

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)
Факультет: Автотракторный
Кафедра: «Двигатели внутреннего сгорания
и электронные системы автомобилей»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент профессор
кафедры «КГМ» ФГБОУ ВПО ЮУрГУ
д.т.н., доцент

_____ / С. С. Никифоров

« ____ » _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой «ДВС и
ЭСА»,

д.т.н., доцент

_____ / В.Е. Лазарев

« ____ » _____ 2017 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к выпускной квалификационной работе (магистерской диссертации)
на тему «Исследование газопоршневого двигателя 12ГЧН16/19 Perkins 4012 TESI в
энергоцентре ЮУрГУ для оптимизации параметров работы на эксплуатационных
режимах»

ЮУрГУ-13.04.03.2017.111.00.00 ПЗ

Руководитель работы:

д.т.н., профессор

_____ / В. Г. Камалтдинов

« ____ » _____ 2017 г.

Автор работы:

магистрант группы П-209

_____ / А. А. Баркин

« ____ » _____ 2017 г.

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

_____ / В.В. Шишков

« ____ » _____ 2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	8
1.1 Газопоршневые станции GE Jenbacher.....	9
1.2 Газопоршневые агрегаты MWM.....	12
1.3 Газопоршневые станции Wartsila.....	15
1.4 Российские газопоршневые агрегаты на базе двигателей Ярославского моторного завода.....	20
1.5 Газопоршневые агрегаты ЗАО «Трансмашхолдинг».....	21
1.6 Газопоршневые двигатели 490ГД производства ОАО «Волжский дизель имени Маминых».....	27
1.7 Когенераторная установка Elteco Petra 750 с газовым двигателем Perkins и генератором Stamford.....	29
1.8 Газовый двигатель Perkins 4012 TESI.....	33
1.9 Цель и задачи исследования.....	35
2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	37
2.1 Аппаратура регистрации давления.....	37
2.2 Тарирование датчика давления.....	40
2.3 Программа и методика испытаний.....	42
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	49
3.1 Проведение эксперимента.....	49
3.2 Графики, полученные в результате проведенного эксперимента	52
3.3 Таблица результатов испытаний для режима 600 кВт.....	58
4 ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ.....	77
4.1 Определение верхней мертвой точки.....	77
4.2 Анализ результатов исследований.....	78

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

4.3 Сравнение результатов расчётов по программам анализа рабочего цикла по индикаторным диаграммам расчета рабочего цикла с двумя функциями Вибе на различных режимах.....	90
4.4 Сравнение результатов экспериментов со статистическими данными расхода топлива.....	105
5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	108

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день малая энергетика очень популярна во всем мире благодаря газовым поршневым двигателям внутреннего сгорания. Газовый поршневой двигатель обладает высокой топливной экономичностью, простотой конструкции, надежностью, а так же высоким электрическим и тепловым коэффициентом полезного действия. Все это снижает стоимость электроэнергии в несколько раз, а теплота, вырабатываемая двигателем, способна отапливать помещения и осуществлять водоподготовку.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Многие мировые компании разрабатывают, совершенствуют и производят модификации двигателей для работы на газовом топливе: MWM GmbH; MTU onsiteenergy; GE Jenbacher; Caterpillar; Scania; Perkins; Cummins; и др. Другие же компании используют в когенераторных и тригенераторных установках дизели переделанные для работы на газовом топливе. Одной из таких компаний является российская GasEcos. GasEcos использует двигатели: Doosan Daewoo (Корея), MAN (Германия), Mitsubishi (Япония), ЯМЗ, ТМЗ, КАМАЗ, Трансмашхолдинг (Россия), ММЗ(Белоруссия), Ricardo (Великобритания).

Современное развитие газопоршневых двигателей характеризуется использованием технологий сжигания обедненной смеси, при этом сокращается содержание вредных выбросов с отработавшими газами. Разрабатываются мероприятия по снижению чувствительности двигателей к содержанию метана в топливном газе. Современные системы управления оценивают такие параметры как давление наддува, температуру газоздушной смеси, состав выхлопных газов для управления соотношением компонентов газоздушной смеси. В качестве наиболее эффективного параметра для анализа качества процесса сгорания рассматривается температура сгорания в каждом цилиндре и управление параметрами осуществляется в каждом отдельном цилиндре. Индивидуальная для каждого цилиндра антидетонационная система рассматривается также в качестве перспективной. Эффективность работы газопоршневого двигателя повышается (как показывает опыт зарубежных производителей) при переходе от цикла Отто к циклу Миллера.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1.1 Газопоршневые станции GE Jenbacher

В России самыми популярными газопоршневыми энергоблоками GE's Jenbacher стали установки мощностью 1 МВт, 2 МВт и 3,35 МВт. На предприятии «Липецк-Агро» работают две ГПУ мощностью по 3,35 МВт.

«Чтобы продемонстрировать, насколько эффективно применение газопоршневых станций GE's Jenbacher, – объясняет председатель совета директоров тепличного комплекса ЛипецкАгро Дмитрий Лашин, – достаточно отметить, что подключение к электросетям по любой схеме не позволит нам иметь тариф ниже 3,5 р./кВт.ч. С техникой GE (если учитывать электрогенерацию и утилизацию тепла от работающего двигателя) этот тариф составляет 2 р./кВт.ч. В зимний период тепличное хозяйство потребляет около 7 МВт.ч, так что ежедневно мы экономим десятки тысяч рублей».

В тепличном комплексе «Липецк-Агро» когенерационные установки GE's Jenbacher работают только в холодный период года, но даже при таком режиме их применение экономически выгодно. Главный показатель, обеспечивающий коммерческую привлекательность данного оборудования, – высокий электрический КПД (45 %) и эффективное использование тепла. Примерно 54 % подведенной к ГПУ энергии газа – это тепловая энергия, которая используется в теплице.

Каждый агрегат включает генераторную установку на базе газопоршневого двигателя J620 компании GE Jenbacher, электрогенератор и последнюю версию системы управления DIA.NE.XT4. Двигатель внутреннего сгорания J620 – 20-цилиндровый, четырехтактный, высокооборотный, с искровым зажиганием. Он оснащен современной бесконтактной системой зажигания с электронным управлением и регулируемым временем воспламенения. Система регулирования доводит число оборотов до заданного значения, обеспечивая постоянную частоту вращения независимо от нагрузки генератора.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Теплообменники (отработавшие газы/горячая вода; смазочное масло/горячая вода; водяная рубашка охлаждения двигателя/ горячая вода) установлены компактно на раме двигателя со всеми трубопроводами. Котел-утилизатор выхлопных газов выполнен в виде трубчатого теплообменника цилиндрической формы, в котором по трубкам подаются выхлопные газы, а в межтрубном пространстве циркулирует вода.

Каждый агрегат имеет индивидуальную систему управления мотором – DIA.NE.XT4 (Dialog Networks new generation), обеспечивающую визуализацию и управление. Она размещается в шкафу управления в операторской энергоцентра. Рабочее место оператора находится в специальном помещении – центральном щите управления станцией. На экран оператора выводится функциональная сводка измерений рабочих параметров, одновременно осуществляется их графическая обработка. На экране высвечиваются все сообщения, в том числе аварийные.

В двигателе применена технология горения обедненной газовой смеси (leanburn), обеспечивающая его высокую эффективность. Инженерам GE удалось достичь отличных показателей экономичности. Предварительная камера сгорания позволяет максимально повысить эффективность и стабильность горения, сводя при этом к минимуму выбросы NOx. Небольшое количество топлива нагнетается под высоким давлением в предкамеру и поджигается с помощью свечи зажигания, получившийся маленький факел воспламеняет газоздушную смесь в цилиндре. Таким образом, достигается быстрое и полное сгорание топлива.

Проверенная конструкция и высокое качество всех элементов двигателя J620 обеспечивают рабочий ресурс до капитального ремонта 60 000 часов. В «Липецк-Агро» наработка двигателей составляет 4000 часов в год: это значит, что капитальный ремонт не потребуется до 2029 года (т.е. через 15 лет после ввода их в эксплуатацию в 2014 г.).

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

Варианты поставки газопоршневых установок GE's Jenbacher могут быть различными: от модульного исполнения, когда заказчик сам проектирует размещение и интеграцию элементов системы, до контейнерного. В этом случае станция полностью монтируется внутри морского контейнера и может устанавливаться буквально «в чистом поле» – такой вариант больше подходит для добывающей промышленности. В «Липецк-Агро» используется ноу-хау, созданное Центром компетенций в Голландии. Каждый двигатель имеет свой собственный шумозащитный кожух. Кожух снижает общий уровень шума на предприятии, а также создает комфортные и безопасные условия для персонала, обслуживающего один двигатель, в то время как рядом работают другие. В кожух встроены системы вентиляции, маслоснабжения, шкаф защиты генератора и др., что избавляет заказчика от самостоятельного монтажа этих систем.

Таблица 1 – технические характеристики газовых двигателей компании GE Jenbacher

Тип двигателя	J208	J320	J420	J624
Число цилиндров	8	20	20	24
Конфигурация	рядный	V-образный 70°		V-образный 60°
Диаметр цилиндра (мм)	135	135	145	190
Ход поршня (мм)	145	170	185	220
Рабочий объем цилиндра (л)	2,08	2,43	3,06	6,24
Общий рабочий объем цилиндров (л)	16,6	48,7	61,1	149,7
Частота вращения (об/мин)	1500 (50 Гц)			

Продолжение таблицы 1

Средняя скорость поршня (м/с)	7,3	8,5	9,3	11
Электрическая мощность, кВт	311	1067	1487	4401
Тепловая мощность ± 8 , кВт	409	1238	1529	4087
Электрический КПД, %	38,1	41,2	43	46,3
Тепловой КПД, %	52,1	47,8	44,2	43
Общий КПД, %	90,2	88,9	87,2	89,3

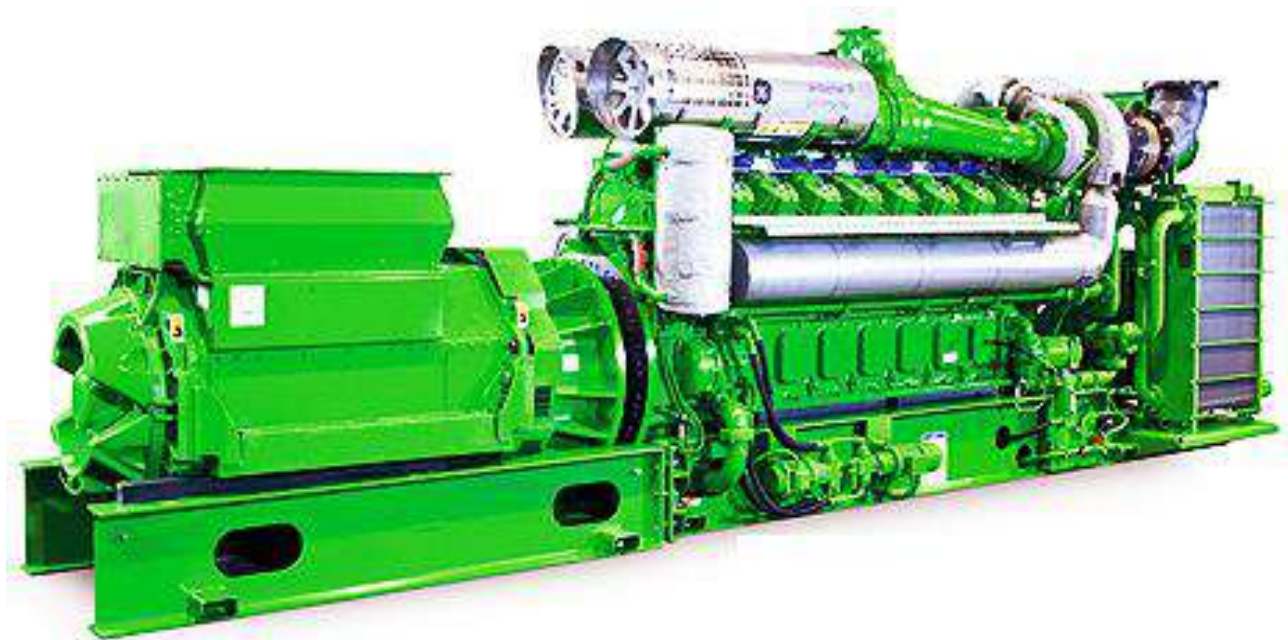


Рисунок 1 - Газопоршневая станция GE JENBACHER J620

1.2 Газопоршневые агрегаты MWM

Газопоршневые агрегаты MWM имеют в основе V-образные двигатели с четырехклапанными головками цилиндров, открытые камеры сгорания (без форкамер), турбонаддув, водяное охлаждение. Применение технологии сжигания обедненной смеси значительно сокращает содержание вредных веществ в выхлопе.

Поскольку турбокомпрессоры сжимают не воздух, а газоздушную смесь, двигатели менее чувствительны к изменениям содержания метана в топливном газе. Благодаря применению турбокомпрессора и охладителя происходит гомогенизация газоздушной смеси, нет необходимости в предварительном сжатии газа.

Технически усовершенствованная антидетонационная система, наряду с системой зажигания Altronic Deutz, работает индивидуально для каждого цилиндра. Момент зажигания также индивидуален для каждого цилиндра, что является уникальным для энергоустановок подобного рода. Запатентованные свечи обеспечивают оптимальное зажигание, снижение выбросов NOx (стандартный уровень выбросов NOx и CO2 при 5% O2 составляет 500 мг/м3 и 300 мг/м3 соответственно), увеличивается также срок службы оборудования.

Существенным преимуществом когенерационных установок MWM является адаптированность к переменному суточному графику электрической нагрузки. Компания гарантирует работу установки на нагрузках от 50 % до 100% (включительно) без каких-либо ограничений срока эксплуатации. Кроме того, обеспечивается возможность производить по одному пуску агрегата в сутки (к примеру, останов когенерационной ТЭС на ночь с последующим пуском утром) без сокращения моторесурса.

Вместо капитального ремонта агрегатов предусмотрена планомерная замена изношенных деталей: через каждые 24 тыс. часов замена турбокомпрессора, через 32 тыс. часов замена гильз цилиндров, через 64 тыс. часов замена поршней. Полный ресурс агрегата составляет не менее 200 тыс. часов.

Система электронного управления Total Electronic Management (TEM) осуществляет контроль и мониторинг всех функций и собственных нужд агрегата – генератора, периферийного и вспомогательного оборудования.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

Мониторинг функций с целью защиты привода от опасных пограничных состояний гарантирует длительный срок службы. Система обеспечивает эффективную загрузку, эксплуатационную надежность, простоту и удобство в работе.



