

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование)

13.03.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

«Альтернативные источники энергии транспортных средств»

(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Двигатель с искровым зажиганием на альтернативном топливе E85

Студент

Е.А. Волков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

## АННОТАЦИЯ

Применение альтернативного топлива E85 в автомобильных двигателях позволит снизить нагрузку на ископаемые углеводородные источники энергии. Анализ возможностей применения альтернативного топлива E85 как основного или второго топлива, является актуальной задачей бакалаврской работы и соответствует профилю направления обучения.

Целью бакалаврской работы является оценка возможностей эффективного применения альтернативного топлива E85 в поршневых двигателях внутреннего сгорания.

В бакалаврской работе представлены результаты проектирования двигателя с искровым зажиганием с двух топливной системой питания, рассчитанной на работу с бензином и альтернативном топливе E85. Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 4 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 51 рисунок, 16 таблиц, списка использованных источников (37 источников). Основной текст изложен на 73 страницах.

Графическая часть работы содержит 8 листов, из них 2 формата A0 и 6 формата A1 иллюстрирующих материал, представленный в пояснительной записке.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 4  |
| 1 Альтернативное топливо E85, его свойства и перспективы .....   | 8  |
| 1.1 Спирты как топливо для двигателей внутреннего сгорания.....  | 8  |
| 1.2 Экспериментальное сравнительное исследование<br>производительности и выбросов E85 с использованием различных<br>подходов к впрыску в двигателе PFI SI с турбонаддувом..... | 10 |
| 2 Тепловой расчет проектируемого двигателя .....   | 24 |
| 3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного<br>механизма двигателя .....   | 41 |
| 3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма<br>двигателя.....   | 41 |
| 3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя   | 43 |
| 4 Анализ влияния вида топлива на рабочий процесс ДВС .....   | 55 |
| 4.1 Влияния вида топлива на максимальную температуру и давление<br>цикла .....   | 55 |
| 4.2 Влияния вида топлива на эффективные показатели цикла .....   | 63 |
| Заключение .....   | 68 |
| Список используемых источников .....   | 70 |

## ВВЕДЕНИЕ

Биотопливо — это топливо из биологического сырья, получаемое, как правило, в результате переработки органических удобрений. Существуют даже проекты разной степени проработанности, направленные на получение биотоплива из целлюлозы и сахарного тростника, но эти технологии находятся в ранней стадии коммерциализации. Различают жидкое биотопливо (для двигателей внутреннего сгорания, к примеру этанол, метанол, биодизель), твердое биотопливо (дрова, солома) и газообразное (биогаз, водород).

Биоэтанол – обычный этанол, получаемый в процессе переработки растительного сырья для использования в качестве биотоплива. Мировое производство биоэтанола в 2010 году составило 44,3 млрд литров, из которых 45% пришлось на Бразилию и 44,7% - на США. По Российской Федерации обработанных статистических данных нет.

Этанол в Бразилии производится преимущественно из сахарного тростника, а в США – из кукурузы. Производство этанола из тростника экономически более выгодно, чем из кукурузы. Интересно, что правительство США предоставляет производителям этанола налоговый кредит (но не субсидии) до \$0,51 за галлон этанола. Бразильский этанол дешевле из-за низких заработных плат у сборщиков сахарного тростника.

Этанол можно считать подходящим альтернативным топливом для двигателей с искровым зажиганием (SI), поскольку он демонстрирует некоторые физические свойства и свойства горения, аналогичные бензину, и его можно производить из возобновляемых источников энергии. В то время как большая часть этанола сегодня производится из зернового крахмала (в США), сахарного тростника (в Бразилии) и рапсового масла (Европа) [1], промышленность внедряет новые технологии для переработки различных видов отходов биомассы, кукурузы и ячменя. для производства новых видов биотоплива с низким содержанием углерода, которые могут достичь целевых

показателей использования возобновляемых источников энергии для транспортного сектора.

В Европейском Союзе рыночный бензин может содержать до 10% этанола по объему (E10). До сих пор бензин E10 был представлен только в Финляндии, Франции, Германии и Бельгии, тогда как в других странах по-прежнему используется E5. Одна из целей ЕС состоит в том, чтобы к 2020 году 10% транспортного топлива обеспечивалось из возобновляемых источников. Биотопливо нового поколения требуется для снижения интенсивности парниковых газов, образующихся в результате использования топлива; по этой причине ЕС устанавливает строгие критерии устойчивости, чтобы избежать процесса косвенного изменения землепользования (Директива 2018/2001).

Этанол в двигателях SI увеличивает эффективность сгорания, в основном за счет более высокой скорости пламени и содержания кислорода. Скрытая теплота испарения этанола в 2–3 раза выше, чем у бензина; это охлаждает воздух, поступающий в двигатель, и увеличивает объемную эффективность и удельную мощность.

Более того, более высокая температура самовоспламенения, скрытая теплота парообразования и исследовательское октановое число этанола могут снизить склонность двигателя к детонации [2].

Несмотря на эти выгодные характеристики, чистый этанол нелегко использовать в качестве транспортного топлива, главным образом потому, что его низкая теплотворная способность и низкая летучесть затрудняют холодный пуск, особенно в холодном климате.

Самый распространенный способ решить эту проблему — смешать этанол с гораздо более летучим топливом, таким как бензин.

Смеси этанола и бензина широко изучались в исследованиях двигателей [3,4], результаты показали, что смеси этанола и бензина обеспечивают более высокий КПД двигателя по сравнению с чистым бензином.

Однако низкие уровни этанола могут способствовать более легкому испарению бензина, поэтому смеси с низким содержанием этанола могут увеличить выбросы в результате испарения в транспортных средствах.

По этой причине производители автомобилей разработали автомобили с гибким топливом, способные работать с уровнями этанола в диапазоне от 0% до 85%. Эти транспортные средства в настоящее время очень популярны в Бразилии и Швеции, и их будущая популярность в основном будет зависеть от стратегии, принятой для увеличения доли биотоплива на рынке.

Более высокие процентные содержания этанола обычно используются в Бразилии и США с целью снижения зависимости от ископаемого топлива и улучшения характеристик двигателя [5]. E85 (15% бензина плюс 85% этанола по объему) обычно представляет собой смесь с наибольшим количеством биоэтанола, которую можно найти в Соединенных Штатах с более чем 3000 заправочными станциями [6]. E85 имеет октановое число 106, что значительно ниже, чем у чистого этанола, но все же выше, чем у бензина (95).

Такая смесь бензина и этанола с высоким содержанием этанола менее летучая, чем смеси бензина и этанола с низким содержанием этанола, и приводит к более низким выбросам в результате испарения. С другой стороны, по сравнению с бензином, этанолу требуется более высокое соотношение топлива/воздух для стехиометрического сгорания, и он имеет более низкую низшую теплотворную способность.

Это означает, что топливу на основе этанола требуется более высокий массовый расход топлива и, следовательно, большая длительность импульса впрыска, что приводит к большей склонности к смачиванию стенок цилиндра и поршня.

Обычно бензин и этанол смешивают снаружи в определенном соотношении перед использованием в качестве топлива. Однако новая стратегия двойного впрыска через порт может обеспечить большую гибкость: разные количества двух разных видов топлива могут по

отдельности и одновременно впрыскиваться во впускной коллектор, что позволяет использовать разные соотношения смешивания. Соотношение альтернативных и ископаемых видов топлива в смеси может быть мгновенно изменено в зависимости от потребности двигателя и наличия топлива в автомобиле. Таким образом, стратегия двойного впрыска в порт предлагает альтернативный подход для достижения строгих целей по выбросам и будущего законодательства о биотопливе [7,8].

В настоящее время нет информации о влиянии смесеобразования на производительность, сгорание и выбросы. По этой причине в этой статье для E85 сравнивались предварительно смешанная стратегия PFI и эквивалентная двойная инъекция через порт.

Рабочие характеристики и выбросы были изучены в различных двигателях SI, работающих на E85, с точки зрения теплового КПД, оксида углерода (CO), оксидов азота (NO<sub>x</sub>), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и несгоревших углеводородов (HC) [9,10]. Многие исследователи сообщили, что смешанное этанольное топливо в двигателе SI значительно снизило содержание HC и CO. Однако изменения содержания CO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> сильно зависели от типа двигателя и условий эксплуатации. Общеизвестно, что топливо со смесью этанола имеет более высокие выбросы массы твердых частиц (PM) и числа частиц (PN), чем бензин в двигателях с непосредственным впрыском (DI) SI, в основном из-за более низких характеристик испарения этанола при температуре окружающей среды ниже 300 К.

## **1 Альтернативное топливо E85, его свойства и перспективы**

### **1.1 Спирты как топливо для двигателей внутреннего сгорания**

**ЭТАНОЛ.** Этанол можно производить из сельскохозяйственных продуктов, таких как сахарный тростник, кукуруза, картофель и т.д. Преимущество использования первичных спиртов в качестве топлива заключается в том, что они могут производиться внутри страны и могут снизить выбросы CO и HC. Спирты, как правило, намного более эффективны и обеспечивают более чистые характеристики горения по сравнению с топливом на основе нефти, таким как бензин. Они имеют более высокое октановое число, что позволяет разрабатывать специализированные двигатели на этаноле для более высоких степеней сжатия, не опасаясь детонации. Однако использование этанола оказывает дополнительное давление на и без того скудную доступность продуктов питания из-за диверсификации земель для производства этанола. Следовательно, необходимо изучить альтернативные ресурсы для производства спирта, чтобы сделать его устойчивым топливом [11].

**МЕТАНОЛ.** На протяжении всей истории производства энергии из углеродных источников наблюдается постоянный переход к низкоуглеродным видам топлива (более низкое соотношение C/H). Переход от топливной древесины к ископаемому углю с последующим переходом на нефть и, наконец, на природный газ в настоящее время, предполагает естественную адаптацию первичного топлива, богатого водородом, такого как метанол. Преимущества метанола включают более низкие выбросы, улучшенный тепловой КПД двигателя при торможении и меньшую опасность возгорания из-за меньшего диапазона воспламеняемости по сравнению с бензином. Метанол можно производить из малоценных сельскохозяйственных отходов, биомассы и других углеродсодержащих первичных источников, таких как природный газ, уголь и т.д. [12]

По данным Института метанола США, двигатели, работающие на метаноле, демонстрируют прирост энергоэффективности на 50% по сравнению с бензином. Поэтому метанол широко используется в автоспорте [13].

Излишки метана можно использовать для производства метанола для транспорта, потенциально снижая выбросы парниковых газов. CO<sub>2</sub>, образующийся при сжигании метанола, используется заводами и за короткий период времени превращается обратно в сельскохозяйственные отходы, которые в дальнейшем можно использовать для производства метанола. Таким образом, метанол имеет гораздо более короткое время рециркуляции по сравнению с ископаемым топливом, что делает его возобновляемым топливом. При производстве метанола из сельскохозяйственных и муниципальных твердых отходов (ТБО) будут использоваться эти ресурсы, которые в противном случае сбрасываются на свалки и водоемы или сжигаются. Все эти средства экологически небезопасны. Также уголь можно превратить в метанол в процессе газификации и использовать в транспортном секторе в качестве топлива.

В отличие от КППГ или водорода, метанол не требует какой-либо уникальной распределительной сети. Потенциально его можно откачивать с помощью существующих бензиновых и дизельных топливных насосов, что позволяет сэкономить значительную сумму денег и избежать необходимости строительства дополнительной инфраструктуры. Знание свойств топлива необходимо для проектирования и производства систем сгорания, систем хранения топлива, а также систем обращения с топливом и его распределения.

Свойства топлива существенно влияют на характеристики двигателя, выбросы и сгорание; следовательно, важно понимать свойства метанола по сравнению с обычным топливом. В таблице 1 сравниваются некоторые важные топливные свойства метанола, дизельного топлива, этанола и бензина [14].

Таблица 1 – Свойства метанола по сравнению с другими видами топлива

| Свойство  | Метанол            | Спирт этиловый                   | Дизельное топливо               | Бензин                          |
|---|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Химическая формула                                  | CH <sub>3</sub> OH | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | C <sub>8</sub> -C <sub>25</sub> | C <sub>4</sub> -C <sub>12</sub> |
| Углерод (мас.%)                                     | 38                 | 52                               | 85                              | 86                              |
| Водород (мас.%)                                     | 12                 | 13                               | 15                              | 14                              |
| Кислород (мас.%)                                    | 50                 | 35                               | 0                               | 0                               |
| Молярная масса (кг/кмоль)                           | 32                 | 56                               | 183                             | 114                             |
| Плотность жидкости (кг/м <sup>3</sup> )             | 798                | 794                              | 840                             | 740                             |
| Низшая теплота сгорания (МДж/кг)                    | 20.1               | 27.0                             | 42.7                            | 44                              |
| Температура кипения (°С при 1 бар)                  | 65                 | 78                               | 180-360                         | 27-245                          |
| Давление пара (бар при 20°С)                        | 0.13               | 0.059                            | ~0                              | 0.25-0.45                       |
| Кинематическая вязкость (сСт при 20°С)              | 0.74               | 1.2                              | 2.5-3.0                         | 0.6                             |
| Объемный модуль (Н/мм <sup>2</sup> при 20°С, 2 МПа) | 823                | 902                              | 553                             | 1300                            |
| Цетановое число                                     | <5                 | 8                                | 38-53                           | -                               |
| Октановое число                                     | 109                | 109                              | 15-25                           | 90-100                          |
| Температура самовоспламенения на воздухе (°С)       | 470                | 362                              | 250-450                         | 250-460                         |
| Теплота испарения (кДж/кг при 1 бар)                | 1089               | 841                              | 250                             | 375                             |
| Минимальная энергия зажигания (мДж при α=1)         | 0.21               | 0.65                             | 0.23                            | 0.8                             |
| Стехиометрическое соотношение воздух/топливо        | 6.5                | 9.1                              | 14.6                            | 14.7                            |
| Пиковая температура пламени (°С при 1 бар)          | 1890               | 1920                             | 2054                            | 2030                            |
| Пределы воспламеняемости (об.%)                     | 6-36               | 3-19                             | 0.5-7.5                         | 1.4-7.6                         |
| Температура вспышки (°С)                            | 12                 | 14                               | 52                              | -45                             |

Метанол – это бесцветный первичный спирт без запаха, который является жидкостью при комнатной температуре и с ним можно обращаться, как и с другими видами топлива на нефтяной основе, такими как бензин и дизельное топливо [15].

## 1.2 Экспериментальное сравнительное исследование производительности и выбросов E85 с использованием различных подходов к впрыску в двигателе PFI SI с турбонаддувом

В таблице 2 показан ряд выбранных свойств, относящихся к анализу, проведенному в этой работе, они даны для давления окружающей среды 1,0 бар и взяты из научной литературы [15,16].

Таблица 2 – Характеристики тестового топлива

|   |                       |                                  |   |
|---|-----------------------|----------------------------------|---|
| Характеристики                                  | Бензин (95 RON EN228) | Этиловый спирт                   | E85                                       |
| Химическая формула                              | C5-C11                | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH - бензин |
| Плотность при 15 °С (кг/м <sup>3</sup> )        | 735                   | 790                              | 780                                       |
| Исследовательское число Octane                  | 95                    | 108                              | 106                                       |
| Низшая теплотворная способность (МДж/кг)        | 42,5                  | 26,9                             | 29,2                                      |
| Углеродоемкость (гСО <sub>2</sub> /МДж)         | 74,4                  | 71                               | 71,5                                      |
| Скрытая теплота парообразования (кДж/кг)        | 370                   | 840                              | 770                                       |
| Стехиометрическое соотношение воздуха и топлива | 14,7                  | 8,95                             | 10  |
| Температура кипения (°С)                        | 30-190                | 78                               | 75-84,8                                   |

### 1.2.1. Влияние режима впрыска этанол-бензин на сгорание и характеристики двигателя

Как уже упоминалось в предыдущем разделе, выбранное эталонное состояние соответствовало по энергоемкости базовому бензину, богатой смеси ( $\lambda = 0,90$ , SA = 11 CAD ATDC, IMEP = 17,5 бар), согласно стандартной карте двигателя ECU, без детонации. Чтобы проиллюстрировать влияние режима впрыска этанола на сгорание и производительность, основные параметры двигателя были получены в условиях обогащенной смеси, как показано в таблице 3.

Таблица 3 – Тестовые характеристики двигателя при работе E85

| $\lambda = 0.90$  | IMEP  | Pmax  | MFB50      | TIT |
|-------------------|-------|-------|------------|-----|
| SA = -11 CAD ATDC | (bar) | (bar) | (CAD ATDC) | (K) |
| Бензин            | 17,5  | 75,4  | 17,66      | 833 |
| Двухтопливный E85 | 17,3  | 79,2  | 15.42      | 799 |
| смесь E85         | 17.2  | 77,2  | 15.27      | 813 |

На E85 незначительно снижается IMEP по сравнению с бензином, а также температура на входе в турбину, хотя тепловой КПД остается практически неизменным (~0,31). Глядя на параметр сгорания, E85 приводит к более быстрому сгоранию, чем бензин, с более высоким и более ранним пиковым давлением в цилиндре ближе к ВМТ. Эти результаты хорошо

показаны на рисунке 1, на котором представлены профили давления в цилиндре и скорости тепловыделения [17].

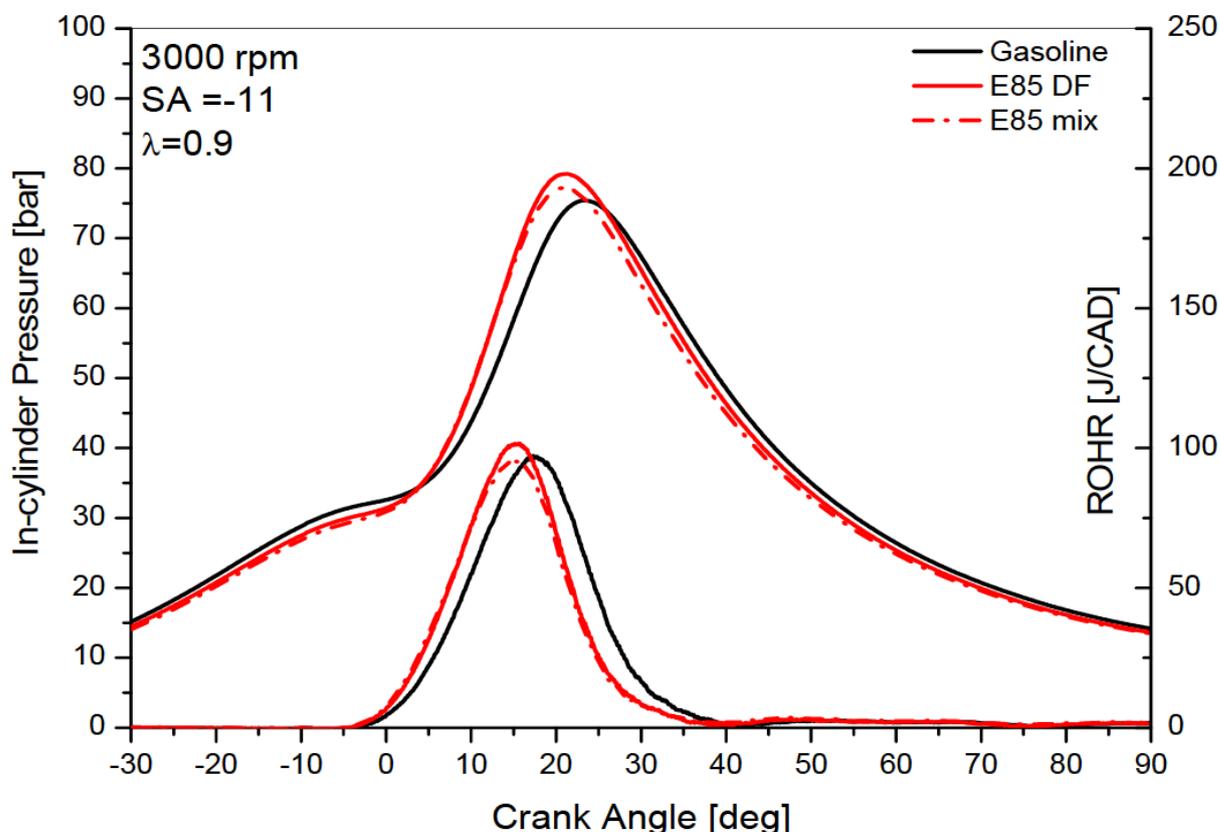


Рисунок 1 – Давление в цилиндре и скорость тепловыделения в цилиндре №2 для различных топлив при SA = -11 CAD ATDC и  $\lambda = 0,9$ .

В такте сжатия давление у E85 ниже, чем у бензина. Это связано с тем, что E85 имеет более высокую скрытую теплоту парообразования. Кроме того, небольшую разницу между двумя режимами впрыска можно объяснить скоростью испарения топлива. Более подробно, несмешанный бензин испаряется быстрее, чем бензин в смеси. Таким образом, при двойном впрыске в камеру сгорания вводится меньше жидкого топлива по сравнению со смешанным режимом и в воздух отводится меньшее количество тепла (температура и давление выше у E85 при двойном впрыске).

E85 увеличивает скорость выделения тепла, вызывая более высокую пиковую температуру и давление в цилиндрах с ускоренным сгоранием. Небольшое снижение IMEP для E85 можно объяснить с помощью анализа

ROHR. Даже если бензин показывает более низкий пик, во время такта расширения выделяется большее количество тепла [18].

В следующих разделах показаны результаты работы двигателя и выбросов отработавших газов, полученные в условиях богатой, стехиометрической и обедненной смеси для двух режимов впрыска в результате изменения угла опережения зажигания до нового режима ограничения детонации. Влияние режима впрыска на IMEP при различных моментах зажигания показано на рисунке 2 [19].

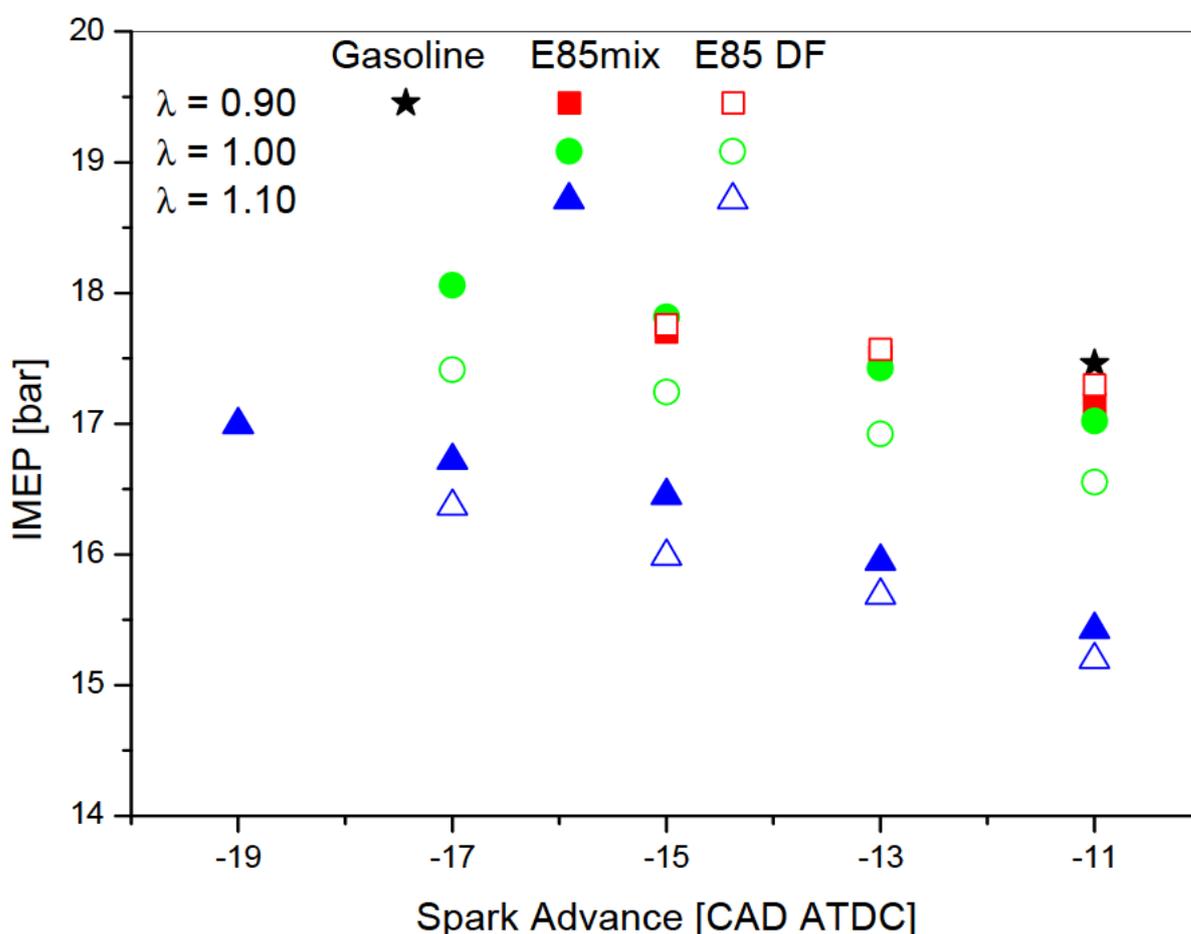


Рисунок 2 – Показано среднее эффективное давление по отношению к СА при различных значениях  $\lambda$ .

На графике показаны исходные условия (черная сплошная звезда) и три относительных соотношения воздух-топливо ( $\lambda = 0,9, 1$  и  $1,1$ ). Эффект охлаждения наддува в сочетании с присущей этанолу химической

антидетонационной способностью позволяет устанавливать опережающее время зажигания по сравнению со случаем полного бензина и даже со стехиометрическими и обедненными условиями. IMEP снижается при переключении с богатого на стехиометрическое и обедненное состояние при фиксированном SA. В любом случае, нагрузку можно компенсировать углом опережения зажигания, учитывая, что E85 позволяет увеличить предел детонации по степени сжатия до 19. С другой стороны, увеличение пикового давления в цилиндре выше порогового значения (~ 90 бар) препятствует более опережающему времени зажигания, чтобы защитить компоненты двигателя от механического повреждения. Для всех условий стандартное отклонение значения IMEP ниже 3% [20].

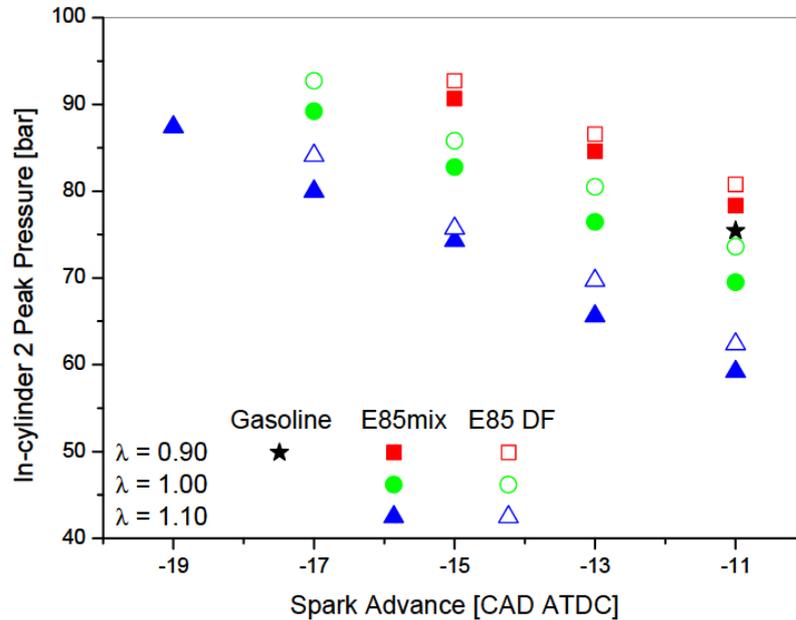
Очень низкие уровни IMEP были измерены для  $\lambda = 1,1$ . При фиксированном опережении зажигания IMEP был выше для смешанной смеси по сравнению с двойным впрыском, за исключением богатого случая, когда два значения почти перекрывались. Наилучшие характеристики двигателя обеспечивала смешанная смесь при  $\lambda = 1$ , SA -17, которая давала наибольшее значение IMEP.

Профиль пикового давления в цилиндре (рисунок 3а) ясно показывает, что обогащенный вариант E85 приводит к значительно более высоким пиковым значениям по сравнению со стехиометрическим и обедненным случаем для всех SA, как и ожидалось.

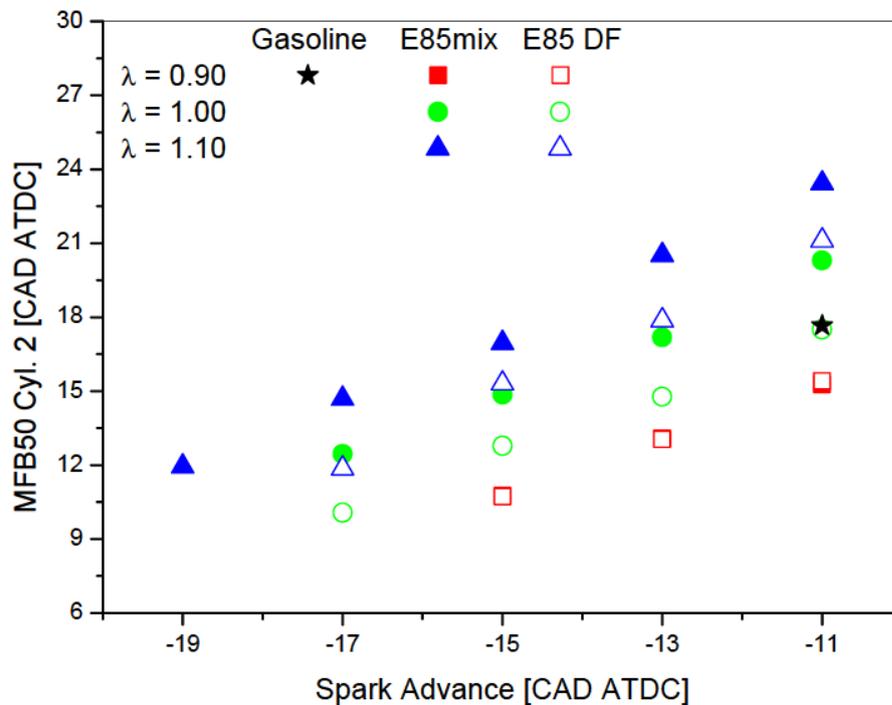
Режимы двойного впрыска топлива всегда обеспечивают более высокое значение  $P_{max}$ , чем в случае смеси, это поведение согласуется с тенденциями фазирования сгорания (MFB50), показанными на рисунке 3б. Фактически, E85 двойного впрыска укорачивает фазу сгорания при каждом SA и соотношении воздуха и топлива, за исключением богатых условий, когда эти два поведения почти перекрываются. Это делает пик давления при сгорании ближе к ВМТ, что приводит к более высоким значениям [21].

Что касается влияния соотношения воздуха и топлива, то, как и ожидалось, более продвинутая фаза сгорания обеспечивается богатой

смесью, в то время как обедненная смесь снижает пиковое давление в цилиндре и обеспечивает более медленное сгорание с более высокими значениями MFB50.



a)



б)

Рисунок 3 – Профиль пикового давления в цилиндре (а) и профиль фазирования сгорания MFB50 (б) в зависимости от SA при различных значениях  $\lambda$ .

На рисунке 4 показаны профили давления в цилиндре и скорости тепловыделения двигателя E85 при  $\lambda = 1,0$  и  $1,1$ .

