими и энергетическими показателями.

Для газовых двигателей, работающих на природном газе (основной компонент – метан), характерны особые закономерности процесса горения. Экспериментальные данные [3] свидетельствуют, что при обеднении смеси пределы воспламенения сужаются с 5-15% до 4-12% по объёму, минимальная

энергия зажигания увеличивается в 1,5-2 раза, а время индукции возрастает на 20-30%.

Метан, обладая высокой устойчивостью молекулярной структуры, требует большей энергии активации для начала реакции горения, особенно в условиях обеднённой смеси. Это объясняет повышение требований к системам зажигания. Указанные особенности необходимо учитывать при проектировании систем зажигания и камер сгорания для двигателей данного типа, так как они напрямую влияют на надёжность воспламенения и стабильность рабочего процесса.

Проблемы эксплуатации двигателей, работающих на обеднённой смеси

Основной технической проблемой эксплуатации данных двигателей является ухудшение воспламеняемости смеси при высоких коэффициентах избытка воздуха. Как показали исследования [4], при $\lambda > 1,5$ вероятность пропусков воспламенения возрастает до 5-8%, разброс момента зажигания между циклами достигает 3-5° п.к.в., а колебания давления в цилиндре увеличиваются на 40-60%.

Нестабильное воспламенение ведёт к увеличению цикловой неравномерности, что негативно сказывается на плавности работы двигателя, повышает вибрации и шум, а также сокращает ресурс деталей кривошипно-шатунного механизма. Кроме того, пропуски воспламенения приводят к выбросу несгоревшего метана, оказывающим мощное влияние на усиление парникового эффекта.

Статистический анализ индикаторных диаграмм [5] выявил, что для обеднённых смесей характерно увеличение коэффициента вариации IMEP (среднего индикаторного давления) до 8-12%, неравномерность работы по цилиндрам до 15-20% и повышенная чувствительность к изменению внешних условий (температуры воздуха, давления, влажности).

Цикловая изменчивость является следствием стохастической природы процесса турбулентного горения в условиях дефицита топлива. Она

затрудняет точное управление двигателем, снижает его КПД и повышает эксплуатационные расходы. Для её снижения необходимы усовершенствованные системы управления, способные оперативно компенсировать отклонения в каждом рабочем цикле.

Применение обеднённых смесей приводит к снижению литровой мощности на 25-30%, ухудшению приёмистости двигателя и ограничению рабочего диапазона по частоте вращения. Это обусловлено уменьшением количества топлива, сгорающего в цикле, а также ухудшением условий наполнения цилиндров из-за меньшего тепловыделения.

Данные ограничения особенно критичны для транспортных средств и мобильных энергоустановок, где важны динамические характеристики и способность быстро реагировать на изменение нагрузки. Компенсация потери мощности требует применения систем наддува, что усложняет и удорожает конструкцию двигателя.

Методы оптимизации рабочего процесса

Современные системы впрыска с электронным управлением позволяют обеспечить точность дозирования $\pm 1,5\%$, реализовать многоточечный впрыск и адаптировать состав смеси к изменяющимся условиям работы двигателя. Это достигается за счёт использования высокоскоростных электромагнитных клапанов, точных датчиков давления и расхода газа, а также адаптивных алгоритмов управления.

Исследования [6] показали эффективность применения вихревых камер смешения, ступенчатого подвода воздуха и динамических заслонок регулировки потока. Вихревое движение смеси способствует её гомогенизации и ускорению испарения, что улучшает подготовку к воспламенению. Ступенчатый подвод воздуха позволяет оптимизировать процесс смесеобразования на разных режимах работы.

Преимущества данного решения включают поддержание давления наддува в широком диапазоне оборотов, уменьшение «турбоямы» на 30-40%

и повышение КПД на режимах частичных нагрузок. Механизм изменения геометрии направляющего аппарата позволяет оптимизировать поток отработавших газов, раскручивающих турбину, на всех режимах работы двигателя.

