

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНА ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ СУДОВОГО МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

А.А. Обозов, д.т.н., профессор,
Р.А Новиков, аспирант
Брянский государственный технический университет

Рассматривается решение задачи оптимизации закона тепловыделения в цилиндре судового малооборотного дизеля БДКРН 60/229 для достижения наиболее экономичного режима работы при условии ограничения максимального давления сгорания. Показано, что итерационный (пошаговый) алгоритм поиска оптимального решения носит универсальный характер и может быть использован для решения других многокритериальных оптимизационных задач.



Известно, что от характера процесса тепловыделения в цилиндре двигателя зависят все его основные параметры: мощность, экономичность, механическая прочность, тепловая напряженность деталей камеры сгорания, экологичность, ресурс и пр. Кроме того, процесс тепловыделения определяется характером процесса топливоподачи (законом подачи топлива, динамикой и геометрией топливного факела, дисперсностью распыливания топлива), параметрами в камере сгорания (давлением, температурой, коэффициентом избытка воздуха и пр.). Эмпирическая формула для описания связи законов тепловыделения и топливоподачи была предложена Н.Ф. Разлейцевым в 1980 г. [1]. Таким образом, кинетика процесса сгорания (тепловыделения) носит сложный характер, зависящий от многих факторов.

При выполнении численного математического моделирования рабочего процесса для описания процесса тепловыделения в цилиндрах двухтактных малооборотных дизелей (МОД) используют односложную функцию Вибе [2], которая в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$\frac{dx}{d\varphi} = -\frac{c(m+1)}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi - \theta}{\varphi_z} \right)^m \exp \left[c \left(\frac{\varphi - \theta}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right], \quad (1)$$

где c — постоянная ($c = -6,908$); m — показатель характера сгорания; φ_z — продолжительность

сгорания; θ — угол поворота коленчатого вала (угол ПКВ), соответствующий началу сгорания (тепловыделения).

При таком задании закона тепловыделения удается получить достаточно хорошие по точности результаты математического моделирования рабочего процесса МОД. Следует отметить, что при моделировании процессов среднеоборотных и особенно высокооборотных дизелей начинает проявляться эффект задержки самовоспламенения топлива (τ_i) и закон тепловыделения поэтому задают двухсложной функцией Вибе.

Форма закона тепловыделения в зависимости от задаваемых при моделировании значений параметров формулы (1) видоизменяется. Так, с уменьшением параметров m и φ_z скорость тепловыделения возрастает, а сам процесс заканчивается раньше. В соответствии с теорией рабочего процесса ДВС уменьшение m и φ_z будет приводить к повышению эффективности цикла и снижению расхода топлива. Однако при этом возрастают максимальное давление цикла (p_{max}) и максимальная температура цикла (T_{max}). Существенное влияние на рабочий процесс оказывает угол опережения подачи топлива ($\varphi_{оп}$), и, как следствие, — момент (угол θ) начала процесса тепловыделения. Обработка индикаторных диаграмм показала, что длительность процесса тепловыделения (φ_z) для двухтактных МОД на

номинальном режиме работы может быть принята равной, приблизительно, 60 град ПКВ.

Сокращение продолжительности подвода тепла в цикле, как правило, приводит к повышению индикаторного КПД и к улучшению экономических параметров двигателя, однако это вызывает рост механической напряженности двигателя. Возникает типовая задача оптимизационного характера: найти наиболее экономический режим работы двигателя ($g_e \min$), но при этом не допустить превышения предельно допустимого значения максимального давления сгорания т. е. должно выполняться условие $p_{\max} \leq [p_{\max}]_{\text{доп}}$.

Приведем графическую иллюстрацию данной оптимизационной задачи для двигателя БДКРН60/229.

На рис. 1 а, б показан характер изменения параметров g_e и p_{\max} в области вариации закона тепловыделения, задаваемой параметрами θ и m .

Приведенные графики построены по результатам численного математического моделирования

