

Контроль и испытания

УДК 621.436

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА НССИ ДВИГАТЕЛЯ С НАДДУВОМ

В.Г. Камалтдинов, С.С. Никифоров

Рассмотрены закономерности влияния частоты вращения коленчатого вала на показатели процесса сгорания и индикаторные показатели рабочего цикла НССИ двигателя с наддувом. Обоснована возможность корректировки момента воспламенения и скорости сгорания подбором оптимальной температуры в начале сжатия для каждого скоростного режима.

Ключевые слова: НССИ двигатель, воспламенение, сгорание, частота вращения коленчатого вала, индикаторные показатели, рабочий цикл.

Специфика организации рабочего процесса в НССИ двигателях предопределяет зависимость процессов воспламенения и сгорания от сочетания различных факторов, таких как вид применяемого топлива, конструкция и тепловое состояние двигателя, скоростной и нагрузочный режим его работы и других. Температура самовоспламенения горючей смеси достигается в результате процесса сжатия в определенный момент времени, т. е. при определенном угле п.к.в. Для различных топлив расчетно-теоретически и экспериментально установлено влияние на этот момент состава, температуры и давления топливно-воздушной смеси в начале сжатия, температуры огневой поверхности цилиндра, геометрической степени сжатия, угла закрытия впускных клапанов [1–4].

Полученные знания позволяют моделировать рабочий процесс НССИ двигателя при заданных конструктивных его параметрах и переменных тепловом и нагрузочном режимах. В то же время абсолютное большинство экспериментальных и расчетно-теоретических исследований выполнено при постоянных частотах вращения коленчатого вала двигателя n [5–9]. Это объясняется особым характером влияния фактора времени на процессы воспламенения и сгорания, которое в распространенных моделях процесса сгорания в явном виде не учитывается.

В реальных условиях работы НССИ двигателя необходимо принимать меры для корректировки момента воспламенения и скорости сгорания с учетом изменения частоты вращения коленчатого вала. Это вызвано тем, что при увеличении n процессы воспламенения и сгорания происходят с запаздыванием, например: экспериментально установлено смещение максимума скорости тепловыделения на ~ 17 град п.к.в. при увеличении частоты вращения в 2,25 раза [10] (рис. 1). Такое запаздывание сгорания может привести к существенному изменению индикаторных показателей рабочего цикла.

Цель и задачи исследования

Целью данного исследования являлось обоснование возможности корректировки момента воспламенения и скорости сгорания НССИ двигателя с наддувом, конвертированного из дизеля 4С13/15 ООО «ЧТЗ-Уралтрак» и работающего на смесевом топливе (природном газе с диметиловым эфиром), для обеспечения максимальной эффективности рабочего цикла при изменении частоты вращения коленчатого вала. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

– расчетно-теоретически определить изменение параметров процесса сгорания и индикаторных показателей при изменении частоты вращения коленчатого вала по внешней скоростной характеристике;

– для каждого скоростного режима расчетно-теоретически подобрать оптимальную температуру в начале сжатия, обеспечивающую наилучшие индикаторные показатели.

Методика исследования

Исследование проводилось с использованием однозональной модели горения топлива [11, 12], разработанной на кафедре «Двигателя внутреннего сгорания» Южно-Уральского государственного университета, в которой предложено процесс сгорания рассматривать как «длинную»

Контроль и испытания

реакцию окисления, подчиняющуюся закону Аррениуса, но с переменной энергией активации. Особенностью модели является введение нового параметра – условной продолжительности реакции окисления молекулы топлива τ_y . Она определяется как период времени, в течение которого полностью прореагируют молекулы топлива с энергией, большей условной энергии активации. При моделировании сгорания двухкомпонентного топлива в HCCI двигателе выгорание каждого из топлив определяется параллельно по законам химической кинетики с различными скоростями в условно отдельных объемах, но с общими давлениями и температурами [1, 12].