Сочетание механического и турбонаддува позволяет обеспечить приёмистость двигателя, увеличить удельную мощность на 15-20% и расширить диапазон устойчивой работы. Механический нагнетатель, приводимый в действие непосредственно от коленчатого вала, обеспечивает давление на низких оборотах, в то время как турбокомпрессор эффективно работает на средних и высоких оборотах.

Современные разработки включают промежуточные охладители EGR, точные регулирующие клапаны и системы очистки рециркулируемых газов. Охлаждение рециркулируемых газов перед подачей во впускной коллектор повышает их плотность и позволяет увеличить массовую долю EGR без снижения наполнения цилиндров.

Эксперименты [7] показали, что оптимальный уровень EGR составляет 15-25% для эффективного снижения выбросов NO_x , но не должен превышать 30% для сохранения стабильности сгорания. EGR снижает пиковые температуры в цилиндре за счёт разбавления смеси инертными компонентами (CO_2 , N_2) и увеличения её теплоёмкости.

Современные решения включают катушки зажигания с энергией до 150 мДж, многократный искровой разряд и плазменные системы воспламенения. Повышение энергии искры позволяет надёжно воспламенять обеднённые смеси, а многократный разряд увеличивает вероятность успешного инициирования горения в условиях высокой турбулентности.

Перспективными направлениями являются лазерное зажигание, микроволновое инициирование и каталитические системы. Лазерное зажигание позволяет создать объёмный очаг воспламенения с точно контролируемой энергией и положением, что повышает стабильность горения.

Каталитические системы способны инициировать реакцию при более низких температурах, расширяя пределы воспламенения.

Экспериментальные исследования и их результаты

Исследования проводились на одноцилиндровом исследовательском двигателе с рабочим объёмом 0,5 л, степенью сжатия 12:1 и электронной системой управления. Двигатель был оснащён системой быстрого впускного клапана для организации стратифицированного заряда, системой EGR с охлаждением и высокоэнергетической системой зажигания с возможностью многократного разряда. Измерения включали индикаторные диаграммы, эмиссию вредных веществ, расход топлива и параметры циклической нестабильности.

Результаты испытаний показали, что при коэффициенте избытка воздуха $\lambda = 1,6$ удалось достичь снижения выбросов NO_x на 45% по сравнению со стехиометрическим режимом. Цикловая нестабильность, оцениваемая по коэффициенту вариации IMEP, уменьшилась на 35% благодаря применению высокоэнергетического зажигания и оптимизированной системы EGR. Эффективный КПД двигателя повысился на 3-5% за счёт улучшения полноты сгорания и снижения потерь тепла.

Были проведены испытания двигателя КамАЗ-445, который был конвертирован из дизельного в газовый вариант. При конвертации была снижена степень сжатия для использования природного газа в качестве топлива. Кроме того, были внесены изменения в топливную систему и впускной коллектор, добавлена система зажигания, а также изменена система управления.

При испытаниях двигателя проводилось сравнение внешней скоростной (BCX) и регулировочных характеристик по различным параметрам: составу рабочей смеси, углу опережения зажигания, давлению топлива и пр. (рисунок 1).

