

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И СГОРАНИЯ В СУДОВОМ ДИЗЕЛЕ

*В.В. Гаврилов, д.т.н., профессор
ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова*

Отмечена ключевая роль смесеобразования в комплексе внутрицилиндровых процессов в дизеле, включая процесс горения топлива. Рассмотрены известные критерии оценки качества смесеобразования. Установлена разрозненность критериев и их частный характер. Предложена система критериев качества смесеобразования. Она представляет собой иерархическую систему, в которой в роли генерального критерия выступает удельный индикаторный расход топлива в дизеле. Система содержит последовательность частных критериев. В указанную последовательность входят как известные критерии, так и критерий, предложенный автором. На основе использования системы критериев выполнена постановка оптимизационной задачи, решение которой дает возможность обоснованного выбора сочетаний параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания, обеспечивающих высококачественные смесеобразование и сгорание в дизеле.

Для развития судовой энергетики необходимы разработка новых и модификация выпускающихся дизельных двигателей. Они должны отвечать современным непрерывно возрастающим требованиям к их технико-экономическим и экологическим показателям. Одним из важнейших путей решения этой проблемы является повышение качества смесеобразования и сгорания в дизеле. Соответствующие задачи на практике решаются преимущественно методом трудоемкой и дорогостоящей доводки рабочего процесса двигателя на испытательном стенде завода, в ходе которой могут варьироваться те или иные параметры топливной аппаратуры (ТА) и камеры сгорания (КС). Решения зачастую принимаются по интуиции, методом проб и ошибок, без достаточно ясного понимания сущности происходящих в дизеле процессов, базирующихся на устаревших знаниях, без «локального» рассмотрения процессов, без ориентиров в виде некоторых критериев их качества и без предварительной количественной оценки. Не всегда достигается наилучший результат этой работы. Другими словами, налицо недостаточное теоретическое обеспечение решения рассматриваемых задач.

Известно, что в комплексе внутрицилиндровых процессов ключевая роль принадлежит смесеобразованию, определяющему показатели сгорания топлива и, в конечном счете, показатели работы дизеля. Опыт работы по рассматриваемой теме показывает, что проблема организации рационального смесеобразования начинается с отсутствия общепризнанного критерия его качества. Исследователями предложены весьма разнообразные критерии, которые носят частный характер. Каждый из них бесспорно отражает некоторые существенные свойства смесеобразования. Учет этих критериев способствует адекватному представлению о процессе и частично может решить проблему его рациональной организации. Однако встает вопрос, какой из критериев следует предпочесть? Необходимость выбора побуждает выдвинуть гипотезу о возможности формирования и использования системы критериев качества смесеобразования. Ожидается, что такая система критериев поможет повысить эффективность работ по организации процесса.

На основании сказанного цель данного исследования состоит в разработке принципов организации процессов смесеобразования и сгорания, качество которых может быть количественно оценено на основе системы известных и новых критериев.

Для достижения указанной цели необходимо было исследовать известные критерии оценки качества смесеобразования, обосновать выбор тех из них, которые могли бы войти в состав предлагаемой системы критериев, и проверить целесообразность использования системы на практике.

Рассмотрим результаты анализа известных критериев качества смесеобразования [1]. Несмотря на хроническую неразрешенность проблем, связанных с теорией смесеобразования, создатели дизелей во все времена вынуждены отвечать на два взаимосвязанных вопроса: какое смесеобразование можно считать высококачественным и как следует его организовывать?

Наиболее часто ответ на эти вопросы дается в общем виде, используются качественные оценки смесеобразования. Ю.Б. Свиридов ставил задачу обеспечения «высокой скорости смесеоб-

разования», которая достигается «...при хорошем распределении топлива в камере сгорания, т. е. при тщательном подборе конфигурации факела топлива к форме камеры сгорания, при тонком распыливании топлива и при интенсивных завихривании и турбулизации среды...». А.С. Лышевский отмечал важность обеспечения некоего рационального распределения топлива на некотором расстоянии от сопла форсунки, максимального использования воздушного заряда камеры сгорания. В трудах НИИДа и МАДИ обсуждалась необходимость такой организации смесеобразования, которая обеспечивает возможность задания определенной взаимосвязи между характеристиками впрыскивания топлива и выделения теплоты при сгорании, которая позволяет управлять указанными характеристиками. В ряде работ ЦНИДИ предлагается путем профилирования днища поршня добиваться определенного соответствия распределения масс топлива и воздуха по радиусу КС (при центральном расположении форсунки). По мнению Н.Ф. Разлецева, указанное распределение должно быть таким, чтобы в определенной фазе процесса была обеспечена некоторая зависимость локального коэффициента избытка воздуха от радиуса камеры [2]. Но при этом авторы, как правило, не располагают достоверными сведениями о распределении массы топлива по длине струи [3].