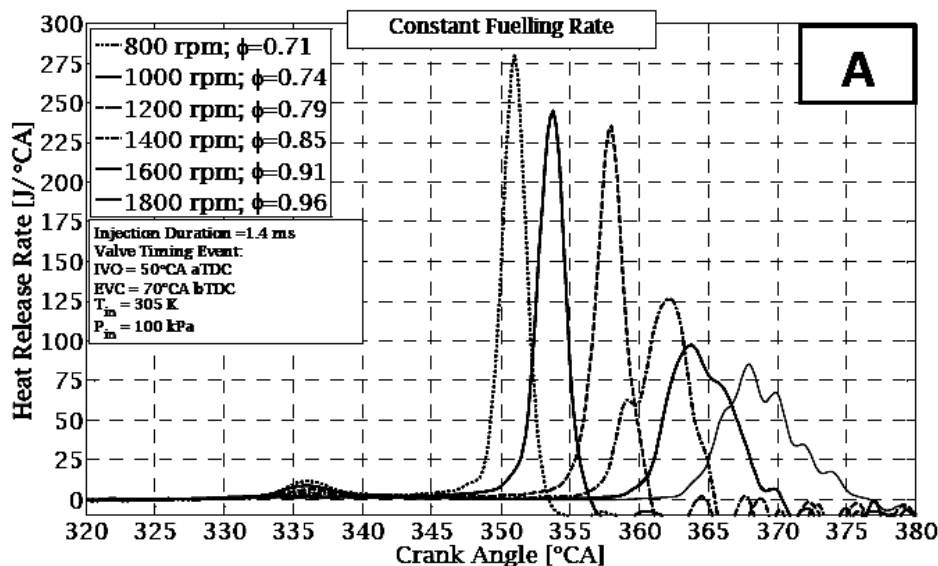


Рис. 1. Влияние частоты вращения коленчатого вала HCCI двигателя на скорость тепловыделения при постоянной подаче топлива [10]

Модель учитывает влияние на процесс сгорания основных физико-химических свойств компонентов топливно-воздушной смеси (метана, диметилового эфира, кислорода, азота, аргона, оксида и диоксида углерода, воды), тепловыделения, теплообмена со стенками цилиндра, утечек рабочего тела [13] и изменение молекулярного состава. Основываясь на этой модели, разработаны методика и программа расчета рабочего цикла HCCI двигателя [14].

Поскольку в разработанных моделях в явном виде учитывается фактор времени, то с их помощью можно исследовать влияние температуры в начале сжатия T_a на показатели рабочего цикла двигателя при изменении частоты вращения коленчатого вала в широких пределах. Наибольший интерес представляет определение влияния частоты вращения коленчатого вала на параметры процесса сгорания и рабочего цикла двигателя в целом по внешней скоростной характеристике, а также возможности корректировки характеристики тепловыделения изменением температуры в начале сжатия.

В качестве постоянных исходных данных принимались следующие параметры: геометрическая степень сжатия 14 единиц, давление начала сжатия 0,24 МПа, смесевое топливо на основе природного газа с добавлением диметилового эфира (ДМЭ) в количестве, соответствующем массовой доле $\varphi_{\text{ДМЭ}} = 0,27$. В результате с изменением температуры на впуске автоматически менялся коэффициент избытка воздуха по смесевому топливу $\alpha_{\text{см}}$ в диапазоне 1,85...1,98.

Результаты исследования

Для заданных конструктивных параметров HCCI двигателя определена температура в начале сжатия $T_a = 351$ К, при которой обеспечиваются наилучшие индикаторные показатели на номинальном режиме (эффективная мощность 183,8 кВт, $n = 2100$ мин⁻¹): среднее индикаторное давление $p_i = 1,635$ МПа, индикаторный к.п.д. $\eta_i = 0,478$, удельный индикаторный расход топлива $g_i = 170,3$ г/(кВт·ч). Цикловые подачи природного газа и ДМЭ составили $0,112 \cdot 10^{-3}$ и $0,042 \cdot 10^{-3}$ кг, соответственно. Угол максимальной скорости сгорания $\alpha_{W_{\text{cr max}}} = 365$ град п.к.в. (рис. 2).