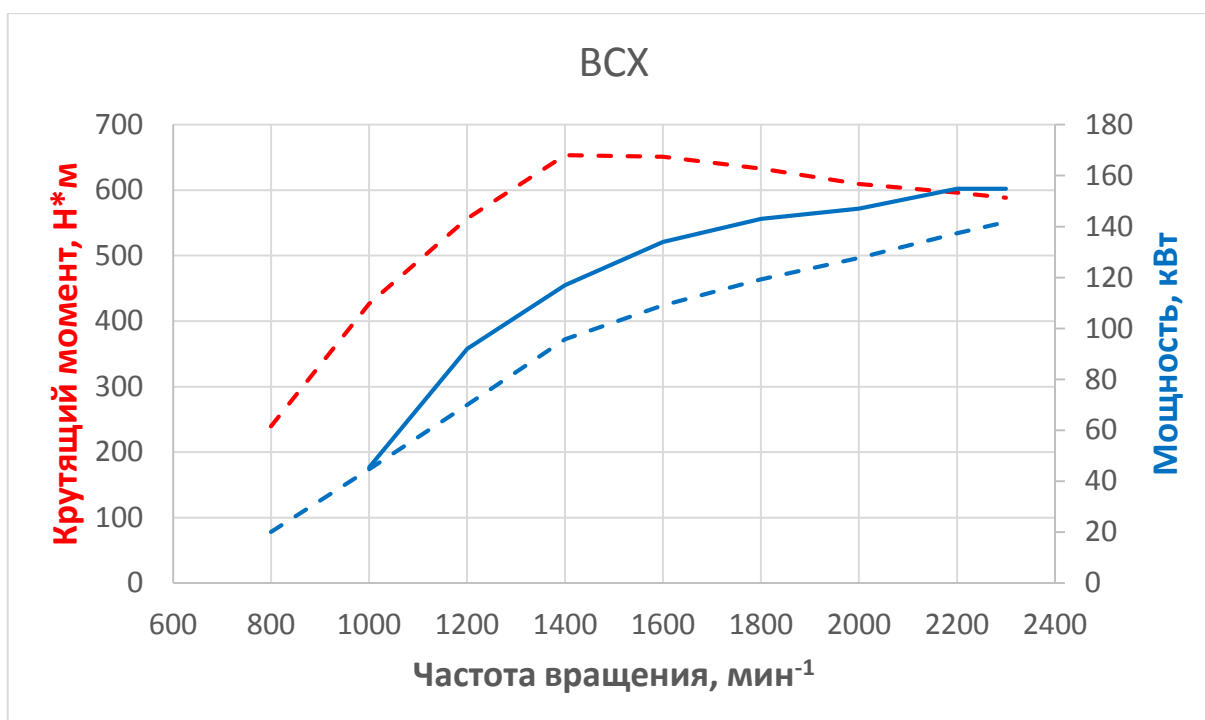


Рис. 1. Сравнение данных о ВСХ для газового и дизельного вариантов двигателя КамАЗ-445

Моделирование проводилось в программном комплексе AVL Cruise M. При разработке модели одна из главных сложностей была связана с подбором настроек солвера и компонентов модели. Необходимо было найти баланс между точностью/стабильностью и скоростью расчёта, которые будут важны при проведении большого количества оптимизаций. В процессе работы было отмечено сильное влияние настроек теплообмена в системе газораспределения на стабильность расчёта и его результаты. Также из-за нехватки данных о геометрии впускного тракта впускной коллектор задавался без учёта особенностей газодинамики.

После проведения расчётов ВСХ и настройки модели удалось достичь хорошей сопоставимости с результатами испытаний на моторном стенде: разброс по основным параметрам рабочего процесса не превысил 5% (рисунок 2).