Рисунок 2 - Когенераторная установка фирмы MWM

Таблица 2 – техническая характеристика газовых двигателей серии TCG 2020 компании MWM

Тип двигателя TCG 2020	V12 K1	V12 K	V12	V16 K	V16	V20
Диаметр цилиндра/ ход поршня, мм	170/195	170/195	170/195	170/195	170/195	170/195
Рабочий объем, л	53,1	53,1	53,1	70,8	70,8	88,5
Частота вращения мин ⁻¹	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Средняя скорость поршня м/с	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
Длина, мм	4660	4790	4790	5430	5430	6200

Продолжение таблицы 2

Ширина, мм	1810	1810	1810	1810	1810	1710
Высота, мм	2210	2210	2210	2210	2210	2190
Сухой вес агрегата, кг	11200	11700	11700	13320	13320	17900
Электрическая мощность, кВт	1000	1125	1200	1500	1560	2000
Среднее эффективное давление, Бар	15,5	17,4	18,6	17,4	18,1	18,6
Тепловая мощность ± 8 , кВт	1177	1253	1190	1675	1579	1977
Электрический КПД, %	40	40,9	43,6	40,9	43,2	43,7
Тепловой КПД, %	47	45,6	43,3	45,7	43,8	43,2
Общий КПД, %	87	86,5	86,9	86,6	87	86,9

1.3 Газопоршневые станции Wartsila

Все возможные сценарии развития энергетического рынка предусматривают стабильный рост потребностей в электроэнергии. В то же время ее производство должно основываться на доступных и экологически чистых решениях.

При активном использовании ветровых и солнечных электростанций неравномерность (колебания) производства энергии в энергосистеме возрастает. Оптимальное решение для быстрого устранения дисбаланса в сети – использовать в энергосистеме гидроэлектростанции. Однако во многих регионах это недоступно, и в этом случае единственным приемлемым вариантом является применение эффективных, гибких в эксплуатации

газопоршневых энергоблоков. Современные газопоршневые энергоблоки имеют высокий *КПД*, а также быстрый запуск и выход на номинальную мощность. Они оснащены передовыми системами управления, обеспечивающими индивидуальный контроль каждого цилиндра. Это гарантирует стабильную работу двигателя, быстрый набор мощности, следование за нагрузкой и, при необходимости, сброс нагрузки. Возможность выхода двигателя на 100 % нагрузку в течение 5 минут поддерживает баланс в энергосистеме при вводе в эксплуатацию электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ).

Все большее количество электростанций на возобновляемых источниках энергии вводится в эксплуатацию. Ряд стран планируют к 2020 году обеспечивать более 50 % своих потребностей в электроэнергии за счет таких энергоблоков.

Несмотря на очевидные экологические преимущества электростанций на ВИЭ, неравно мерная выработка ими требуемой мощности является серьезной проблемой при обеспечении стабильности частоты в сети. Это усугубляется еще и тем, что при замене традиционных станций они не могут обеспечить стабильность и инерционность энергосистемы. При наличии в энергосети большого количества станций на ВИЭ, уязвимость энергосистемы резко возрастает из-за сбоев, вызванных резким снижением производства электроэнергии.

Резервное оборудование должно «справляться» не только с обычными возможными колебаниями мощности в энергосистеме, связанными со снижением производства электроэнергии по причинам аварий, но также с непредсказуемостью выдачи мощности электростанциями на ВИЭ. В связи с этим в системе должно быть достаточное количество резервных электростанций, размещаемых в необходимых местах.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

Способность ГПЭС выходить на полную мощность в течение 5 минут после запуска является очень важным фактором для обеспечения стабильности энергосистемы с использованием электростанций на ВИЭ. Четырехтактные двигатели, работающие на обедненной топливовоздушной смеси, – оптимальное решение для установленных режимов эксплуатации. Уровень рабочих температур двигателей позволяет производителям использовать для их изготовления широкий ряд материалов, не подверженных циклической усталости.

Возможность выхода газопоршневых двигателей на 100 % нагрузку из холодного резерва подтверждена опытом их эксплуатации. Таким примером является электростанция компании Lea County Electric Cooperative Inc. в штате Нью Мексико (США). В ее состав входит пять энергоблоков Wartsila 34SG.

В январе 2012 года были проведены проверки эксплуатационных параметров энергоблоков в присутствии представителей заказчика. Целью проверок было установление времени выхода станции на 100 % нагрузку – 46,7 МВт. Двигатели были готовы к работе в течение 30 секунд после нажатия пусковой кнопки, шаг набора мощности после запуска составил 25 % в минуту. Общее время выхода станции на полную мощность в итоге составило 4 минуты 17 секунд.

Двигатели могут запускаться или останавливаться, набирать мощность или сбрасывать нагрузку как отдельно, так и совместно. Это позволяет выбрать оптимальную стратегию эксплуатации станции для поддержания параметров в энергосети, а также экономичной работы энергоблоков.

Компания Wartsila представила на рынок самый мощный газопоршневой двигатель – Wartsila 50SG. Он соответствует всем настоящим и будущим требованиям по эксплуатационным расходам и имеет высокий КПД как в простом, так и в комбинированном цикле. Его преимуществами

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

являются простота технического обслуживания и длительные межремонтные интервалы.

Максимальная электрическая мощность энергоблока составляет 18,3 МВт при частоте тока 50 Гц. Частота вращения коленчатого вала двигателя – 500 об/мин, *КПД* на клеммах генератора достигает 48,6 % (по сравнению с другими аналогами и газовыми турбинами это самый высокий показатель для электростанций простого цикла). Wartsila 50SG был разработан с учетом возрастающей потребности на рынке в мощных газопоршневых двигателях для использования в составе электростанций общей мощностью до 500 МВт.

В дополнение к большой мощности и высокому уровню *КПД* данный энергоблок имеет еще одно преимущество: снижение и повышение нагрузки возможно без сокращения межремонтного ресурса. Это очень важно при работе энергоблоков в пиковом режиме, а также при использовании в энергосистемах большого количества электростанций на ВИЭ. Двигатель может быстро выходить на номинальную мощность из холодного резерва в случае резкого падения мощности ветро-электростанций. Кроме того, он может быть остановлен в течение одной минуты и снова запущен через пять минут после останова.

Двигатели Wartsila 50SG обеспечивают быстрый набор мощности. Электростанция мощностью 500 МВт обеспечивает набор и сброс нагрузки с шагом 67,2 МВт/мин. Все энергоблоки в составе ГПЭС набирают и сбрасывают нагрузку одновременно, интенсивность набора и сброса нагрузки каждого из них составляет 2,4 МВт/мин.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18



Рисунок 3 – Энергоблоки Wartsila 50SG

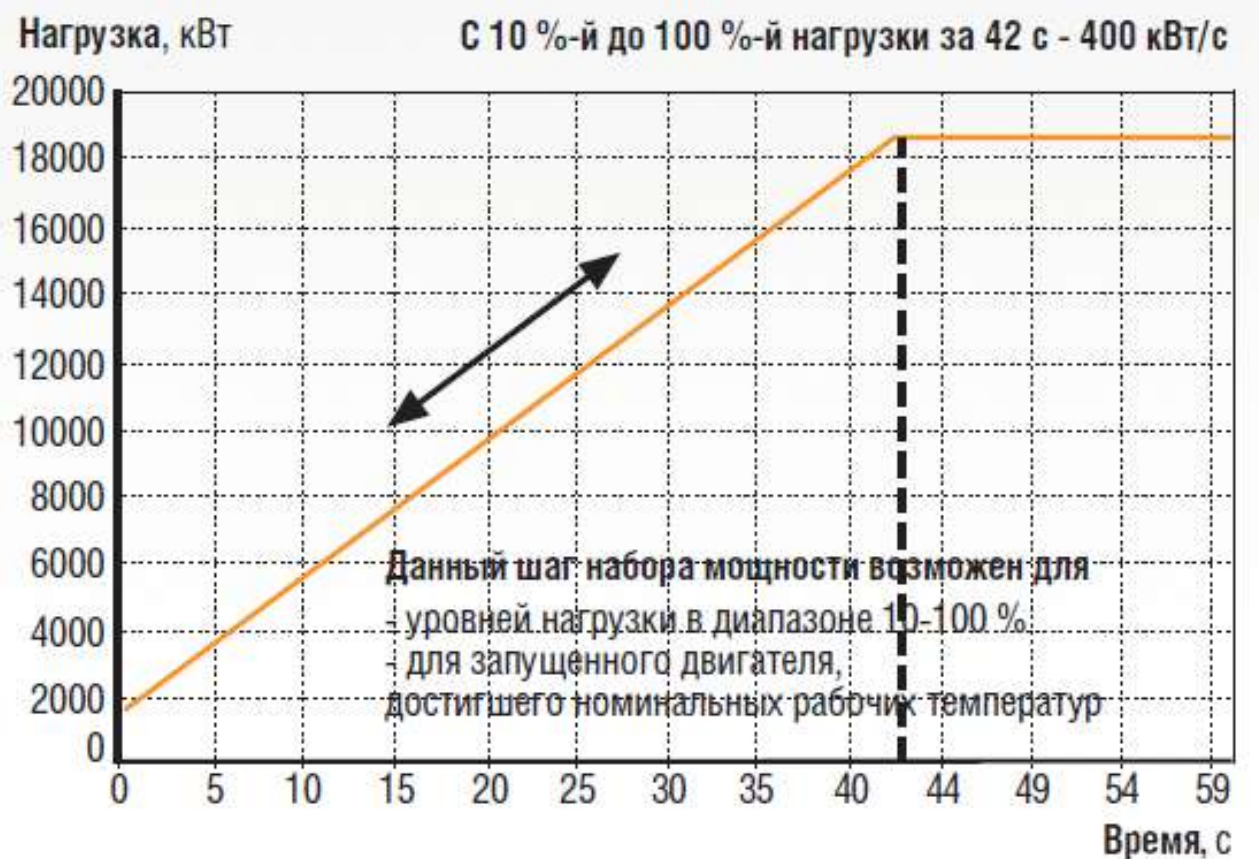


Рисунок 4 - Шаг набора мощности 400 кВт/с энергоблоком Wartsila 50SG

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

1.4 Газопоршневые агрегаты на базе двигателей Ярославского моторного завода

На базе газовых двигателей Ярославского моторного завода существует электрогенераторы разной мощности от 60 до 315 кВт.

Газовая электростанция АП-315 с газовым двигателем ЯМЗ 8502Г (газовый аналог ЯМЗ-8502.10) и российским генератором БГ-315 (БЭМЗ Россия). Номинальная мощность составляет 315 кВт при частоте вращения 1500 мин^{-1} (50 Гц) гарантированная наработка – 3000 моточасов, а ресурс до капитального ремонта составляет 15000 моточасов.

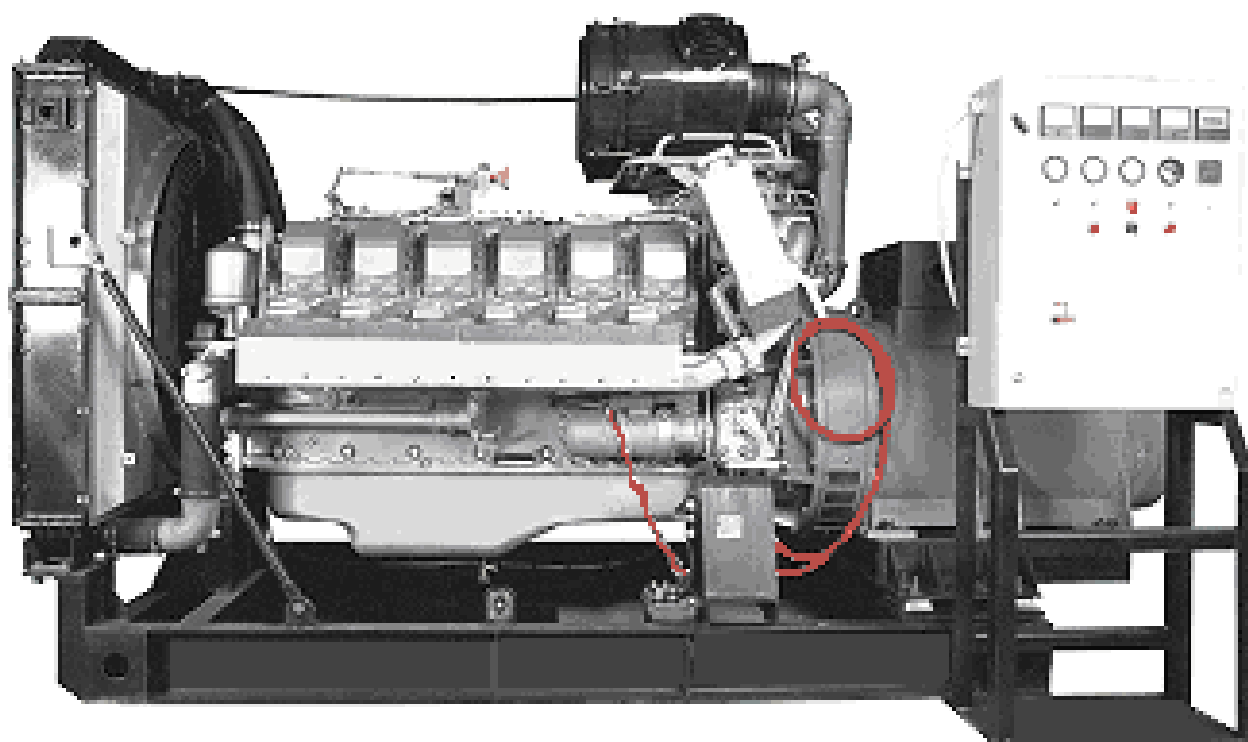


Рисунок 5 - газовая электростанция АП-315

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

1.5 Газопоршневые агрегаты ЗАО «Трансмашхолдинг»

Флагманом российских газовых поршневых электростанция являются электростанции с двигателями ЗАО "Трансмашхолдинг".

ЗАО "Трансмашхолдинг" является флагманом российского двигателестроения на мировом рынке.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские инновации, внедрённые при разработке двигателей, позволяют предприятию достойно конкурировать с известными мировыми производителями.

В частности, эти двигатели экспортируются в Германию и стоят на Бушерской АЭС(Иран), в качестве резервных

В ходе четырехлетних сопоставительных испытаний двигателей семейства КЗ сер.49 с продукцией компаний Caterpillar и MAK-Krupp предприятие подтвердило соответствие выпускаемой продукции жестким требованиям европейских стандартов по экологии и качеству, получило крупный заказ на модернизацию тепловозного парка Железных дорог Германии (DBAG).

Двигатели типа КЗ сер.49 эксплуатируются в Германии, Франции, Болгарии, Венгрии, Сирии, Польше, странах Балтии, Белоруссии, Украине, Египте, Иране, Ираке, Монголии, Корее, Кубе и других странах.

Немаловажным преимуществом является топливная экономичность и меньшая по сравнению с импортными аналогами цена как ГПУ производства GazEcos, так и запасных частей, применяемых отечественных масел и оказываемых сервисных услуг.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

ЗАО "Трансмашхолдинг" крупнейший производитель оборудования для РЖД и больших тихоходных(потому таких ресурсных)двигателей, в том числе для РЖД, флота, и оборонной промышленности.

В настоящее время, на заводах холдинга производятся двигатели от 500кВт до 6,7МВт, включительно

На все газовые двигатели совместного производства ГазЭкос и заводов ЗАО "Трансмашхолдинг" предоставляется гарантия 2 года

Обслуживание двигателей также производится специалистами ЗАО "Трансмашхолдинг".

