

Белоусов Е.В., к.т.н.

Херсонский факультет ХНАДУ, г. Херсон

ОХЛАЖДЕНИЕ ЗАРЯДА ПУТЕМ РАСПЫЛИВАНИЯ ВОДЫ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье рассмотрены результаты моделирования рабочего процесса твердотопливного поршневого двигателя внутреннего сгорания с охлаждаемым зарядом в период сжатия. Проанализированы основные зависимости и их влияние на рабочий процесс двигателя. Полученные результаты могут быть использованы при выборе оптимальных параметров охлаждения рабочего тела в двигателях данного класса.

Актуальность проблемы

Одним из важнейших критериев оценки перспектив использования в транспортной энергетике двигателей новых типов является возможность осуществления в них более эффективных термодинамических циклов. К числу таких двигателей могут быть отнесены твердотопливные поршневые двигатели (ТТПД) со слоевым сжиганием топлива [1]. Анализ условий их работы позволяет предположить, что, помимо использования более дешевого твердого топлива, в этих двигателях может быть реализовано охлаждаемое сжатие воздушного заряда. Это может существенно улучшить характер протекания термодинамического процесса в рабочем цилиндре.

Анализ литературных источников показал, что снижение температуры заряда в процессе сжатия (приближение процесса сжатия к изотермическому [2]) позволяет значительно сократить затраты механической работы за процесс и повысить тем самым полезную работу, полученную в ходе осуществления термодинамического цикла [3]. Наиболее эффективным методом охлаждения заряда является распыливание воды в объеме рабочего цилиндра с последующим поглощением теплоты заряда на фазовый переход жидкой фазы в газообразное состояние. Такой метод воздействия на рабочий процесс использовался в середине прошлого века в калоризаторных двигателях и показал свою эффективность [4]. Учитывая, что по характеру активации горения процессы в ТТПД и калоризаторных двигателях похожи, можно предположить, что охлаждение заряда будет эффективно влиять на работу ТТПД. Однако имеются специфические особенности протекания сжатия в ТТПД, которые необходимо учитывать при моделировании рабочего процесса [5].

Цель данной работы состоит в том, чтобы путем моделирования рабочего процесса выявить основные взаимосвязи между параметрами охлаждения воздушного заряда и характером протекания термодинамического цикла в ТТПД.

Моделирование рабочего процесса ТТПД

Для анализа влияния различных факторов была разработана математическая модель рабочего процесса. Она включает в себя подмодели процессов: газообмена, сжатия (в том числе и охлаждаемого) [3], подвода теплоты, расширения, теплообмена газов со стенками рабочего пространства и подмодель реактора [6]. Модель составлена с использованием классических уравнений термодинамики и теории ДВС. Отдельные подмодели более подробно описаны в работах [3, 5, 6].

В качестве объекта моделирования был выбран ТТПД на базе малоразмерного высокооборотного четырехтактного дизеля 4Ч 10,5/11 (Д-144). Такой выбор в значительной степени обусловлен тем, что в высокооборотных двигателях на все процессы отводятся доста-

точно короткие промежутки времени. Это более жестко лимитирует условия протекания рабочего цикла по сравнению со средне- и малооборотными двигателями. Основные геометрические характеристики двигателя, используемые при моделировании, а также начальные параметры рабочего тела приведены в табл. 1. Все расчеты были выполнены для одного цилиндра.

Для большей объективности исследования, предварительно, путем последовательных приближений, были оптимизированы углы начала и окончания движения вытеснителя, которые составили 24° до ВМТ и 119° после ВМТ, соответственно. При этом объем распыляемой воды принимался равным нулю. Смоделированный таким образом рабочий процесс был принят за базовый.

