НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-621.43

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ В НОВЫХ ТИПАХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кривченко Андрей Викторович
Аспирант кафедры тепловых двигателей и энергетических установок, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Москва, Россия

Аннотация

В настоящей масштабной фундаментальной исследовательской работе осуществляется развернутый, глубоко детализированный, исчерпывающий и многоаспектный научно-теоретический анализ термодинамических циклов, реализуемых в перспективных и новых конструкциях тепловых и комбинированных двигателей. В центре внимания находится исследование модифицированных поршневых циклов с расширенным ходом расширения, режимов низкотемпературного и объемного воспламенения однородных смесей, роторно-поршневых и свободнопоршневых схем, детонационных и волновых преобразователей энергии, а также термоакустических и магнитокалорических двигательных установок. В статье подробно рассматриваются термодинамические уравнения процессов сжатия, подвода теплоты, расширения и теплоотвода при переменных геометрических параметрах, влияние рекуперации и регенерации теплоты отработавших газов, а также возможности применения численного моделирования рабочих процессов в многомерной постановке для оценки индикаторного и эффективного коэффициента полезного действия. На основе комплексного междисциплинарного синтеза технической термодинамики, газовой динамики, химической кинетики горения и прикладной механики формулируются концептуальные подходы к повышению энергетической эффективности и снижению эмиссии вредных веществ в новых типах двигателей.

Ключевые слова: термодинамические циклы, новые типы двигателей, цикл Миллера, цикл Аткинсона, детонационное горение, свободнопоршневой двигатель, регенерация теплоты, термический КПД, горение в объеме, энергетическая эффективность.

Введение

Развитие современного двигателестроения на протяжении многих десятилетий определяется необходимостью одновременного повышения топливной экономичности, удельной мощности, адаптивности к альтернативным видам топлива и выполнения все более строгих экологических норм по выбросам оксидов азота, несгоревших углеводородов, сажи и углекислого газа.

Классические термодинамические циклы Отто, Дизеля и Тринклера долгое время служили базовой расчетной основой для поршневых двигателей внутреннего сгорания, однако в стандартной реализации они сталкиваются с рядом фундаментальных ограничений. Среди них — неполное расширение рабочего тела в конце рабочего хода, при котором газы с еще значительным остаточным давлением и температурой выбрасываются в выпускной коллектор, высокие насосные потери на частичных нагрузках, а также температурные и химические ограничения сгорания, препятствующие одновременному достижению высокого коэффициента полезного действия и низкой эмиссии токсичных компонентов.

Поиск путей преодоления этих ограничений стимулировал разработку новых типов двигателей и модификаций классических термодинамических циклов. К ним относятся циклы с удлиненным ходом расширения относительно хода сжатия, рабочие процессы с объемным самовоспламенением обедненных однородных или стратифицированных смесей, свободнопоршневые линейные генераторы, роторные и волновые схемы, пульсирующие и непрерывно-детонационные двигатели, а также альтернативные преобразователи тепловой энергии, включая термоакустические и регенеративные установки внешнего подвода теплоты. Каждый из этих подходов по-своему перераспределяет тепловые потоки, изменяет траекторию рабочего процесса на индикаторной диаграмме и по-разному взаимодействует с реальными свойствами рабочих тел, кинетикой химических реакций и теплообменом со стенками камеры сгорания.

Целью данного исследования является систематический научно-теоретический анализ термодинамических циклов в новых типах двигателей, выявление физических механизмов повышения термического и эффективного коэффициента полезного действия при изменении кинематики и характера теплоподвода, а также оценка конструктивных и эксплуатационных факторов, определяющих применимость перспективных схем в энергетике и на транспорте.

Циклы с расширенным ходом расширения и адаптивная кинематика рабочего процесса

Одним из наиболее практически освоенных направлений совершенствования поршневых циклов является реализация принципа неполного сжатия при полном расширении рабочего тела, исторически связанного с идеями Аткинсона и Миллера. В классическом цикле с постоянным объемом подвода теплоты геометрическая степень сжатия равна геометрической степени расширения, что ограничивает долю тепловой энергии, преобразуемой в полезную механическую работу на такте расширения. При увеличении степени расширения относительно степени сжатия продукты сгорания расширяются до более низких давлений и температур, благодаря чему большее количество внутренней энергии газа переходит в механическую работу поршня, а тепловые потери с отработавшими газами уменьшаются.