С уменьшением частоты вращения коленчатого вала от 2100 до 1000 мин⁻¹ сгорание начинается все раньше. При постоянной температуре $T_a = 351$ К угол максимальной скорости сгорания изменился с 365 град п.к.в. (при $n = 2100$ мин⁻¹) до 357 град п.к.в. (при $n = 1100$ мин⁻¹), то есть на 8 град п.к.в. (рис. 3). Характер процесса сгорания практически не изменился, но максимальное значение скорости тепловыделения $dQ_{сг}/d\phi$ имело тенденцию к увеличению в диапазоне 4500...5200 Дж/град п.к.в. (см. рис. 3). В результате чего максимальные значения давления p_{max} , температуры T_{max} и скорости нарастания давления $W_{p_{max}}$ в цилиндре увеличились на 1,54 МПа, 76К и 1,4 МПа/град п.к.в., соответственно, а индикаторные показатели заметно ухудшились (на ~2 %) (см. рис. 2).

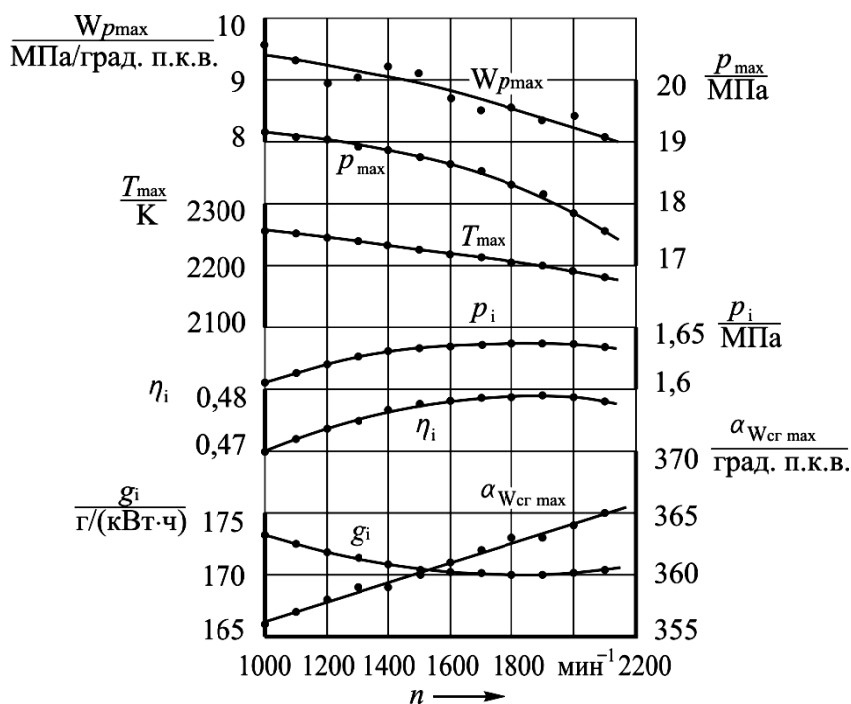


Рис. 2. Зависимость показателей рабочего цикла двигателя с наддувом от частоты вращения коленчатого вала при постоянной $T_a = 351$ К

Подбором оптимальной температуры $T_{a_{опт}}$ для каждого скоростного режима удалось замедлить развитие процесса сгорания и увеличить угол максимальной скорости сгорания $\alpha_{W_{сг\ max}}$ до уровня ~365 град п.к.в. (рис. 4). В результате снижения температуры в начале сжатия (от 351 до 328 К) на меньших частотах вращения коленчатого вала коэффициент избытка воздуха $\alpha_{см}$ увеличился с 1,85 ($n = 2100$ мин⁻¹) до 1,98 ($n = 1000$ мин⁻¹), т. е. на ~7 %, а максимальная температура T_{max} снизилась на 149 К до 2110 К (при $T_a = 351$ К $T_{max} = 2259$ К). Максимальное давление p_{max} и скорость нарастания давления $W_{p_{max}}$ также уменьшились: 18,2 против 19,16 МПа (на 5 %) и 8,75 против 9,63 МПа/град п.к.в. (на 9 %), соответственно. Это будет способствовать снижению механической нагрузки на кривошипно-шатунный механизм.