Таблица 1

Геометрические параметры двигателя и начальные параметры рабочего тела

Наименование параметра	Значение
Диаметр цилиндра, <i>м</i>	0,105
Ход поршня, <i>м</i>	0,11
Степень сжатия геометрическая	20
Частота вращения, мин^{-1}	1500
Момент закрытия впускного клапана, град. после НМТ	23
Рабочий объем, дм^3	0,952
Полный объем, дм^3	1,003
Объем камеры сгорания, дм^3	0,050
Действительная степень сжатия	19,121
Доля потеряннного хода на органы газообмена	0,045
Полный объем (с учетом потери части хода на газообмен), дм^3	0,960
Температура остаточных газов, <i>К</i>	890,00
Давление остаточных газов, <i>МПа</i>	0,12
Коэффициент остаточных газов	0,03
Давление на входе в двигатель, <i>МПа</i>	0,1030
Температура на входе в двигатель, <i>К</i>	293,00
Потери давления на впуске, <i>МПа</i>	0,0214
Давление в конце впуска, <i>МПа</i>	0,0825
Плотность воздуха на впуске, кг/м^3	0,8131
Коэффициент наполнения	0,6870
Температура в конце газообмена, <i>К</i>	353,25

На втором этапе исследования была выполнена серия однофакторных численных экспериментов по моделированию рабочего процесса двигателя с охлаждением заряда, в процессе сжатия, путем впрыска воды. Моделировалось также непродуктивное выгорание топлива в свободном пространстве слоя [5]. При этом фиксировались изменения основных выходных параметров рабочего процесса и двигателя в целом. Закон перемещения вытеснителя принимался линейным.

Анализ результатов моделирования

Основные зависимости, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 1.