Запчасти на все двигатели и специалисты по их обслуживанию доступны практически в любом крупном тепловозном депо и больших судовых мастерских по всей России и странам СНГ

В отличие от многих заводов, менее мощной и, иногда, не очень качественной продукции, с небольшими ресурсами, низших ценовых категорий, двигатели совместного производства ООО "Ротваник СНГ" (ГазЭкос) и ЗАО "Трансмашхолдинг", по всем основным параметрам находятся на мировом уровне или выше.

В качестве основы для производства газопоршневых двигатель-генераторов (ГДГ) единичной мощности 1000/1500/2250кВт GazEcos использует двигатель-генераторы КЗ серии 49, по ТУ 24.06.12.033-98.

Основные преимущества GazEcos ГДГ49

1. Большой ресурс (90 тыс. ч до капремонта)
2. Низкие расходы на обслуживание и ремонты
3. Доступность запчастей
4. Свыше 98% использования отечественных комплектующих

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

5. Высокая экономичность (расход газа не более 0,24м³ на 1кВтЧ)
6. Высокая эластичность двигателя (наброс >60%, низкие нагрузки <10%)
7. Работа на низком давлении газа (600мбар, 0,6 атм)

Основные недостатки GazEcos ГДГ49

1. Большой вес и габариты (>25 тонн)
2. Высокий расход масла (1-1,5г на 1кВтЧ)
3. Длительные сроки изготовления (>7 мес)

Таблица 3 – техническая характеристика газовых электростанций на основе двигателей ЗАО "Трансмашхолдинг".

		GazEcos 8ГДГ49	GazEcos 12ГДГ49	GazEcos 16ГДГ49
Номинальная мощность	кВт	1000	1500	2250
Тип двигателя		4-х тактный, газопоршневой, V-образный с газотурбинным наддувом, охлаждением наддувочного воздуха, искровым зажиганием		
Число и расположение цилиндров		V, 8 цилиндров	V, 12 цилиндров	V, 16 цилиндров
Ход поршня/диаметр поршня	мм	260/260		
Объем двигателя	л	110,4	165,7	220,9

Продолжение таблицы 3

Номинальная частота вращения	об/мин	1000	1000	1000
Назначенный ресурс до капитального ремонта	ч	90 000		
Марка синхронного генератора		ГСД-1000-1000	ГСД-1650-1000	ГСД-2200-1000
Номинальный коэффициент мощности((cos φ)		0.8		
Максимальная мощность в течение 1ч	кВт	1100	1650	2300
Минимальная мощность без ограничения по времени	%	10% номинальной		
Максимальный наброс нагрузки со стабилизацией за 2с, (не менее)	%	60% номинальной		
Давление газа на входе	мбар	600		

Продолжение таблицы 3

Удельный расход топлива в номинальном режиме	нм3/кВт Ч	0.24		
Расход газа на режиме номинальной мощности	нм3/ч	240	360	540
Расход масла на угар	г/кВтч	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6
Масса (сухая)	кг	24500	27600	39000
Габаритные размеры	мм(Дх ШхВ)	5330х 2380х 3070	6635х 1820х 3116	8952х 2430х 3492
Объём системы смазки	л	800	1200	1600

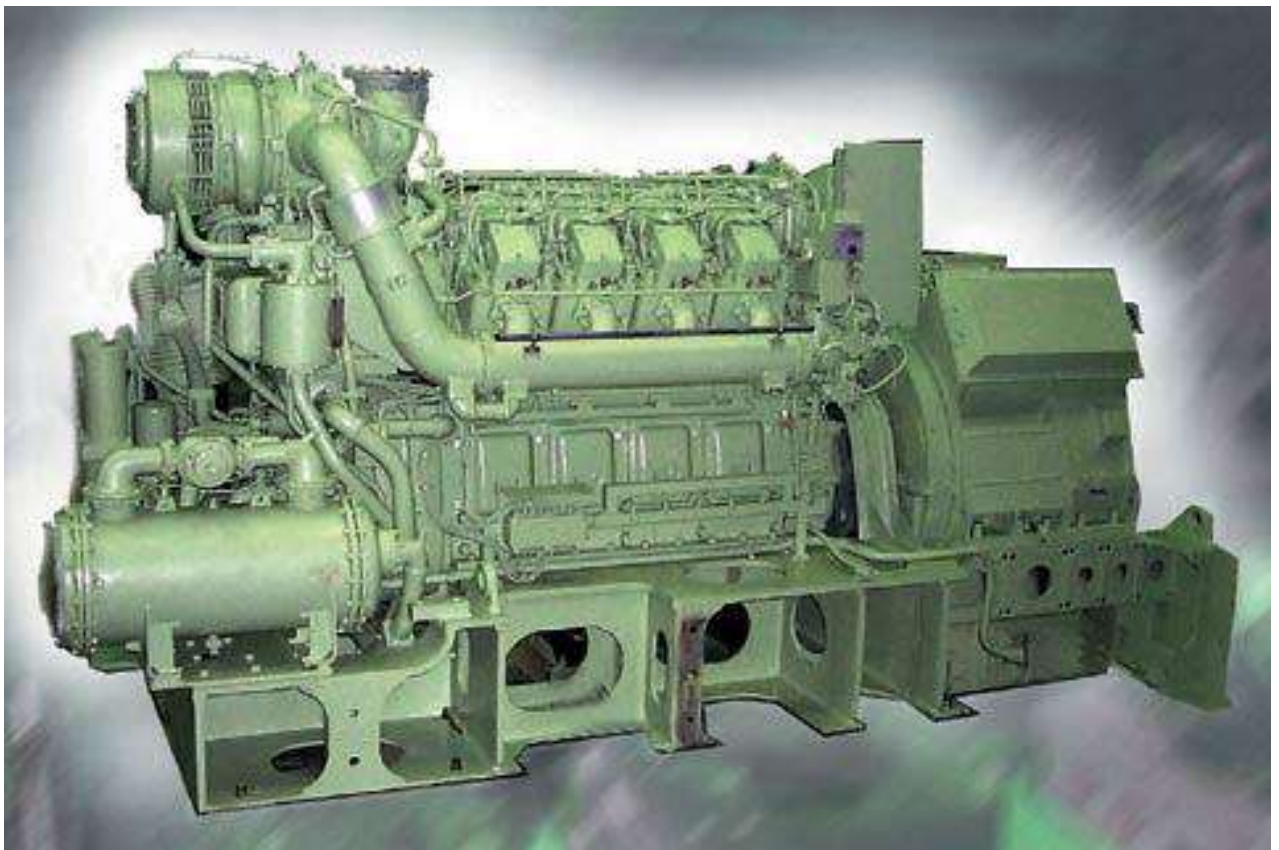


Рисунок 6 – Газовый двигатель 8ГДГ49 компании «ЗАО Трансмашхолдинг» и генератор ГСД-1000-1000



Рисунок 7 – Газовый двигатель 12ГДГ49 компании «ЗАО Трансмашхолдинг» и генератор ГСД-1650-1000

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

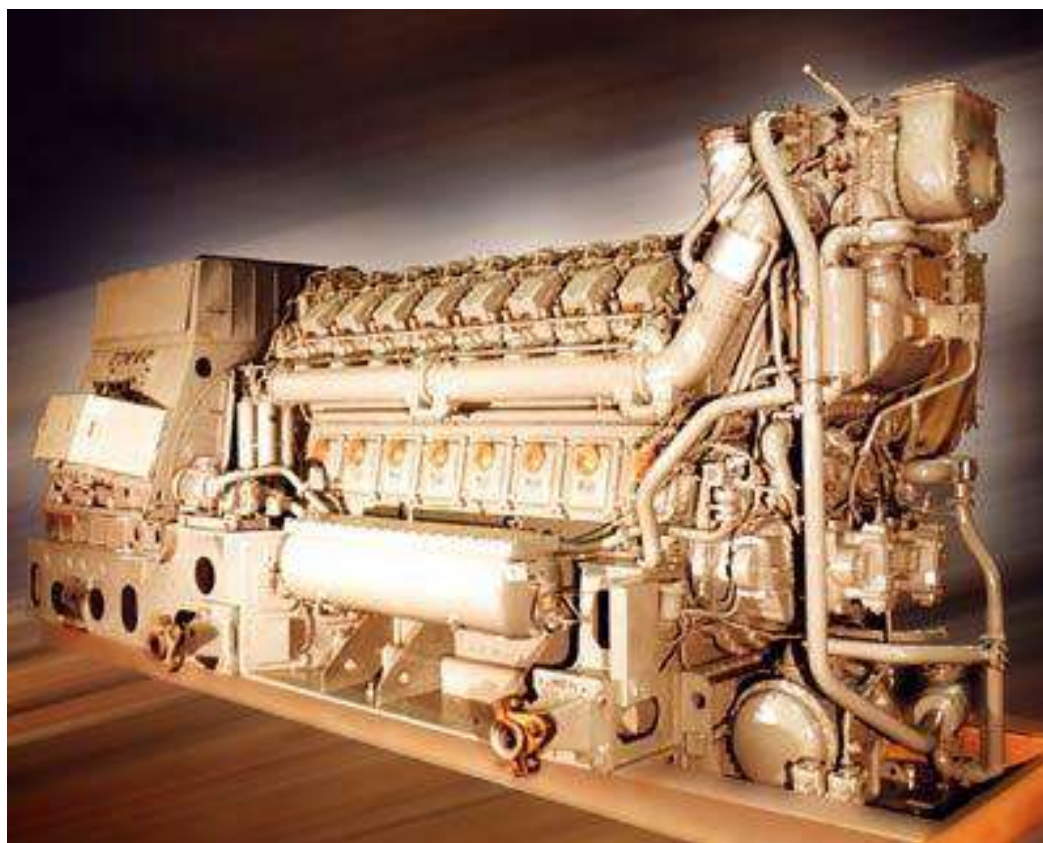


Рисунок 8 – Газовый двигатель 16ГДГ49 компании «ЗАО Трансмашхолдинг» и генератор ГСД-2200-1000

1.6 Газопоршневой двигатель 490ГД производства ОАО «Волжский дизель им. Маминых»

Двигатель 490ГД – 8 цилиндровый, рядный (L образное расположение). Такая компоновка имеет преимущество перед двигателями с V образным расположением цилиндров при обслуживании их в передвижных контейнерах (ширина которых обычно 2,5...3,0 м), обеспечивая свободный проход для обслуживания двигателя.

Диаметр поршней – 210 мм с ходом 260 мм при частоте вращения коленчатого вала 1000 об/мин (среднеоборотный двигатель). Ресурс двигателя составляет 80000 моточасов до капитального ремонта благодаря низкой скорости поршня и низкой частоте вращения коленчатого вала. Двигатель 490ГД способен вырабатывать до 850 кВт электрической и 950

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

кВт тепловой энергии (от системы утилизации тепла выхлопных газов и системы охлаждения двигателя). Основой рабочего процесса является форкамерно-факельное зажигание. При таком типе зажигания источником воспламенения рабочей смеси в цилиндре являются шесть факелов, выходящих из распылителя форкамеры.

Внутреннее смесеобразование (фазированный впрыск газа в цилиндры) позволяет организовать продувку цилиндров наддувочным воздухом. Это снижает температуру выхлопных газов и способствует интенсивному охлаждению выхлопных клапанов и повышению их ресурса. Для сравнения: в зимнее время температура отработанных газов после выхлопных клапанов опускается до 380 °С, тогда как у двигателей с внешним смесеобразованием (без продувки цилиндров) она достигает 680 °С.

Таким образом, сжигание бедных смесей ПНГ и воздуха позволяет работать без детонации с мощностью, которая почти в полтора раза больше, чем у двигателей, работающих на смесях $\lambda = 1,2 \dots 1,4$, – обычно они имеют внешнее (карбюраторное) смесеобразование и искровое зажигание.

Работа на бедных смесях способствует очень низкому образованию на выхлопе оксидов азота – NOx. Это связано с тем, что азот, содержащийся в большом количестве в бедной смеси, является самым сильным антидетонатором и имеет большую теплоемкость, что приводит к низким температурам процесса сгорания и малому образованию NOx и CO2. Уровень содержания вредных веществ не требует установки на выхлопе дорогостоящего катализатора выхлопных газов.

Стабильная работа двигателя обеспечивается процессом сгорания с обратной связью по пределу горения топливной смеси. В обратной связи нет никаких сложных электронных и механических систем управления качеством смеси. Двигатель сам подбирает оптимальную смесь на любом составе топливного газа, на пределе горения – таким образом, она всегда является

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

максимально бедной. В этом случае нет необходимости настраивать топливную систему при изменении состава газа: двигатель сам корректирует процесс сгорания.

Двигатель способен работать при температуре входящего газа от -50 °С до $+80$ °С и атмосферного воздуха от -50 °С до $+40$ °С. Более низкие температуры воздуха и газа способствуют лучшему охлаждению камеры сгорания и увеличивают ресурс выхлопных клапанов.

В период эксплуатации необходимо периодически, через каждые 5000 часов, регулировать только специальные зазоры в газовом и форкамерных клапанах. Тепловые зазоры в механизме газораспределения автоматически регулируются гидрокомпенсаторами. Таким образом, обслуживание двигателя осуществляется через 5000 часов, кроме периодов замены масла (замена масла возможна через 3000...5000 моточасов). В настоящее время на предприятии ведутся работы по исключению затратной операции замены масла в эксплуатации, и тогда пополнение масла будет обеспечиваться только за счет естественного расхода на угар.

1.7 Когенераторная установка Elteco Petra 750 с газовым двигателем Perkins и генератором Stamford

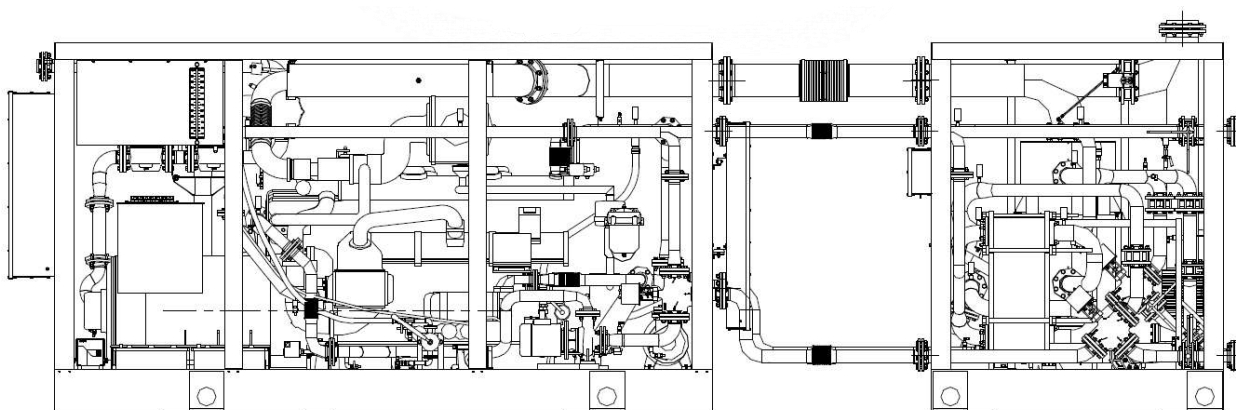


Рисунок 9 – Схема когенераторной установки Elteco Petra 750

Когенераторная установка (КГУ) представляет собой оборудование с двигателем, работающим на природном газе, предназначенная для непрерывного длительного одновременного производства электрической энергии и тепла. Основные составляющие КГУ: энергоагрегат с двигателем внутреннего сгорания и генератором, электрические распределительные устройства, система теплообменников – тепловой содуль и система принудительного охлаждения. Производимое тепло может быть использовано для отопления или приготовления горячей воды для бытовых нужд.