В результате своевременного развития процесса сгорания индикаторные показатели по внешней скоростной характеристике заметно улучшились. Наибольший эффект зафиксирован при $n = 1000$ мин⁻¹, улучшение составило 3,8 %. Следует отметить, что при реализации такого регулирования температуры в начале сжатия могут возникнуть проблемы, связанные со сложностью охлаждения наддувочного воздуха (после сжатия в компрессоре до 0,24 МПа) до требуемого уровня.

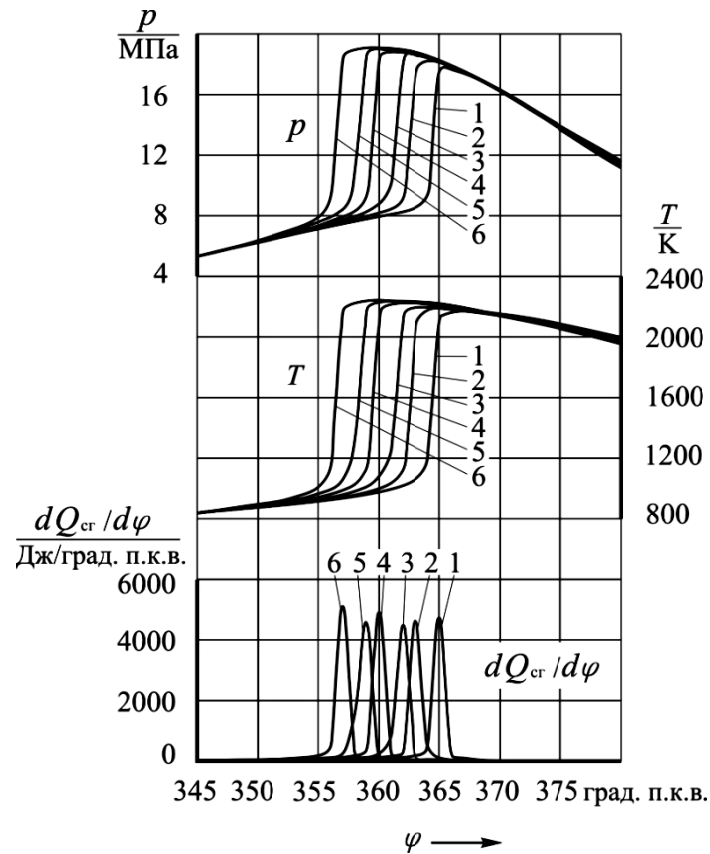


Рис. 3. Влияние частоты вращения коленчатого вала НССИ двигателя на давление, температуру и скорость тепловыделения в цилиндре при постоянной $T_a = 351 \text{ К}$:
 1 – $n = 2100$; 2 – $n = 1900$; 3 – $n = 1700$; 4 – $n = 1500$; 5 – $n = 1300$; 6 – $n = 1100 \text{ мин}^{-1}$