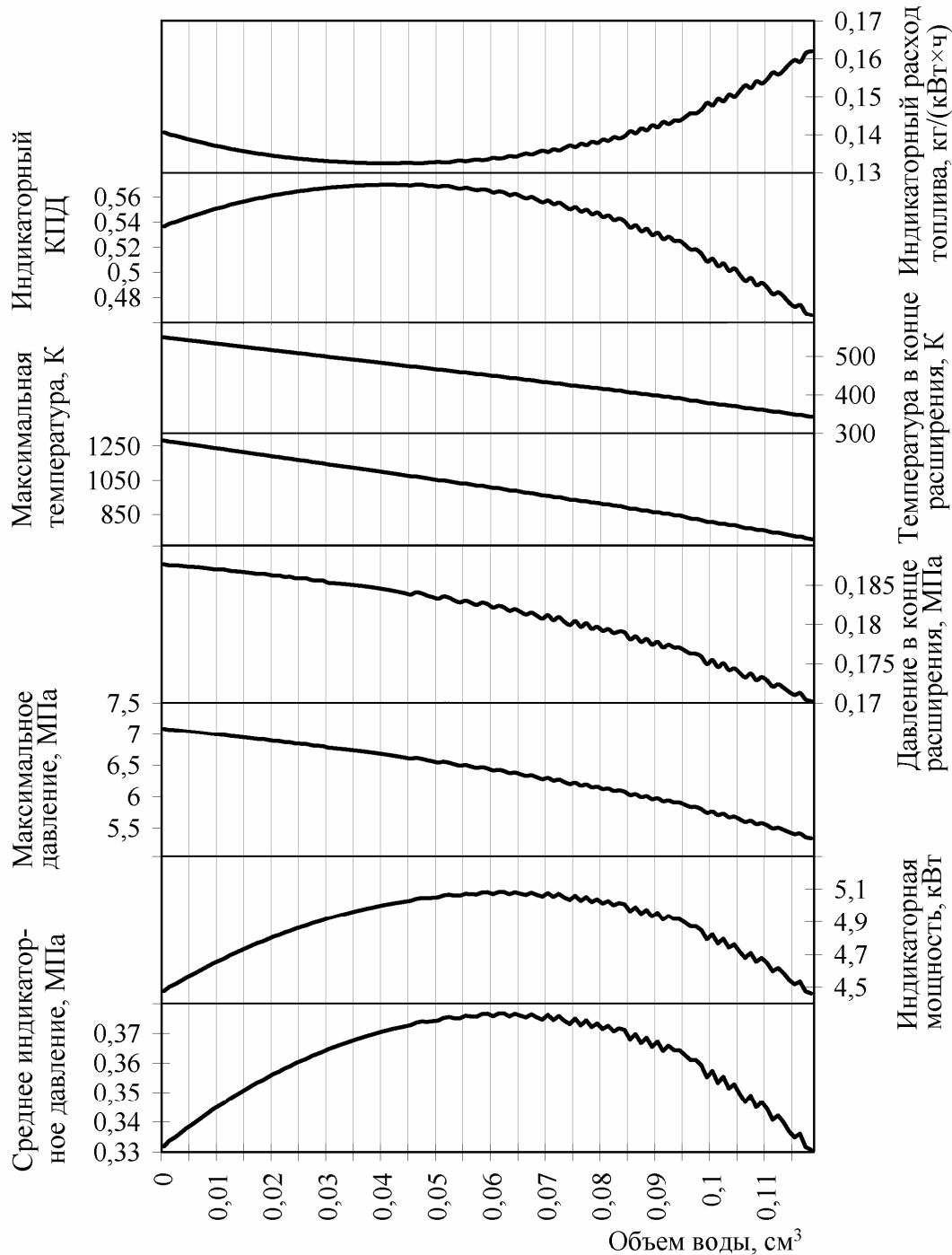


Рис. 1. Основные характеристики ГТТД как функция объема воды, распыленного в цилиндре двигателя

Из представленных графиков видно, что индикаторный КПД двигателя достигает своего максимума ($\eta_i \approx 0,57$) при распыливании $0,035 \dots 0,053 \text{ см}^3$ воды. Этому же промежутку соответствует минимальный расход условного топлива ($g_i \approx 0,133 \text{ кг}/(\text{кВт} \times \text{ч})$). Такое поведение может быть объяснено тем, что на участке сжатия впрыск данного количества воды приводит к снижению механической работы на перемещение поршня, что частично компенсиру-

ет рост давления, связанный с непродуктивным выгоранием топлива в свободном пространстве слоя.

Среднее индикаторное давление и, как следствие, индикаторная мощность имеют максимумы, соответствующие распыливанию $0,055...0,075 \text{ см}^3$ воды ($p_i \approx 0,375 \text{ МПа}$ и $N_i \approx 5,08 \text{ кВт}$ соответственно).

Повышение мощности на этом участке, очевидно, связано с дальнейшим снижением затрат на сжатие и более рациональным изменением температуры процесса относительно ВМТ. Однако значительное уменьшение максимальной температуры цикла приводит к тому, что эффективность рабочего процесса начинает падать. Кроме того, при заданном законе движения вытеснителя, впрыск воды в объеме, превышающем $0,088 \text{ см}^3$, приводит к тому, что жидкая фаза не успевает полностью испариться к моменту начала продувки. Это может привести к попаданию водяного аэрозоля в реактор, снижению температуры топлива и ухудшению условий его горения.

Максимальная температура цикла и температура отработавших газов снижаются практически линейно с увеличением количества впрыскиваемой воды. Снижение максимального давления и давления в конце расширения происходит более интенсивно, чем температуры.

Исходя из выше сказанного, следует, что, при выборе характеристик охлаждения заряда путем распыливания в нем воды, нельзя выделить какого-либо универсального критерия оптимизации рабочего процесса. В зависимости от того, какие цели ставятся при проектировании, могут быть выбраны режимы охлаждения, соответствующие максимальной эффективности рабочего процесса, максимальной мощности, минимальным температурам или давлениям. При этом следует учитывать, что расчетные параметры не в полной мере отражают реальные, в том числе эффективные и экологические показатели двигателя. Так, уменьшение максимальной индикаторной мощности при снижении максимального давления цикла может быть скомпенсировано сокращением механических потерь в двигателе. Снижение максимальной температуры процесса может значительно улучшить экологические показатели двигателя, в частности по выбросам оксидов азота (NO_x).