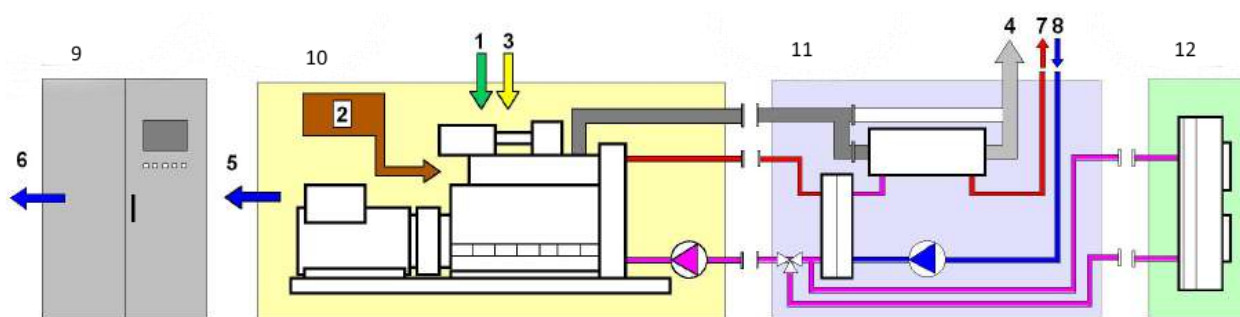


Рисунок 10 – Схема элементов КГУ

- 1 – Впуск воздуха
- 2 – Вход масла из резервуара системы автоматического долива
- 3 – Впуск топлива
- 4 – Выпуск продуктов сгорания
- 5 – Вывод произведенной электроэнергии к распределительному устройству
- 6 – Вывод произведенной электроэнергии
- 7 – Выход нагретой воды из теплового модуля
- 8 – Вход охлажденной воды в тепловой модуль

9 – Распределительное устройство

10 – Энергогенерирующий агрегат

11 – Тепловой модуль

12 – Система принудительного охлаждения



Рисунок 11 – Когенераторная установка Elteco Petra 750 CGC,
установленная в энергоцентре Южно-Уральского государственного
университета

Электроэнергия вырабатывается синхронным генератором, приводимым в движение двигателем внутреннего сгорания. Тепловой модуль (посредством отдельных контуров обменных систем) обеспечивает охлаждение двигателя, охладителя наддувочного воздуха и выхлопных газов с одновременной отдачей тепловой мощности во вторичный контур. В случае

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

недостаточного или нулевого отбора произведенного тепла вторичным контуром, избыточное тепло погашается в системе принудительного охлаждения.



Рисунок 12 – Контроллер управления когенераторной установкой



Рисунок 13 – Шкафы управления энергоцентром

1.8 Газовый двигатель Perkins 4012 TESI

Преимущества и конструктивные особенности

Экономическая мощность. Как и все газовые двигатели Perkins, двигатели 4012 TESI характерна выгодным ценообразованием на двигатели и запасные части, 500 часовой интервал между техническими обслуживаниями и низкий расход топлива обеспечивают значительную экономию денежных средств.

Эффективная мощность. Газовые двигатели Perkins 4012 TESI спроектирован для наивысшей тепловой эффективности. Двигатель компактен, с высокой удельной массовой мощностью.

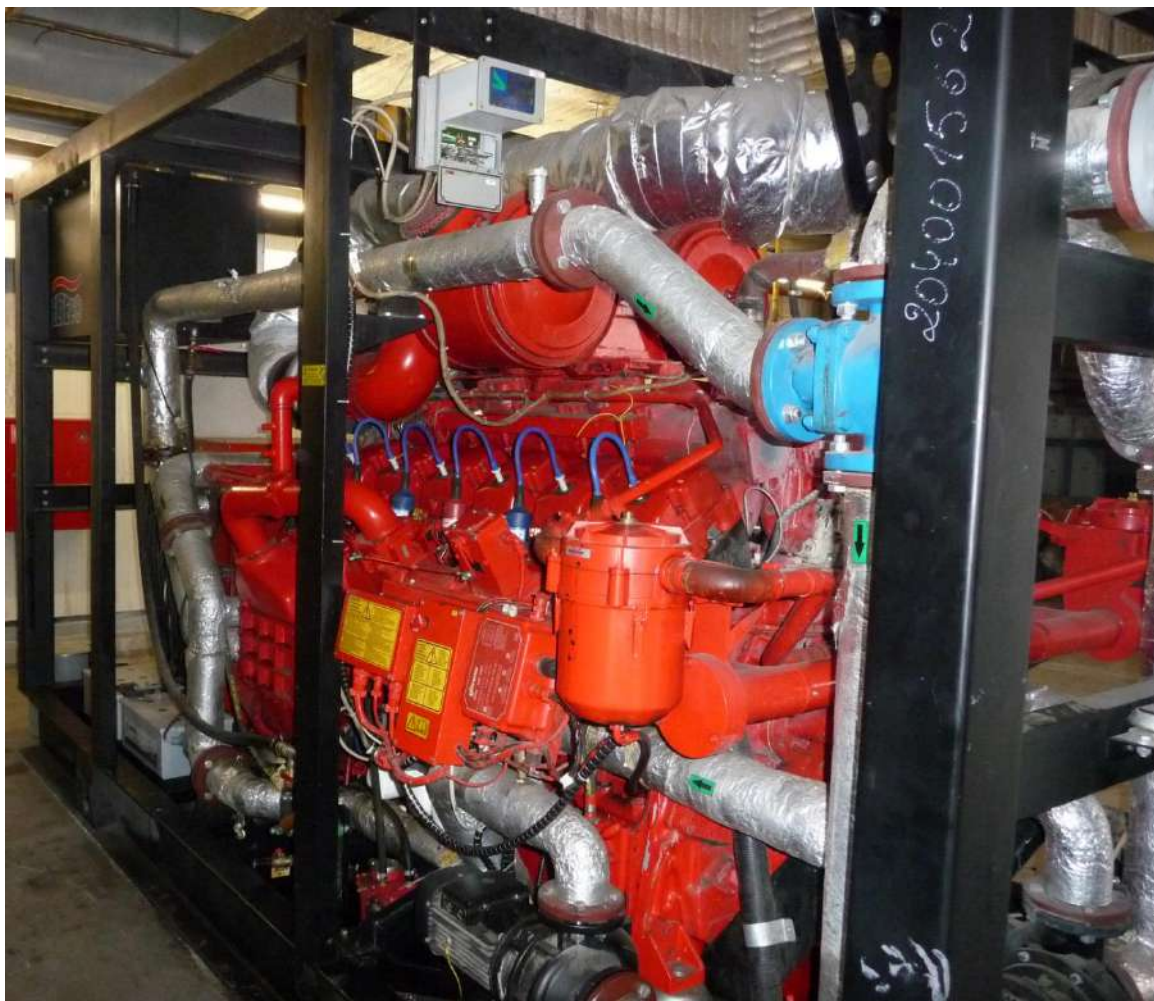


Рисунок 14 – Газовый двигатель Perkins 4012 TESI

Надежная мощность. Газовые двигатели Perkins 4012 TESI обладает ресурсом, гарантируемым компанией Perkins. Удобство технического обслуживания и легкость ремонта двигателя на высоком уровне поддерживается за счет всемирной сетью центров обслуживания газовых двигателей Perkins серии 4000. Расположенные в ключевых точках по всему миру центры обслуживания предоставляют изделия, техническое обслуживание, а также укомплектовывают двигатели по индивидуальному заказу. Изготовленные по техническим условиям заказчика, газовые двигатели Perkins 4012 TESI могут быть укомплектованы для специальных потребностей заказчика и могут использоваться как электрогенератор, так и как когенераторная установка для выработки электрической энергии и тепловой энергии.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

Существуют разные модификации газовых двигателей Perkins 4012 TESI: с высокой (11,5) и низкой (9,5) степенью сжатия. Двигатели могут работать на различных газовых топливах. Двигатели со степенью сжатия 9,5 спроектированы для работы на газах с низким метановым числом (содержанием метана в газе), таких как биогаз, полученный с мест хранения ОТХОДОВ.



Рисунок 15 – Поршни различных модификаций газового двигателя Perkins 4012 TESI. HC – поршень двигателя с высокой степенью сжатия 11,5; LC – поршень двигателя с низкой степенью сжатия 9,5.

1.9 Цель и задачи исследования

На основании анализа характеристик существующих газопоршневых двигателей были сформулированы цель и задачи исследования.

Цель исследования: Определение показателей работы газопоршневого двигателя 12ГЧН16/19 Perkins 4012TESI в энергоцентре ЮУрГУ на эксплуатационных режимах без препарирования двигателя и его систем.

Для достижения этой цели решались следующие задачи.

1. Разработать программу и методику экспериментального исследования рабочего цикла газопоршневого двигателя Perkins 4012 TESI (12ГЧН16/19), установленного в энергоцентре ЮУрГУ, в эксплуатационных условиях без препарирования двигателя и его систем.

2. Произвести подготовку измерительного комплекса для регистрации индикаторных диаграмм давления в цилиндре газопоршневого двигателя Perkins 4012 TESI (12ГЧН16/19), установленного в энергоцентре ЮУрГУ.

3. Произвести регистрацию индикаторных диаграмм давления в цилиндре газопоршневого двигателя Perkins 4012 TESI (12ГЧН16/19) при постоянной частоте вращения коленчатого вала 1500 мин⁻¹ и работе на холостом ходу и нагрузках 300 кВт, 400 кВт, 500 кВт и 600 кВт.

4. Обработать полученные индикаторные диаграммы по программе анализа индикаторных диаграмм по тепловыделению с шагом 1 град. п.к.в. и определить индикаторные показатели рабочего цикла на исследованных режимах.

5. Произвести расчёты рабочего цикла по «Программе расчета рабочего цикла дизеля «Double-Wiebe function» на режимах холостого хода и нагрузках 300 кВт, 400 кВт, 500 кВт и 600 кВт и сравнить полученные расчётом индикаторные показатели с показателями из индикаторных диаграмм.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Аппаратура регистрации давления

Аппаратура регистрации давления «Нейва 10000» предназначена для преобразования сигналов (зарядов) пьезоэлектрических датчиков, измеряющих давление при выстреле на дно стенки зарядной камеры, а также на стенки ствола орудия по всей его длине, в напряжение с последующей регистрацией и обработкой сигналов на компьютере.

На рисунке представлена функциональная схема аппаратуры «Нейва 10000», содержащей четыре независимых канала. Каждый канал включает в себя модуль усилителя заряда МУЗ и АЦП.

В состав аппаратуры входят:

- блок сопряжения БС 312;
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- системный блок компьютера;
- принтер;
- монитор;
- клавиатура;
- манипулятор «мышь»;
- четыре кабеля для подключения датчиков давления к блоку сопряжения;

Пьезоэлектрические датчики давления при нагружении формируют на своих обкладках пропорциональный давлению электрический заряд, который

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

по кабелю поступает на вход «→Q» соответствующего модуля усилителя заряда (МУЗ) блока сопряжения. МУЗ осуществляет линейное преобразование входного заряда в напряжение с заданным коэффициентом преобразования.

С МУЗ сигналы поступают на четырехканальный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), установленный в системном блоке. АЦП производит преобразование сигналов с выбранным периодом дискретизации в цифровой код, который записывается в память компьютера. Обработка и просмотр кривых давления производится в соответствии с установками специального программного обеспечения.

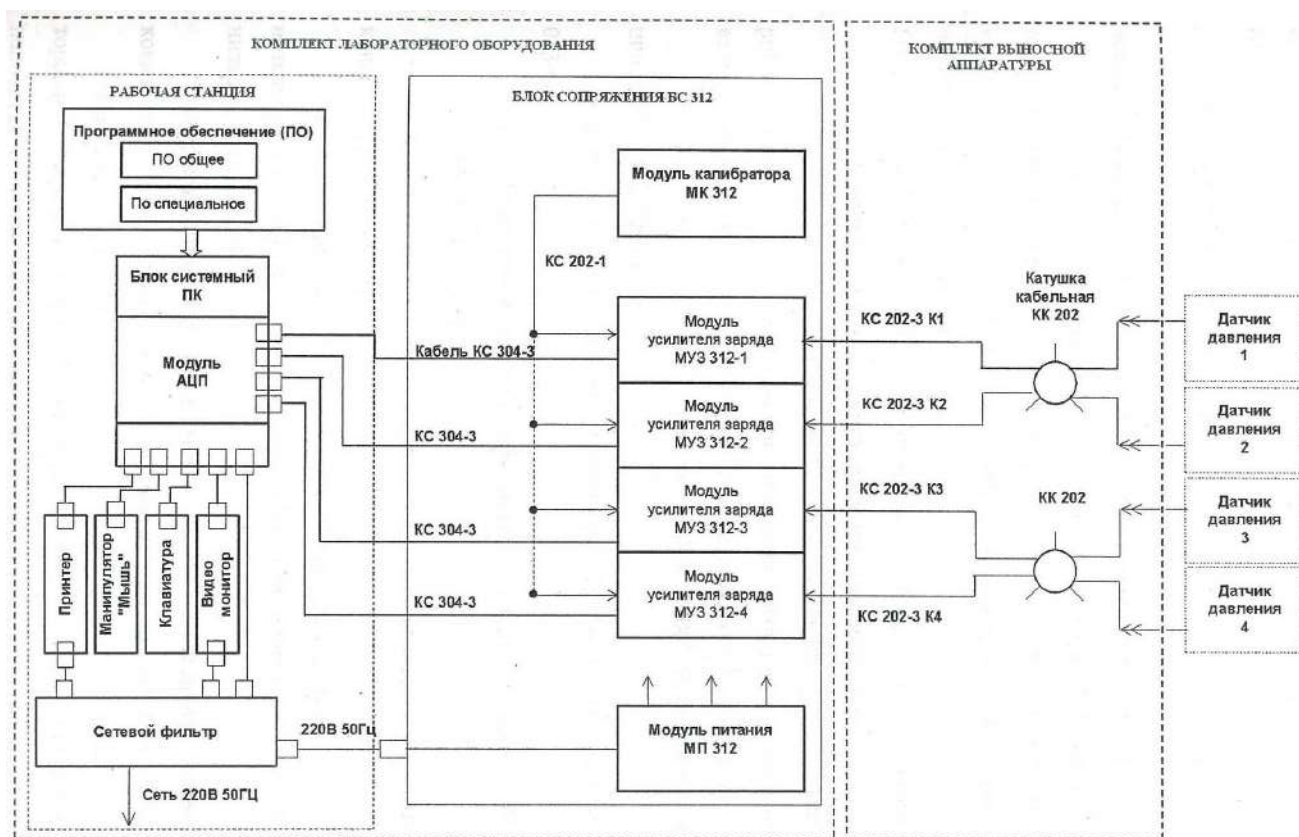


Рисунок 16 – Функциональная схема аппаратуры «Нейва 10000»

Специальное программное обеспечение (СПО) аппаратуры серии «Нейва 10000» предназначена для выполнения следующих задач:

- ввода информации об условиях проведения сеанса измерений, параметров измерительной техники и испытательной установки;
- регистрации измерительной информации в многоканальном режиме;
- обработки результатов измерений с целью получения функциональных зависимостей давления от времени по каждому каналу;
- определения основных характеристик исследуемого процесса;
- сохранения данных;
- печати графических и табличных форм с результатами.