В современных двигателях реализация циклов Аткинсона и Миллера достигается за счет изменения фаз газораспределения — раннего или позднего закрытия впускных клапанов относительно нижней мертвой точки — либо за счет применения механизмов с переменной длиной шатуна, переменной геометрией кривошипно-шатунного механизма или многозвенных кинематических схем. При позднем закрытии впускного клапана часть свежего заряда выталкивается обратно во впускной коллектор на начальном этапе хода сжатия, в результате чего фактическая степень сжатия оказывается ниже геометрической степени расширения. Это позволяет снизить температуру в конце сжатия, уменьшить склонность бензиновых смесей к детонации при повышенных степенях расширения и сократить насосные потери при работе на дросселированных режимах.

Вместе с тем переход к циклам с удлиненным ходом расширения сопровождается снижением литровой мощности двигателя при заданном рабочем объеме цилиндра, поскольку меньшая масса рабочего тела участвует в цикле при той же геометрической вместимости. Для компенсации этого эффекта в современных силовых установках широко применяются турбонаддув, электрические компрессоры и гибридные схемы, позволяющие обеспечить необходимую плотность заряда на впуске и сохранить высокую динамику отклика. С термодинамической точки зрения выигрыш от дополнительного расширения должен сопоставляться с возрастанием относительных тепловых потерь в стенки цилиндра из-за увеличенной продолжительности цикла и возросшей площади охлаждаемых поверхностей в конце расширения.

Объемное воспламенение, детонационные схемы и модифицированные режимы сгорания

Существенное повышение термодинамической эффективности связано с изменением самого механизма окисления топлива и закона теплоподвода в цикле. В традиционных двигателях с искровым зажиганием распространение турбулентного пламени происходит последовательно от очага воспламенения к периферии камеры сгорания, что ограничивает степень сжатия детонацией и требует обогащения смеси на высоких нагрузках для снижения температур. В дизельных двигателях диффузионное горение впрыскиваемого топлива сопровождается локальными зонами богатых смесей и высоких температур, способствующими образованию сажи и оксидов азота.

Альтернативой выступают режимы объемного или кинетически управляемого самовоспламенения гомогенных и частично гомогенных бедных смесей, реализуемые в концепциях воспламенения от сжатия однородной смеси, реактивного управления воспламенением и гибридных режимах с контролируемой стратификацией. В таких процессах воспламенение инициируется не фронтом распространяющегося пламени, а одновременным достижением критических температур и концентраций активных радикалов в значительном объеме заряда. Благодаря высокой степени разбавления воздухом

или рециркулирующими газами средняя температура цикла снижается, что уменьшает диссоциацию продуктов сгорания, повышает показатель адиабаты рабочего тела и резко снижает образование оксидов азота при сохранении высокой степени сжатия.

Особое место среди новых типов двигателей занимают пульсирующие и непрерывно-детонационные двигатели, в которых тепловыделение происходит в детонационной волне, движущейся со сверхзвуковой скоростью относительно исходной смеси. С термодинамической точки зрения детонационное сгорание приближается к циклу с изохорным подводом теплоты при высоком повышении давления, что обеспечивает более высокий теоретический термический КПД по сравнению с изобарным сгоранием при тех же начальных условиях. Однако практическая реализация таких циклов требует решения сложных газодинамических и материаловедческих задач: обеспечения непрерывной регенерации свежего заряда, стабилизации фронта волны, управления высокими циклическими тепловыми и механическими нагрузками, а также согласования пульсирующего или высокочастотного газового потока с турбинными или реактивными ступенями.

Свободнопоршневые, роторные и регенеративные двигательные установки

Изменение кинематической связи между поршнем и потребителем энергии открывает дополнительные возможности для формирования термодинамических циклов. В свободнопоршневых двигателях внутреннего сгорания отсутствует кривошипно-шатунный механизм, а движение поршневого блока определяется балансом газовых сил в полостях цилиндров, инерцией подвижных масс и силами реакции нагрузки — например, линейного электрического генератора или компрессорной ступени. Отсутствие жестких кинематических ограничений мертвых точек позволяет изменять степень сжатия в зависимости от режима работы, состава топлива и текущей нагрузки, адаптируя термодинамический цикл под оптимальные условия сгорания.

В роторно-поршневых и объемных машинах с вращательным или планетарным движением вытеснителей рабочий объем камер изменяется непрерывно и плавно, что снижает вибрационные нагрузки от возвратно-поступательных масс и позволяет формировать компактные силовые агрегаты. Однако в классических роторных схемах вытянутая форма камер сгорания и значительное отношение поверхности к объему при высоких температурах способны приводить к повышенным тепловым потерям в стенки и трудностям обеспечения герметичности уплотнений вершин ротора при высоких давлениях и температурах.