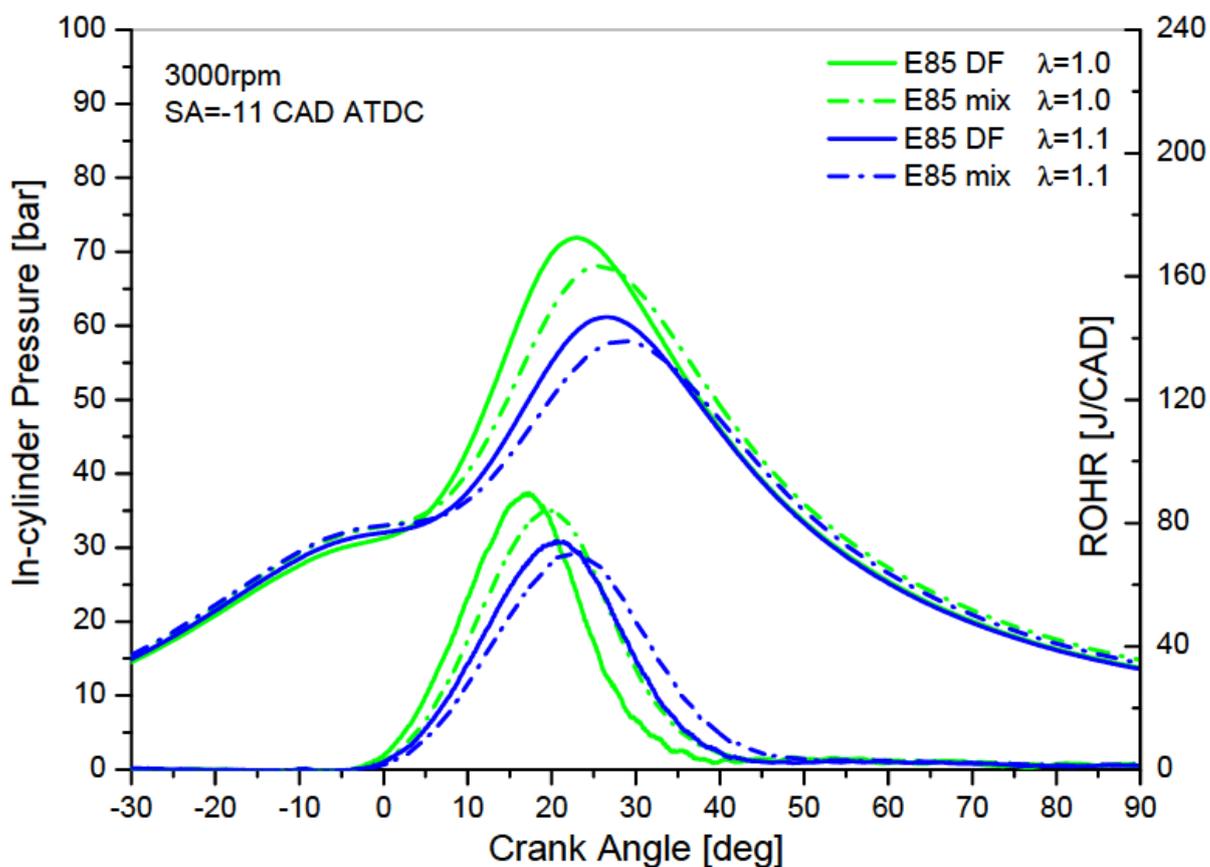


Рисунок 4 – Давление в цилиндре и скорость тепловыделения в цил. № 2 для E85 при  $\lambda = 1$  и  $1,1$  при SA = -11 CAD ATDC

В условиях впрыска смешанного топлива для  $\lambda$  использование смеси этанола дает более низкое пиковое давление и более длительный интервал сгорания. Несмотря на более низкий пик давления, увеличение продолжительности сгорания приводит к постоянно более высокому значению давления во время такта расширения, что приводит к увеличению теплового КПД, что подтверждается результатами, представленными на рисунке 5 [22].

## 1.2.2 Влияние режима впрыска этанола и бензина на выбросы ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

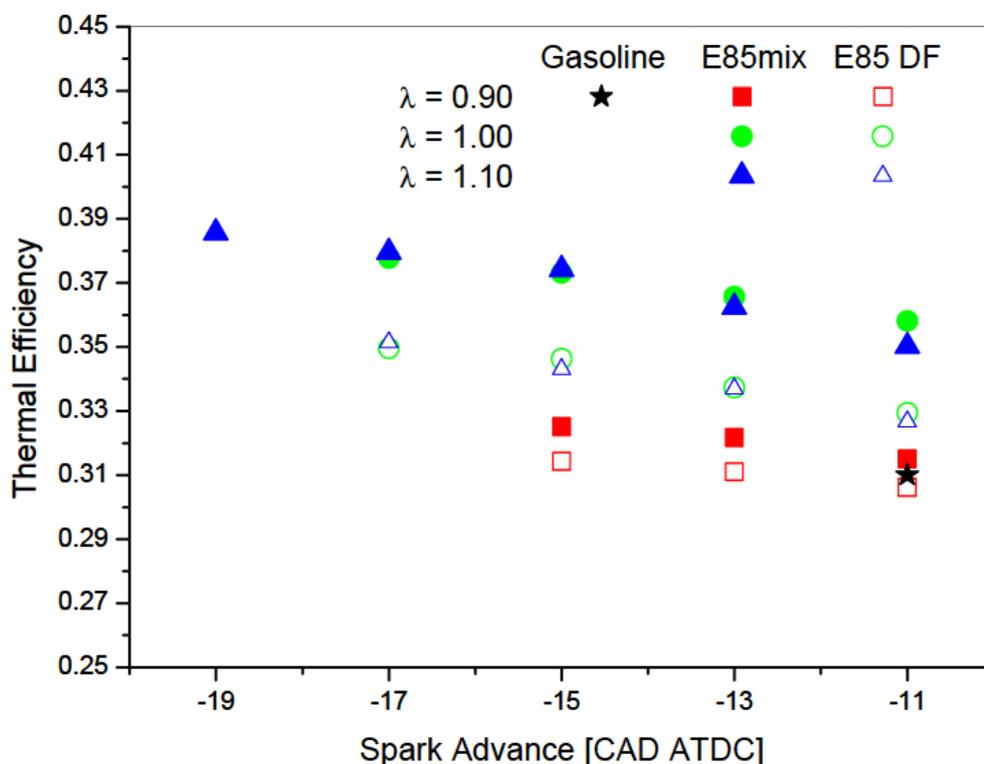


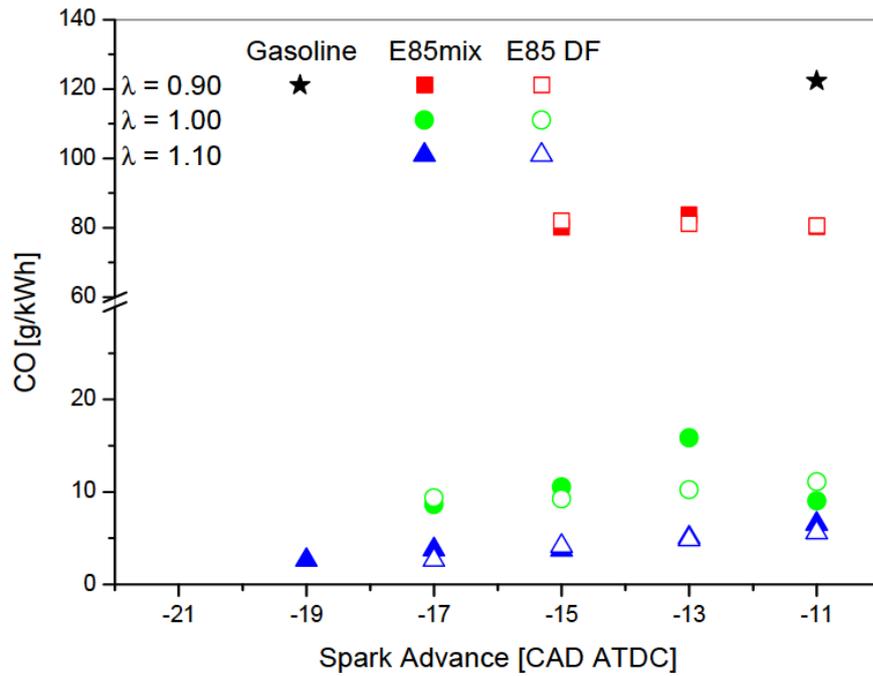
Рисунок 5 – Приведенный профиль теплового КПД по опережению искры при различных значениях  $\lambda$

На рисунках 6–8 показано изменение удельных выбросов отработавших газов в зависимости от угла опережения зажигания для различных соотношений воздух-топливо и режимов впрыска. На рисунке 6а,б показано влияние режима впрыска и соотношения воздух-топливо на CO и CO<sub>2</sub> [23].

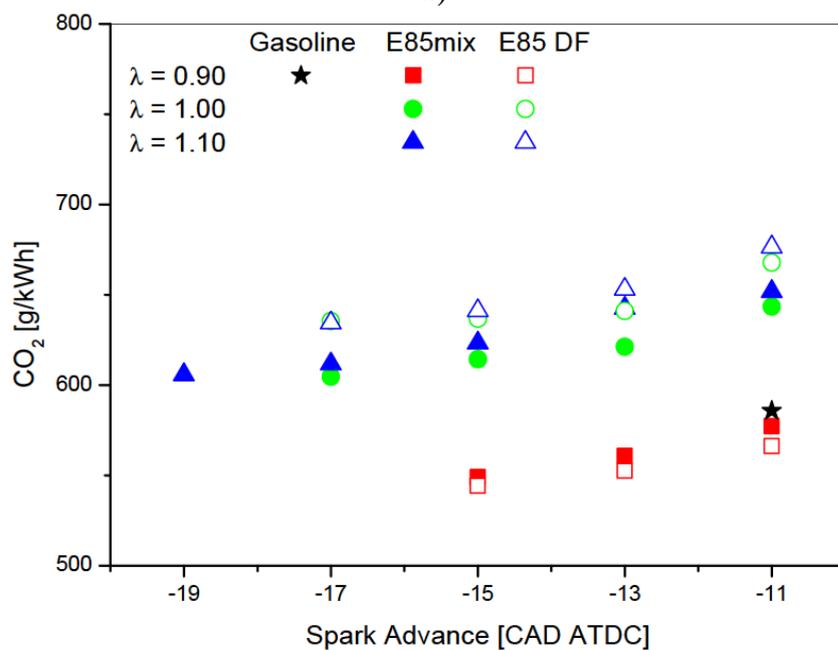
При переходе с бензина на E85 более полное сгорание за счет содержания кислорода в этаноле приводит к снижению выбросов CO.

Для E85 богатый вариант показывает высокое содержание CO и более низкое значение CO<sub>2</sub> по сравнению с другими значениями лямбда, что указывает на низкую эффективность сгорания. В стехиометрических и бедных условиях более высокое содержание кислорода позволяет очень сильно снизить выбросы CO до значений, близких к нулю. Для каждого

режима впрыска при переключении с богатого на стехиометрическое и обедненное состояние обнаруживается увеличение  $\text{CO}_2$ , несмотря на меньшее количество впрыскиваемого топлива. Это связано с лучшим сгоранием стехиометрической и обедненной смеси, что подтверждается одновременным снижением содержания  $\text{CO}$  [24].



a)



б)

Рисунок 6 – Удельные выбросы  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  в зависимости от угла опережения зажигания при различных значениях  $\lambda$ . (а)  $\text{CO}$ ; (б)  $\text{CO}_2$ .

Получаются незначительные различия в удельных выбросах CO по сравнению с режимом впрыска. Удельный выброс CO<sub>2</sub> выше в условиях двойного впрыска топлива для обедненной и стехиометрической смеси.

На рисунке 7 показаны удельные выбросы углеводородов в зависимости от угла опережения зажигания для различных соотношений воздух-топливо и режимов впрыска топлива. Поскольку ПИД, используемый для измерения содержания несгоревших углеводородов (CH), является счетчиком ионов углерода и его отклик прямо пропорционален количеству углерода в анализируемом газе, в случае обнаружения CH из чистого этанола чувствительность снижается на 0,46 [18]. В результате следующие выбросы CH были скорректированы с учетом массовой доли этанола по уравнению, предложенному Kar и др. [19].

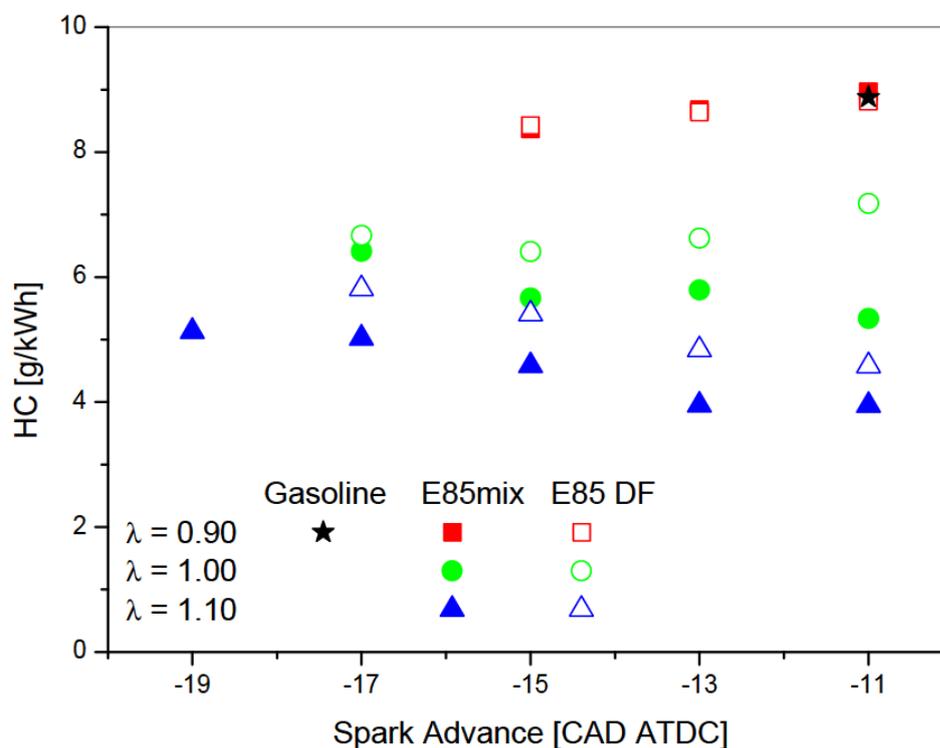


Рисунок 7 – Выбросы CH по ходу искры при различных значениях λ

Переход с бензина на E85 в богатых условиях не приводит к снижению HC. Можно ожидать снижения содержания углеводородов, поскольку этанол обеспечивает более быстрое и полное сгорание, в том числе благодаря

кислороду в молекуле. В любом случае, для выбранных условий эксплуатации при впрыске E85 общая масса топлива выше и будет выделяться больше СН. Эти два фактора компенсируют друг друга, и концентрация СН остается неизменной. Снижение HC достигается за счет увеличения соотношения воздух-топливо. Режим двойного впрыска топлива дает более высокие уровни углеводородов, чем смесь, для всех условий, за исключением богатого случая, когда наихудшая эффективность сгорания уменьшает разницу до тех пор, пока тенденции не перекрываются. Разницу между двумя режимами впрыска можно объяснить тем фактом, что смешанный режим вызывает увеличение продолжительности сгорания, что приводит к постоянно более высокому значению давления во время такта расширения. Более высокое давление (и температура) смеси E85 в такте расширения способствует окислению несгоревшего топлива, попавшего в щели во время такта сжатия [25].

Влияние режима впрыска и  $\lambda$  на удельные выбросы NO показано на рисунок 8. Как предполагают многие исследователи [26], термическое образование NOx является доминирующим механизмом выброса NOx двигателями SI, работающими как на бензине, так и на этаноле. Согласно этому механизму, образование NO прямо пропорционально температуре, достигаемой в камере сгорания, и концентрации кислорода. В богатом состоянии при переходе с бензина на E85 происходит небольшое снижение выбросов NOx. Это может быть связано с более низкой адиабатической температурой пламени этанола, которая замедляет процесс образования NOx для E85.

Обеднение смеси вызывает увеличение выбросов NOx, вероятно, из-за большего количества кислорода, доступного для окисления N<sub>2</sub>. В бедных и стехиометрических условиях режим двойного впрыска топлива дает более высокие уровни NO, чем смешанный вариант. Это согласуется с более высоким пиковым значением давления при использовании двойного впрыска топлива.

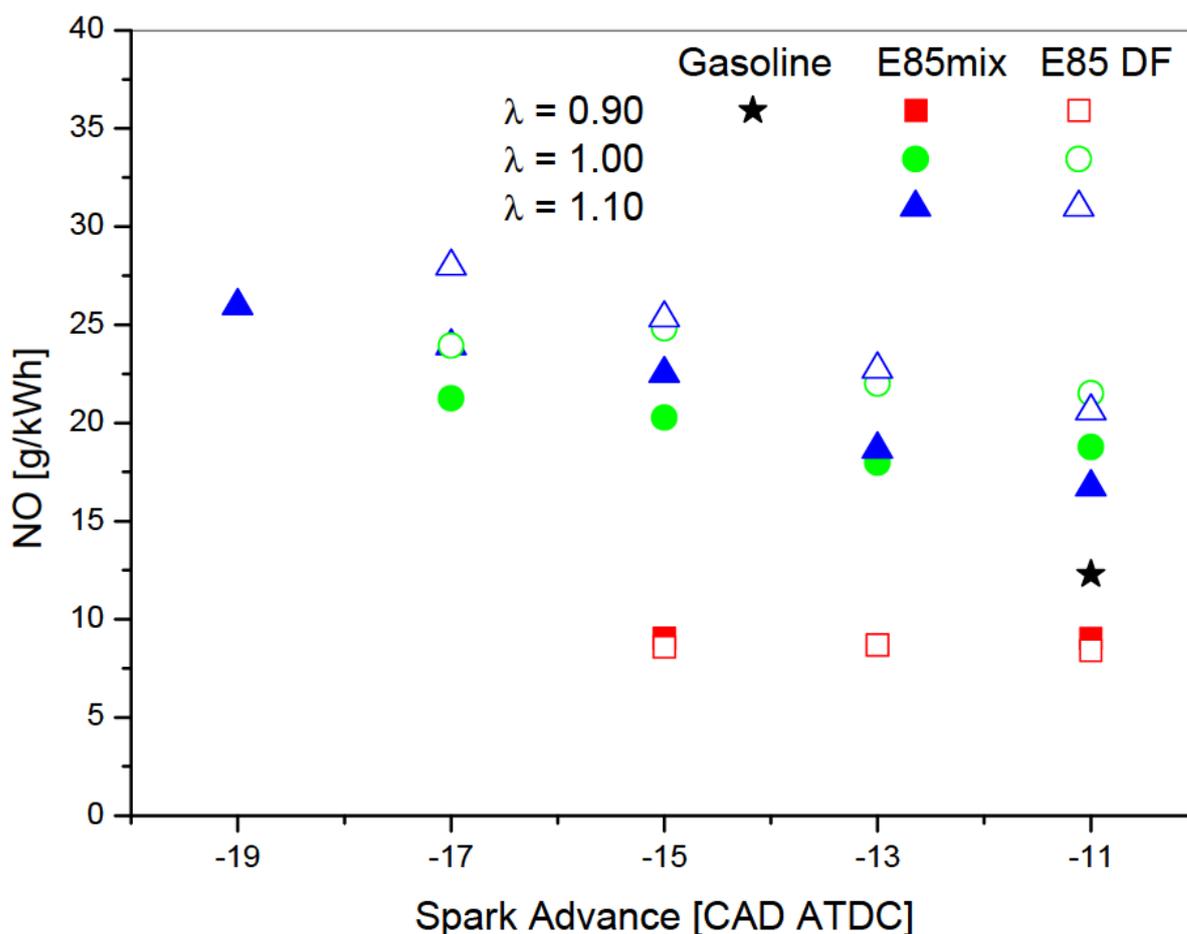


Рисунок 8 – Выбросы NO по ходу искры при различных значениях  $\lambda$ .

Согласно уравнению Su и др. [27], эффективность сгорания ( $\eta_c$ ) можно оценить как функцию измеренных значений концентрации выбросов (HC, CO, CO<sub>2</sub>). Результаты представлены на рисунке 9 в зависимости от опережения зажигания для различных тестовых случаев. Эффективность сгорания почти не зависит от опережения зажигания. Как правило, основным параметром, влияющим на эффективность сгорания, является  $\lambda$  со значительным увеличением для обедненной смеси для обоих режимов впрыска. Эффективность E85 всегда выше, чем у эталонного бензина для обоих режимов впрыска. Двухтопливный режим показывает несколько более высокие значения полноты сгорания, чем смешанный режим, в соответствии с более полным испарением топлива перед поступлением в камеру сгорания. Тем не менее, двух топливный впрыск приводит к ухудшению фазировки тактов двигателя, что снижает тепловую эффективность [28].

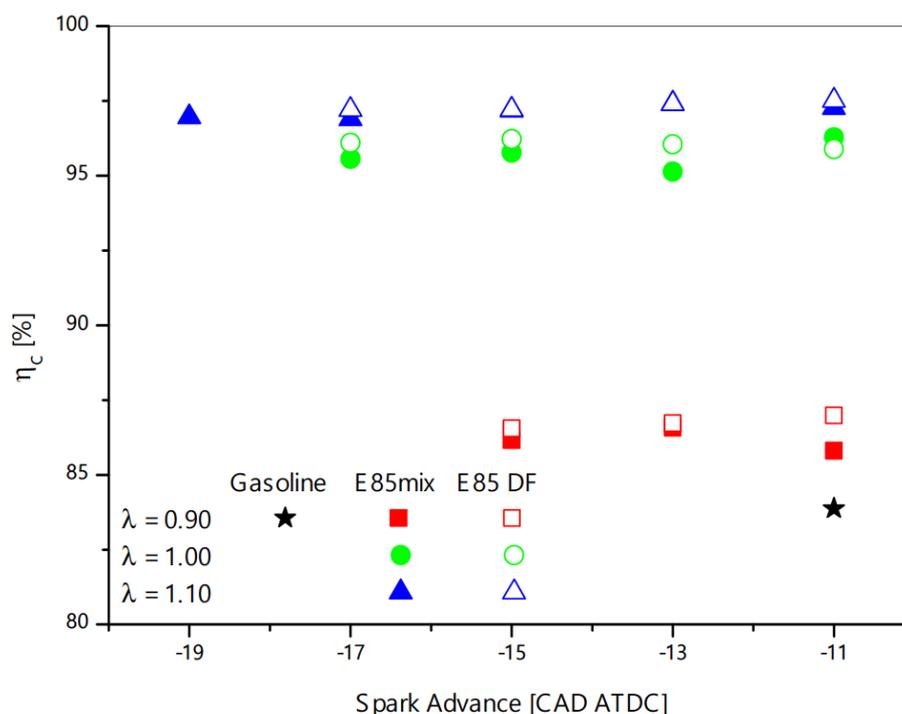


Рисунок 9 – Эффективность сгорания по оперению искры при различных значениях  $\lambda$

### 1.2.3 Обобщение обзора экспериментальных исследований применения E85 в двигателе с искровым зажиганием

В этом исследовании влияние режима впрыска E85 на рабочие характеристики и выбросы газов было изучено на двигателе SI с турбонаддувом, при 3000 об/мин, высокой нагрузке двигателя и различных соотношениях воздух-топливо [29].

Сравнивались два режима впрыска E85: двухтопливный — этанол и бензин впрыскиваются отдельно во впускной коллектор; и смешанный - этанол и бензин смешиваются с образованием E85, а затем впрыскиваются.

Основным преимуществом использования двойного впрыска топлива является гибкость системы, которая может легко подавать в двигатель различные проценты этанола. И наоборот, система впрыска более сложна, поскольку требует двух отдельных контуров и баков [30].

В экспериментах относительное соотношение воздух-топливо ( $\lambda$ ) менялось от богатого (0,9) до стехиометрического (1) и обедненного состояния (1,1). Начальный угол опережения зажигания был установлен в

соответствии со стандартной картой ECU. Затем был использован E85, и время зажигания было увеличено до нового предела детонации [31].

E85 позволил увеличить угол опережения зажигания и устранить перерасход топлива: увеличение угла опережения зажигания привело к небольшому увеличению теплового КПД без снижения нагрузки на двигатель; обеднение смеси обеспечило дальнейшее повышение теплового КПД с максимальным значением для смеси E85 около 0,39 по сравнению с 0,31, достигнутым в эталонном случае с бензином [32].

Комбинированный эффект содержания кислорода в этаноле и обеднения заряда привел к более полному процессу окисления отработавших газов с уменьшением выбросов CO и HC. Напротив, выбросы NO увеличились из-за более высокого соотношения воздух-топливо и повышения пикового давления и температуры из-за увеличения времени зажигания [33].

Режим впрыска оказал значительное влияние на процесс сгорания: двойной впрыск топлива способствовал более быстрому испарению бензина, чем режим смешения, сокращая продолжительность сгорания и снижая тепловую эффективность. Более высокое давление в цилиндре и пиковая температура обеспечили небольшое увеличение NO и HC по сравнению со смешанным режимом [34].

Выводы по первому разделу

Проведенный обзор показал значительный интерес к смесевому топливу E85, которое в будущем может стать серьезной альтернативой бензину. Многими исследователями отмечено, что работа на E85 позволяет повысить детонационные пределы, что позволит снизить эффект снижения мощности из-за меньшей объемной теплотворной способности спиртового топлива. Также отмечается большая полнота сгорания, позволяющая снизить токсичность по продуктам неполного окисления CO и CH. Большие температуры сгорания повысили токсичность по NOx.

## 2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Согласно заданию на бакалаврскую работу, требуется провести тепловой расчет для оценки влияния альтернативного топлива E85 на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием. Для этого приводится сравнение результатов расчета для 3-х видов топлива (таблица 2): бензин (базовое топливо), спирт (этанол) и альтернативное топливо E85 (85% этанола и 15% бензина) [35,36].

Основные характеристики двигателя на базе двигателя SAAB B234 принятого для расчета приведены в таблице 4, а общий вид его конструкции на рисунке 10 [37].

Таблица 4 – Технические характеристики двигателя

|  |           |
|--|-----------|
| Тип  | 4-тактный |
| Число и расположение цилиндров   | 4 – рядно |
| Порядок работы цилиндров   | 1-3-4-2   |
| Диаметр цилиндров, мм  | 90        |
| Ход поршня, мм   | 79        |
| Длина шатуна, мм   | 147,5     |
| Рабочий объем, л   | 2,015     |
| Степень сжатия   | 11        |
| Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин                              | 4800      |
| Максимальный частота вращения коленчатого вала, об/мин                             | 5200      |
| Минимальная частота вращения коленчатого вала при режиме холостого хода, об/мин    | 840       |
| Номинальная мощность при частоте вращения коленчатого вала 5200 об/мин, кВт (л.с.) | 100       |
| Максимальный крутящий момент, Нм   | 220       |



Рисунок 10 – Общий вид двигателя SAAB B234

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе, с учетом рекомендаций по расчету основных параметров, предложенных в учебниках [1,3,4]. Результаты расчета представлены в виде таблиц и графиков.

Так как при изменении скоростного режима при работе на внешней скоростной характеристике максимальный коэффициент избытка воздуха ограничен 1 в связи с требованиями к токсичности отработавших газов, то результаты расчета параметров рабочего тела проводятся (таблица 5) для каждого вида топлива, без учета частоты вращения.

Таблица 5 – Результаты расчета параметров рабочего тела

| $L_0$ , кмоль<br>возд/кг<br>топл | $I_0$ , кг<br>возд/кг<br>топл | $M_1$ , кмоль<br>гор.см./кг<br>топл. | $M_{CO_2}$ , кмоль<br>CO <sub>2</sub> /кг топл. | $M_{H_2O}$ , кмоль<br>H <sub>2</sub> O/кг топл. | $M_{N_2}$ , кмоль<br>N <sub>2</sub> /кг топл. | $M_2$ , кмоль<br>пр.сг./кг<br>топл. | $\mu_0$  |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---|---|---|-------------------------------------|----------|
| Бензин Аи-95                     |                               |                                      |   |   |   |                                     |          |
| 0,51683                          | 14,957                        | 0,52552                              | 0,07125   | 0,0725  | 0,409327                                      | 0,553077                            | 1,052432 |
| Этанол                           |                               |                                      |   |   |   |                                     |          |
| 0,52345                          | 15,148                        | 0,57349                              | 0,054033  | 0,1103  | 0,415288                                      | 0,579622                            | 1,0107   |
| Альтернативное топливо Е85       |                               |                                      |   |   |   |                                     |          |
| 0,50165                          | 14,517                        | 0,55677                              | 0,052372  | 0,104395  | 0,399869                                      | 0,556636                            | 0,99976  |

Анализ результатов расчета процесса впуска (таблица 6) показал увеличение удельного объема рабочего тела в конце процесса наполнения при работе на спирте и Е85, что показывает снижение энергоемкости наполнения цилиндров количество заряда поступившего в цилиндр двигателя.

Таблица 6 – Результаты расчета процесса впуска

| $n$ ,<br>мин <sup>-1</sup> | $\Delta p_a$ , Мпа | $p_a$ , Мпа | $T_r$ , К | $p_r$ , Мпа | $\gamma_r$ | $T_a$ , К | $\eta_v$ | $V_a$ , м <sup>3</sup> /кг | $\omega_{вп}$ , м/с |
|----------------------------|--------------------|-------------|-----------|-------------|------------|-----------|----------|----------------------------|---------------------|
| Бензин Аи-95               |                    |             |           |             |            |           |          |                            |                     |
| 840                        | 0,00016            | 0,09984     | 1065      | 0,103878    | 0,031219   | 327,2379  | 0,9159   | 0,898671                   | 9,991764            |
| 2000                       | 0,00091            | 0,099092    | 1080      | 0,105645    | 0,031103   | 326,0446  | 0,922    | 0,9021498                  | 23,78991            |
| 3400                       | 0,00262            | 0,097376    | 1100      | 0,109699    | 0,031896   | 325,3579  | 0,9166   | 0,9161119                  | 40,44285            |
| 4800                       | 0,00523            | 0,094771    | 1142      | 0,115855    | 0,032703   | 325,41    | 0,9094   | 0,9414495                  | 57,09579            |
| 5200                       | 0,00614            | 0,093863    | 1150      | 0,118       | 0,033835   | 326,0292  | 0,889007 | 0,9523622                  | 61,85378            |
| Этанол                     |                    |             |           |             |            |           |          |                            |                     |
| 840                        | 0,00016            | 0,09984     | 995       | 0,103878    | 0,035905   | 328,1488  | 0,8524   | 1,0192887                  | 9,991764            |
| 2000                       | 0,00091            | 0,099092    | 1005      | 0,105645    | 0,035454   | 326,6451  | 0,8692   | 1,0222735                  | 23,78991            |
| 3400                       | 0,00262            | 0,097376    | 970       | 0,109699    | 0,03469    | 325,2702  | 0,8957   | 1,0359072                  | 40,44285            |

Продолжение таблицы 6

|                            |         |          |      |          |          |          |          |           |          |
|----------------------------|---------|----------|------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| 4800                       | 0,00523 | 0,094771 | 990  | 0,115855 | 0,035707 | 325,2967 | 0,8889   | 1,0644725 | 57,09579 |
| 5200                       | 0,00614 | 0,093863 | 1005 | 0,118    | 0,036532 | 326,0583 | 0,868704 | 1,0772842 | 61,85378 |
| Альтернативное топливо E85 |         |          |      |          |          |          |          |           |          |
| 840                        | 0,00016 | 0,09984  | 990  | 0,103878 | 0,036086 | 328,09   | 0,8524   | 1,0391906 | 9,991764 |
| 2000                       | 0,00091 | 0,099092 | 995  | 0,105645 | 0,035811 | 326,53   | 0,8692   | 1,0420576 | 23,78991 |
| 3400                       | 0,00262 | 0,097376 | 1035 | 0,109699 | 0,035099 | 325,55   | 0,8852   | 1,0572298 | 40,44285 |
| 4800                       | 0,00523 | 0,094771 | 1060 | 0,115855 | 0,036044 | 325,19   | 0,8889   | 1,0850937 | 57,09579 |
| 5200                       | 0,00614 | 0,093863 | 1075 | 0,118    | 0,037042 | 325,898  | 0,868704 | 1,0979707 | 61,85378 |

Анализ результатов расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения (таблица 7) показал снижение коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси при переходе на спирте и E85, причем на E85 он меньше единицы.

Таблица 7 – Результаты расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения

| $n$ ,<br>мин <sup>-1</sup> | $\mu$     | $n_l$    | Угол опережения<br>зажигания, ° ПКВ | $V_y$ , м <sup>3</sup> /кг | $P_y$ , МПа | $T_y$ , К |
|----------------------------|-----------|----------|-------------------------------------|----------------------------|-------------|-----------|
| Бензин Аи-95               |           |          |                                     |                            |             |           |
| 840                        | 1,0508449 | 1,3356   | 10                                  | 0,089553                   | 2,172364    | 709,5342  |
| 2000                       | 1,0508507 | 1,3355   | 13                                  | 0,095305                   | 1,993918    | 693,075   |
| 3400                       | 1,050812  | 1,3352   | 15                                  | 0,101211                   | 1,844321    | 680,8083  |
| 4800                       | 1,05077   | 1,3351   | 18                                  | 0,112012                   | 1,625624    | 664,114   |
| 5200                       | 1,050716  | 1,33507  | 22                                  | 0,126254                   | 1,393456    | 641,6511  |
| Этанол                     |           |          |                                     |                            |             |           |
| 840                        | 1,010329  | 1,3356   | 11                                  | 0,103435                   | 2,120387    | 707,2169  |
| 2000                       | 1,010333  | 1,3358   | 18                                  | 0,121628                   | 1,702135    | 667,571   |
| 3400                       | 1,010341  | 1,3359   | 20                                  | 0,129961                   | 1,558757    | 653,2221  |
| 4800                       | 1,010331  | 1,3359   | 23                                  | 0,145152                   | 1,3572      | 635,2394  |
| 5200                       | 1,010327  | 1,3358   | 26                                  | 0,160137                   | 1,197634    | 618,4206  |
| Альтернативное топливо E85 |           |          |                                     |                            |             |           |
| 840                        | 0,9998    | 1,3756   | 13                                  | 0,109782                   | 2,198561    | 763,2462  |
| 2000                       | 0,9998    | 1,3758   | 19                                  | 0,127274                   | 1,787877    | 719,5674  |
| 3400                       | 0,9998    | 1,3758   | 19                                  | 0,127274                   | 1,787877    | 719,5674  |
| 4800                       | 0,9998    | 1,3759   | 29                                  | 0,176074                   | 1,156993    | 644,2013  |
| 5200                       | 0,999768  | 1,375834 | 32                                  | 0,194512                   | 1,015388    | 624,5612  |

Анализ результатов коэффициентов термодинамического расчета (таблица 8) показал снижение коэффициента использования теплоты в связи с увеличением тепловых потерь в стенку цилиндра и систему охлаждения, связанных с увеличением продолжительности сгорания при работе на спирте и E85.