Довольно распространенным является принцип, в соответствии с которым необходимо всеми средствами обеспечивать максимально возможную длину свободной топливной струи [4] или максимально возможные «объем» и «поверхность» струи [5 и др.]. Авторы исходят из того, что наиболее эффективное смесеобразование, обеспечивающее высокие скорости диффузионного горения топлива, можно получить главным образом в объеме топливной струи. Заметим, что в этих работах, как правило, остается вне поля зрения проблема своевременного использования для смесеобразования воздуха, находящегося между струями.

Многие авторы важную роль в смесеобразовании отводят вращательному движению воздушного заряда вокруг оси цилиндра дизеля [6], а также радиально направленным потокам заряда, образующимся в результате его перетекания в КС при движении поршня в окрестности ВМТ [7]. Интенсивность вращательного движения и число топливных струй выбирают с таким расчетом, чтобы увлекаемые потоком воздуха мелкие частицы топлива не переносились из одного факела в другой. Обычно при этом имеется в виду момент времени, соответствующий началу самовоспламенения. Но следует заметить, что указанный перенос частиц имеет место и после

самовоспламенения. В некоторых работах, например в диссертации В.И. Быкова, это обстоятельство учтено. Способствуя ускорению и полноте диффузионного сгорания топлива, движение воздуха требует затрат энергии на его организацию. Поэтому всегда актуальны вопросы поиска соответствующих экономических средств организации движения воздушного заряда и оценки эффективности соответствующих мероприятий.

Один из наиболее широко обсуждающихся вопросов — роли стенок КС в процессах смесеобразования и сгорания. Довольно устойчивым и весьма распространенным было мнение специалистов о недопустимости контакта между топливной струей и стенкой. Однако уже в 1942 г. В. Пфлаум пришел к выводу, что соударение топливной струи со стенкой КС, несмотря на нежелательное скопление крупных капель топлива на стенке и возможное их коксование, может благотворно влиять на качество смесеобразования за счет вовлечения в процесс воздуха, окружающего топливную струю. По мнению автора, необходимо специально организовывать такое соударение топливной струи со стенкой КС, при котором струя достаточно развита и подготовлена. При этом «поверхность» струи должна быть охвачена пламенем, а ядро струи должно находиться в состоянии испарения. Угол между осью струи и стенкой в месте соударения должен быть таким, чтобы своевременно предоставить движущимся после удара частицам топлива необходимые «боковые» объемы воздуха, в частности, объемы между струями. При всем разнообразии выводов последующих исследований по рассматриваемой проблеме принципы, сформулированные В. Пфлаумом, можно считать основополагающими. Они находят экспериментальное подтверждение в работах современных авторов [1, 8].

Первостепенное значение в организации высококачественного смесеобразования придается процессу топливоподачи. Этот процесс определяет характер изменения интенсивности впрыскивания в цилиндр и качества распыливания топлива во времени. Приведем некоторые общие выводы из выполненного анализа соответствующих многочисленных опубликованных работ.

Наиболее существенные факторы топливоподачи, определяющие качество смесеобразования, — продолжительность впрыскивания топлива φ_j , максимальное давление впрыскивания $p_{j\max}$, диаметр d_c и число i_c сопловых отверстий форсунки, а также вид расходной характеристики топливоподачи — зависимости массового расхода топлива от угла поворота коленчатого вала $g_f(\varphi)$.

Сокращение продолжительности впрыскивания φ_j , с одной стороны, способствует ускорению процесса сгорания топлива, а значит и повышению топливной экономичности дизеля. Объясняется это просто. Общеизвестно, что если сгорание происходит в окрестности ВМТ поршня, то есть теплота в цикл подводится при высоком уровне температур рабочего тела, то имеет место высокий термический КПД цикла. С другой стороны, сокращение φ_j влечет за собой уменьшение продолжительности перемешивания топлива с воздухом, что может снизить качество диффузионного сгорания. По мнению ряда авторов, это в некоторой степени ограничивает возможность влияния на продолжительность сгорания за счет интенсивности топливоподачи. Если в дополнение к сказанному отметить, что сокращение φ_j зачастую сопряжено с увеличением жесткости процесса сгорания, то можно сделать вывод о неоднозначном влиянии на качество смесеобразования и сгорания.