На рис. 2 приводятся графики расчетного изменения давления и температуры, а также скорости и коэффициента тепловыделения для базового цикла и для цикла, соответствующего максимальной эффективности рабочего процесса ($0,048 \text{ см}^3$). В табл. 2 приведены основные параметры для базового цикла (колонка 1), цикла с максимальной эффективностью (2) и цикла с максимальным охлаждением заряда (3).

На графике изменения температуры при охлаждении заряда можно видеть характерный прогиб, связанный с поглощением теплоты на фазовый переход воды из жидкого состояния в газообразное. Подробнее особенности и отдельные стадии этого процесса рассмотрены в работе [4]. Такое распределение температуры относительно ВМТ является основным фактором, приводящим к возрастанию скорости тепловыделения (теплонапряженности) и влияющим на эффективность рабочего процесса. Вторым важным фактором, влияющим на эффективность процесса, является то, что в ходе сжатия масса газовой фазы постепенно возрастает (для случая на рис. 1 примерно на 6%) за счет испарения воды. Следовательно, на линии расширения на поршень действует газовая смесь большей массы, чем на линии сжатия. Из табл. 2 видно, что при данном уровне охлаждения индикаторный КПД возрастает примерно на 6%, а мощность на 13%, при этом максимальная температура снижается на 16,6%, а максимальное давление на 6,65%. Из колонки 3 табл. 2 видно, что в рассматриваемых условиях максимальное охлаждение не только не дает каких-либо термодинамических преимуществ, но и значительно ухудшает рабочие параметры двигателя. Это, во-первых, связано со значительным снижением уровня срабатываемых температур. Во-вторых, при испарении значительного количества воды возрастает отрицательная работа парообразования, которая препятствует перемещению поршня на линии сжатия. Таким образом, для ка-

ждого случая существует наиболее оптимальный уровень охлаждения заряда. Очевидно, величина эффективного охлаждения лежит в диапазоне, соответствующем максимальной эффективности и максимальной мощности. В рассматриваемом случае данный диапазон соответствует впрыску $0,035 \dots 0,075 \text{ см}^3$ воды за цикл.