СПО функционирует на персональном компьютере, который выполняет функции, как средства регистрации измерительной информации, так и средства обработки данных.

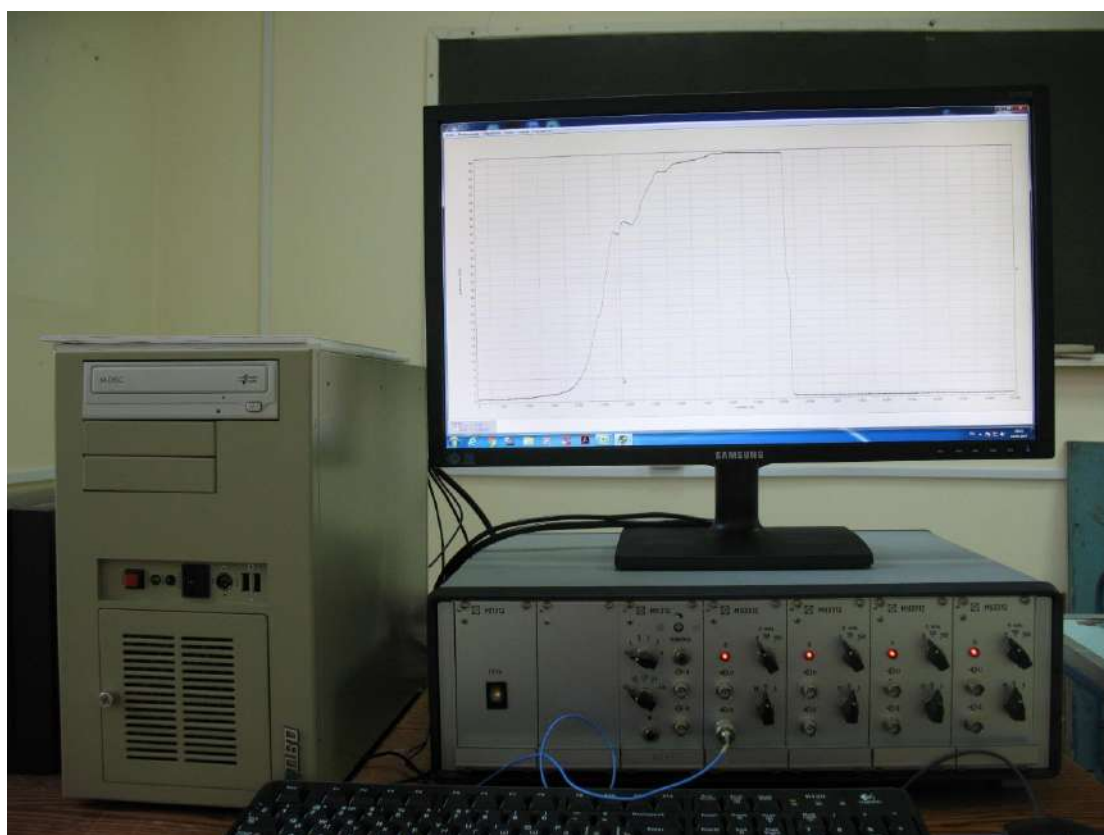


Рисунок 17 – Аппаратура измерения давления «Нейва 10000»

2.2 Тарирование датчика давления

Для обеспечения точных результатов измерения давления в цилиндре газового двигателя необходимо тарировать датчик давления.

Тарировка датчика давления заключается в установлении зависимости между показаниями датчика и размером измеряемой величины. Для нагнетания давления используется масляный пресс с манометром.



Рисунок 18 – Масляный пресс с датчиком давления фирмы AVL
вмонтированным в свечу зажигания

В пресс устанавливается датчик давления. По средством вращения ручки перемещается поршень внутри масляного пресса, нагнетая давления. Показываемое манометром давление принимаем за эталонное. Аппаратура регистрации давления «Нейва 10000» имеет ограниченное количество памяти

для записи. Максимальная продолжительность записи составляет 10,5 секунд, за это время возможно только один раз накачать необходимое давление и сбросить давление в атмосферное.

Тарировку проводим в три цикла, для уменьшения погрешности. Каждый цикл состоит из 12 измерений давления от 10 кгс/см² до 120 кгс/см². Полученные показания давления сводятся в таблицу для определения коэффициента погрешности аппаратуры регистрации давления «Нейва 10000».



Рисунок 19 – Рабочее место при тарировке датчика давления

2.3 Программа и методика испытаний

2.3.1 Общие положения

2.3.1.1 Объектом исследовательских испытаний является газовый поршневой двигатель 12ГЧН16/19 Perkins 4012TESI (далее – объект испытаний).

Основные параметры и характеристики объекта испытаний:

- количество цилиндров – 12;
- диаметр цилиндра 160 мм;
- ход поршня 190 мм;
- степень сжатия – 11,5;
- номинальная частота вращения 1500 мин⁻¹;

2.3.1.2. Цель испытаний

Измерение и регистрация давления в камере сгорания газового двигателя (индицирование) на режимах эксплуатации для исследования качества рабочего цикла.

2.3.2 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

2.3.2.1 Место проведения испытаний

Испытания проводятся на базе ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) в энергоцентре ЮУрГУ.

2.3.2.2 Требования к условиям проведения испытаний

Испытания должны проводиться в нормальных климатических условиях:

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Таблица 5 – Нормальные климатические условия

температура окружающего воздуха, °С	20 ± 10
относительная влажность воздуха, %	от 45 до 80
атмосферное давление, мм рт. ст.	от 730 до 780

2.3.2.3 Требования к подготовке объекта испытаний

Свободный доступ к объекту испытаний.

Перед проведением испытаний проводится осмотр внешнего состояния объекта испытаний на отсутствие механических повреждений.

2.3.3 Программа испытаний

Исследовательские испытания индицирования газового двигателя состоят из контрольных этапов, в ходе которых определяют давление прокрутки двигателя, давление в цилиндре двигателя на холостом ходу, давление в цилиндре на различных нагрузочных режимах.

Программа испытаний состоит из следующих контрольных этапов:

2.3.3.1. Измерение и регистрация давления в цилиндре при прокрутке двигателя с частотой вращения коленчатого вала около 300 мин⁻¹.

2.3.3.2. Измерение и регистрация давления в цилиндре двигателя на холостом ходу при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин⁻¹.

2.3.3.3. Измерение и регистрация давления в цилиндре на различных нагрузочных режимах при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин⁻¹.

Определяемые показатели и точность их измерений:

Таблица 6 – Определяемые показатели и точность их измерений

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Нормируемое значение	Пределы отклонения
Частота вращения двигателя	n	мин ⁻¹	Согласно ПМ	±2,0
Давление в цилиндре	p	бар	измеренная	±1,0
Температура в выпускном коллекторе	t	°С	измеренная	±1,0
Продолжительность записи сигнала	τ	мс	Согласно ПМ	±0,01
Мощность двигателя	N	кВт	Согласно ПМ	±2,0
Чувствительность датчика давления		пКл/бар	Согласно ПМ	±0,1

2.3.4 Подготовка испытаний

2.3.4.1 Подготовка оборудования.

В испытаниях используется аппаратура регистрации давления «Нейва 10000». Подготовка аппаратуры: регулировка усилителя и настройка режимов измерения и сохранения результатов измерения, выбор частоты дискретизации и масштаба регистрации.

Тарировка датчика давления в диапазоне давлений от 0 до 120 бар с шагом 10 бар.

Подготовка двигателя к испытаниям. Демонтаж штатной свечи зажигания из цилиндра № 1 когенераторной установки. Установка на её

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

место свечи зажигания с датчиком давления фирмы AVL.

2.3.5 Методика испытаний

2.3.5.1. Испытание по п. 3.1 Программы выполняется следующим образом.

- 1) Запустить двигатель.
- 2) Прогреть двигатель под нагрузкой 300 кВт в течение 10 – 15 минут для достижения и стабилизации его рабочей температуры.
- 3) Проверить напряжение аккумуляторов. Напряжение в системе должно быть больше 25 вольт.
- 4) Остановить двигатель.
- 5) Демонтировать все свечи зажигания.
- 6) Установить датчик давления в цилиндр №1 двигателя.
- 7) Закрыть газовый клапан подачи газа.
- 8) Произвести прокрутку двигателя стартерами двигателя с частотой вращения коленчатого вала около 300 мин^{-1} , используя штатный алгоритм запуска двигателя, с одновременным запуском специального программного обеспечения «Нейва 10000».
- 9) Записать давление в цилиндре двигателя на аппаратуру «Нейва 10000».
- 10) Сохранить полученные графики и таблицы.
- 11) Повторить 3–4 раза действия по пунктам 8) – 10) раздела 5.1.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

2.3.5.2. Испытание по п. 3.2 Программы выполняется следующим образом.

1) Установить датчик давления фирмы AVL со свечой зажигания в цилиндр №1 и подключить её к системе зажигания двигателя.

2) Установить и подключить штатные свечи зажигания во все остальные цилиндры двигателя.

3) Настроить регулировки аппаратуры измерения давления «Нейва 10000» для регистрации давления до 120 бар датчиком давления фирмы AVL со свечой зажигания.

4) Произвести запуск двигателя.

5) Прогреть двигатель в течение 5 – 10 минут под нагрузкой 300 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин^{-1} для стабилизации его рабочей температуры.

6) Снять нагрузку с двигателя.

7) Записать давление в цилиндре двигателя на аппаратуру «Нейва 10000».

8) Сохранить полученные графики и таблицы.

9) Повторить 3–4 раза действия по пунктам 7) и 8) раздела 5.2.

2.3.5.3. Испытание по п. 3.3 Программы выполняется следующим образом.

1) Подключить нагрузку к двигателю.

2) Установить мощность 300 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин^{-1} и поработать на установленной мощности 5–10 минут для стабилизации его рабочей температуры.

3) Записать давление в цилиндре двигателя на аппаратуру «Нейва 10000».

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

4) Сохранить полученные графики и таблицы.

5) Повторить 3–4 раза действия по пунктам 3) и 4) раздела 5.3.

6) Увеличить нагрузку до 400 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин^{-1} и поработать на установленной мощности 5–10 минут для стабилизации его рабочей температуры.

7) Повторить 3–4 раза действия по пунктам 3) и 4) раздела 5.3.

8) Увеличить нагрузку до 500 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин^{-1} и поработать на установленной мощности 5–10 минут для стабилизации его рабочей температуры.

9) Повторить 3–4 раза действия по пунктам 3) и 4) раздела 5.3.

10) Увеличить нагрузку до 600 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин^{-1} и поработать на установленной мощности 5–10 минут для стабилизации его рабочей температуры.

11) Повторить 3–4 раза действия по пунктам 3) и 4) раздела 5.3.

12) Остановить двигатель в штатном режиме.

13) Демонтировать свечу зажигания с датчиком давления фирмы AVL.

14) Установить штатную свечу зажигания.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47



Рисунок 20 – Рабочее место оператора аппаратуры измерения давления
«Нейва 10000» в энергоцентре ЮУрГУ

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Проведение эксперимента

Для подготовки газового двигателя Perkins 4012 TESI в составе когенераторной установке Eltesco Petra 750 GCG для проведения эксперимента необходимо запустить двигатель в штатном режиме для прогрева до рабочей температуры. Далее, после остановки, устанавливается датчик давления, встроенный в свечу зажигания фирмы AVL.



Рисунок 21 – Подготовка к проведению эксперимента

Для определения верхней мертвой точки записывается сигнал с датчика на диске распределителя зажигания. К клеммам в распределительном ящике подключается экранированный провод через конденсатор, а минусовой

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

провод заземлить. На другом конце провода находится разъем для подключения к аппаратуре измерения давления.



Рисунок 22 – Настройка аппаратуры измерения давления «Нейва 10000»

Настройка аппаратуры заключается в подстройке параметров записи и параметров датчика давления.

Производим записи давлений на различных режимах: холостой ход, нагрузка 300 кВт, 400 кВт, 500 кВт, 600 кВт, прокрутка. Каждый мощностной режим записывается 3 – 4 раза для уменьшения погрешности результатов. После смены мощностного режима необходимо позволить газовому двигателю набрать нагрузку и установить тепловой режим.

В результате эксперимента получили двадцать диаграмм давления в цилиндре газового двигателя, а также таблиц давлений.

Для обработки массива давления выбрали массив со средним значением максимального давления в цилиндре. Разность максимальных давлений вызвана неравномерностью газовой смеси и процесса сгорания.



Рисунок 23 – Изменение параметров двигателя КГУ № 1



Рисунок 24 – Получение характеристики изменения давления в цилиндре двигателя

3.2 Графики, полученные в результате проведенного эксперимента

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

3.3 Таблица результатов испытаний для режима 600 кВт

НЕЙВА-4К

Заводской номер: 0001

Наряд:

Дата: 30.12.1899

Номер опыта: 0

Система:

Изделие:

Канал 1

№	время, мс	давление сглаженное, бар	производная бар/мс	интегральная функция бар*мс	№	время, мс	давление сглаженное, бар	производная бар/мс	интегральная функция бар*мс
0	0,000	1,338	-0,730	0,000	16	0,800	1,338	17,409	1,284
1	0,050	1,561	-10,334	0,080	17	0,850	1,338	34,062	1,366
2	0,100	1,561	27,008	0,156	18	0,900	1,561	18,032	1,454
3	0,150	2,008	-9,514	0,236	19	0,950	1,785	37,590	1,538
4	0,200	1,561	-3,173	0,314	20	1,000	1,561	3,791	1,623
5	0,250	1,785	-23,133	0,390	21	1,050	1,785	-5,473	1,713
6	0,300	1,115	15,807	0,469	22	1,100	1,785	-15,144	1,797
7	0,350	1,561	-12,720	0,548	23	1,150	2,008	-6,395	1,889
8	0,400	1,561	-24,084	0,629	24	1,200	2,454	-6,948	1,983
9	0,450	1,338	-8,558	0,709	25	1,250	1,785	-20,194	2,073
10	0,500	1,115	24,290	0,790	26	1,300	2,008	-16,526	2,165
11	0,550	1,785	-11,857	0,872	27	1,350	1,785	-0,912	2,258
12	0,600	1,561	5,543	0,956	28	1,400	1,561	5,219	2,352
13	0,650	1,561	-34,808	1,037	29	1,450	2,008	6,142	2,446
14	0,700	2,008	-5,504	1,122	30	1,500	1,561	5,921	2,541
15	0,750	1,785	8,855	1,204	31	1,550	1,785	-13,852	2,637

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		85

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		87

4 ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

4.1 Определение верхней мертвой точки

Для определения верхней мертвой точки на диаграмме был произведен расчет рабочего цикла газового двигателя 12ГЧН16/19, указав цикловую подачу топлива близкой к нулю и угол начала сгорания далеко за верхнюю мертвую точку. На полученной диаграмме давления видно, что максимальное давление прокрутки достигается за 1 градус поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки. Сопоставив этот факт с фактической диаграммой давления на режиме прокрутки, можно заметить, что верхняя мертвая точка находится на 28 градуса поворота коленчатого вала после вертикальной нисходящей полосы, полученной от сигнала с датчика распределителя зажигания. 28 градусов поворота коленчатого вала – угол опережения зажигания, которое задает контроллер для когенераторной установки № 1 в нормальных условиях.