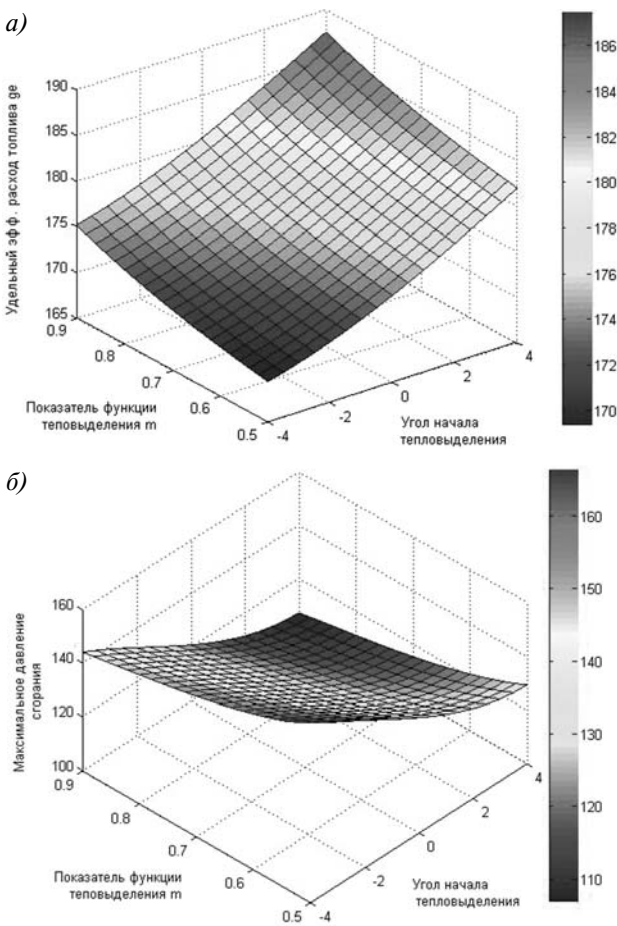


Рис. 1. Изменение параметров g_e (а) и p_{\max} (б) в области вариации параметров закона тепловыделения θ и m (дизель БДКРН60/229):
 $\varphi_c = 60$ град ПКВ, режим номинальной мощности $P_e = 11\ 600$ кВт, $g_i = 52$ г, $n = 109$ об/мин)

рабочего процесса дизеля на ЭВМ. Поверхности описываются полиномиальными зависимостями. Вариация параметров, описывающих закон тепловыделения, задана следующей: $\theta = -4 \dots +4$ град ПКВ, $m = 0,5 \dots 0,9$.

На рис. 2 а, б показаны область поиска $g_e \min$, которая образуется «отсечением» поверхности $p_{\max} = f(\theta, m)$ горизонтальной плоскостью допустимых значений $[p_{\max}]_{\text{доп}} = 140$ бар, а также изолинии параметров g_e и p_{\max} (рис. 2, б).

На рис. 2, б показана локальная область, в которой будет находиться $g_e \min$ (выделена окружностью). Численные методы условной оптимизации широко освещены в научной литературе [3, 4]. Формальное решение изложенной выше оптимизационной задачи следующее:

1. Выбор алгоритма последовательного поиска.

В качестве алгоритма выбран последовательный (пошаговый) поиск $g_e \min$ с обследованием 4-х

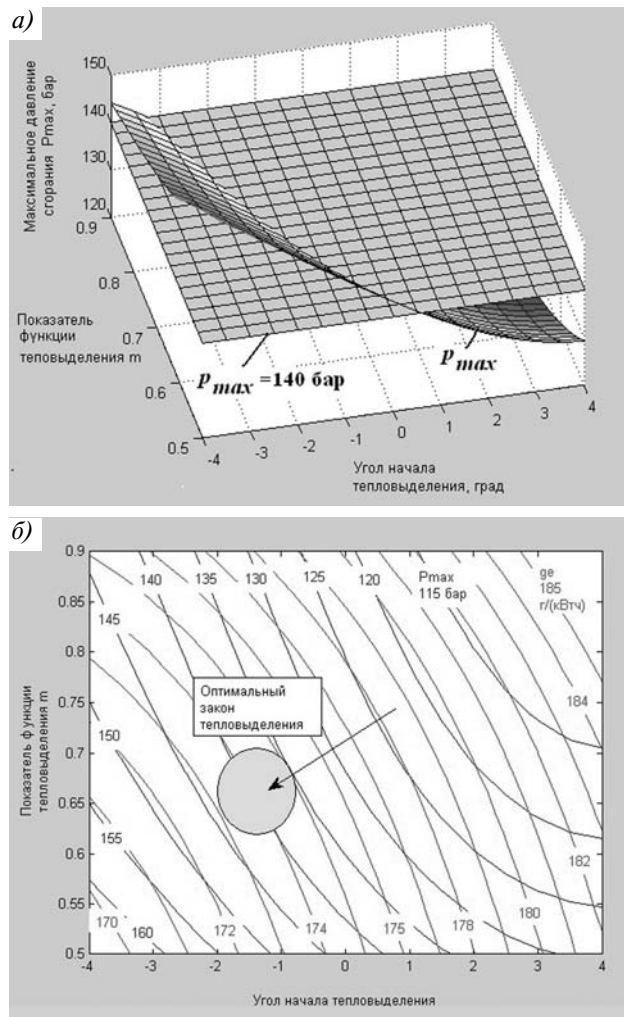


Рис. 2. Иллюстрация условия, накладываемого на область поиска минимальных параметров $g_e \min$ (условие $p_{\max} \leq 140$ бар) (а); линии уровня параметров g_e и p_{\max} в области изменения параметров θ и m (б)

точек, лежащих в окрестности текущей основной точки.