Продолжительность φ_j при некотором неизменном эффективном суммарном проходном сечении сопловых отверстий зависит от среднего давления впрыскивания топлива p_j . В исследованиях смесеобразования часто используется максимальное давление впрыскивания $p_{j\max}$. Давление впрыскивания влияет также на качество распыливания топлива и геометрические характеристики топливной струи. Вместе с тем встречаются сведения о том, что увеличение $p_{j\max}$ выше 100–110 МПа либо мало влияет [3], либо практически не влияет на средний размер капель распыленного топлива. Аналогичные выводы сделаны в некоторых публикациях относительно изменения дальнобойности и угла конуса струи.

С одной стороны, утверждается, что период задержки самовоспламенения τ_i и расстояние между очагом самовоспламенения и соплом форсунки практически не зависит от $p_{j\max}$, с другой — некоторые исследователи отмечают увеличение τ_i и указанного расстояния с ростом $p_{j\max}$. Отмечается сложное влияние $p_{j\max}$ на скорость распространения пламени и другие характеристики процесса горения, в том числе на эмиссию вредных веществ [3, 4]. В частности, в экспериментах на дизеле 1СН13/14 установлено, что при увеличении $p_{j\max}$ до 50–60 МПа уровень эмиссии NO_x существенно снижается, а при дальнейшем увеличении давления впрыскивания количество NO_x растет. Первоначальное снижение эмиссии авторы объясняют выравниванием поля локальных температур в КС, а дальнейший ее рост — увеличением так называемой средне-массовой температуры рабочего тела.

Ввиду неоднозначности упомянутых и других выводов выбор целесообразного уровня $p_{j\max}$ и

продолжительности φ_j на практике представляет собой сложную задачу. Указанный выбор необходимо делать с учетом большого числа ограничений, например ограничений жесткости процесса сгорания, токсичности отработавших газов, механических напряжений в механизме привода топливной аппаратуры, затрат мощности на указанный привод и т. д.

Утверждения авторов относительно целесообразного вида расходной характеристики топливоподачи $g(\varphi)$ различны и противоречивы. Во многих работах обосновывается целесообразность относительно малой интенсивности подачи в период задержки самовоспламенения топлива и увеличенной интенсивности при окончании впрыскивания. Это достигается, в частности, применением так называемого двухфазного впрыскивания топлива (именуемого авторами «двухразовым», «ступенчатым», «двухступенчатым», «двойной топливоподачей»). При этом используется либо форсунка с двумя пружинами, либо две форсунки на один цилиндр. Опубликованы сведения об использовании «трехфазного» впрыскивания, позволившего, по утверждению авторов, снизить уровень эмиссии NO_x [9]. В упомянутых работах, как правило, речь идет об улучшении характеристик тепловыделения в дизеле и не достаточно раскрывается механизм влияния расходной характеристики топливоподачи на токсичность отработавших газов.

При разработке теории смесеобразования авторы предпринимали многочисленные попытки сформулировать критерии качества смесеобразования. Первым по хронологии и наиболее распространенным можно считать критерий, представляющий собой отношение дальнобойности топливной струи l_c к расстоянию l_{kc} от сопла форсунки до стенки КС. Авторы считают, что необходимо добиваться определенного отношения в конце периода задержки самовоспламенения топлива или даже равенства $l_c = l_{kc}$. Например был предложен критерий, оценивающий соотношение длины свободной горящей топливной струи, определяемой расчетом, с расстоянием l_{kc} .

Н.Ф. Разлейцев [2] предложил в качестве «критерия оптимальности формы КС» использовать совокупность характеристики распределения воздушно-топливного отношения по радиусу цилиндра $\alpha(r)$ и двух величин: \bar{m}_{fcm} — доли цикловой подачи топлива в зоне смешения пристенных потоков топлива соседних струй и \bar{m}_{fbr} — доли цикловой подачи топлива, попавшего на зеркало цилиндра. Автор утверждает, что для «оптимального» смесеобразования (по условию достижения максимального КПД дизеля) необходимо обеспечить $\alpha(r) = \text{const}$, а также некоторые значения \bar{m}_{fcm} и \bar{m}_{fbr} (не более 0,15–0,20).