Таблица 8 – Коэффициенты термодинамического расчета

| $n$ , мин <sup>-1</sup>    | $\xi$ | $q_z$ , Дж/кг | $E_2$ , МПа | $\varphi_z$ , град, пкв. | $m$ |
|----------------------------|-------|---------------|-------------|--------------------------|-----|
| Бензин Аи-95               |       |               |             |                          |     |
| 840                        | 0,86  | 2296          | 56,206613   | 50                       | 3   |
| 2000                       | 0,88  | 2349,6        | 57,29843    | 56                       | 3   |
| 3400                       | 0,9   | 2401,2        | 57,663208   | 62                       | 3   |
| 4800                       | 0,9   | 2423,305      | 55,979451   | 68                       | 3   |
| 5200                       | 0,91  | 2423,305      | 55,979451   | 75                       | 3   |
| Этанол                     |       |               |             |                          |     |
| 840                        | 0,8   | 2133,2        | 46,041838   | 57                       | 3   |
| 2000                       | 0,82  | 2187,5        | 47,075564   | 62                       | 3   |
| 3400                       | 0,84  | 2242,5        | 47,624251   | 67                       | 3   |
| 4800                       | 0,86  | 2293,6        | 47,403113   | 73                       | 3   |
| 5200                       | 0,88  | 2345,077      | 47,890508   | 80                       | 3   |
| Альтернативное топливо E85 |       |               |             |                          |     |
| 840                        | 0,78  | 2073,5        | 43,897711   | 62                       | 3   |
| 2000                       | 0,8   | 2127,3        | 44,911366   | 68                       | 3   |
| 3400                       | 0,82  | 2182          | 45,404725   | 71                       | 3   |
| 4800                       | 0,84  | 2233,1        | 45,276443   | 78                       | 3   |
| 5200                       | 0,86  | 2284,115      | 45,766724   | 85                       | 3   |

Анализ результатов расчета процесса расширения и выпуска (таблица 9) показал, что при переходе на спирте и E85 происходит снижение температуры конца сгорания и отработавших газов, что приводит к ухудшению условий прогрева трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. Также следует отметить снижение степени последующего расширения, что показывает на сколько снизилось теплоиспользование при удлинении процесса сгорания.

Анализ результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 10) показал, снижение примерно на 17-20% мощностных показателей работы двигателя при переходе на спирте и E85, но в тоже время практически индикаторные характеристики двигателя на компримированном природном газе находятся в 2-3% выше характеристик при работе двигателя на E85. И если на низких частотах вращения показана максимальная эффективность при работе на бензине, то с ростом частоты вращения эффективность рабочего процесса на E85 увеличивается, и разница в мощности уменьшается.

Таблица 9 – Результаты расчета процесса расширения и выпуска

| $n$ ,<br>мин <sup>-1</sup> | $Vz'$ ,<br>м <sup>3</sup> | $Tz'$ , К | $Pz'$ , МПа | $\delta$ | $n_2$  | $P_b$ , МПа | $T_b$ , К | $T_r$ , К | $\Delta$ , % |
|----------------------------|---------------------------|-----------|-------------|----------|--------|-------------|-----------|-----------|--------------|
| Бензин Аи-95               |                           |           |             |          |        |             |           |           |              |
| 840                        | 0,2                       | 2555,25   | 3,680276    | 4,492591 | 1,188  | 0,617509    | 1926,162  | 1063,29   | -0,1602      |
| 2000                       | 0,2179                    | 2546,96   | 3,367097    | 4,13959  | 1,188  | 0,62278     | 1950      | 1079,52   | -0,0445      |
| 3400                       | 0,2458                    | 2532,78   | 2,968396    | 3,72678  | 1,188  | 0,62212     | 1978      | 1109,33   | 0,8481       |
| 4800                       | 0,2724                    | 2486,79   | 2,629664    | 3,45569  | 1,189  | 0,60207     | 1968      | 1135,91   | -0,5333      |
| 5200                       | 0,2964                    | 2460,7    | 2,391944    | 3,21361  | 1,19   | 0,59653     | 1972      | 1149,08   | -0,08        |
| Этанол                     |                           |           |             |          |        |             |           |           |              |
| 840                        | 0,2665                    | 2231,7173 | 2,62344     | 3,82421  | 1,196  | 0,526259    | 1712,023  | 996,823   | 0,1832       |
| 2000                       | 0,2536                    | 2263,9    | 2,796636    | 4,03047  | 1,199  | 0,52614     | 1717      | 1005,22   | 0,0223       |
| 3400                       | 0,278                     | 2264,4    | 2,552468    | 3,72678  | 1,197  | 0,52823     | 1746      | 1034,22   | -0,0755      |
| 4800                       | 0,308                     | 2262,04   | 2,300858    | 3,4557   | 1,1974 | 0,5212      | 1770,9    | 1072,71   | 0,2529       |
| 5200                       | 0,3432                    | 2253,64   | 2,057319    | 3,1388   | 1,197  | 0,52321     | 1799      | 1095,03   | 0,4611       |
| Альтернативное топливо Е85 |                           |           |             |          |        |             |           |           |              |
| 840                        | 0,2933                    | 2181,76   | 2,3515      | 3,542657 | 1,201  | 0,514789    | 1692,079  | 992,474   | 0,2499       |
| 2000                       | 0,2941                    | 2193,11   | 2,357228    | 3,54266  | 1,202  | 0,51602     | 1701      | 1002,41   | 0,7452       |
| 3400                       | 0,2163                    | 2381,75   | 3,480725    | 4,88694  | 1,195  | 0,5224      | 1747      | 1038,32   | 0,321        |
| 4800                       | 0,3063                    | 2234,88   | 2,306857    | 3,54266  | 1,199  | 0,50645     | 1738      | 1063,07   | 0,2892       |
| 5200                       | 0,3417                    | 2223,37   | 2,057403    | 3,21361  | 1,198  | 0,50785     | 1764      | 1084,27   | 0,8626       |

Таблица 10 – Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла

| $n$ , мин <sup>-1</sup>    | $L_i$ , кДж | $P_i$ , Мпа | $N_i$ , кВт | $\eta_i$ | $g_i$ , г/кВт ч |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|----------|-----------------|
| Бензин Аи-95               |             |             |             |          |                 |
| 840                        | 1,1771325   | 1,440845    | 20,27577    | 0,458679 | 178,664         |
| 2000                       | 1,1921802   | 1,453637    | 48,70423    | 0,459702 | 178,2666        |
| 3400                       | 1,1721972   | 1,407488    | 80,16863    | 0,447728 | 183,034         |
| 4800                       | 1,1668052   | 1,363308    | 109,6266    | 0,437097 | 187,4858        |
| 5200                       | 1,1672976   | 1,348255    | 117,4509    | 0,442183 | 185,3295        |
| Этанол                     |             |             |             |          |                 |
| 840                        | 1,0653906   | 1,149752    | 16,17947    | 0,422678 | 190,9476        |
| 2000                       | 1,1186863   | 1,203743    | 40,33152    | 0,433985 | 185,9726        |
| 3400                       | 1,1371595   | 1,207517    | 68,77853    | 0,422458 | 191,047         |
| 4800                       | 1,1479148   | 1,186227    | 95,38715    | 0,418161 | 193,01          |
| 5200                       | 1,1547824   | 1,179132    | 102,718     | 0,425338 | 189,7533        |
| Альтернативное топливо Е85 |             |             |             |          |                 |
| 840                        | 1,0338469   | 1,094344    | 15,39975    | 0,407621 | 206,6389        |
| 2000                       | 1,0788328   | 1,13882     | 38,15626    | 0,416    | 202,4767        |
| 3400                       | 1,1428313   | 1,189065    | 67,72751    | 0,426469 | 197,5065        |
| 4800                       | 1,15186     | 1,167684    | 93,89601    | 0,41706  | 201,9621        |
| 5200                       | 1,1489458   | 1,151069    | 100,2733    | 0,420698 | 200,2155        |

Анализ результатов расчета эффективных показателей рабочего цикла (таблица 11) показал, что все эффекты, которые мы наблюдали у индикаторных показателей также присутствуют и у эффективных показателей работы двигателя.

Таблица 11 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

| п, мин <sup>-1</sup>       | V <sub>п.ср</sub> , м/с | p <sub>м</sub> , Мпа | p <sub>с</sub> , Мпа | η <sub>м</sub> | η <sub>с</sub> | g <sub>с</sub> , г/(кВт.ч) | Ne, кВт  | Me, Н.м  | G <sub>T</sub> , кг/ч |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------|----------|-----------------------|
| Бензин Аи-95               |                         |                      |                      |                |                |                            |          |          |                       |
| 840                        | 2,212                   | 0,115102             | 1,381849             | 0,959055       | 0,439899       | 186,2918                   | 19,44557 | 221,0614 | 3,62255               |
| 2000                       | 5,2667                  | 0,093513             | 1,360124             | 0,935669       | 0,430129       | 190,5231                   | 45,57105 | 217,5858 | 8,682338              |
| 3400                       | 8,9533                  | 0,135173             | 1,272316             | 0,903962       | 0,404729       | 202,4798                   | 72,46938 | 203,5387 | 14,67358              |
| 4800                       | 12,64                   | 0,176832             | 1,186476             | 0,870292       | 0,380402       | 215,4286                   | 95,40716 | 189,8065 | 20,55343              |
| 5200                       | 13,693                  | 0,188735             | 1,159521             | 0,860016       | 0,380284       | 215,4955                   | 101,0096 | 185,4943 | 21,76711              |
| Этанол                     |                         |                      |                      |                |                |                            |          |          |                       |
| 840                        | 2,212                   | 0,115102             | 1,090757             | 0,948688       | 0,40099        | 201,2753                   | 15,34928 | 174,4938 | 3,089431              |
| 2000                       | 5,2667                  | 0,093513             | 1,11023              | 0,922315       | 0,400271       | 201,6368                   | 37,19835 | 177,609  | 7,500557              |
| 3400                       | 8,9533                  | 0,135173             | 1,072344             | 0,888057       | 0,375167       | 215,1291                   | 61,07928 | 171,5483 | 13,13993              |
| 4800                       | 12,64                   | 0,176832             | 0,996513             | 0,849292       | 0,351284       | 229,7548                   | 80,13183 | 159,4172 | 18,41068              |
| 5200                       | 13,693                  | 0,188735             | 0,972321             | 0,837446       | 0,350737       | 230,1136                   | 84,70198 | 155,547  | 19,49108              |
| Альтернативное топливо Е85 |                         |                      |                      |                |                |                            |          |          |                       |
| 840                        | 2,212                   | 0,115102             | 0,979242             | 0,894821       | 0,364748       | 230,9275                   | 13,78003 | 156,6542 | 3,182188              |
| 2000                       | 5,2667                  | 0,151147             | 0,987673             | 0,867278       | 0,360788       | 233,4623                   | 33,09208 | 158,0031 | 7,725753              |
| 3400                       | 8,9533                  | 0,194649             | 0,994415             | 0,8363         | 0,356656       | 236,1669                   | 56,64054 | 159,0816 | 13,37662              |
| 4800                       | 12,64                   | 0,238152             | 0,929532             | 0,796047       | 0,332          | 253,7061                   | 74,74568 | 148,7018 | 18,96344              |
| 5200                       | 13,693                  | 0,250581             | 0,900488             | 0,782306       | 0,329115       | 255,93                     | 78,4444  | 144,0556 | 20,07628              |

Анализ результатов расчета теплового баланса (таблица 12) показал, значительное увеличение доли потерь на теплоотдачу в окружающую среду при работе на спирте. Для работы двигателя на бензине, следует отметить повышение потерь с отработавшими газами, вследствие увеличения температуры сгорания.

Таблица 12 – Результаты расчета теплового баланса

| п, мин <sup>-1</sup>       | Q <sub>0</sub> , Дж/с | Q <sub>с</sub> , Дж/с | q <sub>с</sub> , % | Q <sub>в</sub> , Дж/с | q <sub>в</sub> , % | Q <sub>г</sub> , Дж/с | q <sub>г</sub> , % | Q <sub>ост</sub> , Дж/с | q <sub>ост</sub> , % |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|
| Бензин Аи-95               |                       |                       |                    |                       |                    |                       |                    |                         |                      |
| 840                        | 44204,67              | 19445,57              | 43,98986           | 9329,962              | 21,10628           | 14001,14              | 31,67343           | 1427,997                | 3,230422             |
| 2000                       | 105947,4              | 45571,05              | 43,01289           | 23660,73              | 22,33252           | 34274,52              | 32,3505            | 2441,123                | 2,304089             |
| 3400                       | 179056,4              | 72469,38              | 40,47292           | 40930,45              | 22,85897           | 59548,72              | 33,25696           | 6107,886                | 3,411151             |
| 4800                       | 250806,1              | 95407,16              | 38,0402            | 62484,55              | 24,91349           | 88219,27              | 35,17429           | 4695,15                 | 1,872024             |
| 5200                       | 265616,1              | 101009,6              | 38,02841           | 66244,38              | 24,93989           | 94404,24              | 35,54161           | 3957,932                | 1,490095             |
| Этанол                     |                       |                       |                    |                       |                    |                       |                    |                         |                      |
| 840                        | 38278,5               | 15349,28              | 40,09895           | 10919,62              | 28,52677           | 11266,47              | 29,43289           | 743,1355                | 1,941391             |
| 2000                       | 92933                 | 37198,35              | 40,02706           | 27933,37              | 30,05753           | 27778,47              | 29,89086           | 22,81409                | 0,024549             |
| 3400                       | 162805,7              | 61079,28              | 37,51668           | 48578,73              | 29,83848           | 50911,47              | 31,27131           | 2236,178                | 1,373526             |
| 4800                       | 228111                | 80131,83              | 35,12844           | 62484,55              | 27,39217           | 75035,43              | 32,89426           | 10459,17                | 4,585124             |
| 5200                       | 241497,3              | 84701,98              | 35,07367           | 66244,38              | 27,43069           | 81692,91              | 33,82767           | 8858,064                | 3,667976             |
| Альтернативное топливо Е85 |                       |                       |                    |                       |                    |                       |                    |                         |                      |
| 840                        | 37779,6               | 13780,03              | 36,47478           | 12780,13              | 33,82811           | 10049,89              | 26,60135           | 1169,564                | 3,095755             |
| 2000                       | 91721,77              | 33092,08              | 36,07877           | 32977,56              | 35,9539            | 24590,25              | 26,80961           | 1061,878                | 1,157717             |
| 3400                       | 158810,1              | 56640,54              | 35,66559           | 55714,2               | 35,08228           | 45236,5               | 28,48465           | 1218,833                | 0,767479             |
| 4800                       | 225137,9              | 74745,68              | 33,19995           | 74416,62              | 33,05379           | 66504,91              | 29,53963           | 9470,711                | 4,206626             |
| 5200                       | 238349,8              | 78444,4               | 32,91146           | 78957,59              | 33,12677           | 71923,49              | 30,1756            | 9024,314                | 3,786164             |

Приведем основные термодинамические параметры работы двигателя по результатам теплового расчета в таблице 13 и 14 для базового топлива (бензин) и Е85, соответственно.

Таблица 13 – Основные термодинамические параметры работы двигателя на бензине

| Угол ПКВ, град. | Объем цилиндра | P <sub>i</sub> , частота вращения 840 мин <sup>-1</sup> | P <sub>i</sub> , частота вращения 2000 мин <sup>-1</sup> | P <sub>i</sub> , частота вращения 3800 мин <sup>-1</sup> | P <sub>i</sub> , частота вращения 5400 мин <sup>-1</sup> | P <sub>i</sub> , частота вращения 6000 мин <sup>-1</sup> |
|-----------------|----------------|---|--|--|--|--|
| 230             | 0,387807       | 0,119703651   | 0,119135864  | 0,117331112  | 0,114782759  | 0,113597961  |
| 231             | 0,385619       | 0,120640925   | 0,120068816  | 0,118250085  | 0,115681831  | 0,114487752  |
| 232             | 0,38339        | 0,12160914  | 0,121032566  | 0,119199396  | 0,116610586  | 0,11540692   |
| 233             | 0,38112        | 0,122609211   | 0,122028026  | 0,120179943  | 0,1175699  | 0,116356333  |
| 234             | 0,378808       | 0,123642092   | 0,123056146  | 0,121192662  | 0,11856069   | 0,117336896  |
| 235             | 0,376456       | 0,124708777   | 0,124117915  | 0,122238529  | 0,11958391   | 0,118349554  |
| 236             | 0,374063       | 0,125810304   | 0,125214368  | 0,12331856   | 0,120640556  | 0,119395293  |
| 237             | 0,371629       | 0,126947755   | 0,12634658   | 0,124433817  | 0,121731666  | 0,12047514   |
| 238             | 0,369155       | 0,12812226  | 0,127515676  | 0,125585408  | 0,122858323  | 0,121590168  |
| 239             | 0,366642       | 0,129334995   | 0,128722829  | 0,126774487  | 0,124021658  | 0,122741495  |
| 240             | 0,364089       | 0,13058719  | 0,129969261  | 0,128002259  | 0,125222849  | 0,123930287  |
| 241             | 0,361497       | 0,131880127   | 0,131256248  | 0,129269982  | 0,126463126  | 0,125157762  |
| 242             | 0,358867       | 0,133215143   | 0,132585124  | 0,130578968  | 0,127743774  | 0,126425191  |
| 243             | 0,356198       | 0,134593636   | 0,133957278  | 0,131930587  | 0,129066133  | 0,1277339  |
| 244             | 0,353491       | 0,136017064   | 0,135374162  | 0,133326269  | 0,130431602  | 0,129085275  |
| 245             | 0,350747       | 0,137486949   | 0,136837292  | 0,134767507  | 0,131841642  | 0,13048076   |
| 246             | 0,347965       | 0,139004881   | 0,13834825   | 0,136255861  | 0,133297779  | 0,131921866  |
| 247             | 0,345147       | 0,140572521   | 0,13990869   | 0,137792959  | 0,134801606  | 0,133410171  |
| 248             | 0,342293       | 0,142191604   | 0,141520339  | 0,139380504  | 0,136354788  | 0,134947321  |
| 249             | 0,339404       | 0,143863943   | 0,143185003  | 0,141020273  | 0,137959066  | 0,13653504   |
| 250             | 0,336479       | 0,145591434   | 0,144904567  | 0,142714125  | 0,139616258  | 0,138175126  |
| 251             | 0,33352        | 0,147376056   | 0,146681004  | 0,144464002  | 0,141328264  | 0,13986946   |
| 252             | 0,330528       | 0,149219882   | 0,148516375  | 0,146271937  | 0,143097072  | 0,141620011  |
| 253             | 0,327502       | 0,151125077   | 0,150412838  | 0,148140054  | 0,144924761  | 0,143428834  |
| 254             | 0,324443       | 0,153093907   | 0,152372647  | 0,150070575  | 0,146813505  | 0,145298083  |
| 255             | 0,321352       | 0,155128743   | 0,154398164  | 0,152065825  | 0,148765581  | 0,147230008  |
| 256             | 0,31823        | 0,157232068   | 0,156491859  | 0,154128239  | 0,150783368  | 0,149226967  |
| 257             | 0,315078       | 0,159406477   | 0,158656317  | 0,156260365  | 0,152869359  | 0,151291427  |
| 258             | 0,311895       | 0,161654692   | 0,160894246  | 0,158464869  | 0,155026166  | 0,153425971  |
| 259             | 0,308684       | 0,163979561   | 0,163208483  | 0,160744547  | 0,157256521  | 0,155633305  |
| 260             | 0,305444       | 0,166384068   | 0,165601999  | 0,163102325  | 0,15956329   | 0,157916262  |
| 261             | 0,302177       | 0,168871341   | 0,168077907  | 0,165541271  | 0,161949472  | 0,160277814  |
| 262             | 0,298882       | 0,171444657   | 0,17063947   | 0,168064601  | 0,164418214  | 0,162721074  |
| 263             | 0,295563       | 0,174107453   | 0,173290111  | 0,170675684  | 0,166972815  | 0,165249306  |
| 264             | 0,292218       | 0,176863335   | 0,176033417  | 0,173378057  | 0,169616733  | 0,167865933  |
| 265             | 0,288849       | 0,179716082   | 0,178873152  | 0,176175428  | 0,172353598  | 0,170574548  |
| 266             | 0,285457       | 0,182669662   | 0,181813267  | 0,179071688  | 0,175187216  | 0,173378917  |
| 267             | 0,282042       | 0,18572824  | 0,184857907  | 0,182070923  | 0,178121584  | 0,176282996  |
| 268             | 0,278607       | 0,188896186   | 0,188011424  | 0,185177421  | 0,181160898  | 0,179290938  |
| 269             | 0,275151       | 0,192178093   | 0,19127839   | 0,188395685  | 0,184309565  | 0,182407105  |
| 270             | 0,271677       | 0,195578784   | 0,194663607  | 0,191730446  | 0,187572214  | 0,185636076  |

Продолжение таблицы 13

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 271 | 0,268184 | 0,199103325 | 0,198172118 | 0,195186675 | 0,190953707 | 0,188982665 |
| 272 | 0,264674 | 0,202757043 | 0,201809228 | 0,198769596 | 0,194459158 | 0,192451933 |
| 273 | 0,261148 | 0,206545538 | 0,205580512 | 0,202484704 | 0,198093941 | 0,196049197 |
| 274 | 0,257607 | 0,210474699 | 0,209491831 | 0,206337773 | 0,201863708 | 0,199780052 |
| 275 | 0,254052 | 0,214550719 | 0,213549353 | 0,210334881 | 0,205774404 | 0,203650381 |
| 276 | 0,250485 | 0,218780117 | 0,217759567 | 0,21448242  | 0,209832285 | 0,207666376 |
| 277 | 0,246907 | 0,223169751 | 0,222129303 | 0,218787121 | 0,214043934 | 0,211834553 |
| 278 | 0,243318 | 0,227726844 | 0,226665749 | 0,223256066 | 0,218416284 | 0,21616177  |
| 279 | 0,239721 | 0,232458998 | 0,231376477 | 0,227896714 | 0,222956632 | 0,220655252 |
| 280 | 0,236116 | 0,237374223 | 0,236269459 | 0,232716924 | 0,227672666 | 0,225322607 |
| 281 | 0,232504 | 0,242480956 | 0,241353097 | 0,23772497  | 0,232572484 | 0,230171849 |
| 282 | 0,228888 | 0,247788088 | 0,246636243 | 0,242929577 | 0,237664622 | 0,235211426 |
| 283 | 0,225267 | 0,253304991 | 0,252128227 | 0,248339937 | 0,242958075 | 0,240450239 |
| 284 | 0,221644 | 0,259041544 | 0,257838885 | 0,253965742 | 0,248462325 | 0,245897674 |
| 285 | 0,21802  | 0,265008165 | 0,263778591 | 0,259817213 | 0,254187374 | 0,251563628 |
| 286 | 0,214396 | 0,27121584  | 0,269958281 | 0,265905128 | 0,260143767 | 0,257458539 |
| 287 | 0,210774 | 0,277676159 | 0,276389497 | 0,272240856 | 0,26634263  | 0,263593416 |
| 288 | 0,207154 | 0,284401348 | 0,28308441  | 0,278836394 | 0,272795699 | 0,269979876 |
| 289 | 0,203539 | 0,291404311 | 0,290055868 | 0,285704399 | 0,279515361 | 0,276630177 |
| 290 | 0,19993  | 0,298698661 | 0,297317427 | 0,292858229 | 0,286514685 | 0,283557254 |
| 291 | 0,196327 | 0,306298769 | 0,304883393 | 0,300311982 | 0,293807466 | 0,290774758 |
| 292 | 0,192734 | 0,314219802 | 0,312768869 | 0,308080538 | 0,301408266 | 0,298297102 |
| 293 | 0,18915  | 0,322477772 | 0,320989796 | 0,316179607 | 0,309332454 | 0,306139495 |
| 294 | 0,185578 | 0,331089578 | 0,329563003 | 0,324625771 | 0,317596256 | 0,314317997 |
| 295 | 0,182018 | 0,340073063 | 0,338506252 | 0,333436533 | 0,326216799 | 0,322849558 |
| 296 | 0,178473 | 0,349447057 | 0,347838296 | 0,34263037  | 0,335212163 | 0,331752072 |
| 297 | 0,174944 | 0,359231438 | 0,357578924 | 0,352226786 | 0,344601432 | 0,341044423 |
| 298 | 0,171433 | 0,369447184 | 0,367749025 | 0,362246362 | 0,354404744 | 0,350746545 |
| 299 | 0,167939 | 0,380116429 | 0,378370639 | 0,372710818 | 0,364643353 | 0,36087947  |
| 300 | 0,164467 | 0,391262525 | 0,389467017 | 0,383643065 | 0,375339678 | 0,371465387 |
| 301 | 0,161016 | 0,402910101 | 0,401062681 | 0,39506727  | 0,386517364 | 0,382527696 |
| 302 | 0,157588 | 0,415085121 | 0,413183486 | 0,407008909 | 0,398201342 | 0,394091071 |
| 303 | 0,154185 | 0,42781495  | 0,425856678 | 0,419494833 | 0,410417885 | 0,406181513 |
| 304 | 0,150808 | 0,44112841  | 0,439110958 | 0,432553324 | 0,423194668 | 0,418826413 |
| 305 | 0,147458 | 0,455055843 | 0,452976539 | 0,446214157 | 0,436560825 | 0,432054603 |
| 306 | 0,144138 | 0,469629171 | 0,467485204 | 0,460508653 | 0,450547005 | 0,445896417 |
| 307 | 0,140848 | 0,484881944 | 0,482670363 | 0,475469736 | 0,465185425 | 0,460383738 |
| 308 | 0,137591 | 0,500849397 | 0,498567102 | 0,491131983 | 0,48050992  | 0,475550051 |
| 309 | 0,134367 | 0,517568494 | 0,515212225 | 0,507531664 | 0,49655598  | 0,491430483 |
| 310 | 0,131177 | 0,535077958 | 0,532644296 | 0,524706784 | 0,513360795 | 0,508061837 |
| 311 | 0,128024 | 0,553418307 | 0,550903658 | 0,542697102 | 0,53096327  | 0,525482618 |
| 312 | 0,124909 | 0,57263186  | 0,570032453 | 0,561544148 | 0,549404045 | 0,543733045 |
| 313 | 0,121833 | 0,592762735 | 0,590074613 | 0,58129122  | 0,568725488 | 0,56285505  |
| 314 | 0,118798 | 0,613856827 | 0,611075842 | 0,601983361 | 0,588971676 | 0,582892255 |
| 315 | 0,115805 | 0,635961763 | 0,633083566 | 0,62366731  | 0,610188345 | 0,603889924 |
| 316 | 0,112855 | 0,65912682  | 0,656146856 | 0,646391432 | 0,632422824 | 0,625894896 |
| 317 | 0,10995  | 0,683402817 | 0,680316319 | 0,670205602 | 0,655723918 | 0,648955475 |
| 318 | 0,107091 | 0,70884196  | 0,705643943 | 0,695161061 | 0,68014177  | 0,673121283 |
| 319 | 0,104279 | 0,735497637 | 0,732182898 | 0,721310211 | 0,70572766  | 0,698443073 |
| 320 | 0,101516 | 0,763424163 | 0,75998727  | 0,748706362 | 0,732533755 | 0,724972473 |
| 321 | 0,098803 | 0,792676444 | 0,789111742 | 0,777403411 | 0,760612797 | 0,752761681 |
| 322 | 0,096142 | 0,823309578 | 0,819611183 | 0,80745544  | 0,790017713 | 0,781863076 |
| 323 | 0,093532 | 0,855378353 | 0,85154016  | 0,838916235 | 0,820801135 | 0,812328749 |

Продолжение таблицы 13

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 324 | 0,090977 | 0,888936657 | 0,88495234  | 0,871838695 | 0,853014833 | 0,844209934 |
| 325 | 0,088477 | 0,924036758 | 0,919899779 | 0,906274134 | 0,886709024 | 0,877556331 |
| 326 | 0,086032 | 0,960728463 | 0,956432087 | 0,942271457 | 0,921931567 | 0,912686942 |
| 327 | 0,083646 | 0,999058135 | 0,994595439 | 0,979876184 | 0,958727012 | 0,949417124 |
| 328 | 0,081317 | 1,039067539 | 1,03443144  | 1,019129334 | 0,997135502 | 0,987859191 |
| 329 | 0,079048 | 1,080792532 | 1,075975808 | 1,060066123 | 1,037392837 | 1,028156867 |
| 330 | 0,07684  | 1,12426155  | 1,119256875 | 1,102714494 | 1,079391469 | 1,070488387 |
| 331 | 0,074694 | 1,169493916 | 1,164293897 | 1,147093444 | 1,123267164 | 1,115069613 |
| 332 | 0,07261  | 1,216497929 | 1,211095157 | 1,193211156 | 1,169204395 | 1,162157036 |
| 333 | 0,07059  | 1,265268765 | 1,259655868 | 1,241123975 | 1,217441334 | 1,212050505 |
| 334 | 0,068634 | 1,315786166 | 1,309955879 | 1,290858745 | 1,268274737 | 1,265095476 |
| 335 | 0,066745 | 1,368011955 | 1,36195719  | 1,342571279 | 1,322064438 | 1,321684536 |
| 336 | 0,064922 | 1,421887383 | 1,415601323 | 1,396493687 | 1,379237095 | 1,382257933 |
| 337 | 0,063166 | 1,477330364 | 1,470674838 | 1,452942195 | 1,440288776 | 1,447302801 |
| 338 | 0,061479 | 1,53423264  | 1,52738908  | 1,512324391 | 1,505785877 | 1,517350765 |
| 339 | 0,05986  | 1,592456959 | 1,58592516  | 1,575145264 | 1,576363853 | 1,592973605 |
| 340 | 0,058312 | 1,651834356 | 1,646587649 | 1,642011275 | 1,652723198 | 1,674776672 |
| 341 | 0,056835 | 1,711844149 | 1,70981659  | 1,713631568 | 1,735622168 | 1,763389805 |
| 342 | 0,055428 | 1,77291602  | 1,776197604 | 1,790815367 | 1,825865755 | 1,859455537 |
| 343 | 0,054094 | 1,835308993 | 1,846468704 | 1,874464587 | 1,924290587 | 1,963614483 |
| 344 | 0,052833 | 1,89949635  | 1,9215222   | 1,965560798 | 2,031745533 | 2,07648788  |
| 345 | 0,051644 | 1,966183067 | 2,002399952 | 2,065145854 | 2,14906799  | 2,198657401 |
| 346 | 0,05053  | 2,036317449 | 2,090280233 | 2,174295804 | 2,277056043 | 2,330642463 |
| 347 | 0,04949  | 2,111093879 | 2,186454753 | 2,294088046 | 2,41643689  | 2,472875442 |
| 348 | 0,048526 | 2,191943335 | 2,292294821 | 2,425562152 | 2,567832152 | 2,625675335 |
| 349 | 0,047636 | 2,28050842  | 2,409206396 | 2,569675144 | 2,731720927 | 2,789220611 |
| 350 | 0,046823 | 2,378600315 | 2,538574571 | 2,727252446 | 2,908401657 | 2,963522166 |
| 351 | 0,046085 | 2,488136287 | 2,681698948 | 2,898936056 | 3,097954144 | 3,148397451 |
| 352 | 0,045425 | 2,611058115 | 2,839722161 | 3,085131762 | 3,300203251 | 3,34344703  |
| 353 | 0,044841 | 2,749233773 | 3,013554409 | 3,285957499 | 3,514686061 | 3,548034907 |
| 354 | 0,044335 | 2,904346574 | 3,203797249 | 3,50119515  | 3,740624414 | 3,761274016 |
| 355 | 0,043906 | 3,077777346 | 3,410670127 | 3,730248295 | 3,976904837 | 3,98201825  |
| 356 | 0,043555 | 3,270485938 | 3,633943256 | 3,97210854  | 4,222067852 | 4,208862237 |
| 357 | 0,043281 | 3,482898407 | 3,872880489 | 4,225333111 | 4,474308447 | 4,440149865 |
| 358 | 0,043086 | 3,714805981 | 4,126195933 | 4,48803628  | 4,731489176 | 4,673992157 |
| 359 | 0,042969 | 3,965281624 | 4,392028017 | 4,757896888 | 4,991166816 | 4,908294688 |
| 360 | 0,04293  | 4,23261985  | 4,667934557 | 5,032183685 | 5,25063284  | 5,140794189 |
| 361 | 0,042969 | 4,514305492 | 4,950911914 | 5,307799431 | 5,506967216 | 5,369103472 |
| 362 | 0,043086 | 4,807016959 | 5,237440544 | 5,581343735 | 5,757104182 | 5,59076326  |
| 363 | 0,043281 | 5,106668967 | 5,523557997 | 5,849193445 | 5,997907865 | 5,803299077 |
| 364 | 0,043555 | 5,408498382 | 5,804958888 | 6,107598275 | 6,226254891 | 6,004280979 |
| 365 | 0,043906 | 5,707194592 | 6,077119492 | 6,352788144 | 6,439120561 | 6,191383721 |
| 366 | 0,044335 | 5,997072722 | 6,335442669 | 6,581087793 | 6,633664851 | 6,362444885 |
| 367 | 0,044841 | 6,272284301 | 6,575416942 | 6,789033435 | 6,807314347 | 6,515518619 |
| 368 | 0,045425 | 6,527055987 | 6,792781926 | 6,973485804 | 6,957836403 | 6,648922843 |
| 369 | 0,046085 | 6,755943214 | 6,983691149 | 7,131733918 | 7,083402155 | 6,761278207 |
| 370 | 0,046823 | 6,95408263  | 7,144862766 | 7,261584176 | 7,182635648 | 6,851537455 |
| 371 | 0,047636 | 7,117425394 | 7,273708841 | 7,361430131 | 7,254646998 | 6,919004406 |
| 372 | 0,048526 | 7,242933291 | 7,368434833 | 7,430299276 | 7,299048431 | 6,963342227 |
| 373 | 0,04949  | 7,32872136  | 7,428102567 | 7,467874489 | 7,315952841 | 6,984571132 |
| 374 | 0,05053  | 7,374134346 | 7,452652352 | 7,47448919  | 7,305955409 | 6,983056114 |
| 375 | 0,051644 | 7,379749624 | 7,442882661 | 7,451096803 | 7,270099627 | 6,959485618 |
| 376 | 0,052833 | 7,347305672 | 7,400388811 | 7,399216579 | 7,209829742 | 6,914842385 |