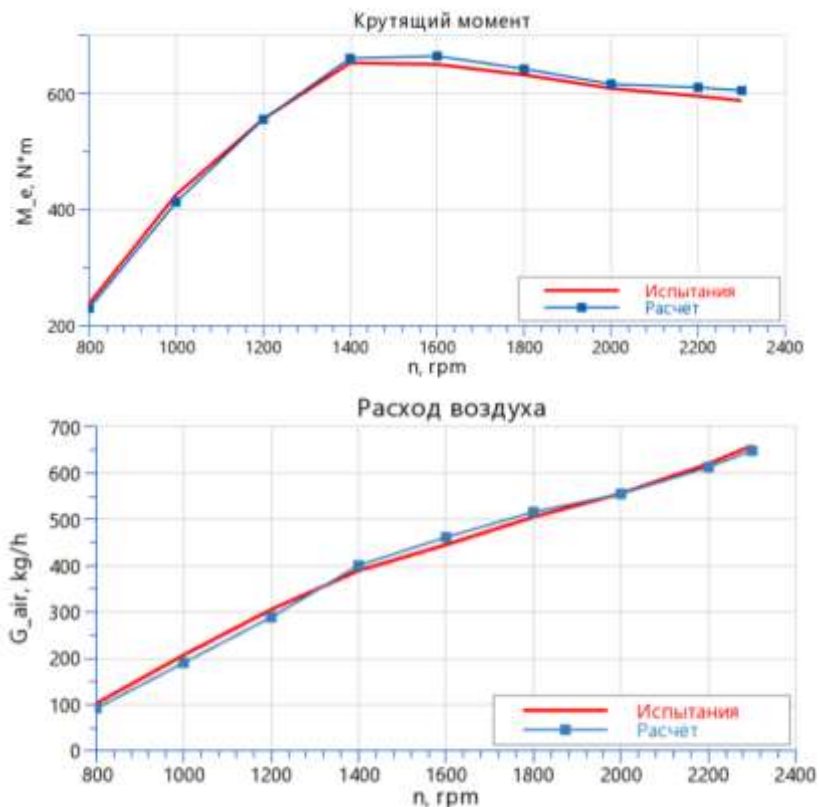


Рис. 2. Валидация компьютерной модели на основании экспериментальных данных

Также были проведены расчёты нагрузочных характеристик двигателя. Результаты совпадают с данными стендовых испытаний двигателя, за исключением некоторых точек. Эти расхождения должны быть исправлены в будущем с более тонкой настройкой теплоотдачи (рисунок 3).

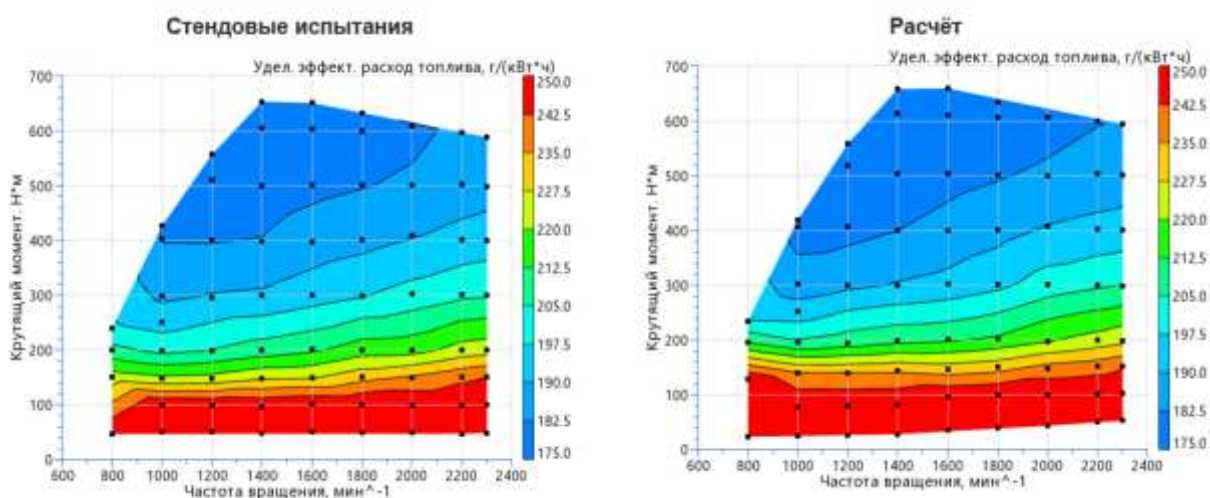


Рис.3. Сравнение данных о нагрузочных характеристиках двигателя КамАЗ-445 (испытания) и его компьютерной модели (расчёт)

Анализ работоспособности разработанной модели на переходных режимах проводился по циклу ETC (European Test Cycle – Европейский испытательный цикл). Этот цикл используется для испытания грузовых автомобилей на соответствие требованиям Euro V.

На графиках (рисунок 4) представлено сравнение результатов, полученных в ходе стендовых испытаний (сверху), и результатов по разработанной модели (снизу). На графиках видно, что модель имеет низкую реакцию при переходе на режимы с низкой нагрузкой, кроме того, аналогично реальному прототипу двигателя, модель не способна достичь коротких пиковых режимов по крутящему моменту. Для этих режимов требуется дополнительная настройка и адаптация системы управления. Однако уже на данном этапе модель показала приемлемую сопоставимость с испытаниями.