Попытки разработки критериев качества смесеобразования предпринимаются до настоящего времени. Ю.Н. Астанским предложен критерий E , названный «коэффициентом диффузионного форсирования смесеобразования», представляющим собой «среднее за период сгорания отношение масс воздуха и топлива, физически контактирующих друг с другом». Указанные массы определяются в работе посредством упрощенных интегральных оценок, не учитывающих параметры топливных струй и КС.

Г.М. Камфером разработан критерий оптимальности смещения $K_{см}$, предусматривающий равенство кинетической энергии вращательного движения воздушного заряда цилиндра требуемой энергии для тангенциального переноса паров топлива через межструйное пространство КС в течение периода впрыскивания топлива.

Критерий, предложенный С.В. Гусаковым [10], выражает отношение располагаемого времени на процесс испарения капель к требуемому времени достижения каплями диаметра, равного критическому на момент воспламенения — диаметра таких капель, которые далее успевают испариться в период их нахождения во фронте пламени. Упомянутым здесь и другим современным критериям свойственно, на взгляд авторов, отсутствие возможности достоверной количественной их оценки. По-видимому, по этой причине они пока не получили широкого применения.

Опыт исследователей в решении обсуждаемой проблемы имеет большую ценность. Однако представленный краткий обзор позволяет сделать вывод о разрозненности, противоречивости, частном характере используемых принципов организации смесеобразования и сгорания в дизелях и соответствующих критериев качества. Зачастую отсутствуют количественное выражение критериев качества смесеобразования. В большинстве случаев применяющиеся критерии учитывают лишь геометрические параметры топливной струи и КС. Они, как правило, оценивают смесеобразование в некоторый фиксированный момент времени, который чаще всего соответствует началу самовоспламенения топлива. При этом не учитывается, что процесс смесеобразования имеет место в течение всего последующего горения топлива.

Рассмотренным работам, направленным на обеспечение высококачественного смесеобразования, свойственен расчетно-экспериментальный характер. Используемые математические модели смесеобразования и сгорания, как правило, фрагментарно описывают процессы. При построении математической модели системный подход используется недостаточно. Адекватность моделирования многих процессов необходимо под-

тверждать экспериментами. Уровни сложности моделей элементарных процессов в пределах одной работы могут существенно различаться: при наличии «локального» описания одних процессов имеются грубые описания интегрального характера в отношении других процессов. Во многих работах применяется физическое моделирование отдельных элементарных процессов, а также комплекса процессов. Однако и для этой части работ также характерна фрагментарность. Как правило, физическое моделирование выполняет второстепенную роль.

На практике организация процессов смесеобразования и сгорания осуществляется путем согласованного выбора основных параметров ТА и КС [11]. Число возможных согласовываемых параметров велико, поэтому их набор в разных исследованиях может быть различным. Весьма различаются методики согласования.

Обсуждаемое согласование параметров двигателя на практике выполняется преимущественно экспериментальным путем при наличии некоторых предварительных расчетных оценок отдельных параметров деталей и узлов [8]. Происходит это во время так называемой доводки рабочего процесса на стенде завода. Процедура согласования может совершаться в виде последовательности однофакторных экспериментов или в виде многоэтапного исследования, которое представляет собой чередование расчетов рабочего процесса с экспериментами на дизеле, позволяющими идентифицировать параметры математической модели применительно к конкретным условиям работы дизеля [2].

Очевидно, что наличие большого числа стендовых испытаний при доводке существенно удлиняет и удорожает процесс создания дизеля. Поэтому необходим поиск новых методов и средств, позволяющих сократить объем доводочных работ и повысить при этом качество процессов смесеобразования и сгорания.

На наш взгляд, на указанном пути полезным может оказаться рассмотрение смесеобразования как системы. Это позволит увидеть сложную картину элементарных процессов, накладывающихся друг на друга в пространстве и времени, оказывающих взаимное влияние. Так, процессы движения и испарения капель топлива определяют и могут сопровождать их горение и, наоборот, горение может влиять на испарение и движение капель. И поскольку выходным элементом системы смесеобразования является процесс сгорания топлива, очевидно, что оценивать качество смесеобразования следует через качество сгорания.

Принимая во внимание эти рассуждения, можно предложить следующее определение понятия «высококачественное смесеобразование».