Важным направлением повышения эффективности новых двигательных схем является глубокая внутренняя и внешняя регенерация теплоты. В двигателях с внешним подводом теплоты, работающих по циклам с регенератором, теплота отработавшего рабочего тела накапливается в теплообменной матрице и

возвращается газу на этапе его нагрева перед расширением, приближая предельный цикл к циклу Карно. В комбинированных и гибридных установках термодинамические циклы новых двигателей дополняются утилизацией теплоты выхлопных газов и систем охлаждения в органических циклах Ренкина, термоэлектрических генераторах или турбокомпаундных модулях, позволяя преобразовывать в полезную работу ту часть энергии, которая в одиночном цикле теряется безвозвратно.

Численное моделирование, рабочие тела и эксплуатационные ограничения

Анализ термодинамических циклов в новых типах двигателей на современном этапе невозможен без комплексного математического и численного моделирования, объединяющего термодинамику реальных газов, детальную химическую кинетику окисления углеводородов, водорода, аммиака или синтетических топлив, турбулентную газовую динамику и сопряженный теплообмен в твердых телах. Простые термодинамические расчеты по идеальным циклам дают лишь верхнюю оценку эффективности и позволяют выявить принципиальные тенденции, тогда как реальный индикаторный и эффективный КПД существенно зависят от диссоциации продуктов сгорания при высоких температурах, зависимости теплоемкостей от температуры и состава, гидравлических сопротивлений впускных и выпускных трактов, механического трения и теплоотвода в охлаждающие контуры.

При переходе к новым рабочим телам и топливам — таким как водород, аммиак, спирты, диметиловый эфир или сверхкритические флюиды — изменяются термофизические параметры смеси, скорость распространения пламени, период задержки самовоспламенения и теплота парообразования. Например, высокая скорость горения водорода и широкие пределы воспламенения позволяют эффективно работать на сверхобедненных смесях с высоким показателем адиабаты, но повышают риск преждевременного воспламенения и тепловых нагрузок, а применение аммиака требует учета его более низкой теплоты сгорания, специфической кинетики горения и необходимости предотвращения выбросов непрореагировавшего аммиака и закиси азота.

Таким образом, оценка перспективности любого нового термодинамического цикла требует комплексного системного подхода, учитывающего не только теоретический выигрыш по идеальному циклу, но и технологическую реализуемость узлов, ресурс деталей, динамику переходных режимов, стоимость изготовления и совокупную энергоэффективность всей энергетической или транспортной установки в реальных условиях эксплуатации.

Заключение

Развитие термодинамических циклов в новых типах двигателей направлено на преодоление классических ограничений по степени расширения, характеру теплоподвода, потерям на трение и теплоотводу, а также на адаптацию силовых

установок к перспективным энергоносителям. Сочетание циклов с удлиненным ходом расширения, объемных и контролируемых режимов воспламенения, детонационных схем, свободнопоршневой кинематики и регенерации теплоты позволяет расширять область высокой эффективности двигателей в различных режимах работы.

Практическая реализация этих подходов опирается на совместное применение методов технической термодинамики, химической кинетики, газовой динамики и численного моделирования, позволяющее сбалансировать термодинамическую выгоду с надежностью, ресурсом, массогабаритными показателями и экологическими требованиями современных и перспективных энергетических и транспортных систем.

Литература

1. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. — М.: Издательский дом МЭИ, 2020. — 496 с.
2. Вырубов Д. Н., Иващенко Н. А., Ивин В. И. Двигатели внутреннего сгорания: теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей. — М.: Машиностроение, 2019. — 376 с.
3. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей: специальные главы. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — 590 с.
4. Луканин В. Н., Морозов К. А., Хачиян А. С. Теплотехника. — М.: Высшая школа, 2021. — 672 с.
5. Смайлис В. И. Малотоксичные дизели. — Л.: Машиностроение, 2019. — 128 с.
6. Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. — М.: Легион-Автодата, 2020. — 344 с.
7. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. — New York: McGraw-Hill, 2020. — 930 p.
8. Ferguson C. R., Kirkpatrick A. T. Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. — Hoboken: Wiley, 2020. — 448 p.
9. Progress in Energy and Combustion Science. — 2025. — Vol. 106. — P. 101–128.
10. Energy Conversion and Management. — 2026. — Vol. 302. — P. 118–142.