Координаты точек:

основная точка	— $\theta_{\text{осн}}$,	$m_{\text{осн}}$
точка 1	— $\theta_{\text{осн}}$,	$m_{\text{осн}} - \Delta m$
точка 2	— $\theta_{\text{осн}} - \Delta\theta$,	$m_{\text{осн}}$
точка 3	— $\theta_{\text{осн}}$,	$m_{\text{осн}} + \Delta m$
точка 4	— $\theta_{\text{осн}} + \Delta\theta$,	$m_{\text{осн}}$

При обследовании точек (включая основную точку) в качестве основной точки для последующего шага выбирается та, у которой минимален параметр g_e . Если для какой-либо из обследуемых точек не выполняется условие $p_{\text{max}} \leq [p_{\text{max}}]_{\text{доп}}$, то на нее «накладывается штраф» (прибавляется к вычисленному значению g_e величина «штрафа», например, $\Delta g_e = 1000$ г/(кВт·ч); значение Δg_e не критично, но должно быть достаточно большим).

При выборе величин $\Delta\theta$ и Δm следует ориентироваться на размер исследуемой области вариации параметров θ и m . При решении поставленной задачи принято $\Delta\theta = 0,05$ град ПКВ, $\Delta m = 0,005$.

2. Выбирается «стартовая» точка поиска (для рассматриваемой задачи выбрано $\theta_{\text{осн}} = +3,5$; $m_{\text{осн}} = 0,85$).

3. Запускается итерационный (пошаговый) процесс поиска.

Иллюстрация условного оптимизационного поиска $g_{e \text{ min}}$ приведена на рис. 3.

В заключение следует отметить, что приведенную в статье процедуру оптимизации закона тепловыделения следует рассматривать только как частную задачу поиска $g_{e \text{ min}}$ (при условии $p_{\text{max}} < 140$ бар). Найденные оптимальные параметры $\theta_{\text{опт}}$ и $m_{\text{опт}}$ удовлетворяют условию ограничения $p_{\text{max}} < 140$ бар, однако существуют и другие параметры двигателя, которые также следует рассматривать в качестве накладываемых ограничений. Такими немаловажными параметрами являются экологические параметры (в частности — выбросы окислов азота NO_x , оксида углерода CO , несгоревших углеводородов, частиц и пр.). Как представляется, становится актуальной задача условного оптимизационного поиска закона тепловыделения при накладываемом многофакторном ограничении, включающем экологические ограничения. Возможна также другая постановка задачи, когда именно экологические параметры принимаются в качестве минимизируемых целевых функций.

Выводы

1. Разработан алгоритм условной оптимизации закона тепловыделения судового МОД (алгоритм реализован в среде программирования Excel).

2. Методом численного моделирования рабочего процесса судового МОД БДКРН60/229 получены двухпараметрические регрессионные зависимости вида $g_e = f(\theta, m)$, $p_{\text{max}} = f(\theta, m)$.

3. Решена задача условной оптимизации закона тепловыделения. Получено: $g_{e \text{ min}} = 173,9$ г/(кВт·ч) при $\theta = -1,75$ град ПКВ, $m = 0,691$, $p_{\text{max}} = 140$ бар.

4. Рассмотренный в статье алгоритм универсален и может быть применен для решения других многокритериальных оптимизационных задач.

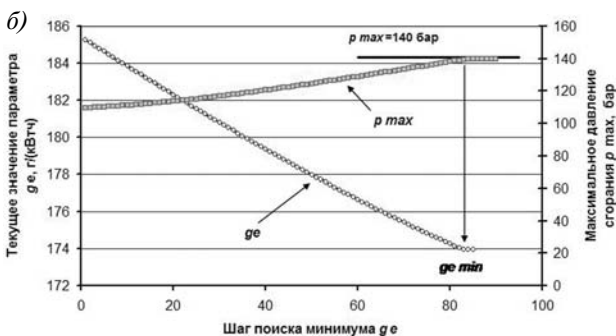
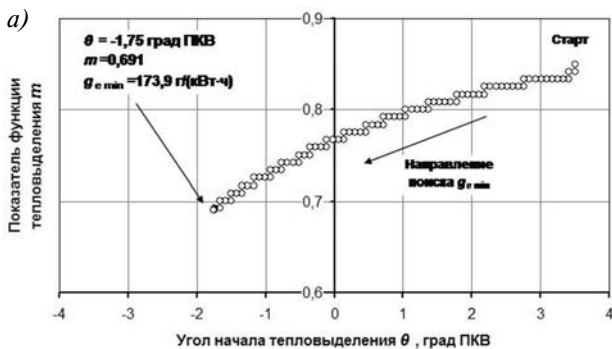


Рис. 3. Иллюстрация условного оптимизационного поиска $g_{e \text{ min}}$

Литература

1. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Изд-во при Харьковском гос. ун-те «Вища школа», 1980. 168 с.

2. Виле И.И. Новое о рабочем цикле двигателя. Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы. Москва, Свердловск, 1962. 271 с.

3. Бирюков А.Г. Методы оптимизации. Условия оптимальности в экстремальных задачах: учеб. пособие для вузов (направ. «Прикладные мат. и физика»). Москва: МФТИ, 2010. 226 с.

4. Лесин В.В., Лисовец Ю.П. Основы методов оптимизации: учебное пособие для вузов 3-е изд., испр. Санкт-Петербург: Лань, 2011. 352 с.