Продолжение таблицы 13

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 377 | 0,054094 | 7,279562126 | 7,327465104 | 7,320859161 | 7,126932205 | 6,850367892 |
| 378 | 0,055428 | 7,180103931 | 7,2269775   | 7,218436378 | 7,023469104 | 6,767521927 |
| 379 | 0,056835 | 7,053107374 | 7,102215981 | 7,094660531 | 6,90170678  | 6,667938925 |
| 380 | 0,058312 | 6,903088934 | 6,956736986 | 6,952438826 | 6,764042869 | 6,553382656 |
| 381 | 0,05986  | 6,734658605 | 6,794206579 | 6,794768627 | 6,612934881 | 6,425700821 |
| 382 | 0,061479 | 6,552297406 | 6,618254315 | 6,624638797 | 6,450833147 | 6,286780971 |
| 383 | 0,063166 | 6,360174594 | 6,432346172 | 6,444941642 | 6,280120523 | 6,138509047 |
| 384 | 0,064922 | 6,162014345 | 6,239682656 | 6,258398965 | 6,103060736 | 5,982731603 |
| 385 | 0,066745 | 5,96101524  | 6,043125496 | 6,067504503 | 5,921756651 | 5,821222607 |
| 386 | 0,068634 | 5,759819852 | 5,845153621 | 5,874483722 | 5,738119089 | 5,655655446 |
| 387 | 0,07059  | 5,560526928 | 5,647846581 | 5,681270756 | 5,553846287 | 5,487580526 |
| 388 | 0,07261  | 5,364735567 | 5,452891615 | 5,489501134 | 5,370413443 | 5,318408638 |
| 389 | 0,074694 | 5,173609738 | 5,261609226 | 5,300518116 | 5,189071424 | 5,149399987 |
| 390 | 0,07684  | 4,98795209  | 5,074991564 | 5,115389904 | 5,01085328  | 4,981658618 |
| 391 | 0,079048 | 4,82146786  | 4,893748035 | 4,934934709 | 4,836587033 | 4,81613176  |
| 392 | 0,081317 | 4,66078493  | 4,718353209 | 4,759750703 | 4,666913085 | 4,653613474 |
| 393 | 0,083646 | 4,505863756 | 4,561562158 | 4,590248144 | 4,502304639 | 4,494751898 |
| 394 | 0,086032 | 4,35663536  | 4,410531152 | 4,426681403 | 4,343089619 | 4,34005933  |
| 395 | 0,088477 | 4,213006362 | 4,2651658   | 4,28086342  | 4,189472805 | 4,189924337 |
| 396 | 0,090977 | 4,074863479 | 4,125351562 | 4,140611232 | 4,041557146 | 4,044625172 |
| 397 | 0,093532 | 3,942077487 | 3,990957763 | 4,005793974 | 3,909849084 | 3,90434378  |
| 398 | 0,096142 | 3,814506704 | 3,861841113 | 3,87626812  | 3,783314134 | 3,769179798 |
| 399 | 0,098803 | 3,692000019 | 3,737848775 | 3,751880556 | 3,66180239  | 3,639164055 |
| 400 | 0,101516 | 3,574399509 | 3,618821016 | 3,632471239 | 3,545157194 | 3,514271176 |
| 401 | 0,104279 | 3,461542685 | 3,504593472 | 3,517875476 | 3,433217355 | 3,403218163 |
| 402 | 0,107091 | 3,353264402 | 3,394999087 | 3,407925858 | 3,325819051 | 3,29667346  |
| 403 | 0,10995  | 3,249398469 | 3,289869743 | 3,302453902 | 3,222797425 | 3,194473266 |
| 404 | 0,112855 | 3,149779001 | 3,189037622 | 3,201291417 | 3,123987921 | 3,096454095 |
| 405 | 0,115805 | 3,054241531 | 3,092336342 | 3,104271639 | 3,029227395 | 3,002453872 |
| 406 | 0,118798 | 2,962623928 | 2,999601876 | 3,011230158 | 2,938355017 | 2,912312837 |
| 407 | 0,121833 | 2,874767134 | 2,910673303 | 2,92200567  | 2,851213009 | 2,82587427  |
| 408 | 0,124909 | 2,790515749 | 2,825393399 | 2,836440571 | 2,767647219 | 2,742985061 |
| 409 | 0,128024 | 2,709718486 | 2,7436091   | 2,75438142  | 2,68750758  | 2,663496166 |
| 410 | 0,131177 | 2,632228517 | 2,665171848 | 2,675679289 | 2,610648443 | 2,587262938 |
| 411 | 0,134367 | 2,557903716 | 2,589937844 | 2,600190016 | 2,53692883  | 2,514145373 |
| 412 | 0,137591 | 2,486606835 | 2,517768218 | 2,527774374 | 2,466212596 | 2,444008277 |
| 413 | 0,140848 | 2,418205598 | 2,448529132 | 2,458298178 | 2,398368534 | 2,37672136  |
| 414 | 0,144138 | 2,35257275  | 2,382091823 | 2,39163233  | 2,333270414 | 2,312159283 |
| 415 | 0,147458 | 2,289586054 | 2,318332608 | 2,327652816 | 2,270796984 | 2,250201656 |
| 416 | 0,150808 | 2,229128253 | 2,257132836 | 2,266240671 | 2,210831934 | 2,190732995 |
| 417 | 0,154185 | 2,171086997 | 2,198378825 | 2,207281904 | 2,153263821 | 2,133642658 |
| 418 | 0,157588 | 2,115354749 | 2,141961759 | 2,150667403 | 2,097985976 | 2,078824746 |
| 419 | 0,161016 | 2,061828675 | 2,087777579 | 2,096292823 | 2,044896396 | 2,026177991 |
| 420 | 0,164467 | 2,010410509 | 2,035726848 | 2,044058451 | 1,993897608 | 1,975605631 |
| 421 | 0,167939 | 1,961006415 | 1,985714614 | 1,993869069 | 1,944896536 | 1,927015269 |
| 422 | 0,171433 | 1,913526842 | 1,937650253 | 1,9456338   | 1,897804352 | 1,880318728 |
| 423 | 0,174944 | 1,867886366 | 1,891447324 | 1,899265954 | 1,852536322 | 1,835431902 |
| 424 | 0,178473 | 1,824003538 | 1,8470234   | 1,854682871 | 1,809011656 | 1,792274595 |
| 425 | 0,182018 | 1,781800721 | 1,804299919 | 1,811805762 | 1,767153348 | 1,750770374 |
| 426 | 0,185578 | 1,741203941 | 1,763202017 | 1,770559545 | 1,726888017 | 1,710846407 |
| 427 | 0,18915  | 1,702142721 | 1,723658376 | 1,730872694 | 1,688145762 | 1,672433315 |
| 428 | 0,192734 | 1,664549938 | 1,685601064 | 1,692677077 | 1,650860001 | 1,635465014 |
| 429 | 0,196327 | 1,628361664 | 1,648965386 | 1,65590781  | 1,614967323 | 1,599878576 |

Продолжение таблицы 13

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 430 | 0,19993  | 1,593517026 | 1,613689739 | 1,620503104 | 1,58040735  | 1,565614076 |
| 431 | 0,203539 | 1,559958061 | 1,579715461 | 1,586404121 | 1,547122586 | 1,532614456 |
| 432 | 0,207154 | 1,527629579 | 1,546986698 | 1,553554841 | 1,51505829  | 1,500825393 |
| 433 | 0,210774 | 1,49647903  | 1,515450268 | 1,521901919 | 1,484162339 | 1,47019516  |
| 434 | 0,214396 | 1,466456379 | 1,485055532 | 1,491394562 | 1,454385101 | 1,440674508 |
| 435 | 0,21802  | 1,437513979 | 1,455754269 | 1,461984401 | 1,425679317 | 1,41221654  |
| 436 | 0,221644 | 1,409606459 | 1,427500558 | 1,433625375 | 1,397999984 | 1,384776601 |
| 437 | 0,225267 | 1,382690606 | 1,400250667 | 1,406273615 | 1,371304239 | 1,358312161 |
| 438 | 0,228888 | 1,356725263 | 1,37396294  | 1,379887336 | 1,34555126  | 1,332782713 |
| 439 | 0,232504 | 1,331671223 | 1,348597694 | 1,354426732 | 1,320702157 | 1,30814967  |
| 440 | 0,236116 | 1,307491131 | 1,324117125 | 1,329853877 | 1,296719879 | 1,284376271 |
| 441 | 0,239721 | 1,284149395 | 1,300485208 | 1,306132634 | 1,273569121 | 1,261427488 |
| 442 | 0,243318 | 1,261612092 | 1,27766761  | 1,283228561 | 1,251216239 | 1,23926994  |
| 443 | 0,246907 | 1,239846889 | 1,255631604 | 1,261108828 | 1,22962916  | 1,217871807 |
| 444 | 0,250485 | 1,218822959 | 1,234345991 | 1,239742133 | 1,208777308 | 1,197202755 |
| 445 | 0,254052 | 1,198510909 | 1,213781019 | 1,21909863  | 1,188631529 | 1,177233859 |
| 446 | 0,257607 | 1,178882703 | 1,193908313 | 1,199149853 | 1,169164015 | 1,157937534 |
| 447 | 0,261148 | 1,159911598 | 1,174700804 | 1,179868643 | 1,15034824  | 1,139287464 |
| 448 | 0,264674 | 1,141572078 | 1,156132665 | 1,161229091 | 1,132158894 | 1,121258542 |
| 449 | 0,268184 | 1,12383979  | 1,138179249 | 1,143206468 | 1,114571826 | 1,103826807 |
| 450 | 0,271677 | 1,10669149  | 1,120817027 | 1,125777167 | 1,097563977 | 1,086969389 |
| 451 | 0,275151 | 1,090104985 | 1,104023535 | 1,108918651 | 1,081113336 | 1,070664451 |
| 452 | 0,278607 | 1,07405908  | 1,087777321 | 1,092609397 | 1,065198881 | 1,054891141 |
| 453 | 0,282042 | 1,058533531 | 1,072057893 | 1,076828844 | 1,049800532 | 1,039629541 |
| 454 | 0,285457 | 1,043508996 | 1,056845673 | 1,061557349 | 1,034899104 | 1,024860622 |
| 455 | 0,288849 | 1,028966991 | 1,042121953 | 1,046776141 | 1,020476264 | 1,0105662   |
| 456 | 0,292218 | 1,014889849 | 1,027868848 | 1,032467275 | 1,006514489 | 0,996728892 |
| 457 | 0,295563 | 1,001260678 | 1,01406926  | 1,018613596 | 0,992997025 | 0,983332082 |
| 458 | 0,298882 | 0,988063325 | 1,000706839 | 1,005198698 | 0,979907849 | 0,970359879 |
| 459 | 0,302177 | 0,97528234  | 0,987765946 | 0,992206888 | 0,967231638 | 0,957797084 |
| 460 | 0,305444 | 0,962902941 | 0,975231617 | 0,979623152 | 0,954953729 | 0,945629155 |
| 461 | 0,308684 | 0,950910982 | 0,963089534 | 0,967433121 | 0,943060093 | 0,933842177 |
| 462 | 0,311895 | 0,939292924 | 0,951325991 | 0,955623045 | 0,931537301 | 0,922422832 |
| 463 | 0,315078 | 0,928035805 | 0,939927868 | 0,944179757 | 0,920372496 | 0,911358369 |
| 464 | 0,31823  | 0,917127212 | 0,928882599 | 0,933090648 | 0,909553366 | 0,900636579 |
| 465 | 0,321352 | 0,906555259 | 0,918178152 | 0,922343643 | 0,899068122 | 0,890245768 |
| 466 | 0,324443 | 0,896308555 | 0,907802997 | 0,911927173 | 0,888905467 | 0,880174735 |
| 467 | 0,327502 | 0,886376189 | 0,897746088 | 0,901830154 | 0,879054577 | 0,870412746 |
| 468 | 0,330528 | 0,876747703 | 0,887996839 | 0,892041961 | 0,86950508  | 0,860949514 |
| 469 | 0,33352  | 0,86741307  | 0,8785451   | 0,88255241  | 0,860247032 | 0,851775178 |
| 470 | 0,336479 | 0,858362681 | 0,869381143 | 0,873351738 | 0,8512709   | 0,842880286 |
| 471 | 0,339404 | 0,849587317 | 0,860495637 | 0,864430581 | 0,842567543 | 0,834255773 |
| 472 | 0,342293 | 0,841078139 | 0,851879632 | 0,855779958 | 0,834128193 | 0,825892943 |
| 473 | 0,345147 | 0,832826667 | 0,843524545 | 0,847391255 | 0,825944438 | 0,817783456 |
| 474 | 0,347965 | 0,824824764 | 0,835422139 | 0,839256204 | 0,818008208 | 0,809919311 |
| 475 | 0,350747 | 0,817064622 | 0,827564509 | 0,831366875 | 0,81031176  | 0,802292828 |
| 476 | 0,353491 | 0,809538747 | 0,819944069 | 0,823715653 | 0,80284766  | 0,794896638 |
| 477 | 0,356198 | 0,802239947 | 0,812553537 | 0,81629523  | 0,795608774 | 0,787723665 |
| 478 | 0,358867 | 0,795161314 | 0,805385922 | 0,80909859  | 0,788588252 | 0,780767119 |
| 479 | 0,361497 | 0,788296218 | 0,798434511 | 0,802118995 | 0,781779517 | 0,774020478 |
| 480 | 0,364089 | 0,78163829  | 0,791692856 | 0,795349974 | 0,775176253 | 0,767477479 |
| 481 | 0,366642 | 0,775181415 | 0,785154767 | 0,788785315 | 0,768772394 | 0,761132108 |
| 482 | 0,369155 | 0,768919717 | 0,778814295 | 0,782419047 | 0,762562113 | 0,754978588 |

Продолжение таблицы 13

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 483 | 0,371629 | 0,762847553 | 0,772665728 | 0,776245437 | 0,756539811 | 0,749011369 |
| 484 | 0,374063 | 0,7569595   | 0,766703575 | 0,770258975 | 0,750700112 | 0,743225118 |
| 485 | 0,376456 | 0,751250349 | 0,760922563 | 0,764454368 | 0,745037848 | 0,737614713 |
| 486 | 0,378808 | 0,745715095 | 0,755317624 | 0,758826529 | 0,739548055 | 0,732175233 |
| 487 | 0,38112  | 0,740348926 | 0,749883888 | 0,75337057  | 0,73422596  | 0,726901945 |
| 488 | 0,38339  | 0,735147219 | 0,744616675 | 0,748081794 | 0,72906698  | 0,721790305 |
| 489 | 0,385619 | 0,730105533 | 0,739511488 | 0,742955688 | 0,724066708 | 0,716835945 |
| 490 | 0,387807 | 0,725219598 | 0,734564003 | 0,737987911 | 0,719220908 | 0,712034666 |
| 500 | 0,407355 | 0,684098302 | 0,692924312 | 0,696176688 | 0,678437483 | 0,67162699  |
| 510 | 0,422596 | 0,584098302 | 0,592924312 | 0,596176688 | 0,578437483 | 0,57162699  |

Таблица 14 – Основные термодинамические параметры работы двигателя на E85

| Угол ПКВ, град. | Объем цилиндра | P <sub>i</sub> , частота вращения 840 мин <sup>-1</sup> | P <sub>i</sub> , частота вращения 2000 мин <sup>-1</sup> | P <sub>i</sub> , частота вращения 3800 мин <sup>-1</sup> | P <sub>i</sub> , частота вращения 5400 мин <sup>-1</sup> | P <sub>i</sub> , частота вращения 6000 мин <sup>-1</sup> |
|-----------------|----------------|---|--|--|--|--|
| 230             | 0,387807       | 0,119786193   | 0,11953366   | 0,118733007  | 0,117598138  | 0,117071519  |
| 231             | 0,385619       | 0,120724751   | 0,120470287  | 0,119663495  | 0,118519665  | 0,11798892   |
| 232             | 0,38339        | 0,121694297   | 0,121437838  | 0,120624707  | 0,11947162   | 0,118936611  |
| 233             | 0,38112        | 0,122695747   | 0,122437229  | 0,121617551  | 0,120454901  | 0,11991549   |
| 234             | 0,378808       | 0,123730058   | 0,123469414  | 0,122642975  | 0,121470448  | 0,120926489  |
| 235             | 0,376456       | 0,124798227   | 0,124535387  | 0,123701968  | 0,12251924   | 0,121970584  |
| 236             | 0,374063       | 0,125901293   | 0,125636186  | 0,124795559  | 0,123602296  | 0,12304879   |
| 237             | 0,371629       | 0,12704034  | 0,126772892  | 0,125924825  | 0,124720683  | 0,124162169  |
| 238             | 0,369155       | 0,128216499   | 0,127946636  | 0,127090887  | 0,12587551   | 0,125311824  |
| 239             | 0,366642       | 0,129430951   | 0,129158593  | 0,128294914  | 0,127067936  | 0,126498911  |
| 240             | 0,364089       | 0,130684926   | 0,130409994  | 0,129538128  | 0,12829917   | 0,127724631  |
| 241             | 0,361497       | 0,13197971  | 0,131702119  | 0,130821802  | 0,129570474  | 0,128990242  |
| 242             | 0,358867       | 0,133316642   | 0,133036308  | 0,132147266  | 0,130883164  | 0,130297054  |
| 243             | 0,356198       | 0,134697123   | 0,134413956  | 0,133515908  | 0,132238615  | 0,131646434  |
| 244             | 0,353491       | 0,136122613   | 0,135836522  | 0,134929176  | 0,13363826   | 0,133039812  |
| 245             | 0,350747       | 0,137594638   | 0,137305529  | 0,136388584  | 0,1350836  | 0,134478679  |
| 246             | 0,347965       | 0,139114792   | 0,138822566  | 0,13789571   | 0,136576196  | 0,135964592  |
| 247             | 0,345147       | 0,140684738   | 0,140389295  | 0,139452205  | 0,138117685  | 0,137499178  |
| 248             | 0,342293       | 0,142306216   | 0,14200745   | 0,141059794  | 0,139709774  | 0,139084136  |
| 249             | 0,339404       | 0,143981041   | 0,143678844  | 0,142720278  | 0,141354245  | 0,140721244  |
| 250             | 0,336479       | 0,145711113   | 0,145405374  | 0,144435539  | 0,143052965  | 0,142412357  |
| 251             | 0,33352        | 0,147498418   | 0,147189019  | 0,146207547  | 0,144807882  | 0,144159415  |
| 252             | 0,330528       | 0,149345029   | 0,149031851  | 0,148038359  | 0,146621035  | 0,145964449  |
| 253             | 0,327502       | 0,151253119   | 0,150936038  | 0,149930128  | 0,148494555  | 0,147829579  |
| 254             | 0,324443       | 0,153224959   | 0,152903844  | 0,151885105  | 0,150430673  | 0,149757026  |
| 255             | 0,321352       | 0,155262923   | 0,154937642  | 0,153905648  | 0,152431721  | 0,151749113  |
| 256             | 0,31823        | 0,1573695   | 0,157039912  | 0,155994222  | 0,154500141  | 0,153808271  |
| 257             | 0,315078       | 0,159547291   | 0,159213254  | 0,158153407  | 0,15663849   | 0,155937044  |
| 258             | 0,311895       | 0,161799024   | 0,161460388  | 0,160385909  | 0,158849445  | 0,158138098  |
| 259             | 0,308684       | 0,164127553   | 0,163784162  | 0,162694557  | 0,16113581   | 0,160414224  |
| 260             | 0,305444       | 0,166535869   | 0,166187563  | 0,165082318  | 0,163500521  | 0,162768346  |
| 261             | 0,302177       | 0,169027107   | 0,168673717  | 0,167552299  | 0,165946656  | 0,165203527  |
| 262             | 0,298882       | 0,171604551   | 0,171245905  | 0,17010776   | 0,168477443  | 0,16772298   |
| 263             | 0,295563       | 0,174271647   | 0,173907563  | 0,172752115  | 0,171096263  | 0,170330073  |
| 264             | 0,292218       | 0,177032007   | 0,176662297  | 0,175488947  | 0,173806664  | 0,173028337  |

Продолжение таблицы 14

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 265 | 0,288849 | 0,179889421 | 0,17951389  | 0,178322015 | 0,176612368 | 0,175821476 |
| 266 | 0,285457 | 0,182847865 | 0,182466309 | 0,181255262 | 0,179517279 | 0,178713379 |
| 267 | 0,282042 | 0,185911513 | 0,185523721 | 0,184292826 | 0,182525498 | 0,181708126 |
| 268 | 0,278607 | 0,189084748 | 0,188690499 | 0,187439055 | 0,185641326 | 0,184810002 |
| 269 | 0,275151 | 0,192372171 | 0,191971237 | 0,190698511 | 0,188869284 | 0,188023505 |
| 270 | 0,271677 | 0,195778617 | 0,195370758 | 0,194075989 | 0,192214119 | 0,191353361 |
| 271 | 0,268184 | 0,199309166 | 0,198894132 | 0,197576526 | 0,19568082  | 0,194804538 |
| 272 | 0,264674 | 0,202969157 | 0,202546689 | 0,201205418 | 0,19927463  | 0,198382255 |
| 273 | 0,261148 | 0,206764203 | 0,20633403  | 0,204968231 | 0,203001062 | 0,202091999 |
| 274 | 0,257607 | 0,210700208 | 0,210262048 | 0,20887082  | 0,206865912 | 0,205939542 |
| 275 | 0,254052 | 0,214783381 | 0,214336939 | 0,212919343 | 0,21087528  | 0,209930955 |
| 276 | 0,250485 | 0,219020256 | 0,218565224 | 0,217120279 | 0,215035581 | 0,214072626 |
| 277 | 0,246907 | 0,223417709 | 0,222953767 | 0,221480448 | 0,219353569 | 0,218371278 |
| 278 | 0,243318 | 0,22798298  | 0,227509792 | 0,226007031 | 0,223836354 | 0,222833988 |
| 279 | 0,239721 | 0,232723693 | 0,232240908 | 0,230707587 | 0,228491422 | 0,22746821  |
| 280 | 0,236116 | 0,237647877 | 0,237155129 | 0,235590079 | 0,233326659 | 0,232281794 |
| 281 | 0,232504 | 0,24276399  | 0,242260897 | 0,240662898 | 0,238350372 | 0,23728301  |
| 282 | 0,228888 | 0,248080949 | 0,247567109 | 0,245934883 | 0,243571316 | 0,242480574 |
| 283 | 0,225267 | 0,253608147 | 0,253083144 | 0,251415355 | 0,248998718 | 0,247883672 |
| 284 | 0,221644 | 0,259355492 | 0,258818886 | 0,257114136 | 0,254642308 | 0,253501989 |
| 285 | 0,21802  | 0,265333429 | 0,264784761 | 0,263041587 | 0,260512343 | 0,259345737 |
| 286 | 0,214396 | 0,271552974 | 0,270991764 | 0,269208634 | 0,266619642 | 0,265425687 |
| 287 | 0,210774 | 0,278025748 | 0,277451494 | 0,275626801 | 0,272975618 | 0,271753201 |
| 288 | 0,207154 | 0,284764012 | 0,284176186 | 0,28230825  | 0,279592313 | 0,278340265 |
| 289 | 0,203539 | 0,291780703 | 0,291178753 | 0,289265811 | 0,286482433 | 0,28519953  |
| 290 | 0,19993  | 0,299089474 | 0,298472821 | 0,296513026 | 0,293659386 | 0,292344344 |
| 291 | 0,196327 | 0,306704735 | 0,306072773 | 0,304064187 | 0,301137324 | 0,299788795 |
| 292 | 0,192734 | 0,314641699 | 0,31399379  | 0,311934381 | 0,308931188 | 0,307547757 |
| 293 | 0,18915  | 0,322916419 | 0,322251897 | 0,320139532 | 0,317056745 | 0,315636927 |
| 294 | 0,185578 | 0,331545847 | 0,330864011 | 0,328696452 | 0,325530643 | 0,324072877 |
| 295 | 0,182018 | 0,340547875 | 0,339847989 | 0,337622889 | 0,334370454 | 0,332873103 |
| 296 | 0,178473 | 0,349941391 | 0,349222682 | 0,346937574 | 0,343594729 | 0,34205607  |
| 297 | 0,174944 | 0,359746329 | 0,359007987 | 0,356660282 | 0,353223047 | 0,351641272 |
| 298 | 0,171433 | 0,369983731 | 0,369224905 | 0,366811883 | 0,363276073 | 0,361649279 |
| 299 | 0,167939 | 0,380675798 | 0,379895593 | 0,377414396 | 0,373775612 | 0,3721018   |
| 300 | 0,164467 | 0,391845953 | 0,39104343  | 0,388491056 | 0,384744669 | 0,383021736 |
| 301 | 0,161016 | 0,403518899 | 0,40269307  | 0,400066365 | 0,396207507 | 0,394433243 |
| 302 | 0,157588 | 0,415720683 | 0,414870511 | 0,412166157 | 0,408189708 | 0,406361785 |
| 303 | 0,154185 | 0,428478753 | 0,427603147 | 0,424817661 | 0,42071823  | 0,418834203 |
| 304 | 0,150808 | 0,441822024 | 0,440919839 | 0,438049557 | 0,433821473 | 0,431878769 |
| 305 | 0,147458 | 0,455780935 | 0,454850965 | 0,451892038 | 0,447529334 | 0,445525244 |
| 306 | 0,144138 | 0,470387509 | 0,469428489 | 0,466376868 | 0,461873265 | 0,459804941 |
| 307 | 0,140848 | 0,485675406 | 0,484686006 | 0,481537438 | 0,476886327 | 0,474750773 |
| 308 | 0,137591 | 0,501679978 | 0,500658799 | 0,497408813 | 0,492603243 | 0,490397307 |
| 309 | 0,134367 | 0,518438309 | 0,517383883 | 0,514027781 | 0,509060437 | 0,506780803 |
| 310 | 0,131177 | 0,535989256 | 0,534900039 | 0,531432887 | 0,526296074 | 0,523939257 |
| 311 | 0,128024 | 0,554373472 | 0,553247844 | 0,549664457 | 0,544350085 | 0,54191242  |
| 312 | 0,124909 | 0,573633421 | 0,572469681 | 0,568764617 | 0,563264179 | 0,560741815 |
| 313 | 0,121833 | 0,593813376 | 0,592609739 | 0,588777284 | 0,583081843 | 0,580470732 |
| 314 | 0,118798 | 0,614959395 | 0,613713988 | 0,60974815  | 0,603848315 | 0,60114421  |
| 315 | 0,115805 | 0,637119272 | 0,635830132 | 0,631724628 | 0,625610543 | 0,622808984 |
| 316 | 0,112855 | 0,660342464 | 0,659007534 | 0,654755781 | 0,648417105 | 0,645513415 |
| 317 | 0,10995  | 0,684679975 | 0,683297103 | 0,67889221  | 0,672318102 | 0,669307381 |

Продолжение таблицы 14

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 318 | 0,107091 | 0,710184207 | 0,708751141 | 0,7041859   | 0,697365005 | 0,694242121 |
| 319 | 0,104279 | 0,73690875  | 0,735423138 | 0,730690018 | 0,723610457 | 0,720370042 |
| 320 | 0,101516 | 0,764908126 | 0,763367515 | 0,758458657 | 0,751108014 | 0,747744462 |
| 321 | 0,098803 | 0,794237459 | 0,792639292 | 0,787546506 | 0,779911825 | 0,776419286 |
| 322 | 0,096142 | 0,824952065 | 0,823293683 | 0,818008449 | 0,810076229 | 0,80644861  |
| 323 | 0,093532 | 0,857106959 | 0,8553856   | 0,84989907  | 0,841655269 | 0,837886235 |
| 324 | 0,090977 | 0,890756254 | 0,888969056 | 0,88327206  | 0,874702103 | 0,870785082 |
| 325 | 0,088477 | 0,925952445 | 0,924096451 | 0,918179509 | 0,909268303 | 0,90519649  |
| 326 | 0,086032 | 0,962745564 | 0,960817725 | 0,954671064 | 0,945403019 | 0,941169391 |
| 327 | 0,083646 | 1,00118219  | 0,999179373 | 0,992792947 | 0,983152015 | 0,979056413 |
| 328 | 0,081317 | 1,041304299 | 1,039223297 | 1,032586818 | 1,022556533 | 1,018655096 |
| 329 | 0,079048 | 1,083147942 | 1,080985482 | 1,074088458 | 1,063916017 | 1,060101268 |
| 330 | 0,07684  | 1,126741731 | 1,124494495 | 1,117326275 | 1,107090911 | 1,10357435  |
| 331 | 0,074694 | 1,172105138 | 1,169769774 | 1,162319608 | 1,152253066 | 1,149301825 |
| 332 | 0,07261  | 1,219246581 | 1,216819731 | 1,209076834 | 1,199640143 | 1,197563681 |
| 333 | 0,07059  | 1,268161315 | 1,265639634 | 1,257740513 | 1,249562496 | 1,248696634 |
| 334 | 0,068634 | 1,318829111 | 1,316209301 | 1,308302141 | 1,302409858 | 1,303097861 |
| 335 | 0,066745 | 1,371211763 | 1,368490608 | 1,3609786   | 1,358657418 | 1,361227918 |
| 336 | 0,064922 | 1,425250426 | 1,422424827 | 1,416092652 | 1,418870762 | 1,423612451 |
| 337 | 0,063166 | 1,480862836 | 1,477906076 | 1,474083712 | 1,483709052 | 1,490842294 |
| 338 | 0,061479 | 1,537940468 | 1,535130782 | 1,535517635 | 1,553925749 | 1,563571474 |
| 339 | 0,05986  | 1,596345698 | 1,594395197 | 1,601094556 | 1,630366129 | 1,6425127   |
| 340 | 0,058312 | 1,655909075 | 1,656174325 | 1,671653594 | 1,713960855 | 1,728429876 |
| 341 | 0,056835 | 1,716252241 | 1,721138442 | 1,748173117 | 1,805714962 | 1,822127301 |
| 342 | 0,055428 | 1,777845152 | 1,790166249 | 1,831765175 | 1,906691699 | 1,924435243 |
| 343 | 0,054094 | 1,84117766  | 1,864352405 | 1,92366281  | 2,017990897 | 2,036191749 |
| 344 | 0,052833 | 1,907061939 | 1,945006858 | 2,025199151 | 2,140721718 | 2,15822063  |
| 345 | 0,051644 | 1,976655532 | 2,033643317 | 2,137777619 | 2,275969901 | 2,291305773 |
| 346 | 0,05053  | 2,051473772 | 2,131954445 | 2,262833014 | 2,424759842 | 2,436162041 |
| 347 | 0,04949  | 2,133386247 | 2,241771999 | 2,401783839 | 2,588012095 | 2,593403249 |
| 348 | 0,048526 | 2,224591808 | 2,365011138 | 2,55597674  | 2,766497119 | 2,763507874 |
| 349 | 0,047636 | 2,327567322 | 2,50359942  | 2,72662439  | 2,960786349 | 2,946783388 |
| 350 | 0,046823 | 2,444987183 | 2,659392266 | 2,914738533 | 3,171201977 | 3,143330325 |
| 351 | 0,046085 | 2,579613405 | 2,834077786 | 3,121060223 | 3,397767167 | 3,353007449 |
| 352 | 0,045425 | 2,73415942  | 3,029074586 | 3,345989603 | 3,640158789 | 3,575399611 |
| 353 | 0,044841 | 2,911133693 | 3,24542658  | 3,589517918 | 3,897665126 | 3,809790079 |
| 354 | 0,044335 | 3,112671275 | 3,483699016 | 3,851164896 | 4,169151311 | 4,055139258 |
| 355 | 0,043906 | 3,340361991 | 3,743880144 | 4,129925049 | 4,453035407 | 4,310071714 |
| 356 | 0,043555 | 3,595083626 | 4,025293321 | 4,424226835 | 4,747278053 | 4,572873316 |
| 357 | 0,043281 | 3,876847883 | 4,326524939 | 4,731908801 | 5,049388292 | 4,841500009 |
| 358 | 0,043086 | 4,184666941 | 4,645374132 | 5,050216728 | 5,356447685 | 5,113599293 |
| 359 | 0,042969 | 4,516449327 | 4,97883058  | 5,375825245 | 5,665153965 | 5,386544878 |
| 360 | 0,04293  | 4,868935206 | 5,323086524 | 5,704886454 | 5,97188442  | 5,657484283 |
| 361 | 0,042969 | 5,237682264 | 5,673588188 | 6,033106656 | 6,272777964 | 5,923398352 |
| 362 | 0,043086 | 5,617113258 | 6,025129964 | 6,355850547 | 6,563833555 | 6,181170885 |
| 363 | 0,043281 | 6,000634259 | 6,371992068 | 6,668270227 | 6,841021315 | 6,427665887 |
| 364 | 0,043555 | 6,380828448 | 6,708119057 | 6,965454363 | 7,100401676 | 6,659809339 |
| 365 | 0,043906 | 6,749724108 | 7,027332916 | 7,242590934 | 7,338247011 | 6,874672039 |
| 366 | 0,044335 | 7,099127817 | 7,323570747 | 7,495135495 | 7,551159787 | 7,06954988  |
| 367 | 0,044841 | 7,421005618 | 7,591133897 | 7,718975862 | 7,73618123  | 7,242038021 |
| 368 | 0,045425 | 7,70788729  | 7,824933008 | 7,910583796 | 7,890884906 | 7,390095714 |
| 369 | 0,046085 | 7,953262997 | 8,020712367 | 8,067144661 | 8,013450385 | 7,512099047 |
| 370 | 0,046823 | 8,15193859  | 8,175237342 | 8,186657131 | 8,102713333 | 7,606879515 |