Это такое перемешивание топлива с воздухом, которое обеспечивает своевременное и полное сгорание топлива при допустимых уровнях тепломеханической напряженности деталей камеры сгорания и токсичности отработавших газов.

Как показал приведенный выше анализ опубликованных работ, известные критерии качества смесеобразования носят частный характер и не учитывают влияния совокупности большого числа действующих факторов. Ввиду обилия этих факторов авторам не удалось предложить универсальный критерий. Для оценки качества смесеобразования в данной работе предложено использовать систему критериев.

Так как качество смесеобразования может проявиться только через показатели результирующего процесса — процесса сгорания топлива или рабочего процесса дизеля в целом, генеральным критерием качества смесеобразования можно считать удельный индикаторный расход топлива или обратную ему величину — индикаторный КПД дизеля.

Принимая во внимание необходимость комплексной оценки смесеобразования и сгорания, наряду с b_i следует использовать характеристики собственно смесеобразования. Поэтому предлагаемая система представляет собой иерархию критериев, в которую, кроме генерального критерия, включены ряд частных критериев, в том числе известных.

Состав частных критериев в каждом конкретном случае может быть различным. Наряду с критериями, рассмотренными выше, для среднеоборотных дизелей с объемным смесеобразованием предлагается применение отношения координаты центра масс топлива в струе XC_f в некоторый момент времени ее развития к радиальной координате центра масс воздуха в секторе КС, приходящемся на одну струю, XC_a [1]. Целесообразность учета XC_f/XC_a при согласовании параметров ТА, КС и заряда цилиндра следует из результатов выполненных автором расчетно-экспериментальных исследований, которые показали, что камеры, равноценные по традиционному критерию l_c/l_{kc} , обеспечивают существенно различные показатели рабочего процесса дизеля. В упомянутых исследованиях установлена связь между показателями рабочего процесса и отношением XC_f/XC_a .

Если к обсуждаемым здесь критериям добавить предложенный Г.М. Камфером критерий смешения $K_{см}$, определяющий потребную кинетическую энергию вращательного движения заряда цилиндра, а также упомянутый выше критерий, характеризующий массовые доли топлива, содержащегося в зоне смешения струй $\bar{m}_{см}$ и достигшего втулки цилиндра $\bar{m}_{вт}$ [2], то пример

иерархической системы может быть представлен в виде последовательности $b_i - l_c/l_{kc} - XC_f/XC_a - \bar{m}_{см}, \bar{m}_{вт} - K_{см}$. Возможны другие комбинации критериев. При решении задачи согласования параметров ТА, КС и заряда цилиндра частные критерии целесообразно использовать в порядке убывания степени их влияния на значение генерального критерия.

Ввиду того что качество смесеобразования и сгорания, как сказано выше, зависит от большого числа факторов, при согласовании параметров дизеля приходится рассчитывать и испытывать на дизеле множество вариантов их сочетания. Предварительно отобрав варианты по частным критериям, можно существенно сократить их число для дальнейших исследований. Такое сокращение области допустимых значений варьируемых параметров позволяет уменьшить объем потребных вычислительных ресурсов и трудоемкость доводки рабочего процесса дизеля, а также повысить качество этой работы.

Основываясь на опыте выполненных исследований, можно выделить несколько десятков факторов, определяющих качество смесеобразования. Повлиять на него можно, изменяя конструктивные и регулировочные параметры ТА, КС и заряд цилиндра. В обширном списке параметров отметим основные, наиболее часто варьируемые при доводке рабочего процесса дизеля. Это — диаметр d_c и число i_c сопловых отверстий форсунки; расстояние между соплом и стенкой КС l_{kc} , измеренное по оси соплового отверстия при положении поршня в ВМТ; угол θ между осью соплового отверстия и плоскостью крышки цилиндра, интенсивность топливopодачи (которая, в частности, может характеризоваться средним расходом топлива через форсунку $q_{фр}$); угол начала подачи топлива форсункой $\varphi_{нпф}$ относительно ВМТ поршня; диаметр горловины КС (углубления в поршне) d ; угол наклона стенки КС γ в области встречи с ней топливной струи; давление p и температура T заряда цилиндра в некоторой характерной фазе рабочего цикла; вихревое число Ω заряда цилиндра. Представленный далеко не полный перечень свидетельствует о том, сколь сложна многофакторная задача поиска рационального сочетания параметров, обеспечивающих высококачественные смесеобразование и сгорание в дизеле.