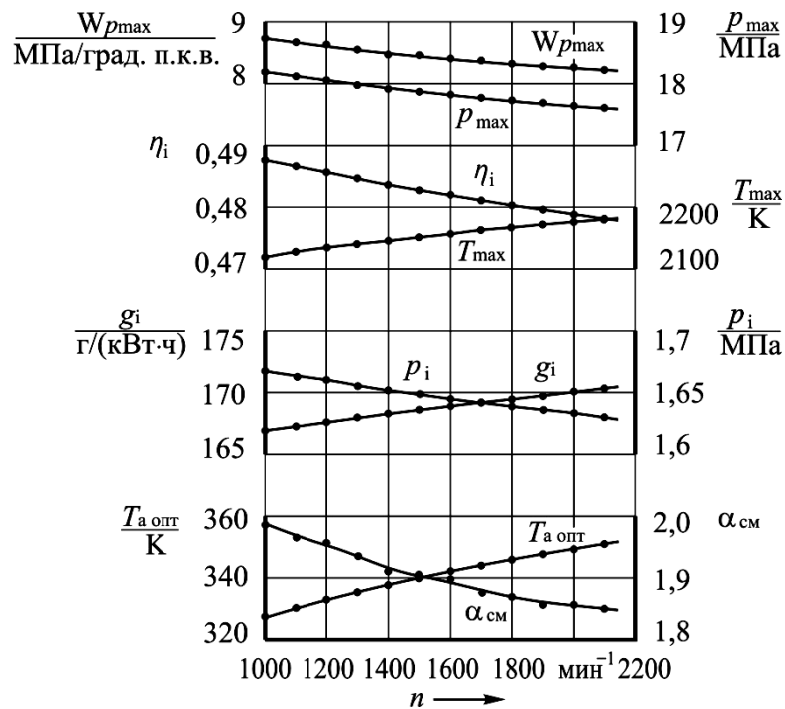


Рис. 4. Зависимость показателей рабочего цикла двигателя с наддувом от частоты вращения коленчатого вала при оптимальной температуре в начале сжатия

Заключение

В результате расчетных исследований влияния частоты вращения коленчатого вала на параметры процесса сгорания и рабочего цикла двигателя 4Ч13/15 с воспламенением от сжатия гомогенной топливно-воздушной смеси на основе природного газа с ДМЭ установлены следующие закономерности.

1. Наилучшие расчетные показатели при степени сжатия 14 единиц, номинальной частоте вращения $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$, давлении начала сжатия 0,24 МПа и суммарном коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{\text{см}} = 1,85$ достигаются в рабочих циклах с температурой начала сжатия около 351 К: $\eta_i = 0,478$, $p_i = 1,635 \text{ МПа}$ и $g_i = 170,3 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$.

2. При снижении частоты вращения коленчатого вала от 2100 до 1000 мин^{-1} по внешней скоростной характеристике (и постоянстве других параметров) целесообразно понижать температуру начала сжатия T_a от 351 до 328 К (или 6,5 %). Это позволит сохранить угол максимальной скорости сгорания на уровне ~5 град п.к.в. после ВМТ, получить наилучшие индикаторные показатели рабочего цикла для каждой частоты вращения коленчатого вала и снизить механическую нагрузку на кривошипно-шатунный механизм.

Литература

1. Камалтдинов, В.Г. Влияние состава двухкомпонентного топлива на процесс сгорания в двигателе с объемным самовоспламенением от сжатия / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелиович // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2008. – Вып. 12 – № 23(123). – С. 46–53.

2. Камалтдинов, В.Г. Влияние параметров свежего заряда на показатели рабочего цикла HCCI двигателя с наддувом / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Изв. вузов. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 6. – С. 31–37.

3. Камалтдинов, В.Г. Расчетное исследование процесса сгорания и показателей рабочего цикла HCCI двигателя, работающего на смеси природного газа и диметилового эфира / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2010. – № 6 (54). – С. 8–15.

4. Камалтдинов, В.Г. Влияние геометрической степени сжатия и угла закрытия впускных клапанов на процесс сгорания и показатели рабочего цикла HCCI двигателя с наддувом / В.Г. Камалтдинов, В.А. Марков // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2011. – № 2 (56). – С. 9–16.

5. Гусаков, С.В. Оценка влияния ДМЭ в смеси с природным газом на работу ДВС с гомогенным самовоспламенением / С.В. Гусаков, М. М. Эльго-баши Эльхагар, И.В. Епифанов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 2 (14). – С. 10–13.