Продолжение таблицы 14

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 371 | 0,047636 | 8,300316666 | 8,286430634 | 8,267996816 | 8,1581897   | 7,673747101 |
| 372 | 0,048526 | 8,39657545  | 8,353446602 | 8,310939982 | 8,18007322  | 7,712497295 |
| 373 | 0,04949  | 8,440726552 | 8,376677642 | 8,316146199 | 8,169206967 | 7,723402321 |
| 374 | 0,05053  | 8,434544709 | 8,357692159 | 8,285101522 | 8,127031147 | 7,707187501 |
| 375 | 0,051644 | 8,381376389 | 8,299109452 | 8,220026466 | 8,05551056  | 7,664994338 |
| 376 | 0,052833 | 8,285847466 | 8,204422196 | 8,123755351 | 7,957046202 | 7,59833242  |
| 377 | 0,054094 | 8,153501258 | 8,077781516 | 7,999595321 | 7,83437607  | 7,509022579 |
| 378 | 0,055428 | 7,990404959 | 7,923762381 | 7,851174414 | 7,690470625 | 7,399133991 |
| 379 | 0,056835 | 7,802763991 | 7,747127861 | 7,682288266 | 7,528428247 | 7,270917994 |
| 380 | 0,058312 | 7,596579721 | 7,552609628 | 7,496754537 | 7,351375666 | 7,126741329 |
| 381 | 0,05986  | 7,377377245 | 7,344719093 | 7,298282821 | 7,162377662 | 6,969021358 |
| 382 | 0,061479 | 7,150018207 | 7,127599301 | 7,090366024 | 6,964359377 | 6,800165527 |
| 383 | 0,063166 | 6,918601201 | 6,904922707 | 6,876196981 | 6,760043573 | 6,622516957 |
| 384 | 0,064922 | 6,68644127  | 6,67983493  | 6,658611788 | 6,551904003 | 6,438307659 |
| 385 | 0,066745 | 6,456112135 | 6,454940289 | 6,440059181 | 6,342135005 | 6,249620344 |
| 386 | 0,068634 | 6,229530876 | 6,232321696 | 6,222593414 | 6,132636448 | 6,058359365 |
| 387 | 0,07059  | 6,008064715 | 6,013585702 | 6,007886791 | 5,925012362 | 5,866230824 |
| 388 | 0,07261  | 5,808690153 | 5,799923102 | 5,797257163 | 5,720581024 | 5,674731483 |
| 389 | 0,074694 | 5,615465541 | 5,592176332 | 5,59170551  | 5,520393928 | 5,485145731 |
| 390 | 0,07684  | 5,4284839   | 5,405812759 | 5,391958986 | 5,325261003 | 5,298549579 |
| 391 | 0,079048 | 5,247786248 | 5,225717647 | 5,198515407 | 5,135779531 | 5,115820463 |
| 392 | 0,081317 | 5,073368891 | 5,051886944 | 5,025584882 | 4,95236452  | 4,937651544 |
| 393 | 0,083646 | 4,90519011  | 4,884278699 | 4,858844747 | 4,775278685 | 4,764569143 |
| 394 | 0,086032 | 4,743176227 | 4,722819109 | 4,698221569 | 4,604660624 | 4,596952062 |
| 395 | 0,088477 | 4,587227062 | 4,567407965 | 4,543615649 | 4,44050254  | 4,435051637 |
| 396 | 0,090977 | 4,437220794 | 4,417923501 | 4,394905837 | 4,282910976 | 4,279011566 |
| 397 | 0,093532 | 4,293018263 | 4,274226681 | 4,251953808 | 4,131648398 | 4,128886745 |
| 398 | 0,096142 | 4,154466739 | 4,136164958 | 4,114607793 | 3,986625707 | 3,995372569 |
| 399 | 0,098803 | 4,021403206 | 4,003575552 | 3,982705846 | 3,847675985 | 3,867155161 |
| 400 | 0,101516 | 3,893657201 | 3,876288275 | 3,85607865  | 3,714611839 | 3,744069527 |
| 401 | 0,104279 | 3,771053249 | 3,754127961 | 3,734551939 | 3,587232803 | 3,62594588  |
| 402 | 0,107091 | 3,653412933 | 3,636916532 | 3,617948547 | 3,55507766  | 3,512611637 |
| 403 | 0,10995  | 3,540556648 | 3,524474742 | 3,506090148 | 3,445096345 | 3,403893107 |
| 404 | 0,112855 | 3,432305064 | 3,416623635 | 3,398798706 | 3,339607382 | 3,299616903 |
| 405 | 0,115805 | 3,328480336 | 3,313185754 | 3,295897678 | 3,238437003 | 3,199611107 |
| 406 | 0,118798 | 3,228907103 | 3,213986134 | 3,197212996 | 3,141413888 | 3,103706233 |
| 407 | 0,121833 | 3,133413292 | 3,118853098 | 3,102573868 | 3,048369945 | 3,011735994 |
| 408 | 0,124909 | 3,041830748 | 3,027618894 | 3,011813405 | 2,959140935 | 2,923537921 |
| 409 | 0,128024 | 2,95399574  | 2,94012019  | 2,924769116 | 2,873566951 | 2,838953835 |
| 410 | 0,131177 | 2,869749332 | 2,856198448 | 2,841283279 | 2,791492787 | 2,75783021  |
| 411 | 0,134367 | 2,788937656 | 2,77570019  | 2,761203208 | 2,712768198 | 2,680018435 |
| 412 | 0,137591 | 2,711412095 | 2,698477187 | 2,684381438 | 2,637248081 | 2,605374986 |
| 413 | 0,140848 | 2,6370294   | 2,624386569 | 2,610675834 | 2,564792583 | 2,533761538 |
| 414 | 0,144138 | 2,565651738 | 2,553290873 | 2,539949642 | 2,49526715  | 2,465045009 |
| 415 | 0,147458 | 2,497146691 | 2,485058043 | 2,47207149  | 2,428542526 | 2,39909756  |
| 416 | 0,150808 | 2,431387221 | 2,419561393 | 2,406915342 | 2,364494712 | 2,335796555 |
| 417 | 0,154185 | 2,368251589 | 2,356679528 | 2,344360431 | 2,303004893 | 2,275024486 |
| 418 | 0,157588 | 2,30762326  | 2,296296245 | 2,284291155 | 2,243959338 | 2,216668877 |
| 419 | 0,161016 | 2,249390779 | 2,23830041  | 2,226596951 | 2,187249281 | 2,160622165 |
| 420 | 0,164467 | 2,193447631 | 2,182585819 | 2,171172167 | 2,132770785 | 2,106781563 |
| 421 | 0,167939 | 2,139692092 | 2,129051051 | 2,117915904 | 2,080424594 | 2,055048915 |
| 422 | 0,171433 | 2,08802707  | 2,077599305 | 2,06673186  | 2,030115976 | 2,005330543 |
| 423 | 0,174944 | 2,038359941 | 2,028138235 | 2,017528169 | 1,981754564 | 1,957537085 |

Продолжение таблицы 14

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 424 | 0,178473 | 1,99060238  | 1,980579788 | 1,970217231 | 1,93525419  | 1,911583332 |
| 425 | 0,182018 | 1,944670189 | 1,934840026 | 1,924715542 | 1,890532718 | 1,867388066 |
| 426 | 0,185578 | 1,90048313  | 1,890838961 | 1,880943529 | 1,847511878 | 1,824873892 |
| 427 | 0,18915  | 1,857964757 | 1,848500389 | 1,838825381 | 1,806117104 | 1,783967078 |
| 428 | 0,192734 | 1,81704225  | 1,80775172  | 1,798288884 | 1,766277368 | 1,744597394 |
| 429 | 0,196327 | 1,777646252 | 1,768523822 | 1,759265263 | 1,727925028 | 1,706697955 |
| 430 | 0,19993  | 1,739710713 | 1,730750857 | 1,721689021 | 1,690995664 | 1,670205068 |
| 431 | 0,203539 | 1,703172734 | 1,694370132 | 1,68549779  | 1,655427939 | 1,635058085 |
| 432 | 0,207154 | 1,667972422 | 1,659321952 | 1,650632182 | 1,621163445 | 1,601199256 |
| 433 | 0,210774 | 1,634052743 | 1,625549471 | 1,617035649 | 1,588146567 | 1,568573596 |
| 434 | 0,214396 | 1,601359387 | 1,592998562 | 1,584654341 | 1,556324348 | 1,537128744 |
| 435 | 0,21802  | 1,569840634 | 1,561617679 | 1,55343698  | 1,525646359 | 1,506814844 |
| 436 | 0,221644 | 1,539447228 | 1,531357734 | 1,523334732 | 1,496064576 | 1,477584415 |
| 437 | 0,225267 | 1,510132255 | 1,502171972 | 1,494301086 | 1,46753326  | 1,449392237 |
| 438 | 0,228888 | 1,481851025 | 1,474015859 | 1,466291737 | 1,440008844 | 1,422195237 |
| 439 | 0,232504 | 1,454560967 | 1,446846971 | 1,439264479 | 1,413449823 | 1,395952384 |
| 440 | 0,236116 | 1,428221515 | 1,420624884 | 1,413179101 | 1,387816656 | 1,370624586 |
| 441 | 0,239721 | 1,402794015 | 1,395311079 | 1,387997283 | 1,363071661 | 1,34617459  |
| 442 | 0,243318 | 1,378241624 | 1,370868845 | 1,363682502 | 1,339178927 | 1,322566895 |
| 443 | 0,246907 | 1,354529221 | 1,347263185 | 1,340199946 | 1,316104221 | 1,29976766  |
| 444 | 0,250485 | 1,331623321 | 1,324460736 | 1,317516421 | 1,293814905 | 1,27774462  |
| 445 | 0,254052 | 1,309491992 | 1,302429679 | 1,295600276 | 1,272279858 | 1,256467009 |
| 446 | 0,257607 | 1,288104776 | 1,281139668 | 1,274421322 | 1,251469396 | 1,235905484 |
| 447 | 0,261148 | 1,267432617 | 1,260561752 | 1,253950758 | 1,231355202 | 1,216032054 |
| 448 | 0,264674 | 1,247447789 | 1,240668309 | 1,234161104 | 1,211910256 | 1,196820008 |
| 449 | 0,268184 | 1,22812383  | 1,221432974 | 1,215026133 | 1,193108773 | 1,178243857 |
| 450 | 0,271677 | 1,209435481 | 1,202830581 | 1,196520809 | 1,174926136 | 1,160279269 |
| 451 | 0,275151 | 1,191358622 | 1,1848371   | 1,178621228 | 1,157338845 | 1,142903012 |
| 452 | 0,278607 | 1,173870217 | 1,167429583 | 1,161304559 | 1,140324453 | 1,1260929   |
| 453 | 0,282042 | 1,156948263 | 1,150586108 | 1,144548997 | 1,123861522 | 1,109827742 |
| 454 | 0,285457 | 1,140571734 | 1,134285732 | 1,128333704 | 1,107929567 | 1,094087288 |
| 455 | 0,288849 | 1,124720539 | 1,118508438 | 1,112638769 | 1,092509011 | 1,07885219  |
| 456 | 0,292218 | 1,10937547  | 1,103235092 | 1,097445158 | 1,077581142 | 1,064103952 |
| 457 | 0,295563 | 1,094518163 | 1,088447401 | 1,082734672 | 1,06312807  | 1,049824889 |
| 458 | 0,298882 | 1,080131055 | 1,074127871 | 1,068489908 | 1,049132686 | 1,035998092 |
| 459 | 0,302177 | 1,066197346 | 1,060259767 | 1,054694217 | 1,035578624 | 1,022607385 |
| 460 | 0,305444 | 1,052700964 | 1,046827078 | 1,041331674 | 1,022450226 | 1,009637291 |
| 461 | 0,308684 | 1,039626525 | 1,033814483 | 1,028387034 | 1,009732508 | 0,997073001 |
| 462 | 0,311895 | 1,026959305 | 1,021207315 | 1,015845709 | 0,997411129 | 0,98490034  |
| 463 | 0,315078 | 1,014685207 | 1,008991533 | 1,003693729 | 0,985472357 | 0,973105736 |
| 464 | 0,31823  | 1,002790731 | 0,99715369  | 0,991917719 | 0,973903043 | 0,961676194 |
| 465 | 0,321352 | 0,991262946 | 0,985680908 | 0,980504867 | 0,962690593 | 0,950599266 |
| 466 | 0,324443 | 0,980089465 | 0,974560848 | 0,969442898 | 0,951822942 | 0,939863029 |
| 467 | 0,327502 | 0,969258417 | 0,963781688 | 0,958720051 | 0,941288529 | 0,929456055 |
| 468 | 0,330528 | 0,958758424 | 0,953332097 | 0,948325054 | 0,931076273 | 0,919367395 |
| 469 | 0,33352  | 0,94857858  | 0,943201211 | 0,938247101 | 0,921175554 | 0,909586552 |
| 470 | 0,336479 | 0,938708429 | 0,933378618 | 0,928475832 | 0,911576189 | 0,90010346  |
| 471 | 0,339404 | 0,92913794  | 0,923854328 | 0,919001311 | 0,90226841  | 0,89090847  |
| 472 | 0,342293 | 0,919857497 | 0,914618764 | 0,909814009 | 0,893242853 | 0,881992323 |
| 473 | 0,345147 | 0,91085787  | 0,905662736 | 0,900904785 | 0,88449053  | 0,873346141 |
| 474 | 0,347965 | 0,902130207 | 0,896977425 | 0,892264866 | 0,876002822 | 0,864961402 |
| 475 | 0,350747 | 0,893666009 | 0,888554372 | 0,883885835 | 0,867771454 | 0,856829931 |
| 476 | 0,353491 | 0,885457122 | 0,880385453 | 0,875759613 | 0,859788485 | 0,84894388  |

Продолжение таблицы 14

|     |          |             |             |             |             |             |
|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 477 | 0,356198 | 0,877495716 | 0,872462872 | 0,867878445 | 0,852046293 | 0,841295716 |
| 478 | 0,358867 | 0,869774276 | 0,864779146 | 0,860234883 | 0,84453756  | 0,833878207 |
| 479 | 0,361497 | 0,862285582 | 0,857327086 | 0,852821778 | 0,837255258 | 0,826684408 |
| 480 | 0,364089 | 0,855022704 | 0,850099789 | 0,845632264 | 0,830192639 | 0,81970765  |
| 481 | 0,366642 | 0,847978983 | 0,843090627 | 0,838659746 | 0,823343221 | 0,812941529 |
| 482 | 0,369155 | 0,841148025 | 0,836293231 | 0,831897888 | 0,816700777 | 0,806379891 |
| 483 | 0,371629 | 0,834523684 | 0,829701484 | 0,825340605 | 0,810259328 | 0,800016826 |
| 484 | 0,374063 | 0,82810006  | 0,823309507 | 0,818982049 | 0,804013125 | 0,793846655 |
| 485 | 0,376456 | 0,821871478 | 0,817111653 | 0,812816603 | 0,797956649 | 0,787863922 |
| 486 | 0,378808 | 0,81583249  | 0,811102496 | 0,806838868 | 0,792084593 | 0,782063385 |
| 487 | 0,38112  | 0,809977856 | 0,80527682  | 0,801043656 | 0,786391858 | 0,776440005 |
| 488 | 0,38339  | 0,804302545 | 0,799629613 | 0,795425981 | 0,780873546 | 0,770988941 |
| 489 | 0,385619 | 0,798801718 | 0,794156059 | 0,789981052 | 0,775524947 | 0,765705539 |
| 490 | 0,387807 | 0,793470726 | 0,78885153  | 0,784704263 | 0,770341536 | 0,760585329 |
| 500 | 0,407355 | 0,748599734 | 0,744204504 | 0,740290772 | 0,726714845 | 0,717491232 |
| 510 | 0,422596 | 0,648599734 | 0,644204504 | 0,640290772 | 0,626714845 | 0,617491232 |

Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы

Переход на E85 позволил увеличить угол опережения зажигания и устранить перерасход топлива, при этом увеличение угла опережения зажигания привело к небольшому увеличению теплового КПД без снижения нагрузки на двигатель.

### 3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

#### 3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

Кинематический расчет для центрального кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя (радиус кривошипа 39,5 мм, а длина шатуна 147,5 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $5200 \text{ мин}^{-1}$ .

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены на рисунках 11, 12 и 13.

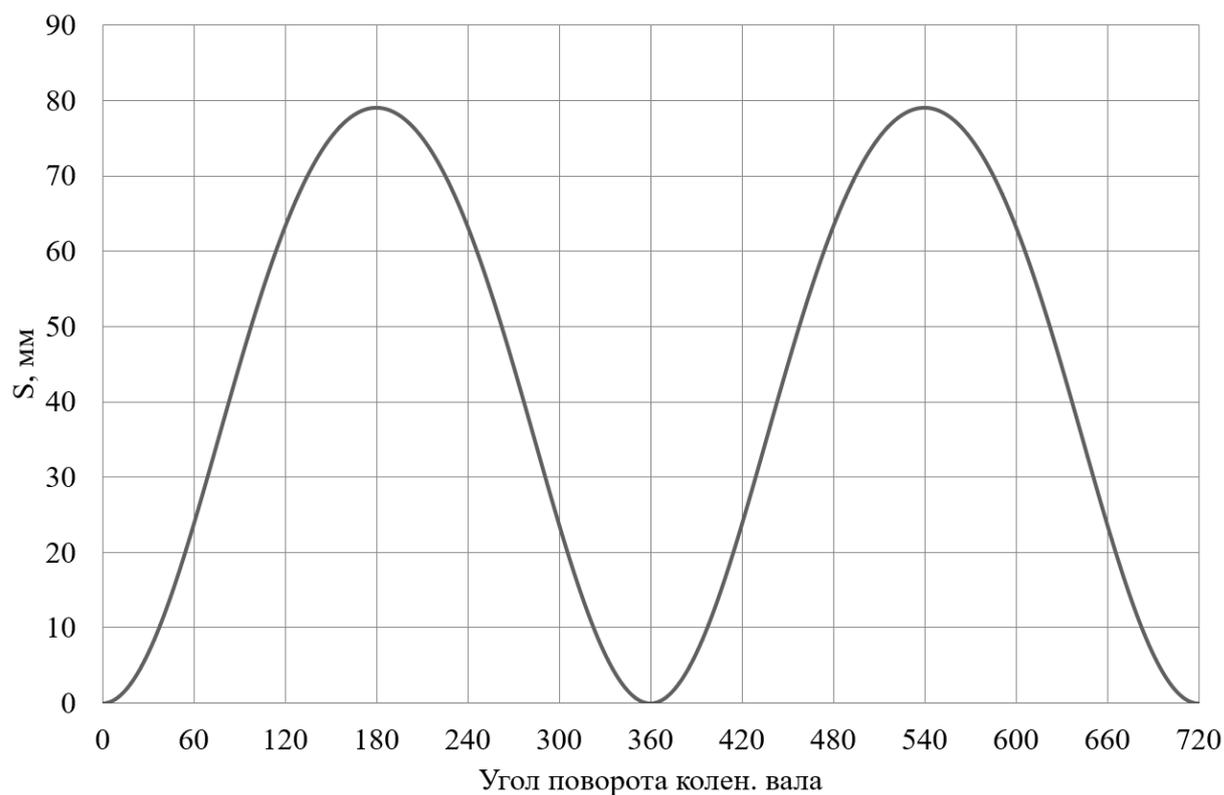


Рисунок 11 – Диаграмма изменения хода поршня

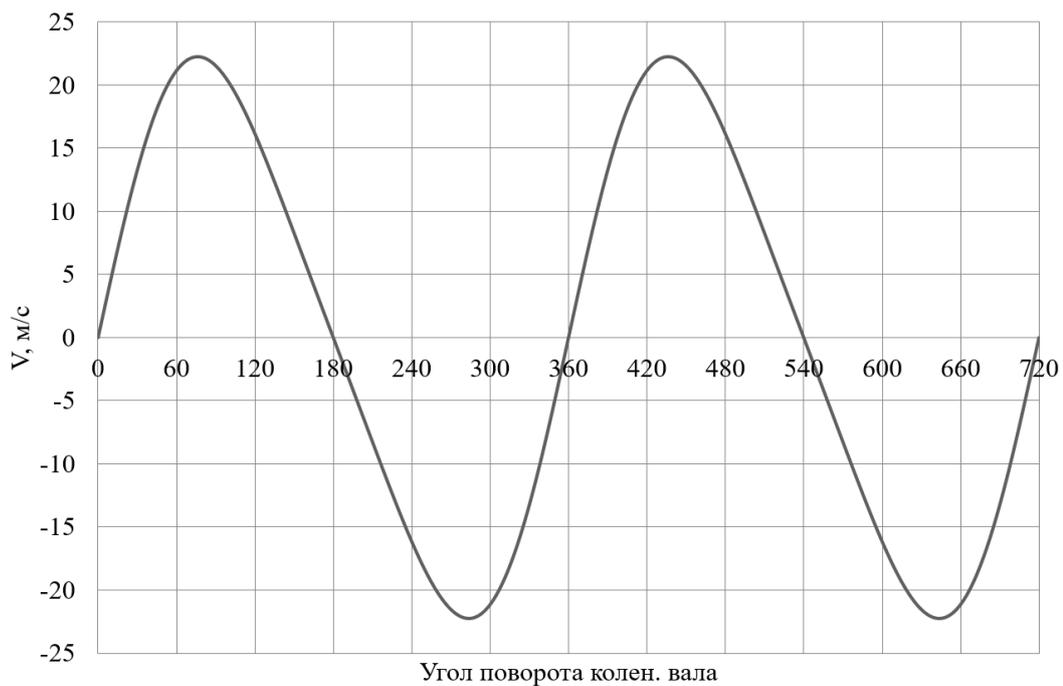


Рисунок 12 – Диаграмма изменения скорости поршня

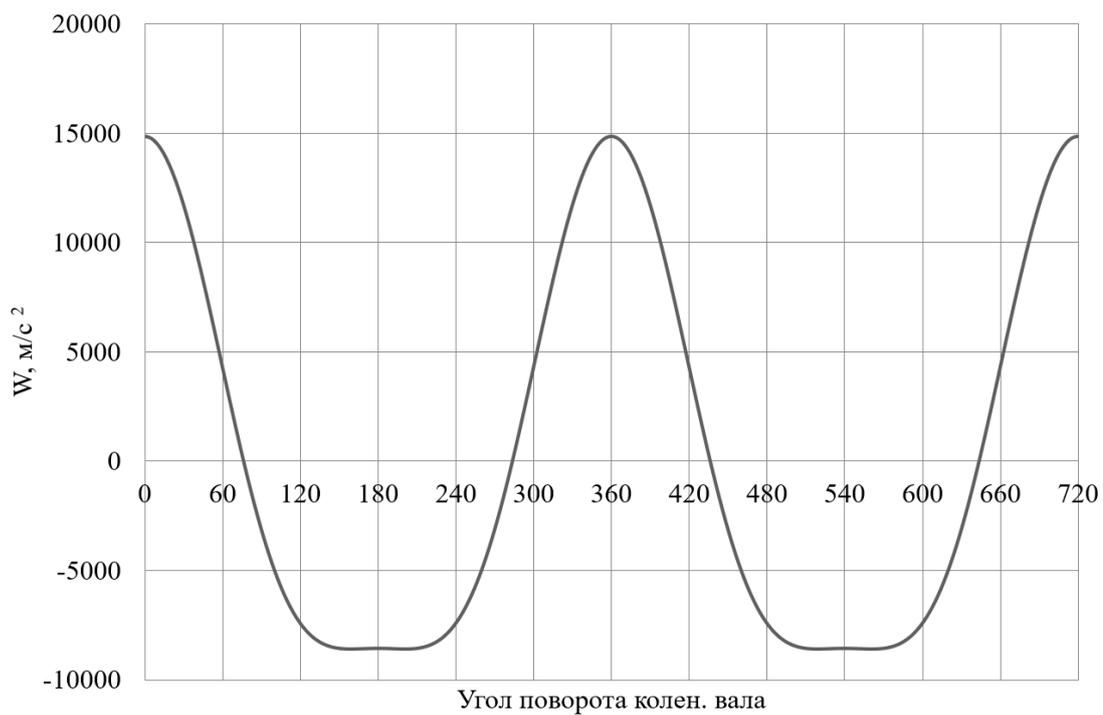


Рисунок 13 – Диаграмма изменения ускорения поршня

По результатам кинематического расчета мы можем определить инерционные силы в динамическом расчете.

## 3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

### 3.2.1 Расчет основных сил и моментов действующих в КШМ

Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $5200 \text{ мин}^{-1}$ , для условий работы двигателя на бензине, компримированном природном газе и биометане соответственно.

Результаты приведение масс кривошипно-шатунного механизма по двух массовой схеме показаны в таблице 15.

Таблица 15 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

| Параметр   | Величина |
|--|----------|
| Площадь поршня, $\text{м}^2$                               | 0,006362 |
| Удельная масса поршня, $\text{кг}/\text{м}^2$              | 100      |
| Масса поршневой группы, кг                                 | 0,63617  |
| Удельная масса шатуна, $\text{кг}/\text{м}^2$              | 150      |
| Масса шатуна, кг   | 0,95426  |
| Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг | 0,262    |
| Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг         | 0,692    |
| Удельная масса одного колена вала, $\text{кг}/\text{м}^2$  | 140      |
| Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг       | 0,8906   |
| Массы, совершающие возвратно-поступательное движение       | 0,899    |
| Массы, совершающие вращательное движение                   | 1,58248  |
| Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н       | -8103,36 |
| Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н    | -10432   |
| Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н              | -18535   |

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 14 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения.

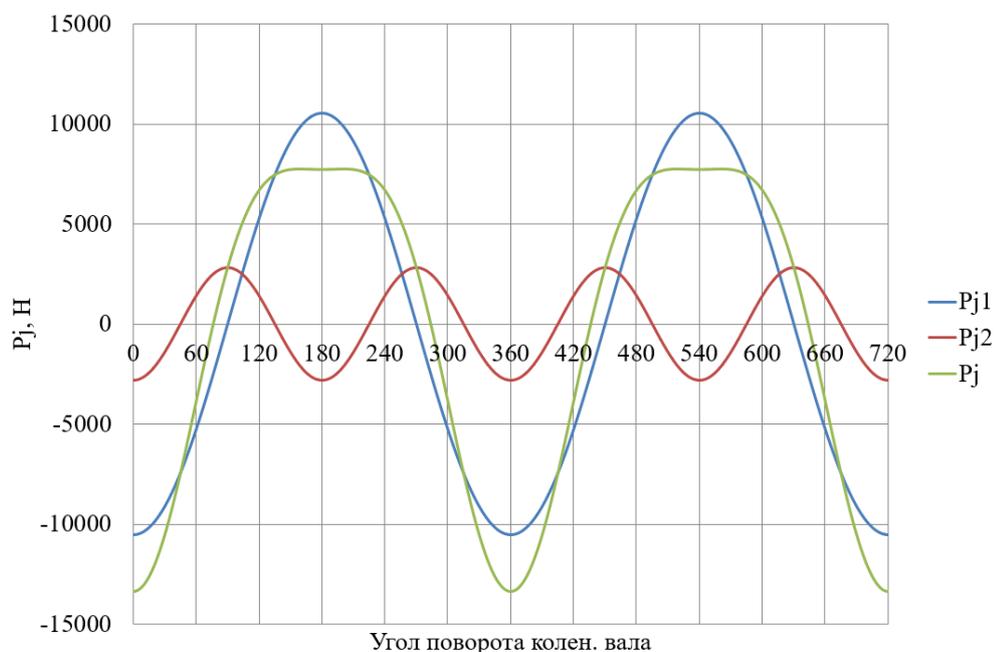


Рисунок 14 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

На рисунках 15 – 17 приведено сравнение суммарных сил, действующих на поршневой палец двигателя при работе на бензине (рисунок 15), спирте (рисунок 16) и E85 (рисунок 17).

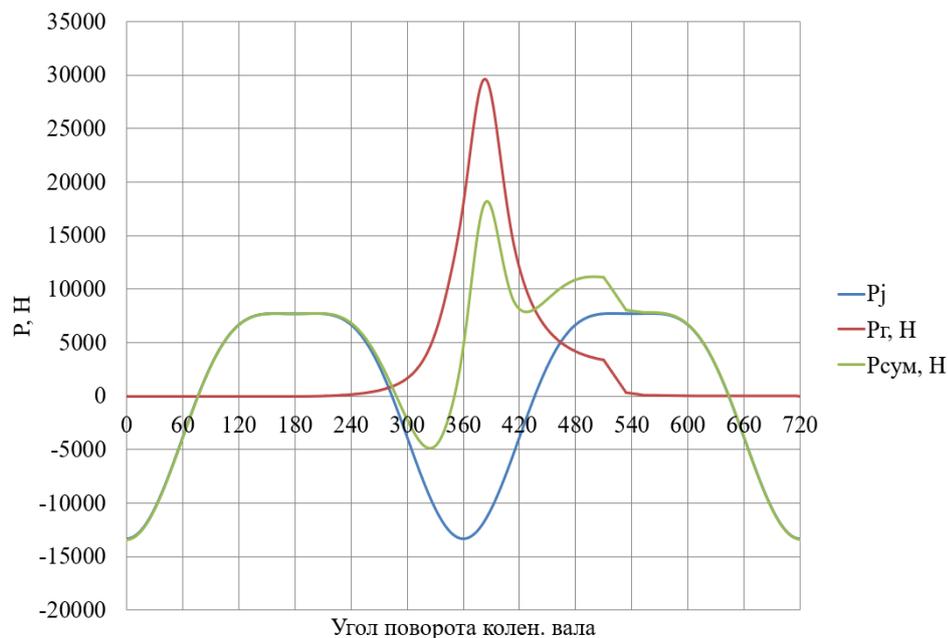


Рисунок 15 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на бензине

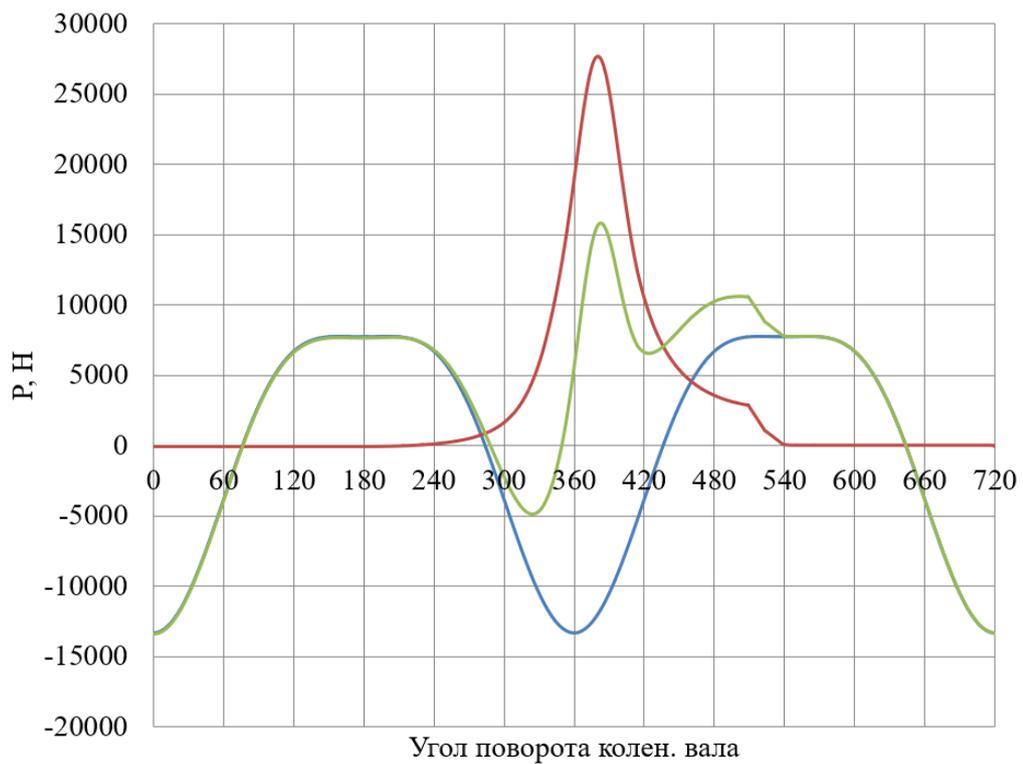


Рисунок 16 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на спирте

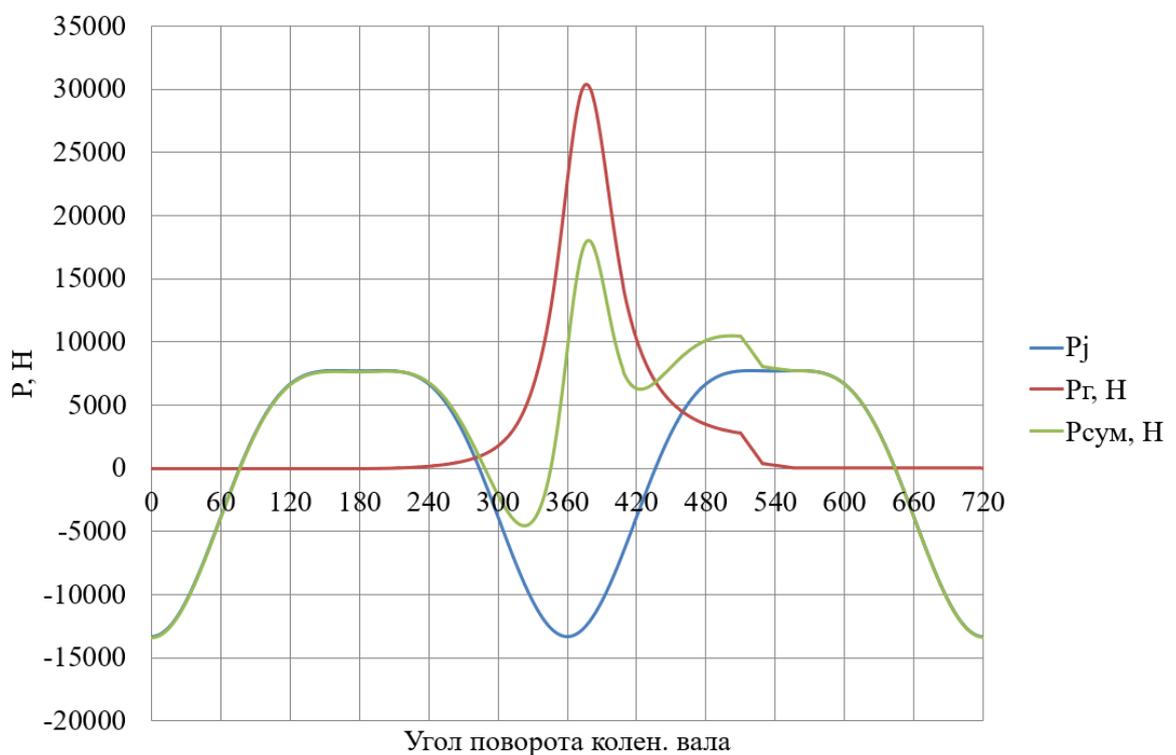


Рисунок 17 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на E85

На рисунках 18 – 20 приведено сравнение сил, сосредоточенных на оси поршневого пальца и шатунной шейке при работе на бензине (рисунок 18), спирте (рисунок 19) и E85 (рисунок 20).