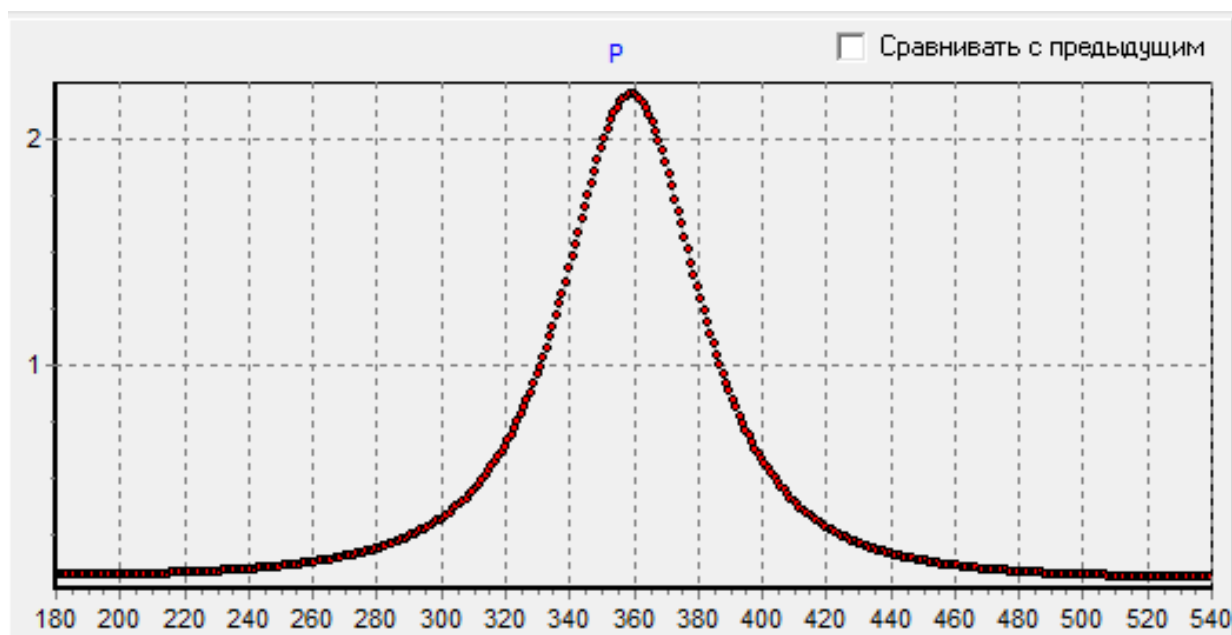


Рисунок 26 – Расчетный график давления на режиме прокрутки двигателя

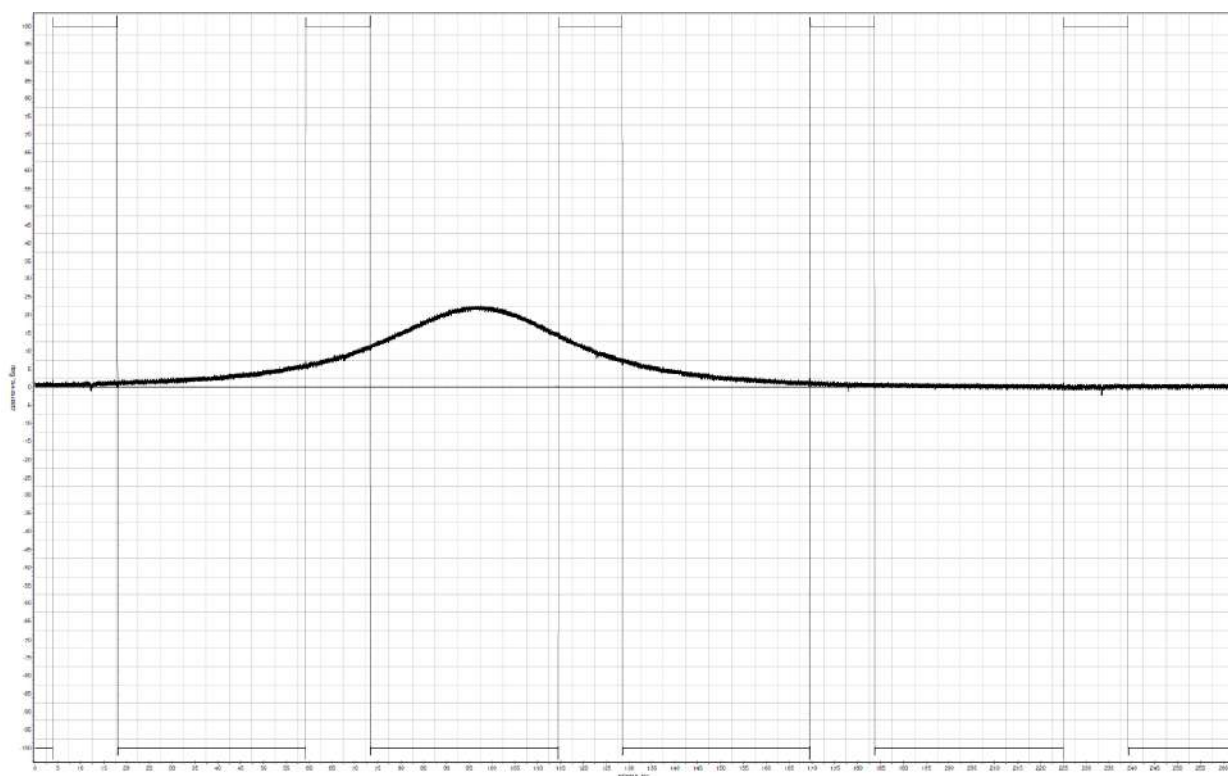


Рисунок 27 – График давления на режиме прокрутки двигателя, полученный в ходе эксперимента

Аппаратура измерения давления «Нейва 10000» записывает давление каждые 5 сотых миллисекунды. При частоте вращения 1500 мин^{-1} совершается 25 оборотов в секунду, а один оборот длится 40 миллисекунд.

4.2 Анализ результатов исследования

После выборки давлений, соответствующих каждому градусу поворота коленчатого вала, из массива необходимо было сгладить получившийся график. Неровности записанного графика вызваны наводками от соседнего канала, а также от внешних источников.

Скорректированный массив давлений используем в программе анализа рабочего цикла по индикаторным диаграммам для определения индикаторных показателей.

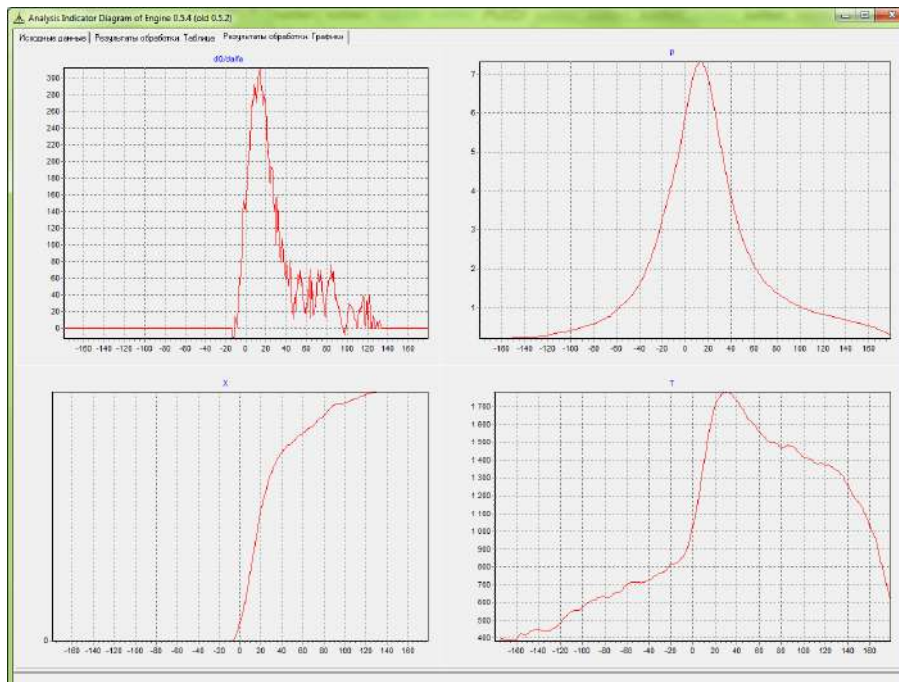


Рисунок 28 – Программа анализа рабочего цикла по индикаторным диаграммам с загруженным массивом давления на режиме 600 кВт

Исходные данные | Результаты обработки | Таблица | Результаты обработки | Графики

Исходные данные

Обороты двигателя, мин⁻¹: 1500
 Степень сжатия: 11.5
 Диаметр цилиндра, м: 0.16
 Ход поршня, м: 0.19
 Длина шатена, м: 0.336
 Площадь головки, м²: 0.02
 Площадь поршня, м²: 0.021
 Объем КС, м³: 0.0009
 Температура стенки, К: 470
 Углы PT из цилиндра: 0.001
 Атмосферное давление, МПа: 0.098
 MSER: 0.2336
 DMSER: 0
 DMSI: 0
 DQNI: 0
 DQT: 0
 DQNI: 0
 DQNC: 0

Цикловая подача, грамм: 0
 Цикловая подача на впуск, грамм: 0
 Плотность топлива, г/см³: 0.0006
 Начальная теплотворная способность топлива: 43700
 Максимальная масса PT в начале сжатия: 29.85
 Эффективность сгорания: 1
 Начальная температура PT, К: 300
 Начальное давление PT, МПа: 0.19
 Угол начала раската поршня от сжатия: -15
 Угол начала сжатия до ВМТ: -180
 Угол окончания расширения после ВМТ: 180
 Шаг расчета, град: 1
 Угол начала подачи топлива серийной форсункой: -30.01
 Угол окончания подачи топлива серийной форсункой: -15.01

Загрузить исходные данные
 Из txt файла
 Из Excel файла
 РАСЧЕТ
 Сохранить результат расчета
 В Excel файл

Массив давлений

Угол i	Pi, МПа
0	0.191
1	0.1905
2	0.191
3	0.191
4	0.192
5	0.193
6	0.194732049
7	0.196644332
8	0.198726261
9	0.197808189
10	0.197580689
11	0.197352969
12	0.197452969
13	0.197552969
14	0.197552969
15	0.197552969
16	0.197452969
17	0.197352969
18	0.197201339
19	0.197049689
20	0.196145339
21	0.195242969
22	0.203467969
23	0.207692969
24	0.213022969
25	0.218352969
26	0.218352969
27	0.218352969
28	0.218352969
29	0.218352969
30	0.219852969
31	0.221352969
32	0.221352969

Индикаторная работа Li = 4433.738 Дж
 Ср индикаторное давление Pi = 1160611 Па
 Индикаторная мощность Ni = 55421.73 Вт
 Максимальный индикаторный расход qh = 189.6432 г/кВт·ч
 Индикаторный КПД = 0.381952

Рисунок 29 – Программа анализа рабочего цикла по индикаторным диаграммам с загруженным массивом давления на режиме 600 кВт

Таблица 7 – Индикаторные показатели цикла в программе рабочего цикла по индикаторным диаграммам на режиме 600 кВт

Индикаторные показатели цикла	
Индикаторная работа L_i , Дж	4433,738
Ср. индикаторное давление P_i , Па	1160611
Индикаторная мощность N_i , Вт	55421,73
Удельный индикаторный расход g_i , г/кВт ч	189,6432
Индикаторный КПД	0,381952

Таблица 8 – Результаты расчёта по программе анализа рабочего цикла по индикаторным диаграммам на режиме 600 кВт

alfa	P	T	V	X	Li
-179	0,1905	380,98	0,004184	4,28E-06	-0,03677
-178	0,191	381,93	0,004183	4,28E-06	-0,14735
-177	0,192	383,84	0,004182	4,28E-06	-0,3323
-176	0,193	385,72	0,004181	4,28E-06	-0,5927
-175	0,19473	389,02	0,004179	4,28E-06	-0,92979
-174	0,19964	398,63	0,004177	4,28E-06	-1,3491
-173	0,19873	396,55	0,004175	4,28E-06	-1,8496
-172	0,19781	394,45	0,004172	4,28E-06	-2,4247
-171	0,19758	393,68	0,004168	4,28E-06	-3,0747
-170	0,19735	392,88	0,004165	4,28E-06	-3,8006
-169	0,19745	392,7	0,004161	4,28E-06	-4,6029
-168	0,19755	392,48	0,004156	4,28E-06	-5,4824
-167	0,19755	392,02	0,004151	4,28E-06	-6,4391
-166	0,19755	391,53	0,004146	4,28E-06	-7,4726
-165	0,19745	390,8	0,004141	4,28E-06	-8,5831
-164	0,19735	390,03	0,004134	4,28E-06	-9,77
-163	0,1972	389,13	0,004128	4,28E-06	-11,033
-162	0,19705	388,19	0,004121	4,28E-06	-12,373
-161	0,19815	389,67	0,004114	4,28E-06	-13,793
-160	0,19924	391,11	0,004107	4,28E-06	-15,3
-159	0,20347	398,62	0,004099	4,28E-06	-16,906
-158	0,20769	406,07	0,00409	4,28E-06	-18,626
-157	0,21302	415,6	0,004081	4,28E-06	-20,47
-156	0,21835	425,04	0,004072	4,28E-06	-22,445
-155	0,21835	424,04	0,004063	4,28E-06	-24,532
-154	0,21835	423,01	0,004053	4,28E-06	-26,705
-153	0,21835	421,93	0,004042	4,28E-06	-28,965
-152	0,21835	420,8	0,004032	4,28E-06	-31,313