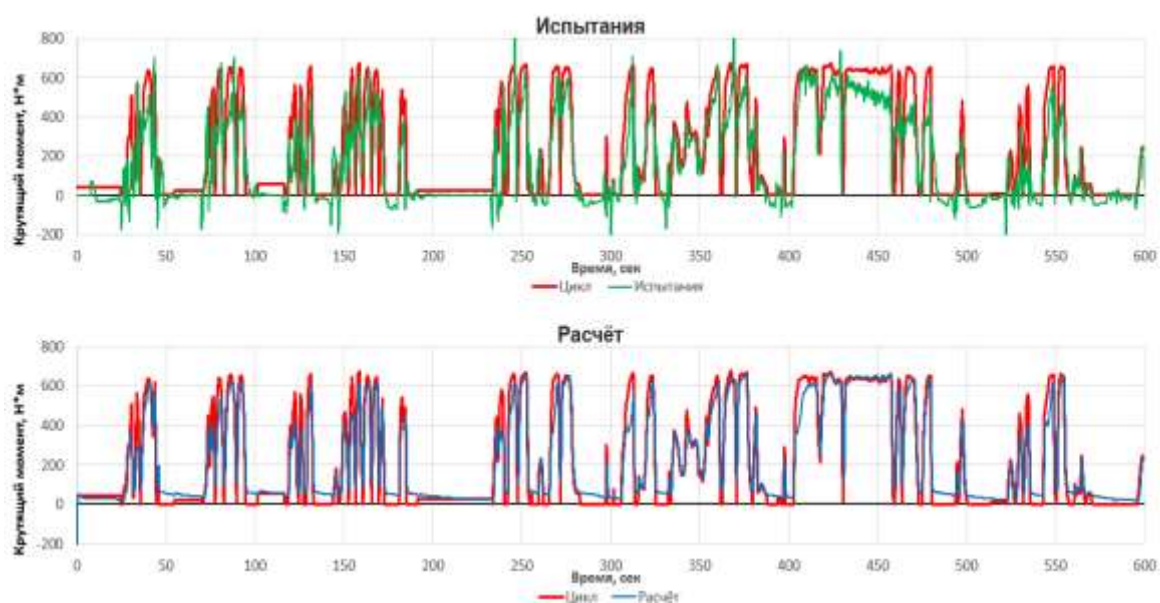


Рис. 4. Сравнение данных о прохождении цикла ETC для двигателя КамАЗ-445 (испытания) и его компьютерной модели (расчёт)

Выводы

1. Созданная компьютерная модель двигателя имеет хорошую сходимость со стендовыми испытаниями реального прототипа.
2. Модель способна работать на неустановившихся режимах – при прохождении транзитного цикла.

3. На основе данной модели возможно провести расчёты выбросов вредных веществ с отработавшими газами, а также использовать модель как основу для оптимизации системы управления двигателем.

4. С помощью модели можно выявить недостатки рабочего процесса и найти способы их решения.

5. Оптимизация рабочего процесса газовых двигателей на обеднённой смеси требует комплексного подхода, сочетающего совершенствование систем смесеобразования, наддува, рециркуляции отработавших газов и зажигания.

6. Наибольшую эффективность демонстрируют комбинированные системы управления, адаптирующие параметры рабочего процесса к изменяющимся условиям эксплуатации.

7. Перспективным направлением является разработка адаптивных алгоритмов управления, использующих обратную связь по давлению в цилиндре и данным о качестве сгорания в реальном времени.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку интеллектуальных систем управления на основе искусственного интеллекта, создание новых конструкций камер сгорания с улучшенным вихреобразованием и стратификацией заряда, а также углублённое исследование альтернативных методов воспламенения, таких как лазерное и каталитическое, для достижения предельных экологических и экономических показателей.

Список источников

1. Cho, H. M. Spark ignition natural gas engines – A review / H. M. Cho, B. Q. He // Energy Conversion and Management. – 2007. – Vol. 48, No. 2. – P. 608-618. – DOI 10.1016/j.enconman.2006.05.023.
2. A review on exhaust gas after-treatment of lean-burn natural gas engines – From fundamentals to application / P. Lott, M. Casapu, Ja. D. Grunwaldt, O. Deutschmann // Applied

Catalysis B: Environmental. – 2024. – Vol. 340. – P. 123241. – DOI 10.1016/j.apcatb.2023.123241. – EDN NJKTGX.