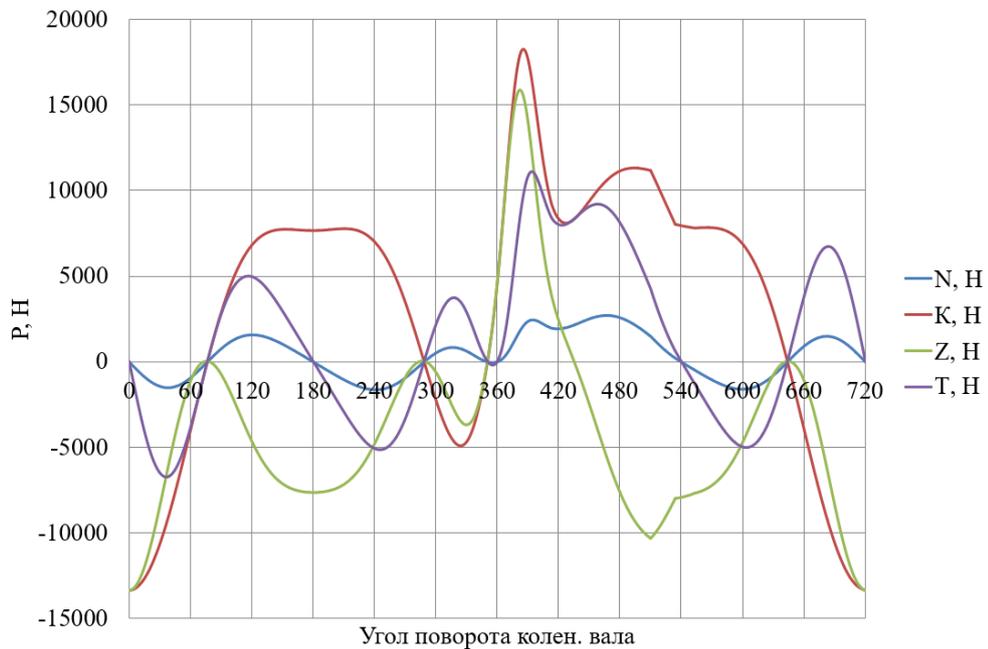


Рисунок 18 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейке двигателя при работе на бензине

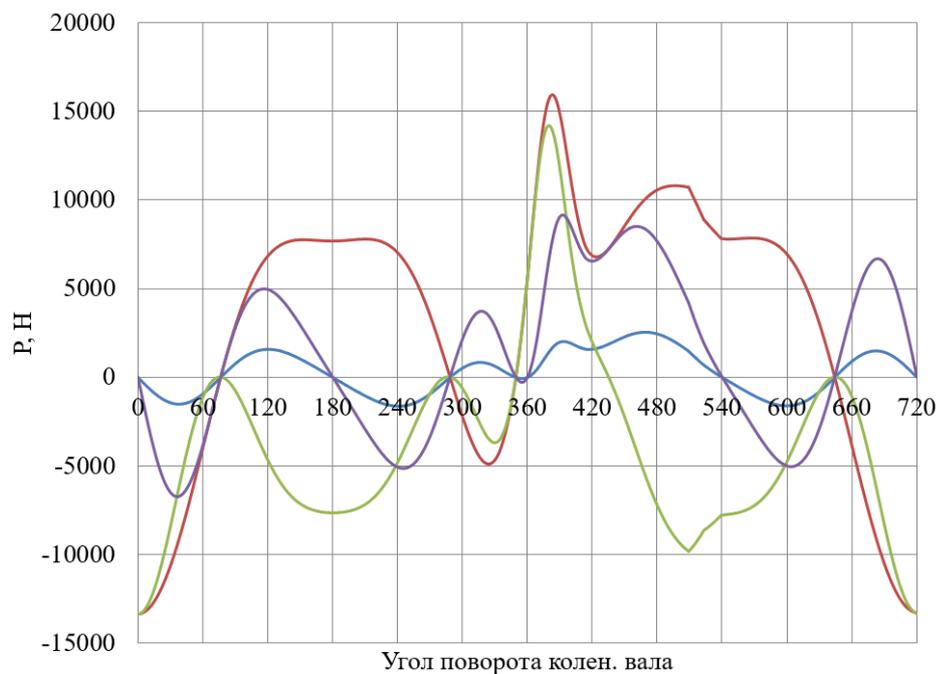


Рисунок 19 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейке двигателя при работе на спирте

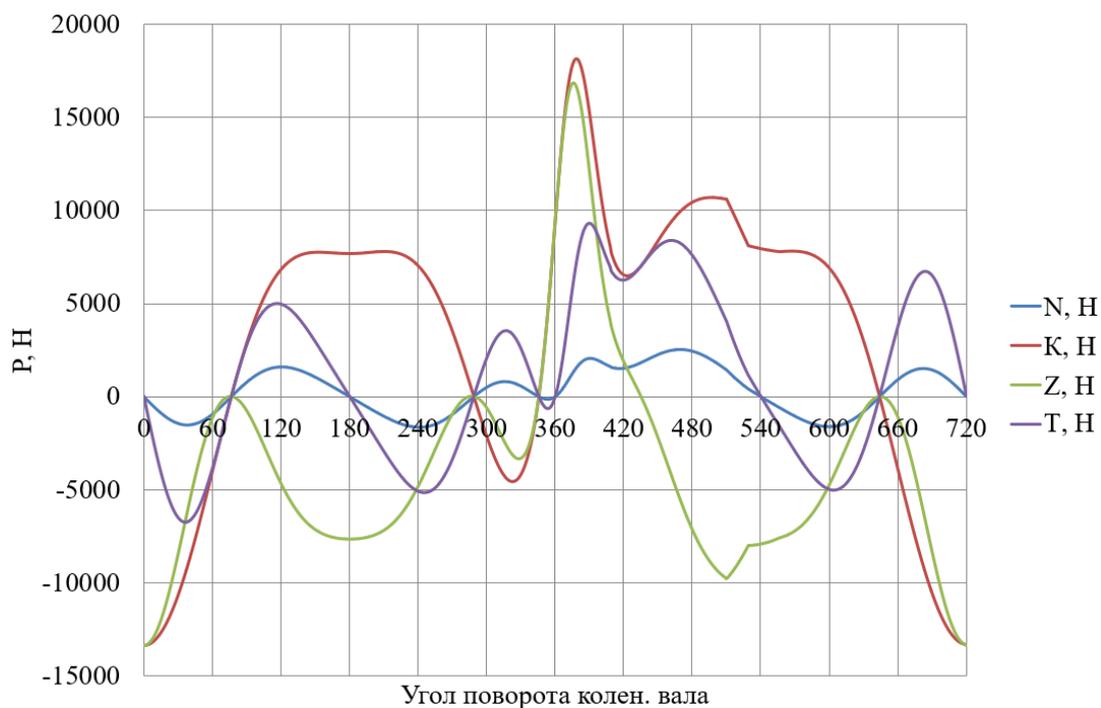


Рисунок 20 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейке двигателя при работе на E85

На рисунках 21 – 23 приведено сравнение крутящего момента двигателя при работе на бензине (рисунок 21), спирте (рисунок 22) и E85 (рисунок 23).

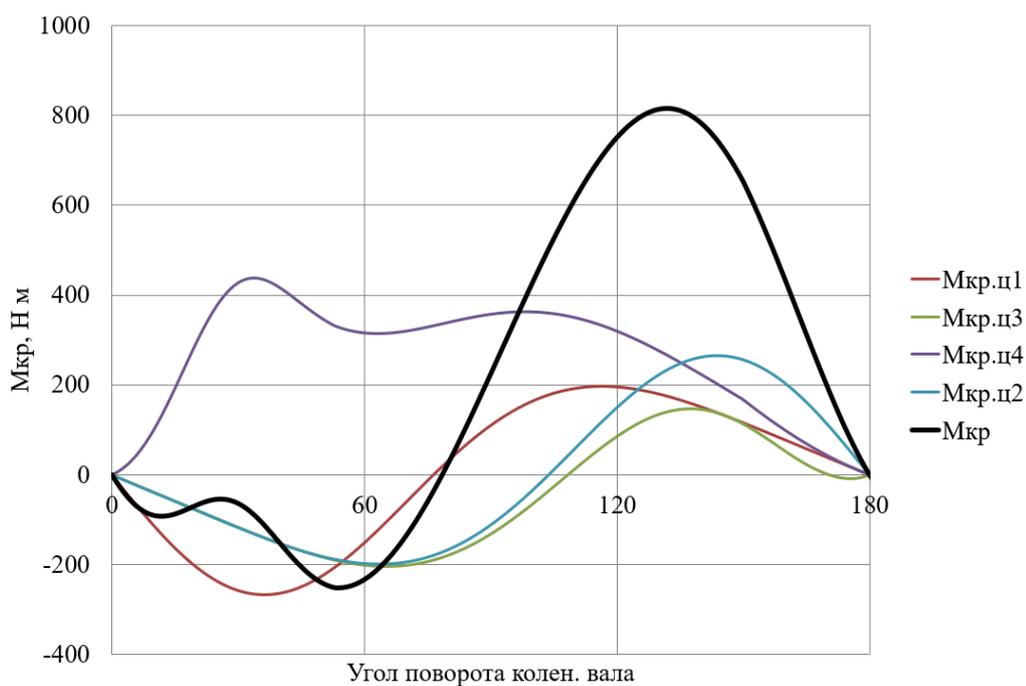


Рисунок 21 – График крутящего момента при работе на бензине

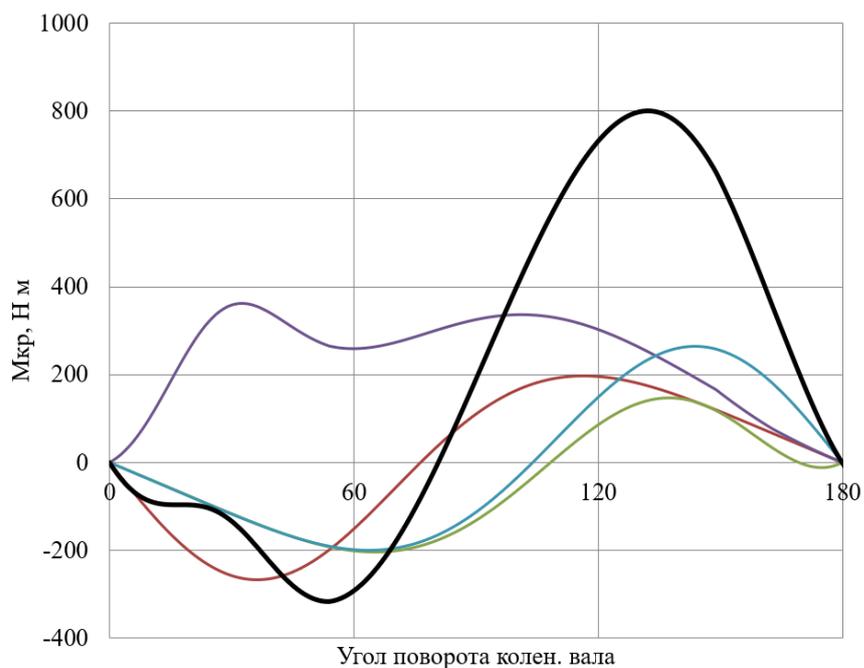


Рисунок 22 – График крутящего момента при работе на спирте

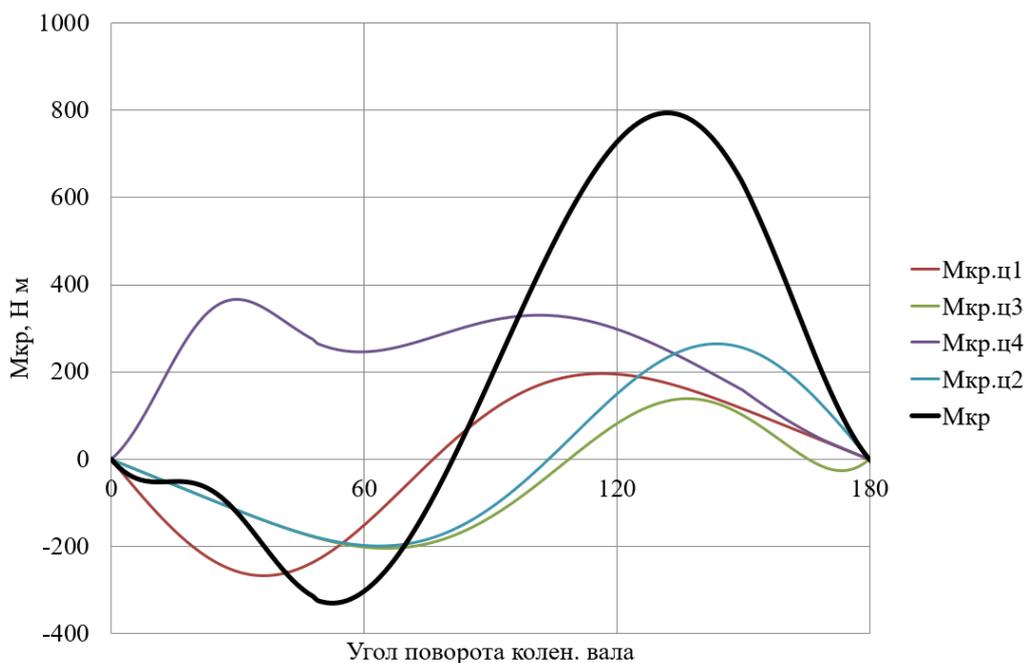


Рисунок 23 – График крутящего момента при работе на E85

Расчет основных сил и моментов действующих в КШМ показал, что наибольшие силы возникают при работе на бензине, а при работе на спирте их максимальные величины снижаются 5 – 8 %, причем при работе на E85 происходит еще снижение на 1 – 2 процента.

### 3.2.2 Расчет сил, действующих на шатунную и коренные шейки коленчатого вала

На рисунках 24 – 26 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в прямоугольных координатах при работе на бензине (рисунок 24), спирте (рисунок 25) и E85 (рисунок 26) соответственно.

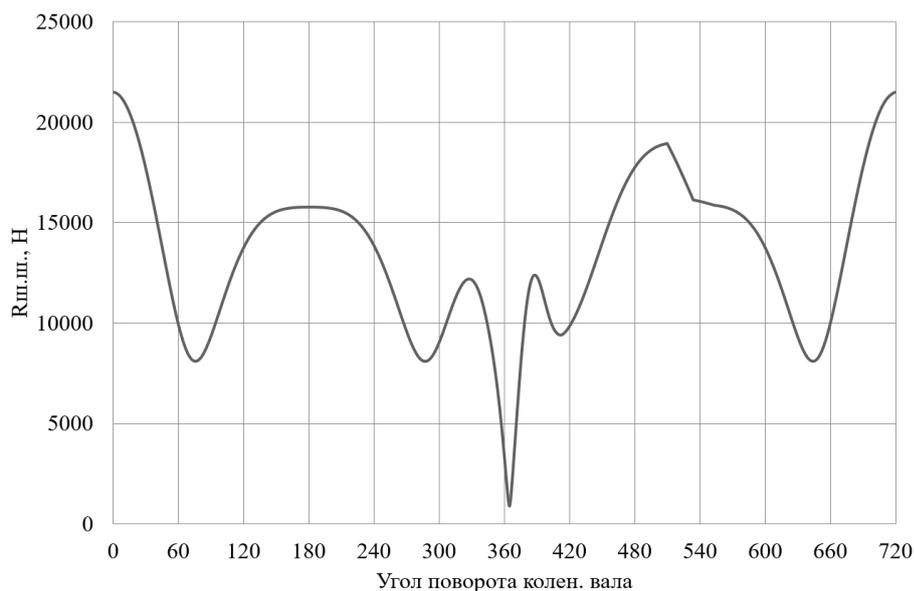


Рисунок 24 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при работе на бензине

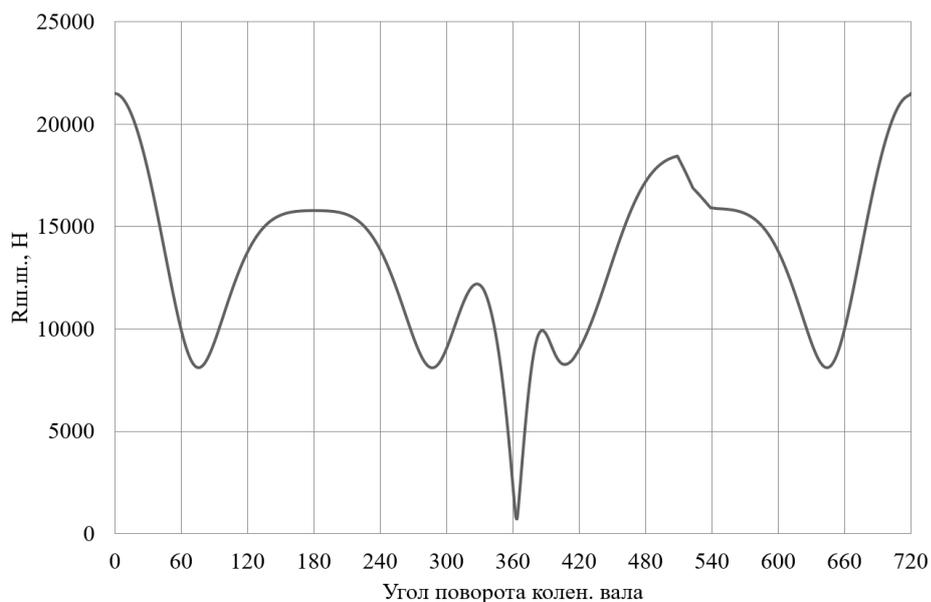


Рисунок 25 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при работе на спирте

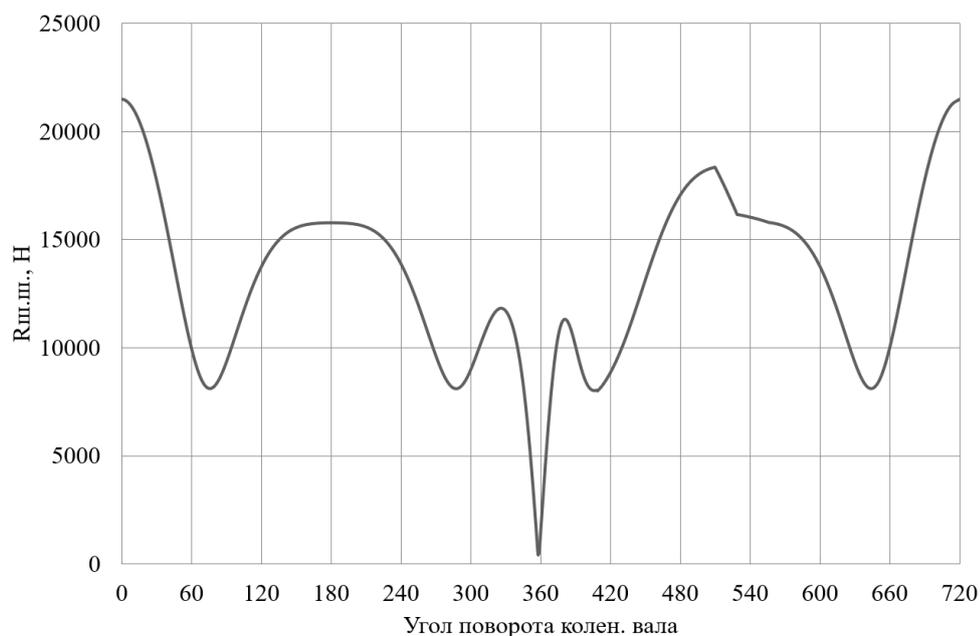


Рисунок 26 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при работе на E85

На рисунках 27 – 28 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах при работе на бензине (рисунок 27), спирте (рисунок 28) и E85 (рисунок 29) соответственно.

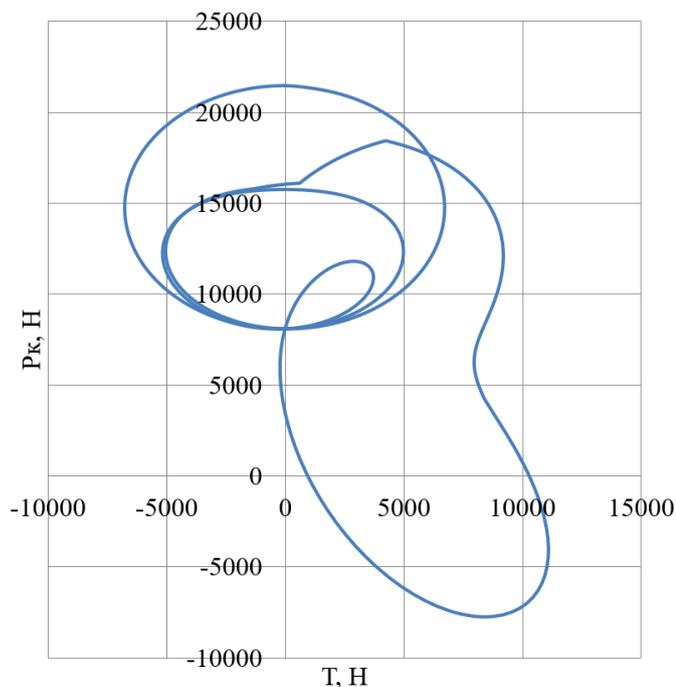


Рисунок 27 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при работе на бензине

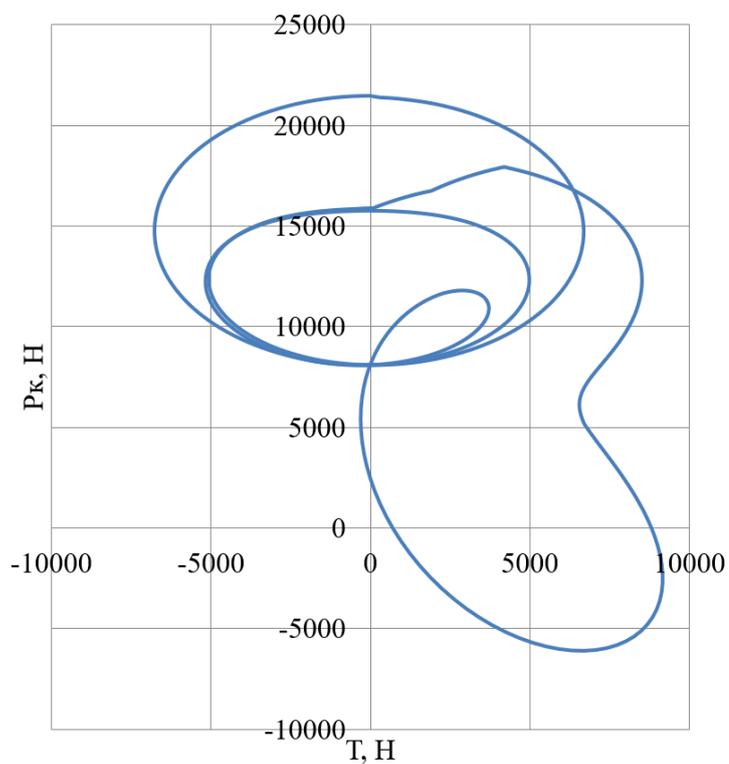


Рисунок 28 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при работе на спирте

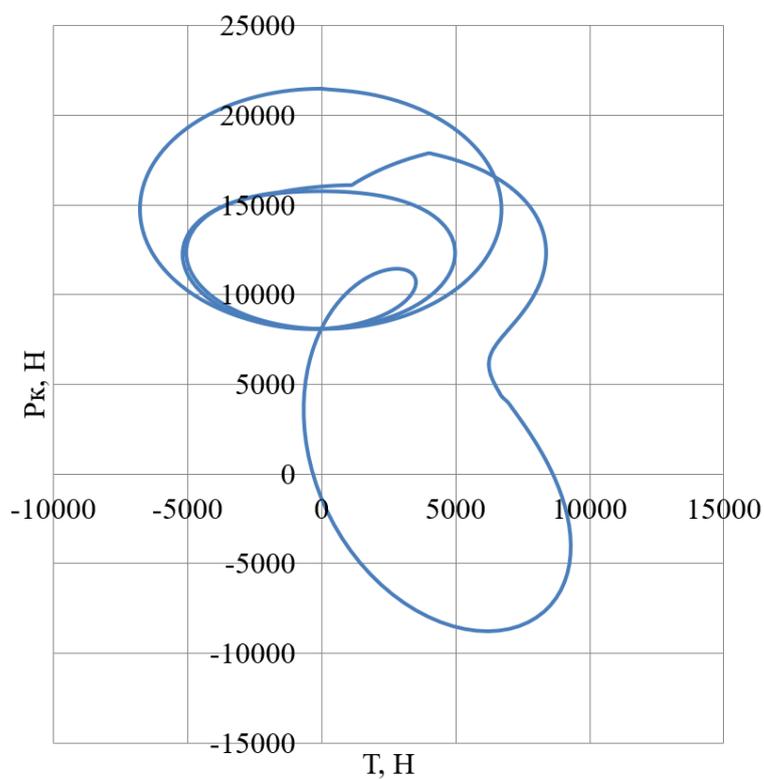


Рисунок 29 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при работе на E85

На рисунках 30 – 32 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на бензине (рисунок 30), спирте (рисунок 31) и E85 (рисунок 32).

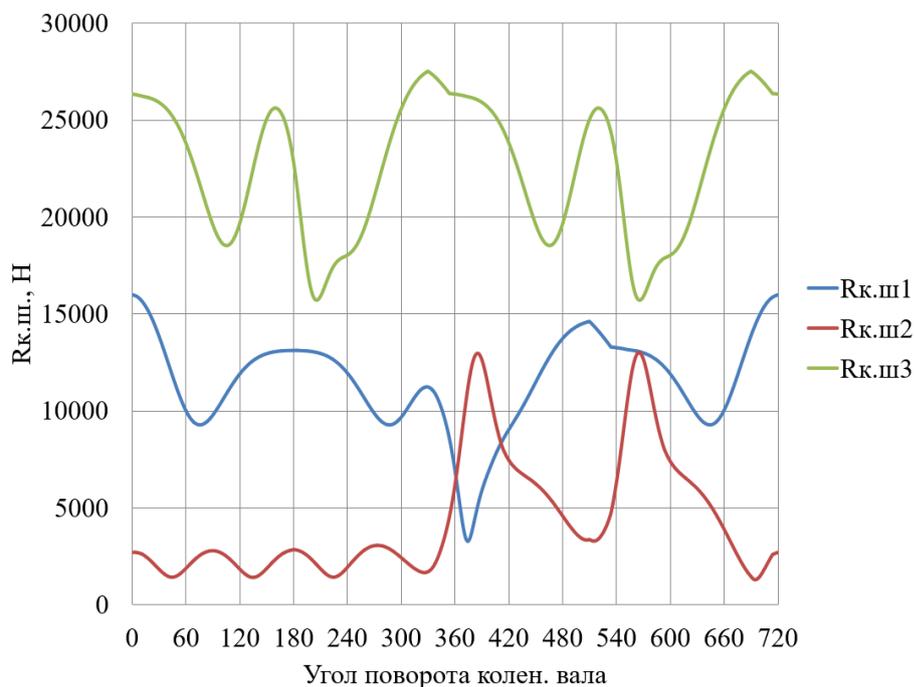


Рисунок 30 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на бензине

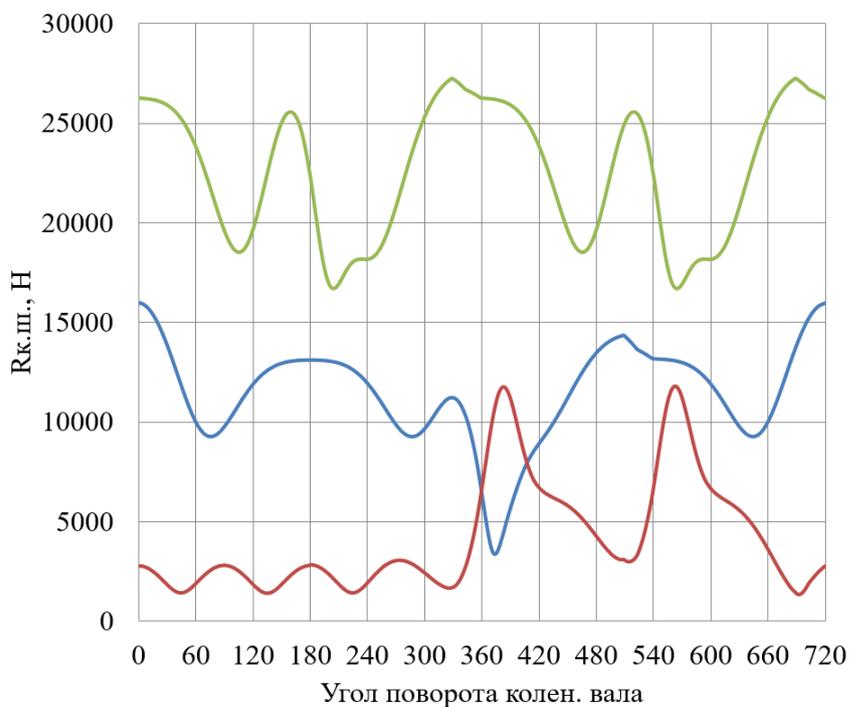


Рисунок 31 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на спирте

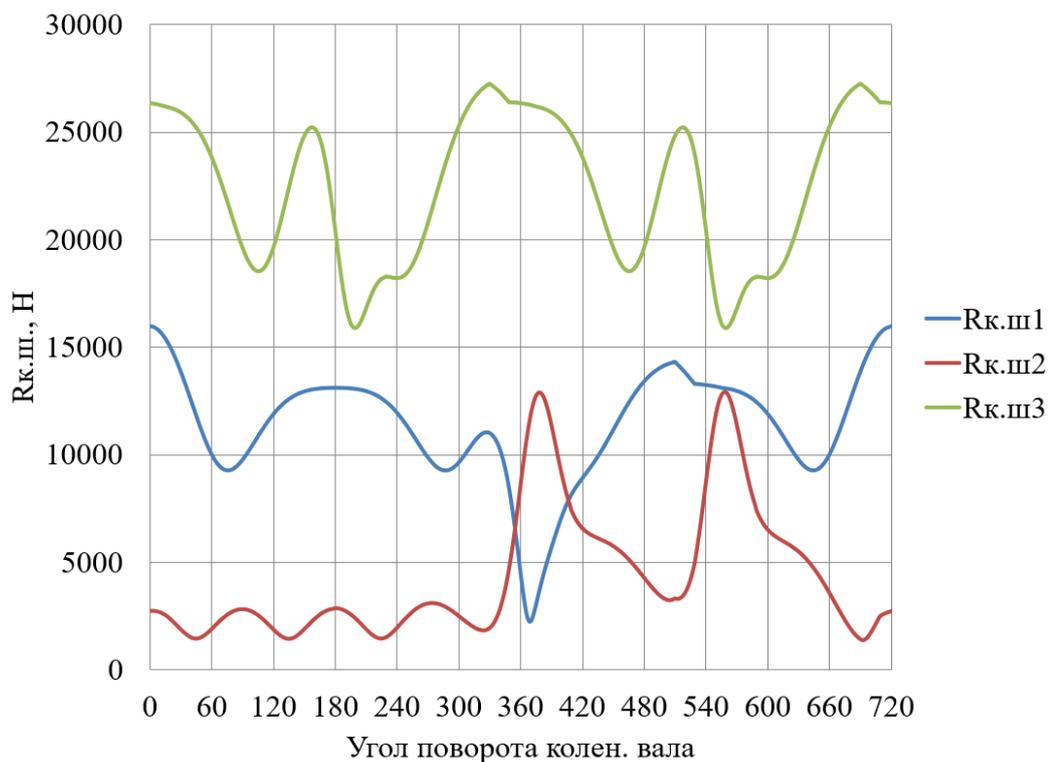


Рисунок 32 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на E85

На рисунках 33 – 35 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на бензине (рисунок 33), спирте (рисунок 34) и E85 (рисунок 35).