Продолжение таблицы 8

-151	0,21985	422,52	0,00402	4,28E-06	-33,755
-150	0,22135	424,18	0,004009	4,28E-06	-36,303
-149	0,22485	429,61	0,003997	4,28E-06	-38,969
-148	0,22835	434,95	0,003985	4,28E-06	-41,767
-147	0,22968	436,07	0,003972	4,28E-06	-44,688
-146	0,231	437,13	0,003959	4,28E-06	-47,717
-145	0,23468	442,57	0,003945	4,28E-06	-50,874
-144	0,23835	447,91	0,003931	4,28E-06	-54,176
-143	0,23835	446,27	0,003917	4,28E-06	-57,599
-142	0,23835	444,59	0,003902	4,28E-06	-61,119
-141	0,24215	449,92	0,003887	4,28E-06	-64,764
-140	0,24215	448,12	0,003871	4,28E-06	-68,536
-139	0,24215	446,27	0,003855	4,28E-06	-72,407
-138	0,24215	444,37	0,003839	4,28E-06	-76,375
-137	0,24215	442,43	0,003822	4,28E-06	-80,442
-136	0,24215	440,44	0,003805	4,28E-06	-84,606
-135	0,24275	439,49	0,003787	4,28E-06	-88,875
-134	0,24335	438,48	0,003769	4,28E-06	-93,252
-133	0,24435	438,12	0,003751	4,28E-06	-97,743
-132	0,24534	437,69	0,003732	4,28E-06	-102,35
-131	0,24718	438,71	0,003713	4,28E-06	-107,08
-130	0,24904	439,67	0,003693	4,28E-06	-111,95
-129	0,2537	445,46	0,003673	4,28E-06	-116,99
-128	0,25835	451,11	0,003653	4,28E-06	-122,22
-127	0,26135	453,75	0,003632	4,28E-06	-127,64
-126	0,26435	456,27	0,003611	4,28E-06	-133,22
-125	0,26719	458,41	0,003589	4,28E-06	-138,97
-124	0,27003	460,43	0,003567	4,28E-06	-144,89
-123	0,27469	465,44	0,003545	4,28E-06	-150,99
-122	0,27935	470,29	0,003522	4,28E-06	-157,32
-121	0,28635	478,9	0,003499	4,28E-06	-163,88
-120	0,29035	482,31	0,003475	4,28E-06	-170,69
-119	0,29935	493,83	0,003451	4,28E-06	-177,77
-118	0,30835	505,08	0,003427	4,28E-06	-185,17
-117	0,31433	511,15	0,003402	4,28E-06	-192,88
-116	0,3203	517,01	0,003377	4,28E-06	-200,86
-115	0,32563	521,64	0,003351	4,28E-06	-209,11
-114	0,33095	526,07	0,003325	4,28E-06	-217,61
-113	0,33765	532,48	0,003299	4,28E-06	-226,39
-112	0,34435	538,66	0,003272	4,28E-06	-235,47
-111	0,35305	547,72	0,003245	4,28E-06	-244,88

Продолжение таблицы 8

-110	0,35535	546,64	0,003218	4,28E-06	-254,57
-109	0,36135	551,08	0,00319	4,28E-06	-264,5
-108	0,36735	555,31	0,003162	4,28E-06	-274,73
-107	0,37117	556,04	0,003134	4,28E-06	-285,21
-106	0,37499	556,61	0,003105	4,28E-06	-295,94
-105	0,37838	556,39	0,003076	4,28E-06	-306,89
-104	0,38177	556,01	0,003047	4,28E-06	-318,07
-103	0,3864	557,26	0,003017	4,28E-06	-329,48
-102	0,39103	558,32	0,002987	4,28E-06	-341,16
-101	0,39835	562,99	0,002957	4,28E-06	-353,14
-100	0,4093	572,47	0,002926	4,28E-06	-365,52
-99	0,41864	579,34	0,002895	4,28E-06	-378,33
-98	0,42798	585,88	0,002864	4,28E-06	-391,55
-97	0,43547	589,57	0,002832	4,28E-06	-405,16
-96	0,44295	592,97	0,0028	4,28E-06	-419,12
-95	0,45049	596,15	0,002768	4,28E-06	-433,43
-94	0,45802	599,05	0,002736	4,28E-06	-448,11
-93	0,46754	604,22	0,002704	4,28E-06	-463,17
-92	0,47705	609,05	0,002671	4,28E-06	-478,66
-91	0,48755	614,76	0,002638	4,28E-06	-494,58
-90	0,49463	615,82	0,002604	4,28E-06	-510,9
-89	0,50254	617,64	0,002571	4,28E-06	-527,57
-88	0,51045	619,16	0,002537	4,28E-06	-544,61
-87	0,5213	623,89	0,002504	4,28E-06	-562,06
-86	0,53215	628,23	0,00247	4,28E-06	-579,97
-85	0,54025	628,97	0,002435	4,28E-06	-598,28
-84	0,54835	629,4	0,002401	4,28E-06	-616,96
-83	0,55835	631,68	0,002367	4,28E-06	-636,03
-82	0,56835	633,6	0,002332	4,28E-06	-655,52
-81	0,57675	633,4	0,002297	4,28E-06	-675,39
-80	0,58335	630,94	0,002263	4,28E-06	-695,58
-79	0,59085	629,19	0,002228	4,28E-06	-716,07
-78	0,59835	627,17	0,002193	4,28E-06	-736,88
-77	0,6099	629,06	0,002158	4,28E-06	-758,05
-76	0,62145	630,54	0,002122	4,28E-06	-779,67
-75	0,63554	634,16	0,002087	4,28E-06	-801,76
-74	0,64963	637,3	0,002052	4,28E-06	-824,36
-73	0,66749	643,59	0,002017	4,28E-06	-847,53
-72	0,68535	649,29	0,001982	4,28E-06	-871,33
-71	0,6995	650,94	0,001947	4,28E-06	-895,68
-70	0,71535	653,67	0,001911	4,28E-06	-920,54

Продолжение таблицы 8

-69	0,72935	654,23	0,001876	4,28E-06	-945,89
-68	0,74335	654,33	0,001841	4,28E-06	-971,69
-67	0,76045	656,68	0,001806	4,28E-06	-997,98
-66	0,77755	658,48	0,001771	4,28E-06	-1024,8
-65	0,80125	665,23	0,001737	4,28E-06	-1052,3
-64	0,82495	671,24	0,001702	4,28E-06	-1080,4
-63	0,85573	682,16	0,001668	4,28E-06	-1109,4
-62	0,8865	692,13	0,001633	4,28E-06	-1139,4
-61	0,91135	696,62	0,001599	4,28E-06	-1170,1
-60	0,93835	702	0,001565	4,28E-06	-1201,6
-59	0,96335	705,12	0,001531	4,28E-06	-1233,8
-58	0,98835	707,52	0,001497	4,28E-06	-1266,6
-57	1,0168	711,64	0,001464	4,28E-06	-1300,1
-56	1,0452	714,96	0,001431	4,28E-06	-1334,3
-55	1,0718	716,27	0,001398	4,28E-06	-1369,2
-54	1,0984	716,89	0,001365	4,28E-06	-1404,6
-53	1,1234	715,83	0,001333	4,28E-06	-1440,5
-52	1,1484	714,17	0,001301	4,28E-06	-1476,9
-51	1,1791	715,37	0,001269	4,28E-06	-1513,9
-50	1,2084	715	0,001238	4,28E-06	-1551,4
-49	1,2384	714,36	0,001207	4,28E-06	-1589,4
-48	1,2684	713,04	0,001176	4,28E-06	-1627,9
-47	1,3018	712,97	0,001146	4,28E-06	-1666,9
-46	1,3353	712,17	0,001116	4,28E-06	-1706,4
-45	1,3768	714,89	0,001086	4,28E-06	-1746,4
-44	1,4184	716,71	0,001057	4,28E-06	-1787,1
-43	1,4654	720,36	0,001028	4,28E-06	-1828,5
-42	1,5124	723,05	0,001	4,28E-06	-1870,6
-41	1,5583	724,29	0,000972	4,28E-06	-1913,2
-40	1,6084	726,57	0,000945	4,28E-06	-1956,5
-39	1,6609	728,99	0,000918	4,28E-06	-2000,4
-38	1,7134	730,46	0,000892	4,28E-06	-2044,8
-37	1,7808	737,24	0,000866	4,28E-06	-2089,9
-36	1,8483	742,81	0,000841	4,28E-06	-2135,8
-35	1,9133	746,31	0,000816	4,28E-06	-2182,4
-34	1,9784	748,79	0,000792	4,28E-06	-2229,5
-33	2,0484	752,13	0,000768	4,28E-06	-2277,1
-32	2,1184	754,47	0,000745	4,28E-06	-2325,1
-31	2,2052	761,68	0,000722	4,28E-06	-2373,7
-30	2,2884	766,48	0,000701	4,28E-06	-2422,9
-29	2,3659	768,36	0,000679	4,28E-06	-2472,5

Продолжение таблицы 8

-28	2,4434	769,4	0,000659	4,28E-06	-2522,2
-27	2,5251	770,94	0,000639	4,28E-06	-2571,9
-26	2,6068	771,71	0,000619	4,28E-06	-2621,7
-25	2,7076	777,28	0,0006	4,28E-06	-2671,5
-24	2,8084	781,93	0,000582	4,28E-06	-2721,4
-23	2,9334	792,3	0,000565	4,28E-06	-2771,5
-22	3,0584	801,57	0,000548	4,28E-06	-2821,6
-21	3,1867	810,73	0,000532	4,28E-06	-2871,8
-20	3,3	815,31	0,000517	4,28E-06	-2921,7
-19	3,3984	815,77	0,000502	4,28E-06	-2970,8
-18	3,495	815,64	0,000488	4,28E-06	-3019
-17	3,6052	818,52	0,000475	4,28E-06	-3066
-16	3,7221	822,75	0,000462	4,28E-06	-3111,9
-15	3,8287	824,72	0,00045	4,28E-06	-3156,5
-14	3,9354	826,87	0,000439	4,28E-06	-3199,5
-13	4,0519	831,33	0,000429	-0,00108	-3240,7
-12	4,1684	836,13	0,000419	-0,00184	-3280,1
-11	4,3021	844,78	0,000411	-0,00059	-3317,6
-10	4,4284	852,47	0,000403	0,000414	-3352,9
-9	4,5384	857,75	0,000395	0,000491	-3385,7
-8	4,6484	863,95	0,000389	0,001252	-3415,9
-7	4,7875	876,54	0,000383	0,005325	-3443,3
-6	4,9267	890,17	0,000378	0,010173	-3467,7
-5	5,0775	907,08	0,000374	0,0169	-3489,1
-4	5,2284	925,31	0,00037	0,024587	-3507,1
-3	5,4184	951,91	0,000367	0,036657	-3521,5
-2	5,6084	980,1	0,000365	0,049895	-3532,2
-1	5,7743	1005,9	0,000364	0,062403	-3538,9
0	5,9184	1029,9	0,000364	0,074496	-3541,1
1	6,0784	1058,9	0,000364	0,089477	-3538,8
2	6,2384	1090,3	0,000365	0,10613	-3531,6
3	6,3856	1121,9	0,000367	0,12346	-3519,4
4	6,5328	1156,3	0,00037	0,14268	-3501,8
5	6,6831	1194,1	0,000374	0,16418	-3478,7
6	6,8334	1234,9	0,000378	0,18781	-3449,9
7	6,9509	1272,9	0,000383	0,21068	-3415,2
8	7,0684	1314,1	0,000389	0,23578	-3374,5
9	7,1574	1353,1	0,000395	0,26048	-3327,8
10	7,2084	1388,1	0,000403	0,28374	-3275,2
11	7,2534	1424,8	0,000411	0,30852	-3216,7
12	7,2884	1462,5	0,000419	0,33442	-3152,5

Продолжение таблицы 8

13	7,3084	1500,1	0,000429	0,36085	-3082,5
14	7,3135	1537,3	0,000439	0,38769	-3006,9
15	7,2884	1570,7	0,00045	0,41311	-2926,1
16	7,2384	1600,8	0,000462	0,43736	-2840,4
17	7,1649	1627,5	0,000475	0,4603	-2750,1
18	7,0914	1655,8	0,000488	0,48448	-2655,6
19	7,0012	1681,6	0,000502	0,50773	-2557,2
20	6,9033	1706,6	0,000517	0,53094	-2455,2
21	6,761	1721,2	0,000532	0,54897	-2350,2
22	6,6188	1735,8	0,000548	0,56728	-2242,7
23	6,4531	1744,1	0,000565	0,58238	-2133,2
24	6,2874	1751,8	0,000582	0,59728	-2022,2
25	6,1355	1762,6	0,0006	0,61397	-1909,8
26	5,9837	1772,7	0,000619	0,63037	-1796,2
27	5,813	1776,1	0,000639	0,64329	-1681,8
28	5,6424	1778,1	0,000659	0,65546	-1567
29	5,4843	1782,5	0,000679	0,66894	-1452
30	5,3036	1777,9	0,000701	0,67754	-1337,2
31	5,1564	1782,5	0,000722	0,69109	-1222,7
32	5	1782,3	0,000745	0,70197	-1108,5
33	4,8341	1776,5	0,000768	0,70984	-995,08
34	4,67	1769,1	0,000792	0,7167	-882,72
35	4,5196	1764,5	0,000816	0,72496	-771,49
36	4,3803	1762	0,000841	0,73424	-661,31
37	4,2374	1755,9	0,000866	0,74144	-552,32
38	4,0946	1747,3	0,000892	0,74721	-444,75
39	3,955	1737,6	0,000918	0,75224	-338,77
40	3,8292	1731,5	0,000945	0,75905	-234,33
41	3,7055	1724	0,000972	0,76495	-131,41
42	3,5817	1714,1	0,001	0,76942	-30,15
43	3,4734	1709,2	0,001028	0,77641	69,507
44	3,3652	1702,2	0,001057	0,78209	167,63
45	3,2513	1689,9	0,001086	0,78486	263,99
46	3,14	1676,5	0,001116	0,78684	358,4
47	3,0308	1661,6	0,001146	0,78788	450,81
48	2,9341	1651,2	0,001176	0,79111	541,28
49	2,8375	1638,5	0,001207	0,79296	629,91
50	2,7504	1629,2	0,001238	0,79636	716,72
51	2,674	1624,1	0,001269	0,80191	801,93
52	2,5984	1617,7	0,001301	0,80656	885,61
53	2,53	1614	0,001333	0,8125	967,82