3. Ziyaei, S. A Review of Ultra-lean and Stratified Charged Combustion in Natural Gas Spark Ignition Engines / S. Ziyaei, S. K. Mazlan, P. Lappas // *SAE International Journal of Engines*. – 2023. – Vol. 16, No. 7. – P. 883-922. – DOI 10.4271/03-16-07-0050. – EDN EMTRAR.

4. Combustion and Emission Characterization of a CRCI Engine Fueled by Cyclopentanol/Diesel Blends and Verification Through Real-Time Vehicle Test / H. Chen, X. Su, J. He [et al.] // *Social Science Research Network*. – 2022. – DOI 10.2139/ssrn.4002246. – EDN DXNHPL.

5. Analysis of Combustion Instability for a Natural Gas Engine with Lean-burn Conditions / D. Shunliang, G. Haitang, G. Jianshe [et al.] // *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*. – 2024. – Vol. 45, No. 5. – P. 45-51. – DOI 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.05.014.

6. A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines / C. E. C. Alvarez, G. E. Couto, V. R. Roso [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 128. – P. 107-120. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.118. – EDN VCYOMO.

7. Optimization on the combustion and performance of high-EGR engine by Air-assisted Pre-chamber Turbulent Jet Ignition (APTJI) / D. Wang, Yu. Song, Z. Liu [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 274. – P. 126710. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2025.126710. – EDN GXKSAD.

References

1. Cho H.M., He B.Q. Spark ignition natural gas engines – A review, *Energy Conversion and Management*, 2007, vol. 48, no. 2, pp. 608-618, doi 10.1016/j.enconman.2006.05.023.

2. Lott, P. Casapu M., Grunwaldt Ja. D., Deutschmann O. A review on exhaust gas after-treatment of lean-burn natural gas engines – From fundamentals to application, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2024, vol. 340, p. 123241, doi 10.1016/j.apcatb.2023.123241.

3. Ziyaei S., Mazlan S.K, Lappas P. A Review of Ultra-lean and Stratified Charged Combustion in Natural Gas Spark Ignition Engines, *SAE International Journal of Engines*, 2023, vol. 16, no. 7, pp. 883-922, doi 10.4271/03-16-07-0050.

4. Chen H., Su X., He J., Sun F., Chen Zh., Zhang P., Xu H. Combustion and Emission Characterization of a CRCI Engine Fueled by Cyclopentanol/Diesel Blends and Verification Through Real-Time Vehicle Test, *Social Science Research Network*, 2022, doi 10.2139/ssrn.4002246.

5. Shunliang D., Haitang G., Jianshe G., Zheng T., Enzhe S. Analysis of Combustion Instability for a Natural Gas Engine with Lean-burn Conditions, *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2024, vol. 45, no. 5, pp. 45-51, DOI 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.05.014.

6. Alvarez C.E.C., Couto G.E., Roso V.R., Thiriet A.B., Valle R.M. A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines, *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 128, pp. 107-120, doi 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.118.
7. Wang D., Song Yu., Liu Z., Wei H., Zhou L. Optimization on the combustion and performance of high-EGR engine by Air-assisted Pre-chamber Turbulent Jet Ignition (APTJI), *Applied Thermal Engineering*, 2025, vol. 274, p. 126710, doi 10.1016/j.applthermaleng.2025.126710.

Рецензент: А.Л. Яковенко, канд. тех. наук, доцент кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели», МАДИ

Информация об авторе

Никифоров К. А. – аспирант, ДПО Научно-образовательный центр ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва.

Information about the author

Nikiforov K. A. – Postgraduate student, Scientific and Educational Center of the Russian State Research Center "NAMI", Moscow.

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 18.04.2026; принята к публикации 24.06.2026.

The article was submitted 07.04.2026; approved after reviewing 18.04.2026; accepted for publication 24.06.2026.