6. Гусаков, С.В. Опыт моделирования рабочего процесса ДВС с воспламенением гомогенного заряда от сжатия / С.В. Гусаков, М.М. Эльгобаши Эльхагар // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». – 2004. – № 2 (9). – С. 25–28.

7. Федянов, Е.А. Моделирование основной фазы процесса сгорания в двигателе с самовоспламенением от сжатия гомогенной метановоздушной смеси / Е.А. Федянов, Е.М. Иткис, В.Н. Кузьмин // Изв. ВГТУ. – 2008. – Т. 6, № 1. – С. 11–13.

8. Experimental study of CI natural-gas/DME homogeneous charge engine / Z. Chen, M. Konno, M. Oguma, T. Yanai // SAE Technical Paper Series. – 2000. – № 2000-01-0329. – 10 p.

9. Kong, S.C. A study of natural gas/DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics / S.C. Kong // Fuel. – 2007. – Vol. 86. – P. 1483–1489.

10. Luszcz, P.M. Combustion Diagnostics in Homogeneous Charge Compression Ignition Optical and Thermal Single Cylinder Engines / P.M. Luszcz // University of Birmingham, 2009. – 293 p. – <http://etheses.bham.ac.uk/524/1/Luszcz09PhD.pdf>.

11. Камалтдинов, В.Г. Новая модель процесса горения топлива в ДВС / В.Г. Камалтдинов // Двигателестроение. – 2008. – № 3 (233). – С. 17–20.

12. Kamaltdinov, V. Combustion process modeling in HCCI engine / V. Kamaltdinov // SAE Technical Paper Series. – 2011. – № 2011-01-1789. – 10 p.

13. Камалтдинов, В.Г. Уточненная методика расчета параметров рабочего тела на

Контроль и испытания

пусковых режимах дизеля / В.Г. Камалтдинов // Двигателестроение. – 2008. – № 2 (232). – С. 31–34.

14. Камалтдинов, В.Г. Программа расчета рабочего цикла двигателя с воспламенением от сжатия «Рабочий цикл»: программа для ЭВМ, рег. № 2010617228 / В.Г. Камалтдинов // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем: офиц. бюл. / Фед. служба по интелект. собств., патентам и товарным знакам. – М.: ФГУ ФИПС. – 2011. – № 1 (74). – С. 173.

Камалтдинов Вячеслав Гилимянович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – процессы смесеобразования, воспламенения и сгорания в дизелях. E-mail: vkamaltdinov@yandex.ru

Никифоров Сергей Степанович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные, гусеничные машины и автомобили», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – процессы смесеобразования, воспламенения и сгорания в дизелях. E-mail: nss@susu.ac.ru

THE INFLUENCE OF CRANKSHAFT ROTATION ON OPERATING CYCLE HCCI SUPERCHARGED ENGINE

V.G. Kamaltdinov, S.S. Nikiforov

Investigated of regulars of influence of bent shaft rpm on combustion process rates and indicated working cycle rates for the HCCI supercharge engine. Capability proven for correction of ignition moment and combustion speed by means selection of optimal temperature at the beginning of compression for speed conditions each.

Keywords: HCCI engine, ignition, combustion, bent shaft rpm, indicated rates, working cycle.

Vyacheslav G. Kamaltdinov. The candidate of engineering science, docent of Internal Combustion Engine department, South Ural State University (Chelyabinsk). The area of scientific – diesel engine fuel-air mixing, inflammation, and combustion processes. E-mail: vkamaltdinov@yandex.ru

Sergey S. Nikiforov. The candidate of engineering science, docent of Wheel Caterpillar Machines and Automotive department, South Ural State University (Chelyabinsk). The area of scientific – diesel engine fuel-air mixing, inflammation, and combustion processes. E-mail: nss@susu.ac.ru

Поступила в редакцию 21 февраля 2013 г.