Учитывая описанные обстоятельства, можно предложить набор методов обеспечения высокого качества смесеобразования и сгорания. В зависимости от уровня научно-технической подготовки производства на конкретном предприятии, от наличия на заводе необходимых результатов физического моделирования внутрицилиндровых процессов и соответствующего математического

и программного обеспечения могут быть применены либо один из следующих методов, либо их комбинация:

- 1) метод физического моделирования смешения;
- 2) метод вычислительного (многофакторного или однофакторного) эксперимента;
- 3) метод математической оптимизации;
- 4) метод натурных испытаний дизеля.

По *первому методу* выбор сочетаний согласовываемых параметров производят расчетом пространственно-временных характеристик топливовоздушной смеси в КС на основе их физического моделирования. (Необходимый комплекс методов физического моделирования описан в [1]). Выбирают те сочетания, которые обеспечивают характеристики смеси, соответствующие аналогичным характеристикам в лучших двигателях того же класса. Выбранные сочетания проверяют в испытаниях дизеля.

Второй метод состоит в выполнении расчетов показателей рабочего цикла двигателя при некоторых сочетаниях согласовываемых параметров. Расчеты выполняют с использованием моделей топливоподачи и внутрицилиндровых процессов, в частности модели, предложенной автором [1]. Рассчитываемые сочетания выбирают одним из методов математического планирования эксперимента, например методом латинских квадратов. Выбранные на основании расчетов сочетания проверяют при испытаниях дизеля. Сочетания первого и второго методов применены в ряде работ, выполненных по заказу ОАО «Коломенский завод».

Третий метод заключается в постановке и решении математической задачи оптимизации с использованием моделей топливоподачи и внутрицилиндровых процессов [12]. При этом в качестве функции цели принимают удельный индикаторный расход топлива. В роли переменных проектирования выступает набор некоторых параметров ТА, КС и заряда цилиндра из тех, которые перечислены выше, или других. В качестве переменных состояния используются показатели тепломеханической напряженности дизеля, токсичности отработавших газов, а также те или иные частные критерии качества смешения.

Оптимизационная задача в общем виде может быть записана так:

$$b_i = f[\bar{X}, \bar{Y}, (\bar{X})] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где

$$\bar{X} \equiv d_c, i_c, l_{kc}, d_r, \epsilon, \tilde{a}, q_{fcp}, \varphi_{нпф}, p, T, \Omega \dots; \quad (2)$$

$$\bar{Y} \equiv p_{j \max}, p_{\max}, (d_p / d_\phi)_{\max}, T_n, e_{NOx} \dots \quad (3)$$

В выражении (2) указаны переменные проектирования, а в (3) — переменные состояния. Здесь: $p_{j \max}$ — максимальное давление впрыскивания топлива; p_{\max} — максимальное давление рабочего цикла; $(dp/d\phi)_{\max}$ — жесткость процесса сгорания; T_n — характерная температура поршня, e_{NOx} — содержание окислов азота в отработавших газах. В список переменных состояния могут быть включены рассмотренные выше частные критерии l_c/l_{kc} , XC_f/XC_a , \bar{m}_{fcm} , \bar{m}_{fvt} , K_{cm} и другие.

Введением ограничений на перечисленные переменные состояния обеспечиваются, во-первых, допустимый уровень тепломеханической напряженности дизеля и токсичности отработавших газов, во-вторых, сокращение области допустимых значений параметров проектирования, что способствует сокращению потребных вычислительных ресурсов для решения оптимизационной задачи и повышению качества оптимизации.

Таким образом даже при указанном ограниченном наборе переменных проектирования размерность оптимизационной задачи довольно значительна. Состав переменных проектирования и переменных состояния может быть пересмотрен, их число может измениться как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Но в последнем случае необходимо иметь в виду, что увеличение размерности задачи влечет за собой, во-первых, значительный рост требуемых вычислительных ресурсов и, во-вторых, внесение дополнительных вычислительных погрешностей, вызванных учетом малозначащих факторов.

Четвертый метод — натурные испытания в традиционном понимании представляют собой доводку рабочего процесса дизеля на стенде. Кроме того, этот метод используется в качестве завершающей стадии применения любых вышеуказанных методов и служит для проверки рекомендаций, полученных тем или иным методом.

Выводы

1. Одной из важных проблем организации рационального смешения в дизельном двигателе является проблема отсутствия общепризнанного критерия его качества. Исследователями предложены весьма разнообразные критерии, которые носят частный характер. Нуждаются в совершенствовании используемые на практике методики организации рационального смешения.