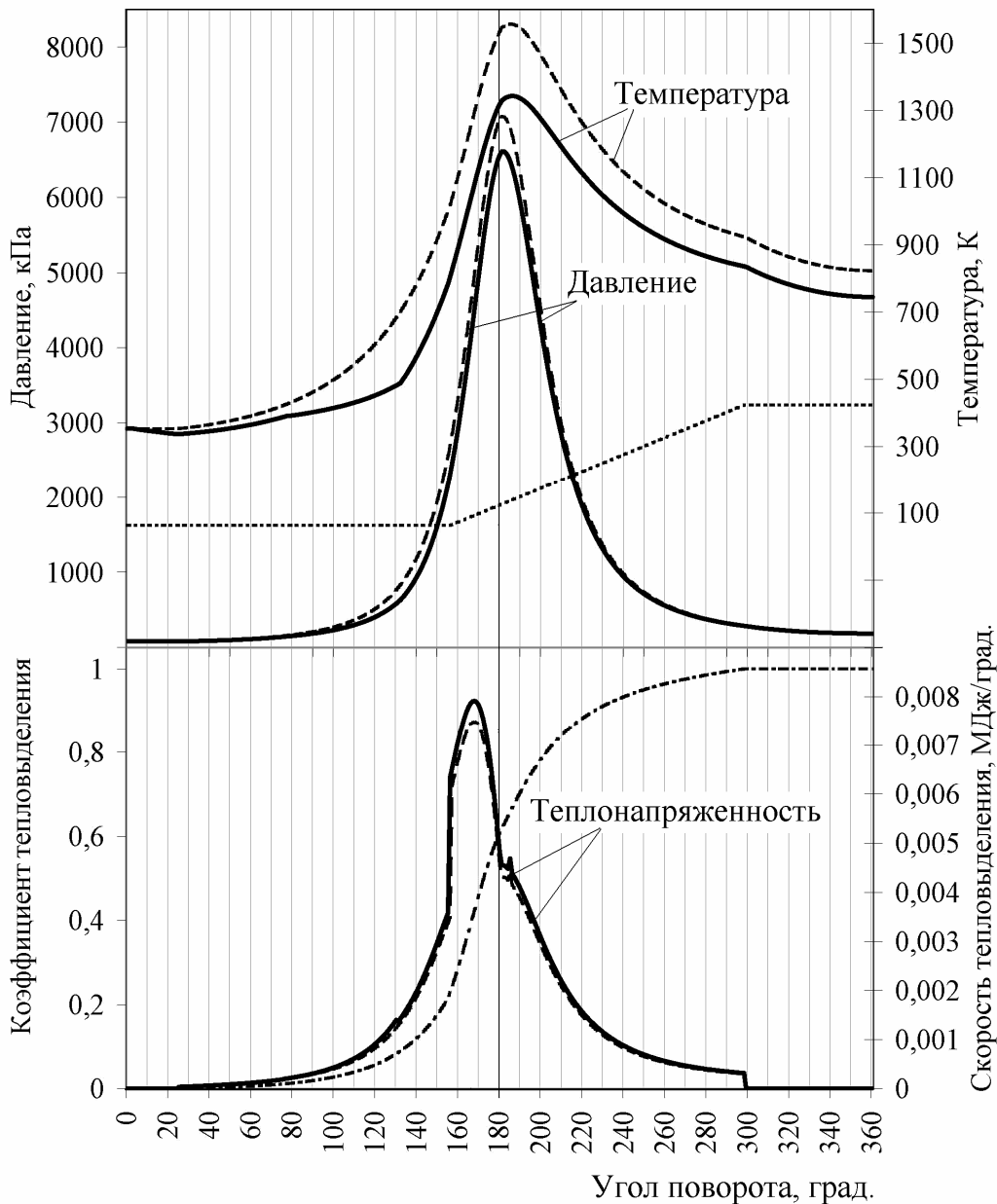


Рис. 2. Сравнение расчетных параметров рабочего процесса и характеристик тепловыделения в ТППД: - - - без охлаждения воздушного заряда; — с охлаждением заряда; — · — коэффициент тепловыделения; · · · · перемещение вытеснителя

Для нескольких рассмотренных случаев рабочих процессов с охлаждением заряда была предпринята попытка оптимизировать режим подвода теплоты путем изменения параметров продувки. Для этого последовательно моделировалось изменение начала и конца подъема вытеснительного поршня. Ни в одном из рассмотренных случаев не удалось добиться значительного улучшения параметров рабочего процесса. Следовательно, можно предположить, что параметры продувки, оптимизированные для рабочего процесса с неохлаждаемым сжатием, являются оптимальными и для всех остальных процессов с охлаждением заряда.