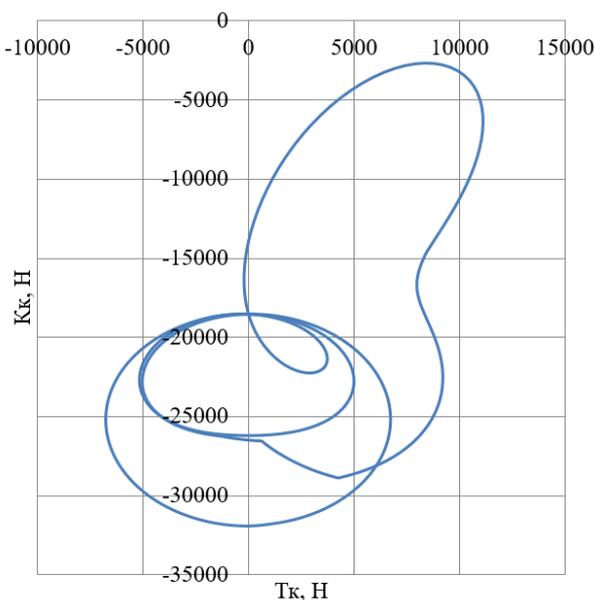


Рисунок 33 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на бензине

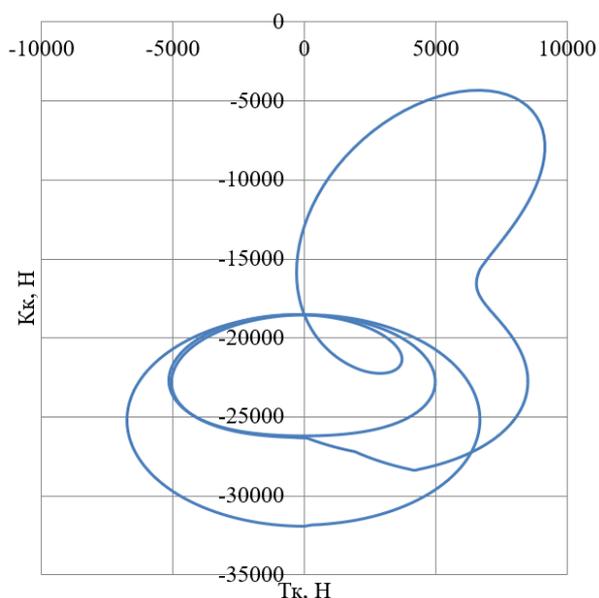


Рисунок 34 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на спирте

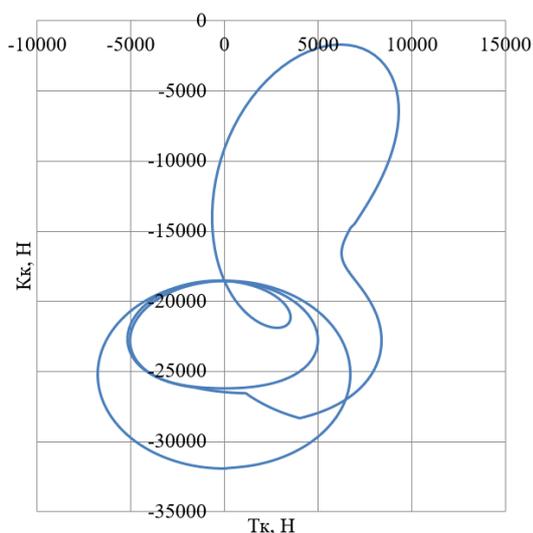


Рисунок 35 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на E85

### Выводы по 3-му разделу

Применение топлива E85 привело к незначительному снижению нагрузок на КШМ, примерно на 8%. Снижение нагрузки при большей детонационной устойчивости позволяет рекомендовать работать на таких топливах на степенях сжатия 14-17. Это повысит несколько нагрузки на элементы КШМ, но их увеличение будет в рамках запаса прочности. Либо же необходимо применять наддув для эффективного использования заложенного с топливом потенциала.

## 4 Анализ влияния вида топлива на рабочий процесс ДВС

### 4.1 Влияния вида топлива на максимальную температуру и давление цикла

Сравнивая величины максимального давления в цилиндре двигателя (рисунок 36), следует отметить снижение давления с ростом оборотов при работе на бензине и рост давления при работе на E85. Такие характеристики изменения максимального давления произошли из-за подбора оптимальных значений угла опережения зажигания. Проведем сравнение индикаторных диаграмм в P-V координатах для всех 3-х рассматриваемых видов топлива (рисунок 37 – 41). Из представленных рисунков видно, что максимальное давление снижается по мере увеличения частоты вращения, это объясняется увеличением продолжительности процесса сгорания по углу поворота коленчатого вала.

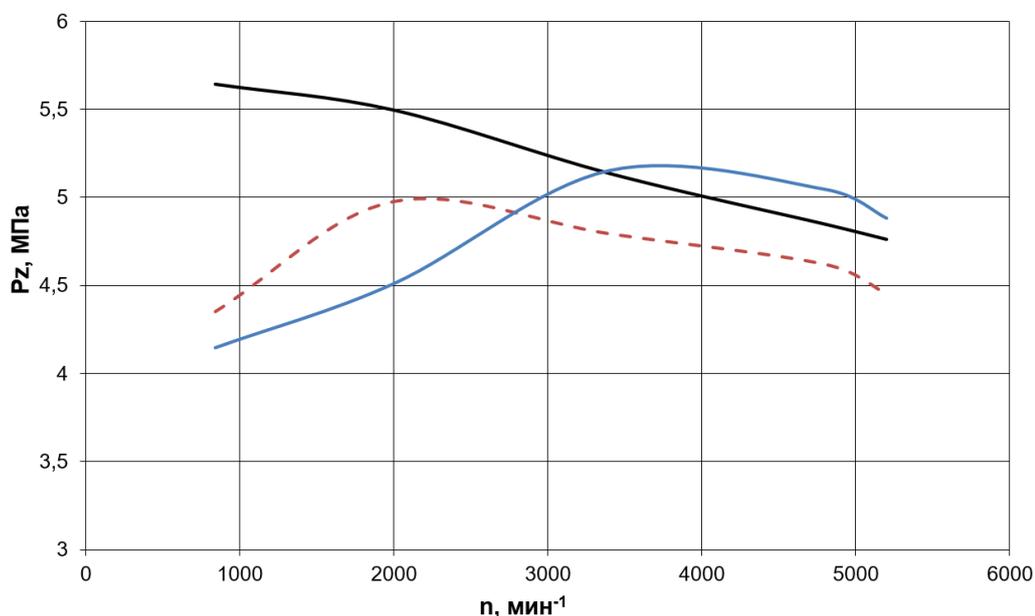


Рисунок 36 – Сравнение величины максимального давления в цилиндре двигателя для исследуемых видов топлива

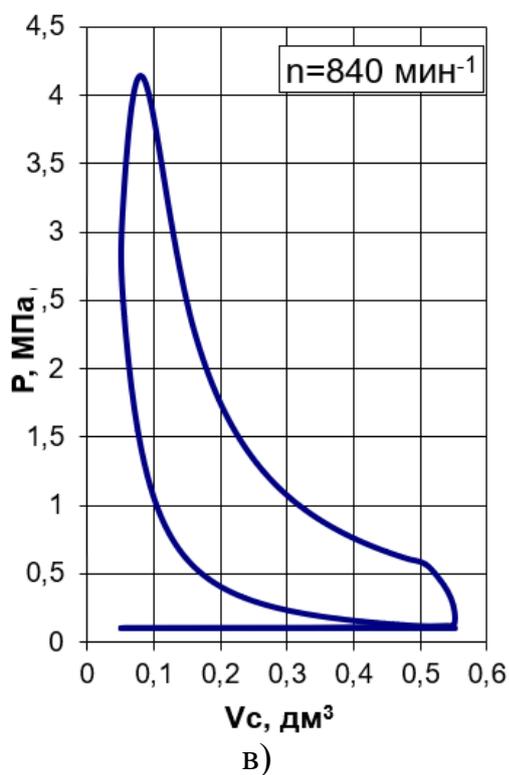
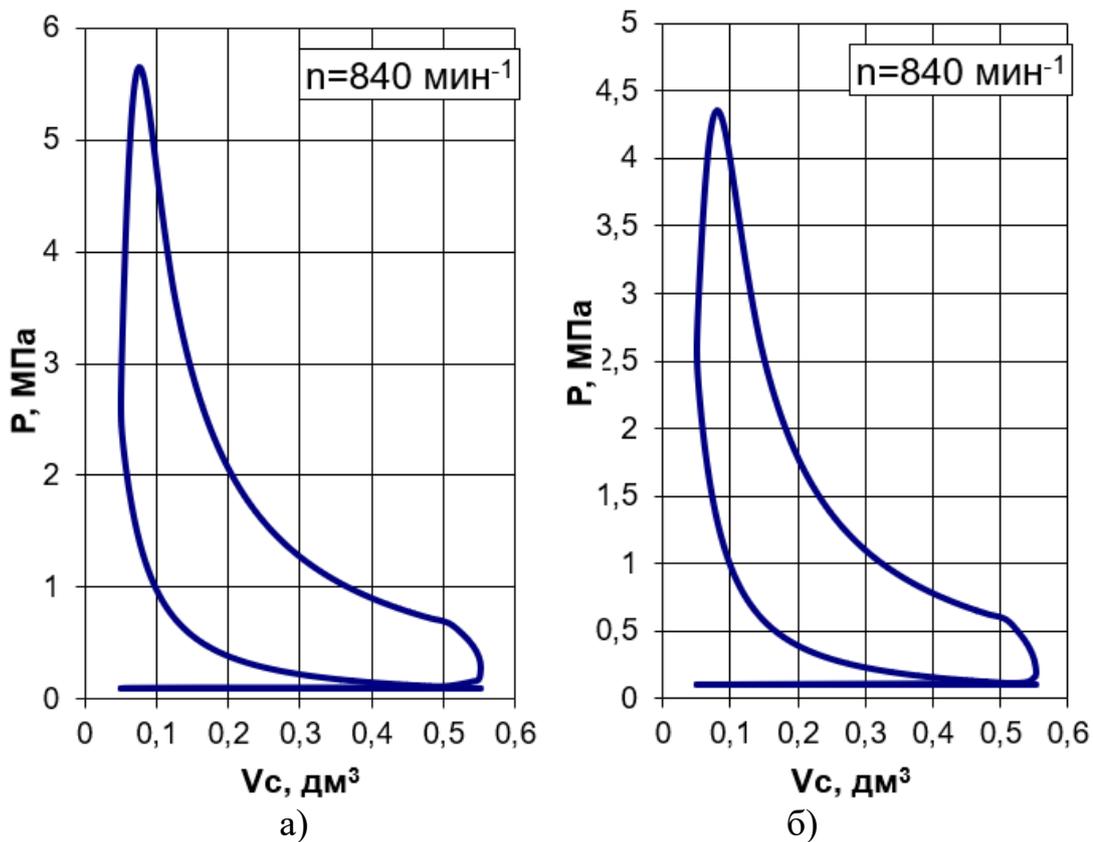


Рисунок 37 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $840 \text{ мин}^{-1}$  при работе на: (а) бензине; (б) спирте и (в) E85

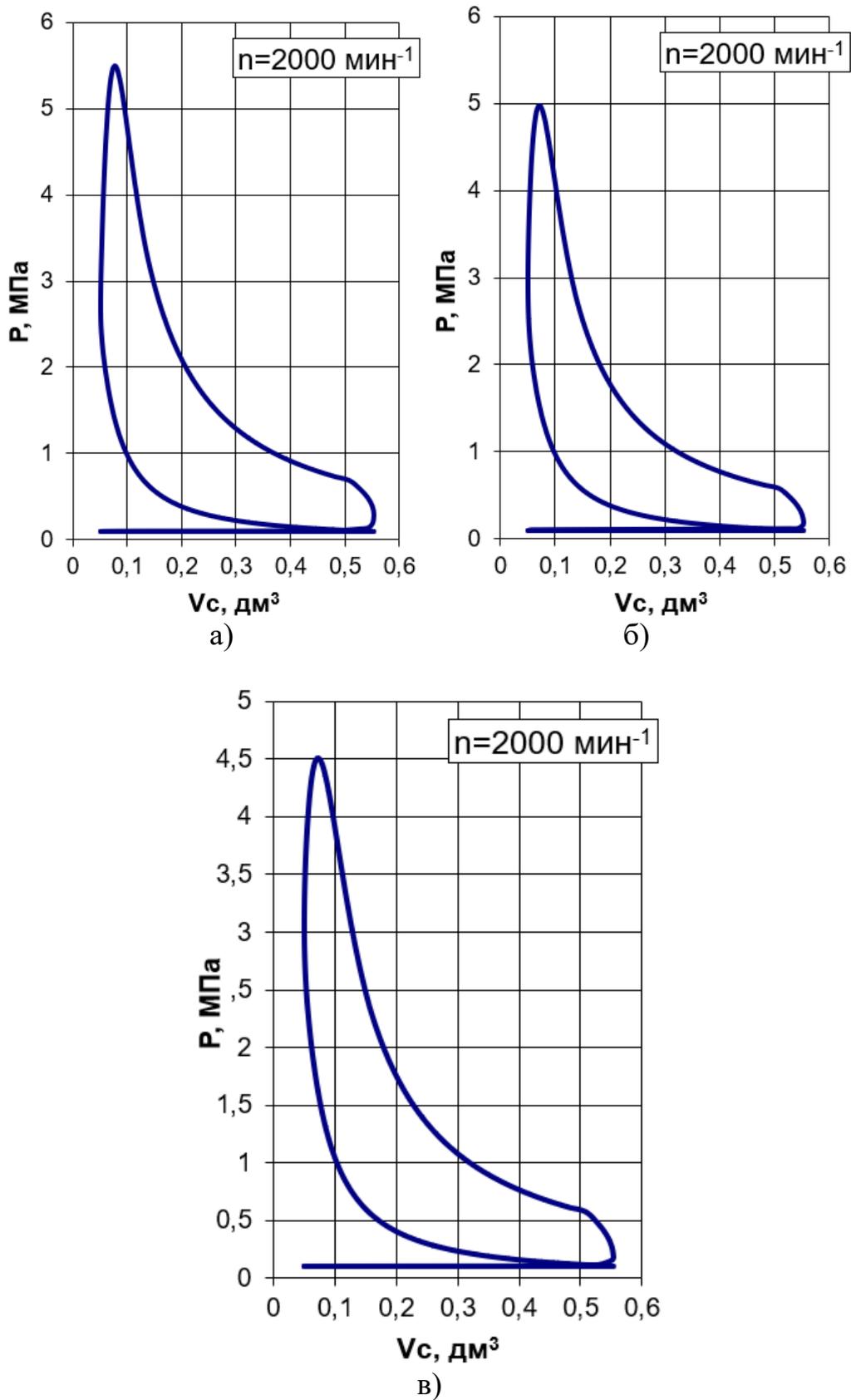


Рисунок 38 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима 900 мин<sup>-1</sup> при работе на: (а) бензине; (б) спирте и (в) E85

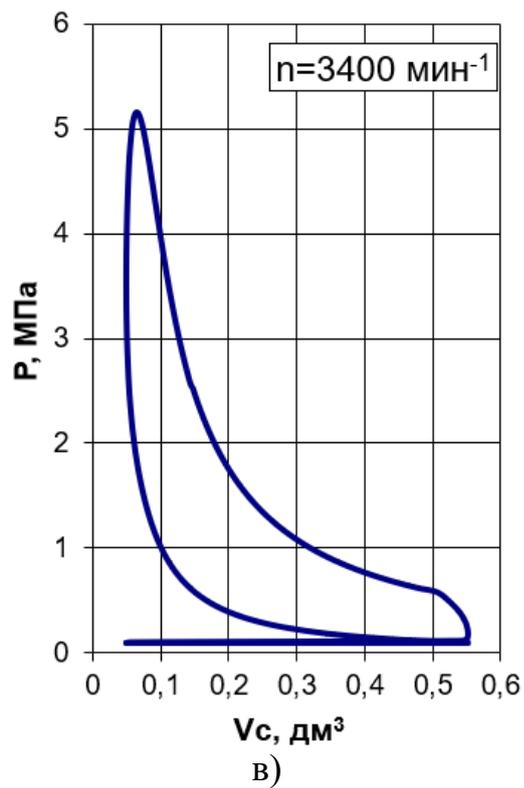
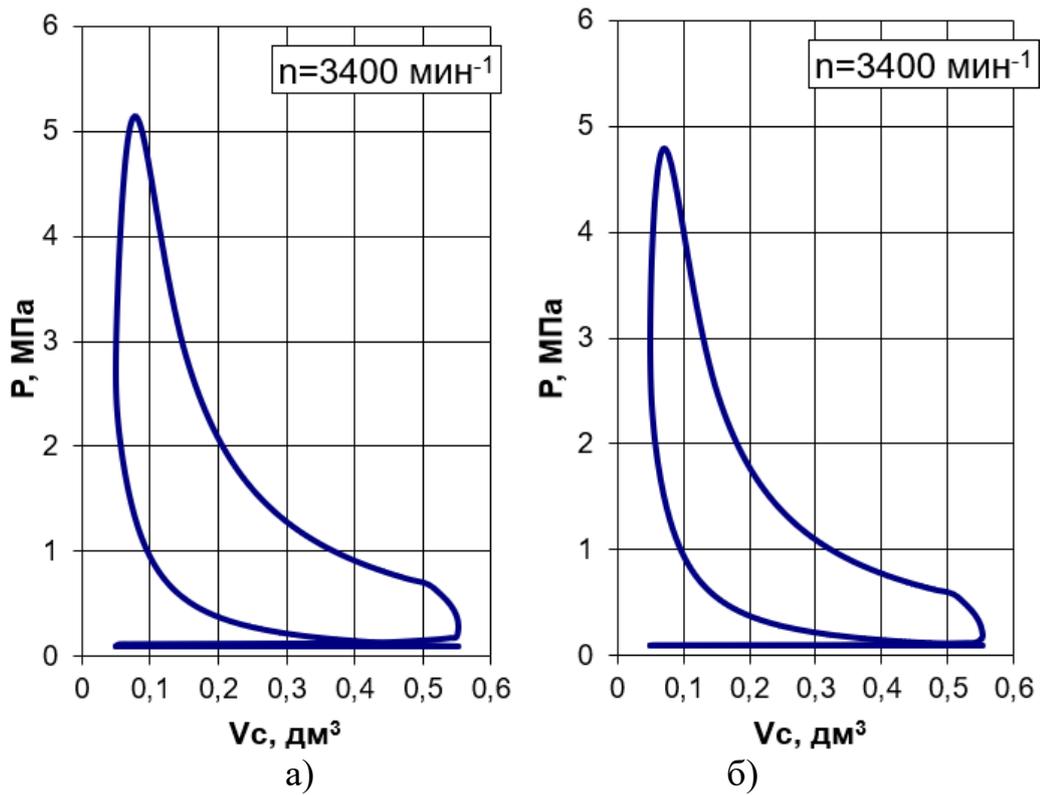


Рисунок 39 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $1200 \text{ мин}^{-1}$  при работе на: (а) бензине; (б) спирте и (в) E85

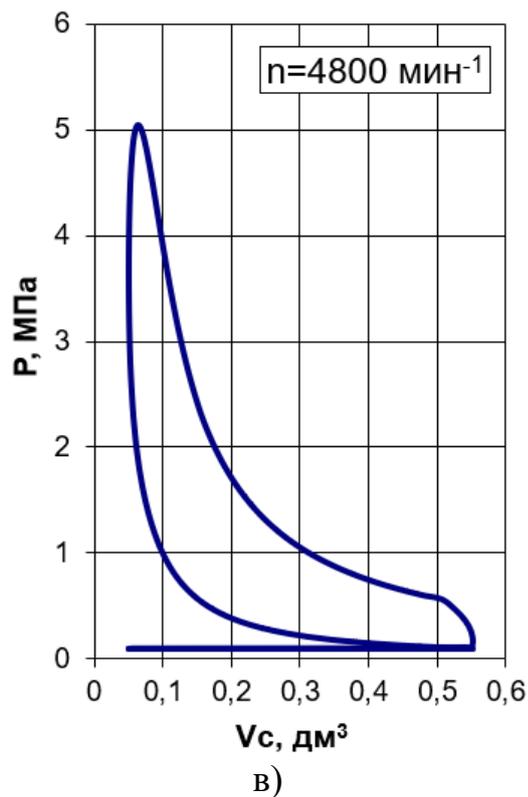
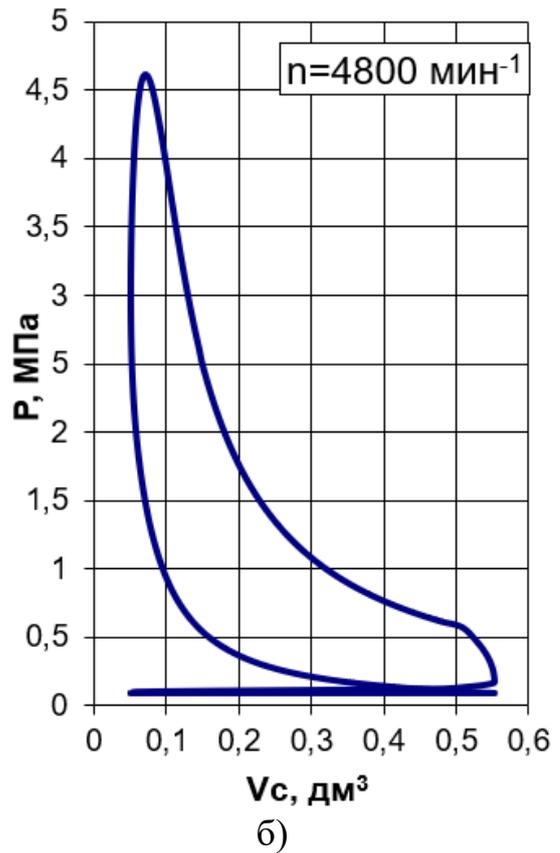
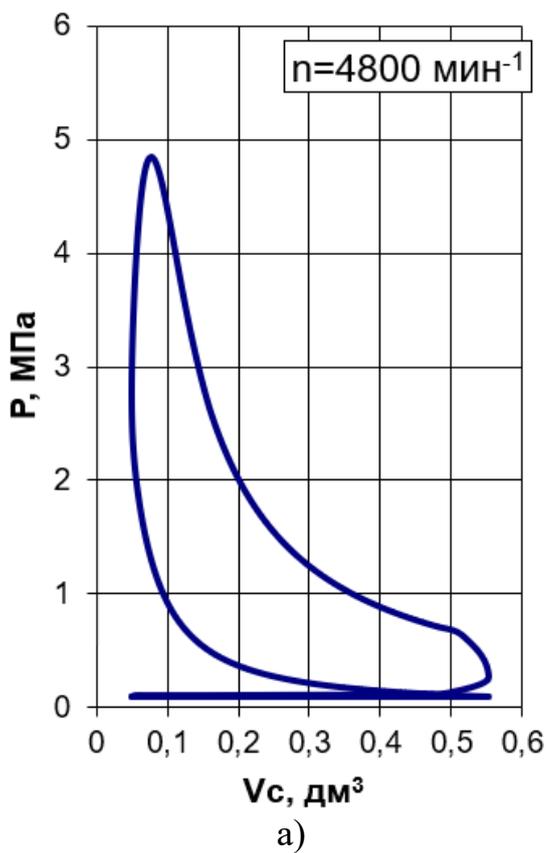


Рисунок 40 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $1600 \text{ мин}^{-1}$  при работе на: (а) бензине; (б) спирте и (в) E85

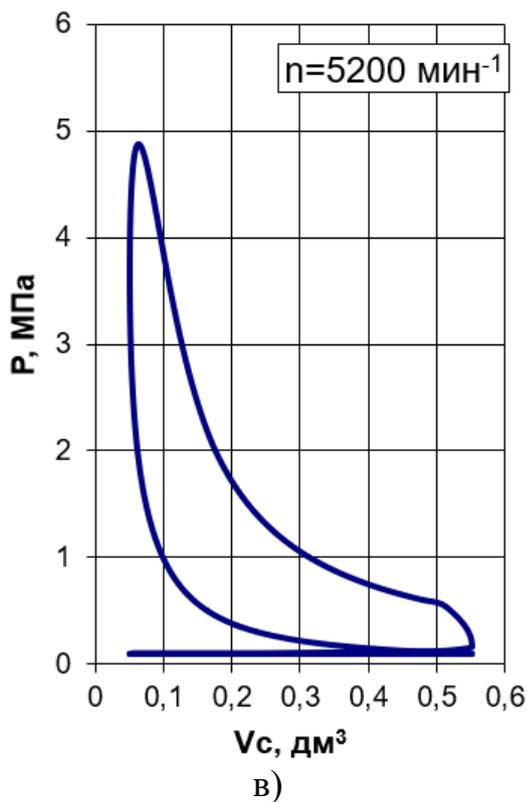
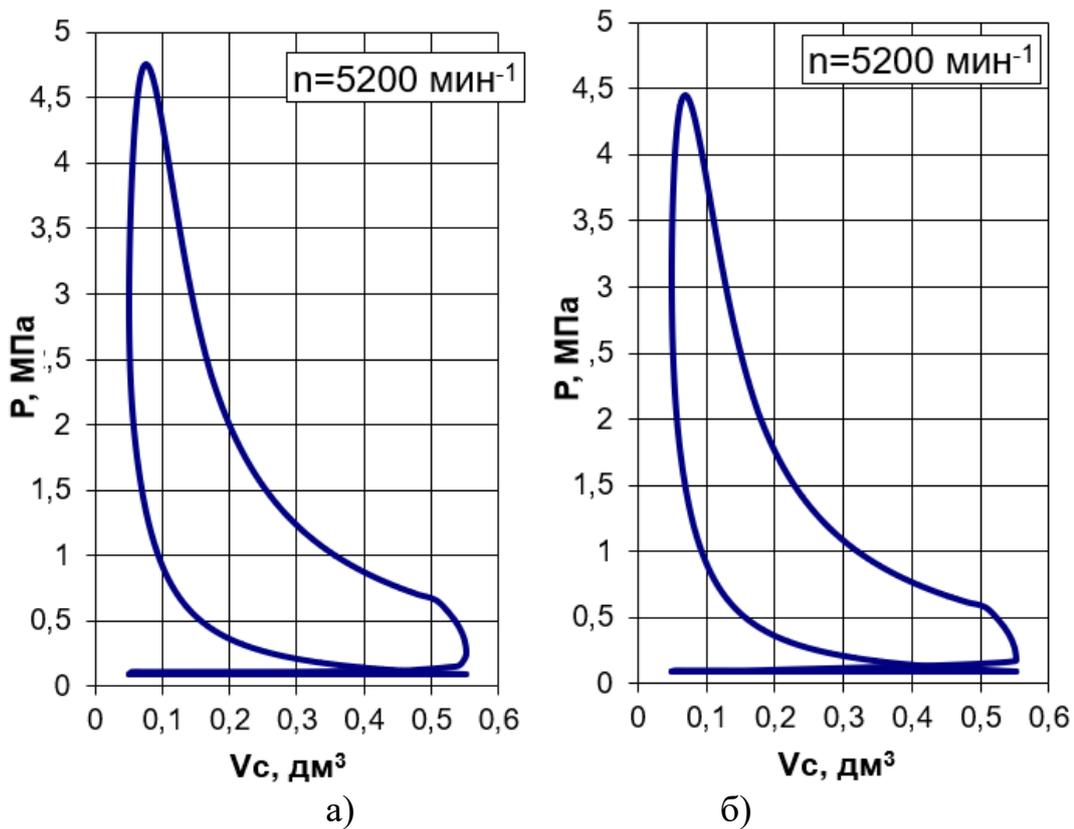


Рисунок 41 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $2000 \text{ мин}^{-1}$  при работе на: (а) бензине; (б) спирте и (в) E85

Для оценки токсичности проведем сравнение изменения температуры в процессе сгорания (рисунки 42 – 46).