2. В данной работе определено понятие «высококачественное смешение». Это такое перемешивание топлива с воздухом, которое обеспечивает своевременное и полное сгорание топлива при допустимых уровнях тепломеханической напряженности деталей камеры сгорания и токсичности отработавших газов.

3. С учетом накопленного опыта исследователей в формулировании частных критериев предложено сформировать систему критериев качества смесеобразования.

4. Поскольку выходным элементом системы процессов смесеобразования является процесс сгорания топлива, очевидно, что оценивать качество смесеобразования следует через качество сгорания и даже посредством некоторого показателя качества рабочего цикла.

5. Предлагаемая совокупность критериев качества смесеобразования представляет собой иерархическую систему критериев, в которой в роли генерального критерия выступает удельный индикаторный расход топлива в дизеле (или индикаторный КПД) и содержится некоторая последовательность частных критериев. В указанную последовательность входят как известные критерии, так и критерии, предложенный автором. Он представляет собой отношение координаты центра масс топлива в струе в некоторый момент

времени ее развития к радиальной координате центра масс воздуха в секторе камеры сгорания, приходящемся на одну струю.

6. В порядке совершенствования методики организации высококачественного смесеобразования в дизеле на основе использования предложенной системы критериев выполнена постановка оптимизационной задачи. В соответствии с методикой в зависимости от возможностей завода-изготовителя двигателей могут быть применены либо один из следующих методов, либо их комбинация: метод физического моделирования смесеобразования; метод вычислительного эксперимента; метод математической оптимизации; метод натурных испытаний дизеля. Применение предложенной методики на практике дает возможность обоснованного выбора сочетаний параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания, обеспечивающих высококачественное смесеобразование и сгорание в дизеле.

Литература

1. Гаврилов В.В. Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: дис. ... докт. тех. наук /Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. — СПб., 2004. — 359 с.

2. Марченко А.П., Сукачев И.И., Гаврилов В.В. Методика расчета движения и распределения топлива в камере сгорания форсированных дизелей // Двигатели внутреннего сгорания. — 2005. — № 1. — С. 53–58.

3. Гаврилов В.В. Повышение эффективности смесеобразования в судовых среднеоборотных дизелях: Отчет (Промежут.: Анализ математических моделей и разработка принципов организации процессов смесеобразования) / Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; Руковод. работы В. В. Гаврилов; № ГР 01.200.202457; Инв. № 02.200.2 01120. СПб., 2001. — 144 с.

4. Габитов И.И., Неговора А.В. Топливная аппаратура автотракторных дизелей. — Уфа : БашГАУ, 2004. — 216 с.

5. Одинцов В.И., Сапожников Э.В. Метод определения количества окислов азота, образующихся при сгорании топлива в цилиндрах дизеля // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Двигатели 2008». Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2008. — С. 176–181.

6. Голев Б.Ю. Совершенствование впускных каналов тракторного дизеля: дис. ... канд. техн. наук / Владимирский государственный университет. — Владимир, 2009. — 149 с.

7. Хандримайлов А.А., Солодов В.Г. Структура течения воздушного заряда в цилиндре дизеля на такте впуска и сжатия // Двигатели внутреннего сгорания. — 2006. — № 1. — С. 89–93.

8. Никифоров С.С. Разработка методики профилирования открытой камеры сгорания при форсировании четырехтактного быстроходного транспортного дизеля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Южно-Уральский государственный университет. — Челябинск, 2006. — 22 с.

9. Кулаев П.В., Рыжов В.А. Коломенская школа конструирования топливной аппаратуры // Тяжелое машиностроение. — 2002. — № 9. — С. 28–32.

10. Гусаков С.В. Разработка методов совершенствования процессов смесеобразования и сгорания в поршневых двигателях: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. — М., 2002. — 32 с.

11. Гаврилов В.В., Мащенко В.Ю. Исследование влияния профиля камеры сгорания на рабочий процесс дизеля с использованием программы CyberDiesel // Материалы межотрасл. научн.-техн. конф. — СПб. : Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2010. — С. 57–59.

12. Гаврилов В.В., Мащенко, В.Ю. Математическое моделирование топливopодачи и локальных внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием с использованием программы CyberDiesel // Журнал университета водных коммуникаций. — СПб., 2012. Вып. 2. — С. 92–98.