Таблица 2

Основные параметры рабочего процесса для различных циклов ТТПД

Параметр рабочего процесса	Номер расчетного цикла		
	1	2	3
Объем воды, $см^3$	0	0,048	0,12
Скорость вытеснителя (max), $м/с$	2,572	2,572	2,572
Ускорение вытеснителя (max), $м/с^2$	26235,4	26235,4	26235,4
Инд. цикловой расход твердого топлива, $кг$	$1,69 \times 10^{-5}$	$1,79 \times 10^{-5}$	$1,94 \times 10^{-5}$
Инд. работа, совершаемая за цикл, $кДж$	0,316	0,357	0,316
Инд. КПД рабочего процесса	0,537	0,570	0,466
Инд. часовой расход твердого топлива, $кг$	0,861	0,915	0,9898
Инд. часовой расход условного топлива, $кг^*$	0,63	0,67	0,7244
Инд. удельный расход теплоты $кДж/(кВт \times ч)$	6709,1	6320,0	7721,8
Инд. расход условного топлива, $кг/(кВт \times ч)^*$	0,141	0,132	0,162
Среднее инд. давление, $МПа$	0,332	0,375	0,332
Инд. мощность, $кВт$	4,48	5,06	4,47
Максимальная температура цикла (T_{max}), $^{\circ}C$	1282,019	1069,450	707,990
Температура газов в конце расширения, $^{\circ}C$	549,325	471,822	343,667
Максимальное давление цикла (p_{max}), $МПа$	7,083	6,612	5,351
Давление газов в конце расширения, $МПа$	0,188	0,184	0,171
Достижение T_{max} , $^{\circ}$ после ВМТ	5 $^{\circ}$	6 $^{\circ}$	9 $^{\circ}$
Достижение p_{max} , $^{\circ}$ после ВМТ	1 $^{\circ}$	1 $^{\circ}$	2 $^{\circ}$

* $H_u=42,7 \text{ МДж/кг}$

Выводы

Результаты проведенного численного эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование охлаждаемого сжатия, путем распыливания воды, позволяет существенно повысить эффективность рабочего процесса ТТПД (для рассмотренного случая на 6%), снизив при этом максимальные температуру и давление цикла (на 16,6% и 6,65% соответственно). Мощность при этом возрастает примерно на 13%. За счет снижения температуры процесса существенно могут быть улучшены экологические показатели двигателя, в частности по выбросам NO_x .

2. При оптимизации рабочего процесса путем охлаждения заряда не существует универсального критерия. В зависимости от того, какие цели ставятся при проектировании, могут быть выбраны режимы охлаждения, соответствующие максимальной эффективности рабочего процесса, максимальной мощности, минимальным температурам или давлениям.

3. При использовании охлаждаемого сжатия количество впрыскиваемой воды необходимо выбирать в диапазоне между максимальной эффективностью рабочего процесса и максимальной мощностью (для рассмотренного случая $0,035 \dots 0,075 \text{ см}^3$). Дальнейшее повышение интенсивности охлаждения сначала приводит к ухудшению рабочих характеристик

двигателя, а затем и к снижению эффективности выгорания топлива (для рассмотренного случая это соответствует впрыску $0,088 \text{ см}^3$ воды).

4. Параметры продувки, оптимизированные для рабочего процесса с неохлаждаемым сжатием, являются оптимальными и для всех остальных процессов с охлаждением заряда.

Список литературы

1. Белоусов Е.В. Создание и совершенствование твердотопливных поршневых двигателей внутреннего сгорания. — Херсон: ОАО ХГТ, 2006. — 451 с.
2. Бальян С.В. Техническая термодинамика и тепловые двигатели. — Л.: Машиностроение, 1973. — 302 с.
3. Белоусов Е.В. Моделирование процесса сжатия с охлаждением воздушного заряда путем распыливания воды в рабочем цилиндре ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. — 2006. — №1. — С. 72 – 78.
4. Двигатели внутреннего сгорания. Описательный курс / Алексеев В.П., Костыгов Н.И., Круглов М.Г. и др., под ред. Проф. Орлина А.С. // М.: Гос. Научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. — С. 331 – 335.
5. Белоусов Е.В., Белоусова Т.П. Особенности протекания политропного процесса сжатия в твердотопливных поршневых двигателях со слоевым сжиганием топлива // Зб. наук. праць УДМТУ. — Миколаїв: УДМТУ, 2001. — № 3 (375). — С. 84 – 89.
6. Белоусов Е.В., Белоусова Т.П. Моделирование процесса формирования слоя твердого топлива в реакторе твердотопливного поршневого двигателя со слоевым сжиганием // Двигатели внутреннего сгорания. — 2006. — № 2. — С. 126 – 130.

Стаття надійшла до редакції 02.11.06

© Белоусов Є.В., 2006