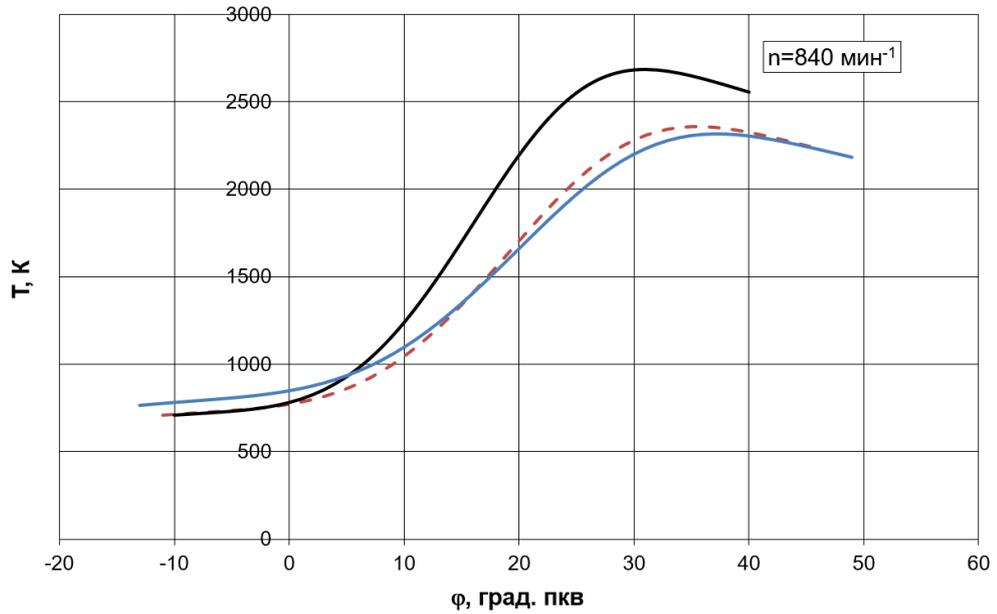


Рисунок 42 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 840 мин<sup>-1</sup>

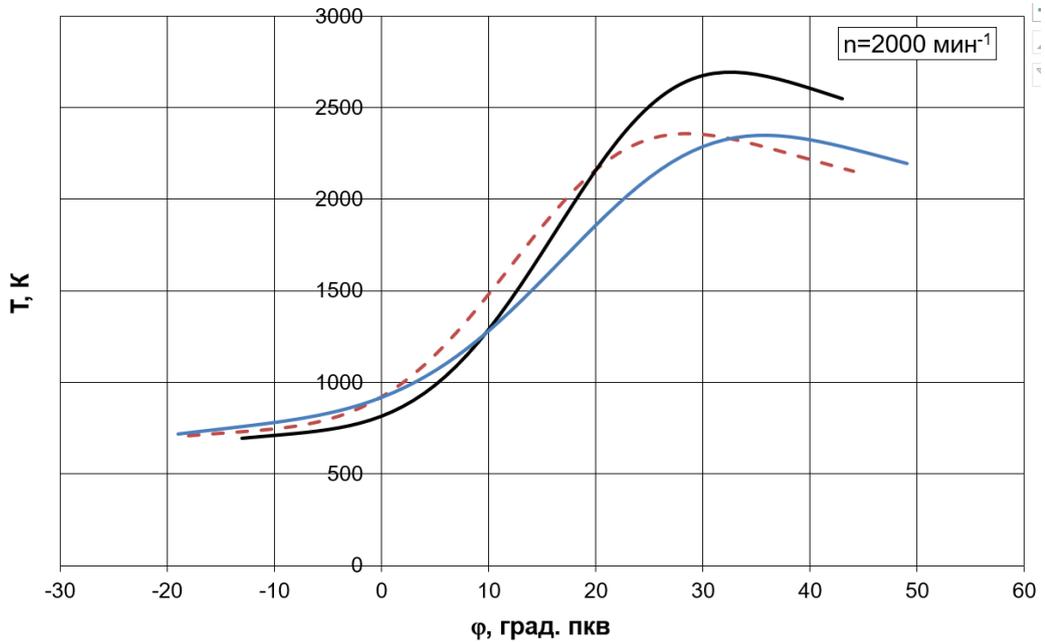


Рисунок 43 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 2000 мин<sup>-1</sup>

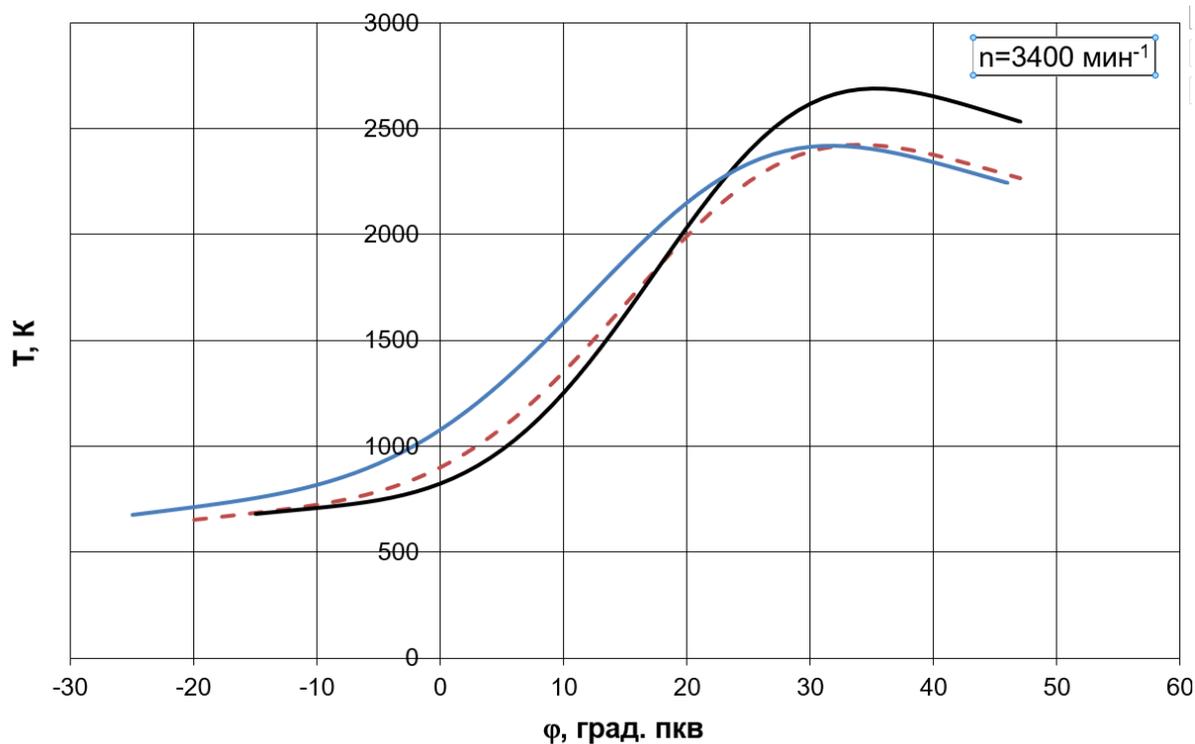


Рисунок 44 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $3400 \text{ мин}^{-1}$

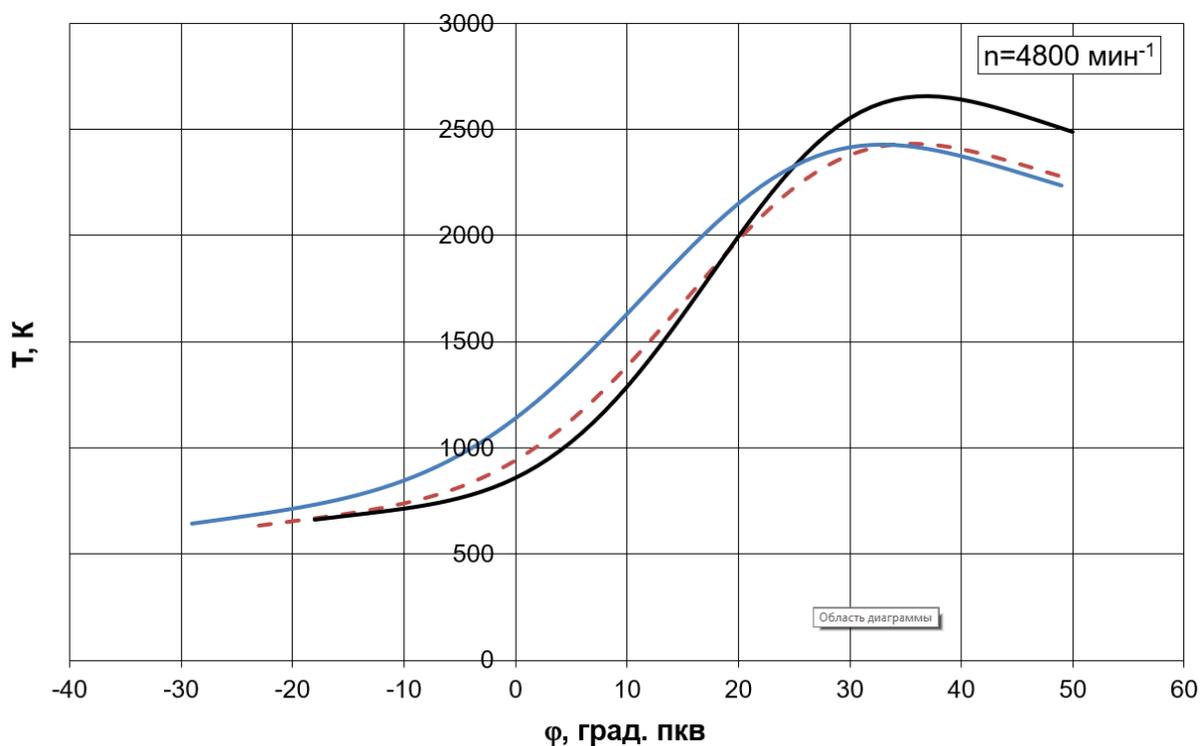


Рисунок 45 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $4800 \text{ мин}^{-1}$

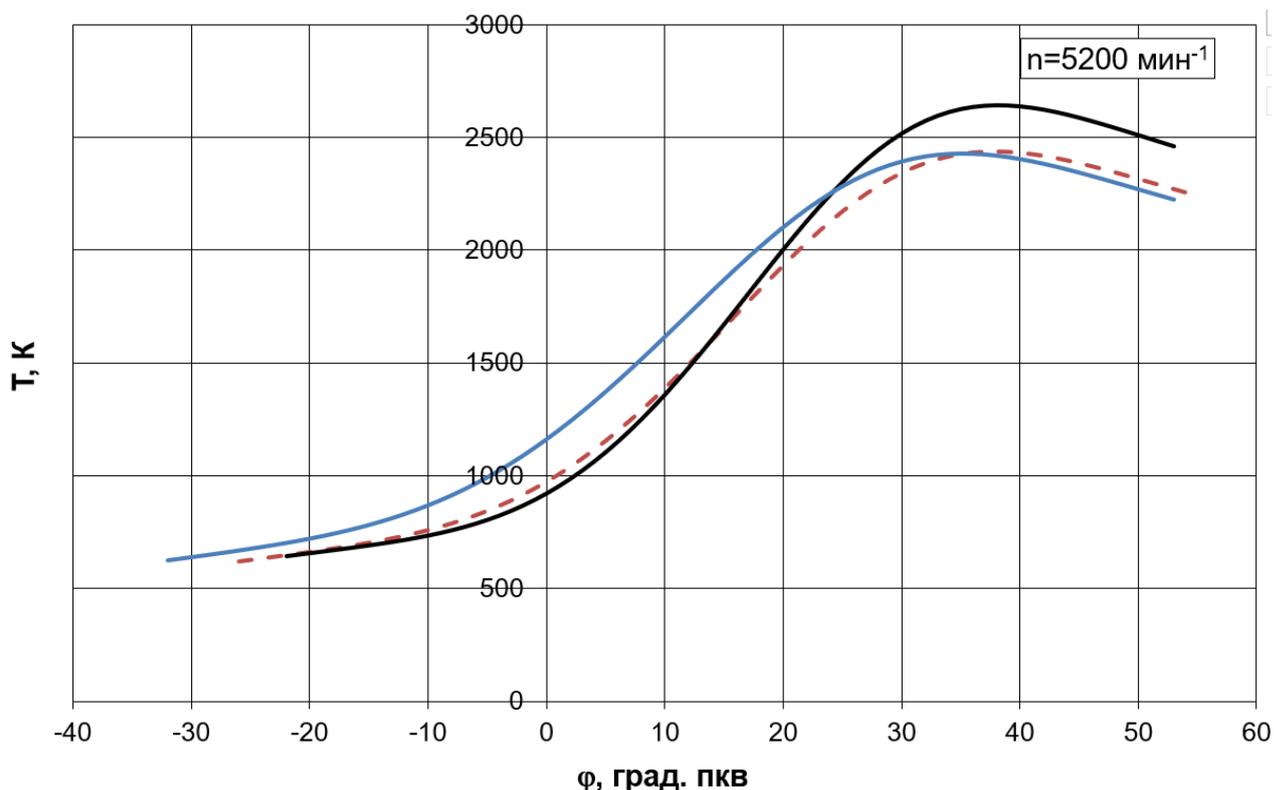


Рисунок 46 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 5200 мин<sup>-1</sup>

Проводя анализ средней температуры в цилиндре двигателя во время сгорания по рисункам 42 – 46, можно отметить, что максимальная температура соответствует рабочему процессу на бензине, что соответствует большему энергетическому заряду, вводимому в цилиндр двигателя при работе на бензине на впуске, по сравнению с спиртовыми топливами. Сравнивая рабочий процесс для E85 и спирта, следует отметить, что у спирта ниже объемная энергоемкость стехиометрической смеси, что требует более раннего угла опережения зажигания. Более раннее зажигание позволяет спирту показывать такие же максимальные температуры, как и при работе на E85.

#### 4.2 Влияния вида топлива на эффективные показатели цикла

Проводить анализ эффективных показателей работы двигателя правильнее всего по графическому изображению внешней скоростной

характеристики (рисунки 47 – 49). Для Е85 наглядно видно (рисунок 47), наличие максимума крутящего момента для частоты вращения 3400 мин<sup>-1</sup>. С увеличением частоты вращения крутящий момент снижается.

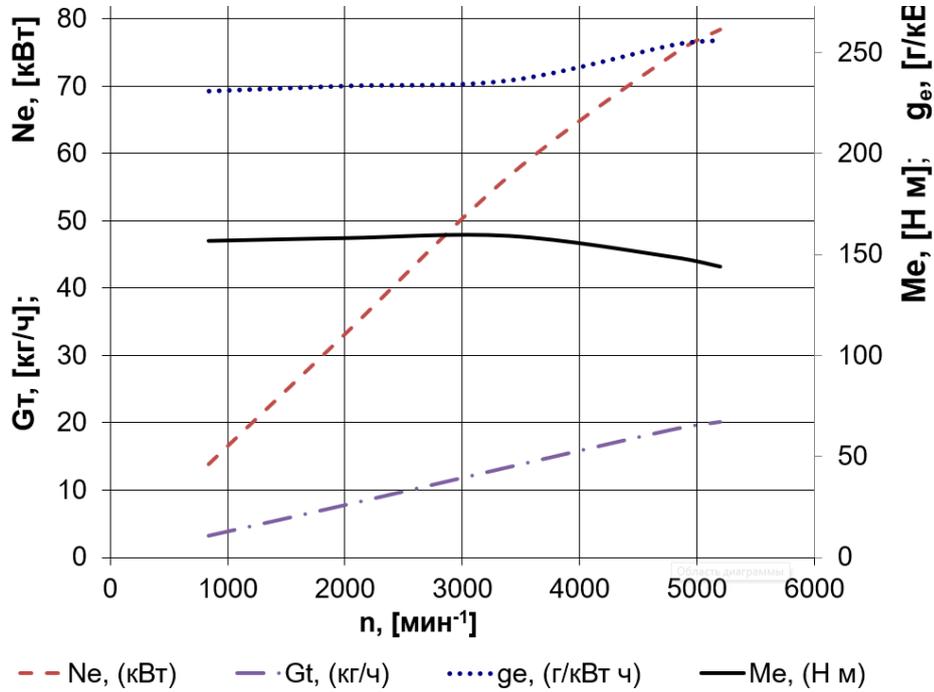


Рисунок 47 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на Е85

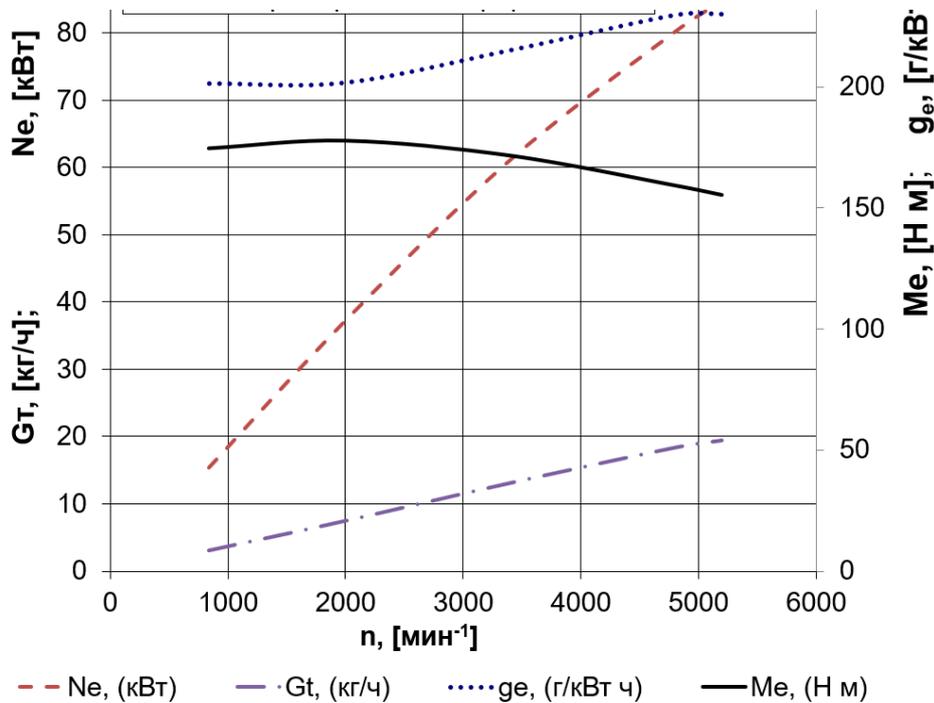


Рисунок 48 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на спирте

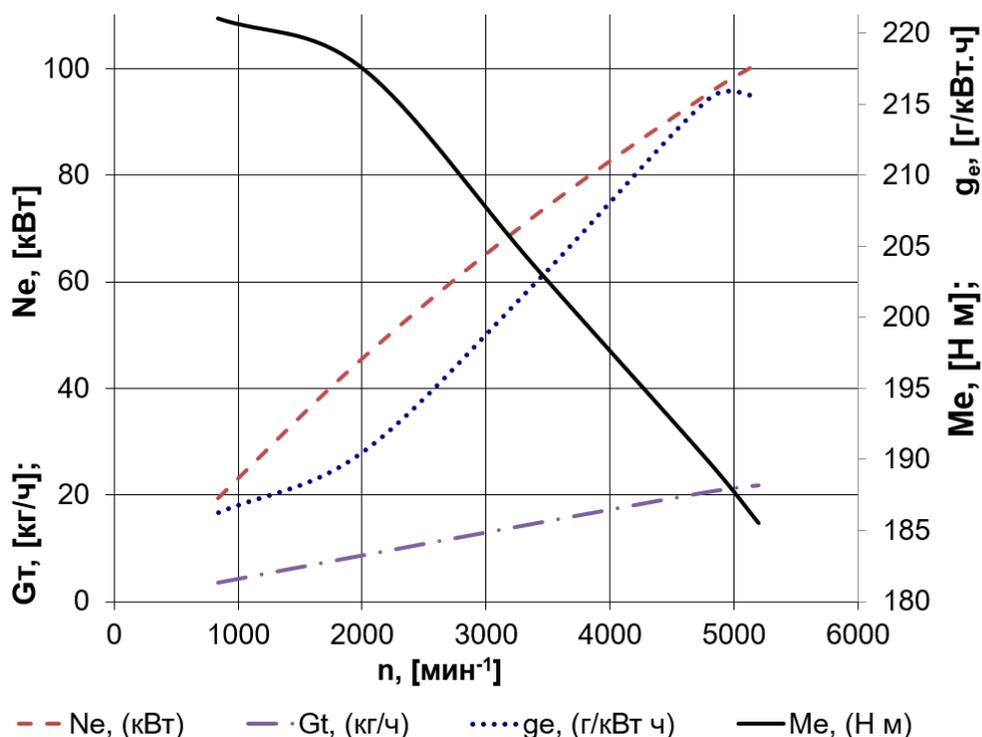
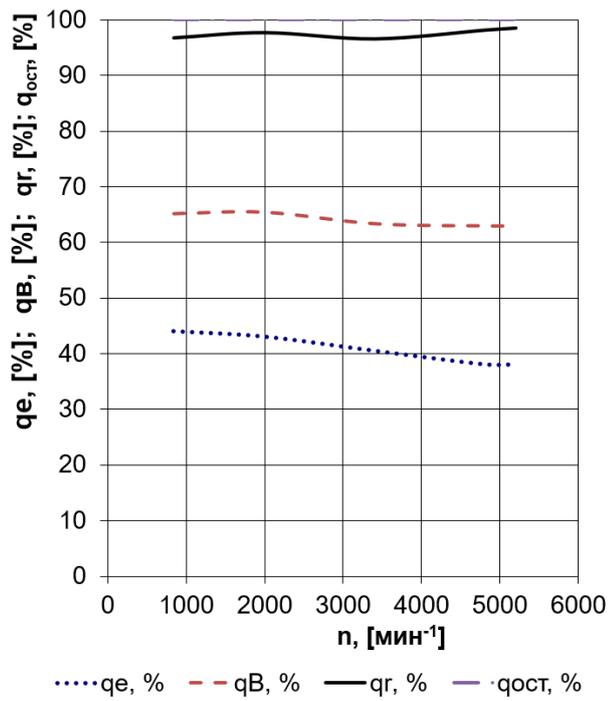


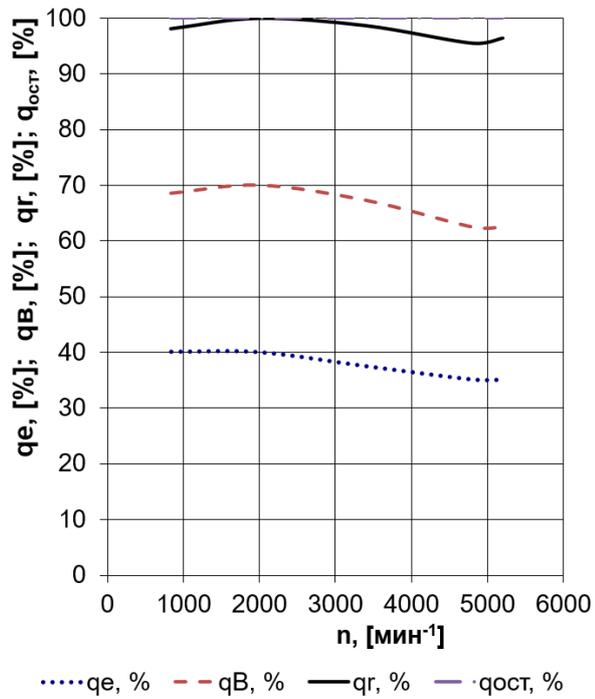
Рисунок 49 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на бензине

Из графиков внешней скоростной характеристики видно наличие высоких крутящих моментов на низких частотах вращения. Особенно это заметно для условий работы на бензине (рисунок 49), где видно, что крутящий момент с ростом оборотов падает на 20%.

Наглядно распределение тепловых потерь хорошо иллюстрируют графики внешнего теплового баланса (рисунки 50 и 51). На графиках отчетливо видно увеличение доли тепла отданного в систему охлаждения при работе на спиртовом топливе. Также видно наличие высоких потерь с отработавшими газами, что говорит о более высоких температурах отработавших газов и лучших условиях прогрева каталитического нейтрализатора при работе на бензине.



а)



б)

Рисунок 50 – Внешний тепловой баланс при работе на: (а) бензине; (б) спирт

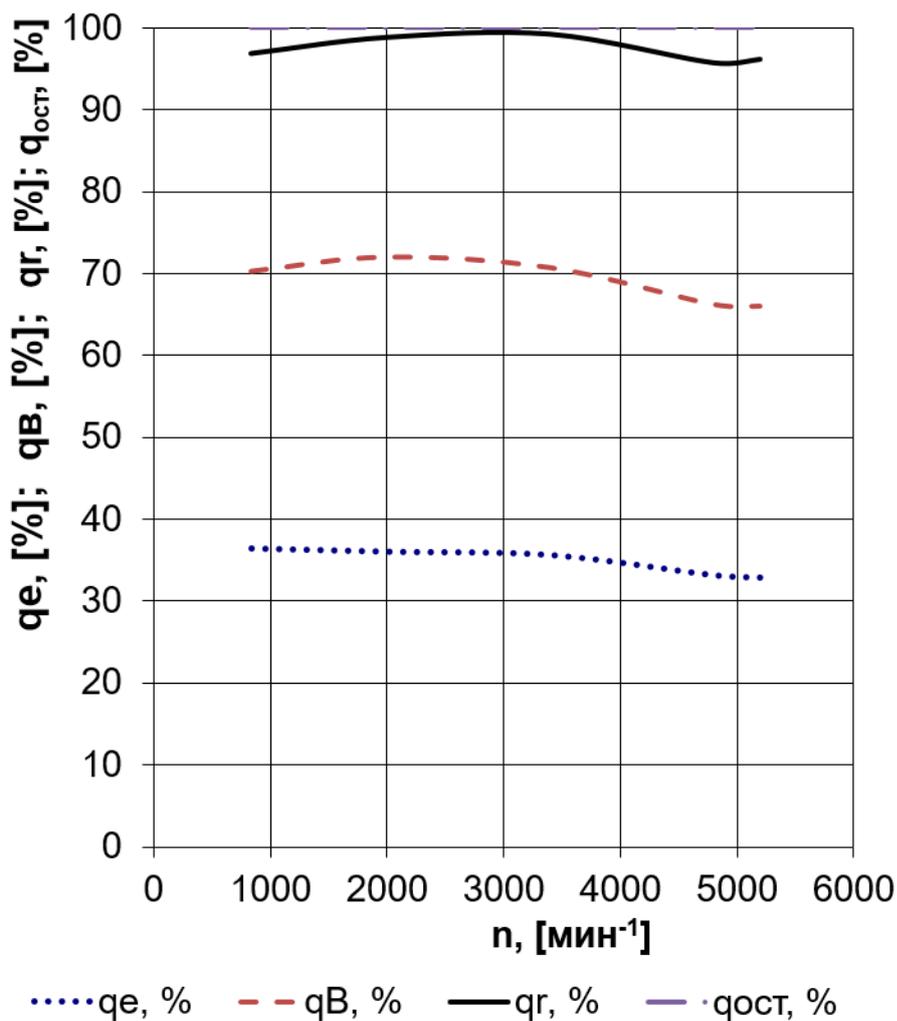


Рисунок 51 – Внешний тепловой баланс при работе на E85

#### Выводы по 4-му разделу

Комбинированный эффект содержания кислорода в этаноле и обеднения заряда привел к более полному процессу окисления отработавших газов с уменьшением выбросов CO и HC. Напротив, выбросы NO увеличились из-за более высокого соотношения воздух-топливо и повышения пикового давления и температуры из-за увеличения времени воспламенения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено сравнение протекания процесса сгорания при работе на альтернативном топливе E85 и базовом топливе бензине. Выполнен обзор литературы по поставленной проблеме, тепловой, динамический и кинематический расчет двигателя, а также анализ влияния нового топлива на характеристики работы двигателя. Получены основные выводы по работе:

1. Переход на E85 позволил увеличить угол опережения зажигания и устранить перерасход топлива, при этом увеличение угла опережения зажигания привело к небольшому увеличению теплового КПД без снижения нагрузки на двигатель.
2. Комбинированный эффект содержания кислорода в этаноле и обеднения заряда привел к более полному процессу окисления отработавших газов с уменьшением выбросов CO и HC. Напротив, выбросы NO увеличились из-за более высокого соотношения воздух-топливо и повышения пикового давления и температуры из-за увеличения времени воспламенения.

### Выводы по 1-му разделу

Проведенный обзор показал значительный интерес к смесевому топливу E85, которое в будущем может стать серьезной альтернативой бензину. Многими исследователями отмечено, что работа на E85 позволяет повысить детонационные пределы, что позволит снизить эффект снижения мощности из-за меньшей объемной теплотворной способности спиртового топлива. Также отмечается большая полнота сгорания, позволяющая снизить токсичность по продуктам неполного окисления CO и CH. Большие температуры сгорания повысили токсичность по NOx.

### Выводы по 2-му разделу

Переход на E85 позволил увеличить угол опережения зажигания и устранить перерасход топлива, при этом увеличение угла опережения

зажигания привело к небольшому увеличению теплового КПД без снижения нагрузки на двигатель.

#### Выводы по 3-му разделу

Применение топлива E85 привело к незначительному снижению нагрузок на КШМ, примерно на 8%. Снижение нагрузки при большей детонационной устойчивости позволяет рекомендовать работать на таких топливах на степенях сжатия 14-17. Это повысит несколько нагрузки на элементы КШМ, но их увеличение будет в рамках запаса прочности. Либо же необходимо применять наддув для эффективного использования заложенного с топливом потенциала.

#### Выводы по 4-му разделу

Комбинированный эффект содержания кислорода в этаноле и обеднения заряда привел к более полному процессу окисления отработавших газов с уменьшением выбросов CO и HC. Напротив, выбросы NO увеличились из-за более высокого соотношения воздух-топливо и повышения пикового давления и температуры из-за увеличения времени воспламенения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
2. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Общие требования и правила составления. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 47 с.
3. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
4. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1983.
5. Смоленский, В.В. Автомобильные двигатели: курс лекций / В.В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 183 с.
6. Akmandor, I.S. Novel Thermodynamic Cycle / I.S. Akmandor, N. Ersöz// PTC, WO, 2004. 022919 A1. (March 18th 2004)
7. Alamia, A.; Magnusson, I.; Johnsson, F.; Thunman, H. Well-to-wheel analysis of bio-methane via gasification, in heavy duty engines within the transport sector of the European Union. Appl. Energy 2016, 170, 445–454.
8. Alfredas Rimkus, Tadas Vipartas, Donatas Kriauciunas, Jonas Matijošius and Tadas Ragauskas «The Effect of Intake Valve Timing on Spark-Ignition Engine Performances Fueled by Natural Gas at Low Power» / Energies 2022, 15, 398. doi.org/10.3390/en15020398
9. Ammenberg, J.; Anderberg, S.; Lönnqvist, T.; Grönkvist, S.; Sandberg, T. Biogas in the transport sector: Actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region. Resour. Conserv. Recycl. 2018, 129, 70.
10. Baumeister, T. Mark's Standard Handbook for M. Engineer / T Baumeister // McGraw- Hill Inc., New York, 1966.

11. Beran, R. Entwicklung des H17/24G - Demerstenkoreanischen Gasmotor / R. Beran, T. Baufeld, H. Philipp, J. T. Kim, J. S.Kim // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007
12. Beran, R., Baufeld, T., Philipp, H., Kim, J. T., Kim, J. S.: Entwicklung des H17/24G - Dem ersten koreanischen Gasmotor. in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007
13. Bonnevie-Svendsen, A. Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition /A. Bonnevie-Svendsen, K. Boulouchos, Ch. Lämmle, I. Vlakos // in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009
14. Bonnevie-Svendsen, A., Boulouchos, K., Lämmle, Ch., Vlakos, I.: Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition. in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009
15. Carbot-Rojas, D. A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines /D.A. Carbot-Rojas , R.F. Escobar-Jiménez, J.F. Gómez-Aguilar, A.C. Téllez-Anguiano // Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, CP 58120, Mexico 2017-PP.21-26
16. Cinzia Tornatore, Luca Marchitto, Maria Antonietta Costagliola and Gerardo Valentino « Experimental Comparative Study on Performance and Emissions of E85 Adopting Different Injection Approaches in a Turbocharged PFI SI Engine» / Energies 2019, 12, 1555; doi:10.3390/en12081555
17. Clarke, J. M. Thermodynamic Cycle Requirements for Very High Rotational Efficiencies / J. M. Clarke // J. Mech. Eng. Sci. 1974
18. Defu, Z., Qingping, Z. Investigation on the Combustion Characteristics of the Compression Ignition Divided Chamber Combustion System of the Natural Gas Engine. in: CIMAC Congress. Wien. 2007.

19. Duranti, A. *Ethnography of Speaking: Toward a Linguistics of praxis* / A. Duranti // *Linguistics: The Cambridge Survey*. – Cambridge, 1988. – PP. 210-228.
20. Fuller, D.D. *Theory and Practice of Lubrication for Engineers* / D.D. Fuller // John Wiley & Sons Inc., New York, 1966
21. Haywood, R.W. *A Critical Review of Theorems of Thermodynamics Availability* // R.W. Haywood / *J. Mech. Eng. Sci.* vol.16 MIT Press, 1970.
22. Heinz, C. Mittermayer, F., Sattelmayer, T.: *Investigation of a Novel Pre-Chamber-Concept for Lean Premixed Combustion in Large Bore Gas Motors*. Projektplakat. Technische Universität München. 2005
23. Huan,L.*Study of air fuel ratio on engine performance of direct injection hydrogen fueled engine* / L. Huan //Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia 2016-PP.13-21
24. Jensen, S.S.; Winther, M.; Jørgensen, U.; Møller, H.B. *Scenarios for Use of Biogas for Heavy-Duty Vehicles in Denmark and Related GHG Emission Impacts*; Trafikdage: Aalborg, Denmark, 2017.
25. Lönnqvist, T.; Sanches-Pereira, A.; Sandberg, T. *Biogas potential for sustainable transport—a Swedish regional case*. *J. Clean. Prod.* 2015, 108, 1105–1114.
26. Lyng, K.A.; Brekke, A. *Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels*. *Energies* 2019, 12, 532.
27. Moteki K, Aoyama S, Ushijima K, Hiyoshi R, Takemura S, Fujimoto H, et al. *A study of a variable compression ratio system with amulti-linkmechanism*. SAE Paper No. 2003-01-0921.Warrendale PA, USA: SAE International; 2003
28. Osama H. Ghazal, Gabriel Borowski « *Use of Water Injection Technique to Improve the Combustion Efficiency of the Spark-Ignition Engine: A Model Study*»/ *Journal of Ecological Engineering* Vol. 20(2), 2019. - 226–233. – doi.org/10.12911/22998993/99689

29. Paolo Iodice, Amedeo Amoresano, Giuseppe Langella «A review on the effects of ethanol/gasoline fuel blends on NOX emissions in spark-ignition engines» / *Biofuel Research Journal* 32 (2021) 1465-1480. DOI: 10.18331/BRJ2021.8.4.2
30. Renegar, D.C. The Quasiturbine / D.C. Renegar // USA Patent No:6629065 September 12th 2003
31. Rory, R. D. The Ball Piston Engine: A New Concept in High Efficient Power Machines / R. D. Rory // Convergence Eng. Corporation.
32. Shaik A, Shenbaga Vinayaga Moorthi N, Rudramoorthy R. Variable compression ratio engine: A future power plant for automobiles—An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE); Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2007;221(D9):1159-1168
33. Stephen, R. T. An Introduction to Combustion / R.T.Stephen // McGraw-Hill Series in Mech. Eng. 1996.
34. Thomasson, A. Co-Surge in Bi-Turbo Engines - Measurements, Analysis and Control / Thomasson A, Eriksson L. // *Control Engineering Practice*, (32) 2014, 113-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.08.001> Copyright: Elsevier
35. Verhelst, S. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines / S. Verhelst, R. Sierens, S. Verstraeten // SAE. - 2006. - №2006-01-0430.
36. Wonjae Choi, Han Ho Song «Composition-considered Woschni heat transfer correlation: Findings from the analysis of over-expected engine heat losses in a solid oxide fuel cell-internal combustion engine hybrid system» / *Energy* 203 (2020) 117851: [doi.org/10.1016/j.energy.2020.117851](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117851)
37. Woś P, Balawender K, Jakubowski M, Kuszewski H, Lejda K, Ustrzycki A. Design of Affordable Multi-Cylinder Variable Compression Ratio (VCR) Engine for Advanced Combustion Research Purposes. SAE Paper No. 2012-01-0414. Warrendale PA, USA: SAE International; 2012