Продолжение таблицы 8

54	2,46	1607,4	0,001365	0,81684	1048,6
55	2,396	1603	0,001398	0,82217	1127,8
56	2,3289	1594,8	0,001431	0,82537	1205,6
57	2,2635	1586	0,001464	0,82808	1281,7
58	2,198	1575,3	0,001497	0,82969	1356,3
59	2,1383	1566,9	0,001531	0,83234	1429,2
60	2,0783	1556,6	0,001565	0,8339	1500,5
61	2,0273	1551,5	0,001599	0,83796	1570,4
62	1,9764	1544,8	0,001633	0,84113	1638,9
63	1,9346	1544	0,001668	0,84721	1706,1
64	1,8829	1533,8	0,001702	0,84831	1772
65	1,8421	1531,2	0,001737	0,85319	1836,6
66	1,795	1521,9	0,001771	0,85453	1899,8
67	1,7503	1513,3	0,001806	0,85605	1961,6
68	1,7093	1506,4	0,001841	0,85838	2022,1
69	1,6699	1499,7	0,001876	0,86066	2081,3
70	1,6365	1497,2	0,001911	0,86502	2139,3
71	1,608	1498,2	0,001947	0,87109	2196,3
72	1,578	1496,8	0,001982	0,87585	2252,4
73	1,55	1496,4	0,002017	0,88099	2307,4
74	1,5249	1497,8	0,002052	0,88702	2361,5
75	1,4966	1495,2	0,002087	0,89092	2414,6
76	1,4684	1491,7	0,002122	0,89422	2466,7
77	1,4384	1485,4	0,002158	0,896	2517,8
78	1,4084	1478	0,002193	0,89714	2567,6
79	1,383	1474,6	0,002228	0,90019	2616,5
80	1,3594	1472,1	0,002263	0,90365	2664,3
81	1,3389	1472,2	0,002297	0,90835	2711,3
82	1,32	1473,4	0,002332	0,91355	2757,4
83	1,302	1474,9	0,002367	0,91881	2802,8
84	1,287	1479,1	0,002401	0,92544	2847,4
85	1,27	1480,5	0,002435	0,93051	2891,3
86	1,255	1483,5	0,00247	0,93639	2934,4
87	1,237	1482,4	0,002504	0,94006	2976,8
88	1,2184	1479,7	0,002537	0,9429	3018,3
89	1,2014	1478,4	0,002571	0,94634	3059
90	1,1834	1475,2	0,002604	0,94873	3098,9
91	1,1659	1472	0,002638	0,95101	3137,9
92	1,1484	1468	0,002671	0,95287	3176,1
93	1,1303	1462,6	0,002704	0,95391	3213,4
94	1,112	1456,3	0,002736	0,95441	3249,9

Продолжение таблицы 8

95	1,094	1449,7	0,002768	0,95465	3285,6
96	1,076	1442,3	0,0028	0,95446	3320,3
97	1,058	1434,3	0,002832	0,95384	3354,3
98	1,042	1428,3	0,002864	0,9542	3387,3
99	1,026	1421,8	0,002895	0,95418	3419,6
100	1,012	1417,3	0,002926	0,9552	3451,2
101	1	1415,2	0,002957	0,95732	3482
102	0,989	1414	0,002987	0,95985	3512,2
103	0,978	1412,4	0,003017	0,9621	3541,7
104	0,96715	1410,5	0,003047	0,96416	3570,7
105	0,95675	1408,8	0,003076	0,96628	3598,9
106	0,94635	1406,6	0,003105	0,96811	3626,6
107	0,93535	1403,1	0,003134	0,96921	3653,6
108	0,92435	1399,2	0,003162	0,97002	3680,1
109	0,91135	1391,8	0,00319	0,97002	3705,8
110	0,89835	1383,8	0,003218	0,97002	3730,9
111	0,88998	1382,6	0,003245	0,97202	3755,3
112	0,88162	1381	0,003272	0,97379	3779,3
113	0,87418	1380,5	0,003299	0,97607	3802,6
114	0,86675	1379,7	0,003325	0,97813	3825,5
115	0,86125	1381,6	0,003351	0,98156	3847,9
116	0,85575	1383,2	0,003377	0,98479	3869,8
117	0,84713	1379,5	0,003402	0,98526	3891,2
118	0,8385	1375,4	0,003427	0,98549	3912,1
119	0,8333	1376,6	0,003451	0,98837	3932,4
120	0,82335	1369,6	0,003475	0,98837	3952,3
121	0,81935	1372,2	0,003499	0,99187	3971,7
122	0,81535	1374,6	0,003522	0,99522	3990,7
123	0,8076	1370,3	0,003545	0,99522	4009,2
124	0,79985	1365,8	0,003567	0,99522	4027,2
125	0,7941	1364,3	0,003589	0,99651	4044,8
126	0,78835	1362,6	0,003611	0,99762	4061,9
127	0,77985	1355,9	0,003632	0,99762	4078,6
128	0,77135	1348,8	0,003653	0,99762	4094,7
129	0,76569	1346,4	0,003673	0,99824	4110,4
130	0,75835	1340,7	0,003693	0,99824	4125,7
131	0,75335	1339	0,003713	0,99912	4140,5
132	0,74835	1337	0,003732	0,99984	4155
133	0,73994	1328,6	0,003751	0,99984	4169
134	0,73152	1320	0,003769	0,99984	4182,5
135	0,72394	1312,5	0,003787	0,99984	4195,6

Продолжение таблицы 8

136	0,71635	1304,8	0,003805	0,99984	4208,3
137	0,70485	1289,7	0,003822	0,99984	4220,5
138	0,69335	1274,2	0,003839	0,99984	4232,3
139	0,68764	1269,1	0,003855	0,99984	4243,6
140	0,68035	1260,9	0,003871	0,99984	4254,5
141	0,67085	1248,3	0,003887	0,99984	4265
142	0,66135	1235,4	0,003902	0,99984	4275,1
143	0,65255	1223,6	0,003917	0,99984	4284,8
144	0,64375	1211,5	0,003931	0,99984	4294,2
145	0,63505	1199,4	0,003945	0,99984	4303,1
146	0,62635	1187	0,003959	0,99984	4311,6
147	0,62135	1181,4	0,003972	0,99984	4319,8
148	0,61635	1175,7	0,003985	0,99984	4327,7
149	0,61305	1173	0,003997	0,99984	4335,3
150	0,60485	1160,8	0,004009	0,99984	4342,6
151	0,5991	1153,1	0,00402	0,99984	4349,5
152	0,59335	1145,2	0,004032	0,99984	4356,2
153	0,58785	1137,6	0,004042	0,99984	4362,5
154	0,58235	1129,8	0,004053	0,99984	4368,6
155	0,57135	1111,2	0,004063	0,99984	4374,3
156	0,56035	1092,4	0,004072	0,99984	4379,7
157	0,55188	1078,3	0,004081	0,99984	4384,8
158	0,54342	1064	0,00409	0,99984	4389,6
159	0,53774	1055,1	0,004099	0,99984	4394,2
160	0,52435	1030,8	0,004107	0,99984	4398,4
161	0,51585	1016	0,004114	0,99984	4402,3
162	0,50735	1001	0,004121	0,99984	4406
163	0,50024	988,57	0,004128	0,99984	4409,4
164	0,49312	976,03	0,004134	0,99984	4412,6
165	0,48324	957,85	0,004141	0,99984	4415,6
166	0,47335	939,54	0,004146	0,99984	4418,3
167	0,45835	910,91	0,004151	0,99984	4420,7
168	0,44335	882,13	0,004156	0,99984	4422,9
169	0,42971	855,9	0,004161	0,99984	4424,8
170	0,41635	830,11	0,004165	0,99984	4426,5
171	0,40585	809,89	0,004168	0,99984	4428
172	0,39535	789,56	0,004172	0,99984	4429,4
173	0,38082	761,07	0,004175	0,99984	4430,5
174	0,36629	732,47	0,004177	0,99984	4431,4
175	0,35244	705,14	0,004179	0,99984	4432,2
176	0,33859	677,71	0,004181	0,99984	4432,8

Продолжение таблицы 8

177	0,32847	657,67	0,004182	0,99984	4433,2
178	0,31835	637,55	0,004183	0,99984	4433,6
179	0,30915	619,21	0,004184	0,99984	4433,7

Для проверки верности показателей, полученных при обработке индикаторных диаграмм по программе анализа рабочего цикла проводился расчет по программе расчета рабочего цикла с двумя функциями Вибе.

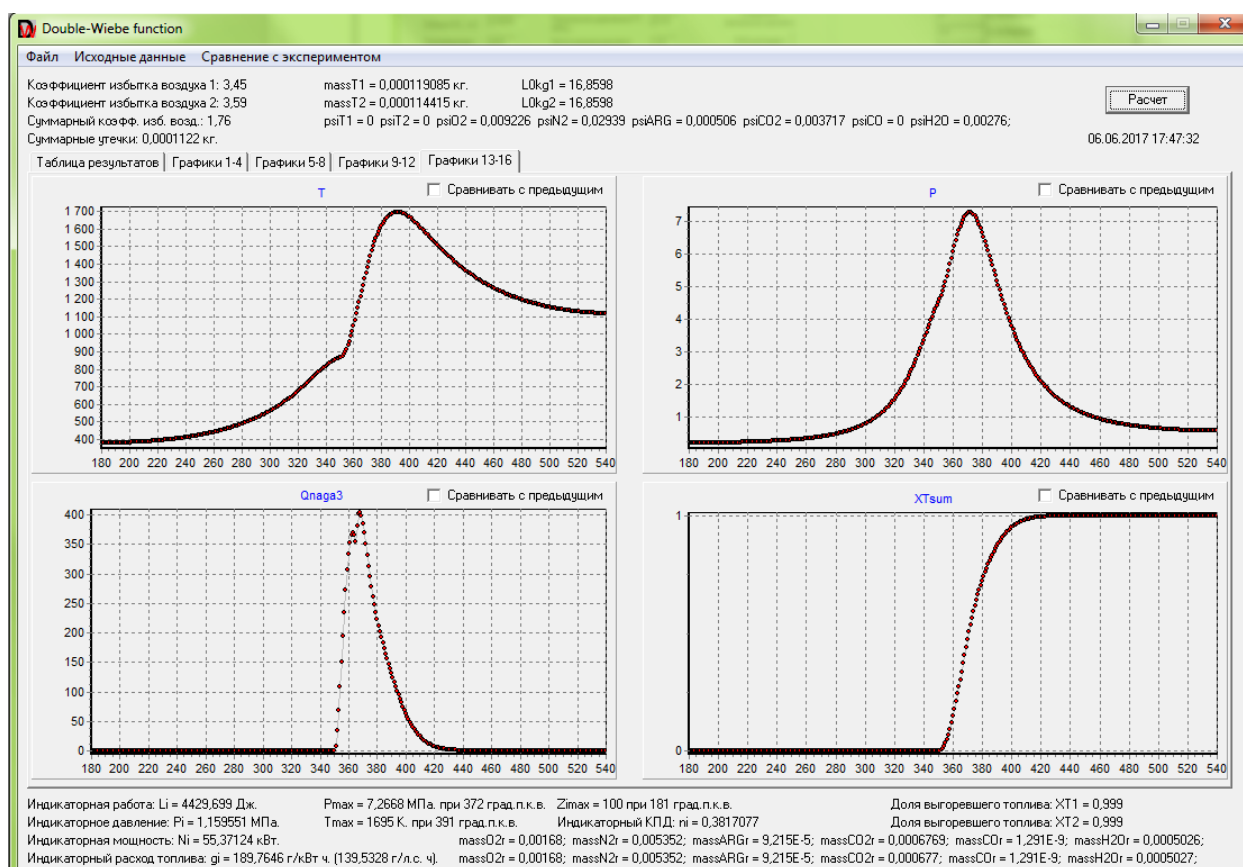


Рисунок 30 – Программа расчета рабочего цикла с двумя функциями Вибе для режима 600 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

4.3 Сравнение результатов расчётов по программам анализа рабочего цикла по индикаторным диаграммам и расчёта рабочего цикла с двумя функциями Вибе на различных режимах

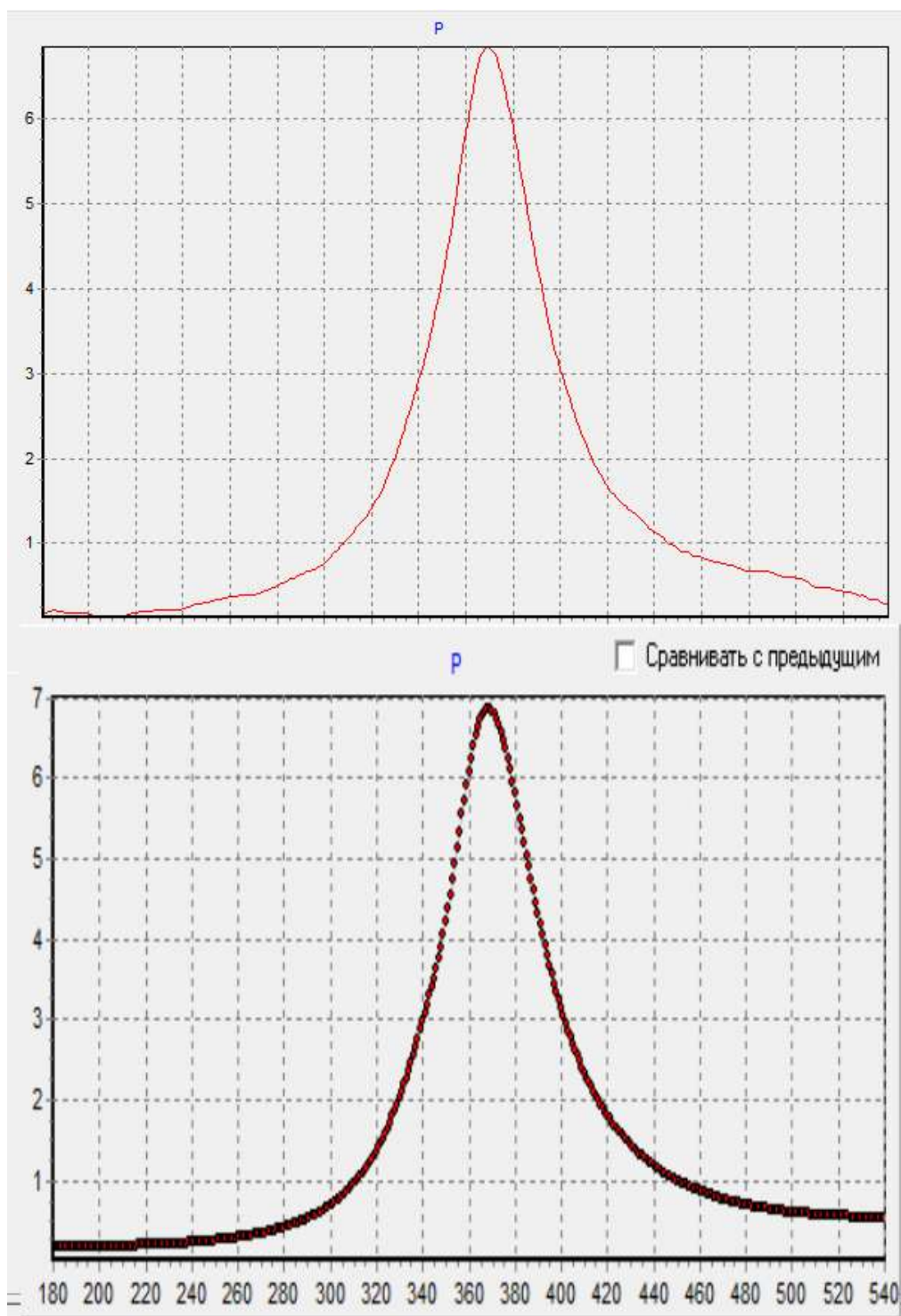


Рисунок 31 – Графики давлений из программ анализа и расчета на режиме 500 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

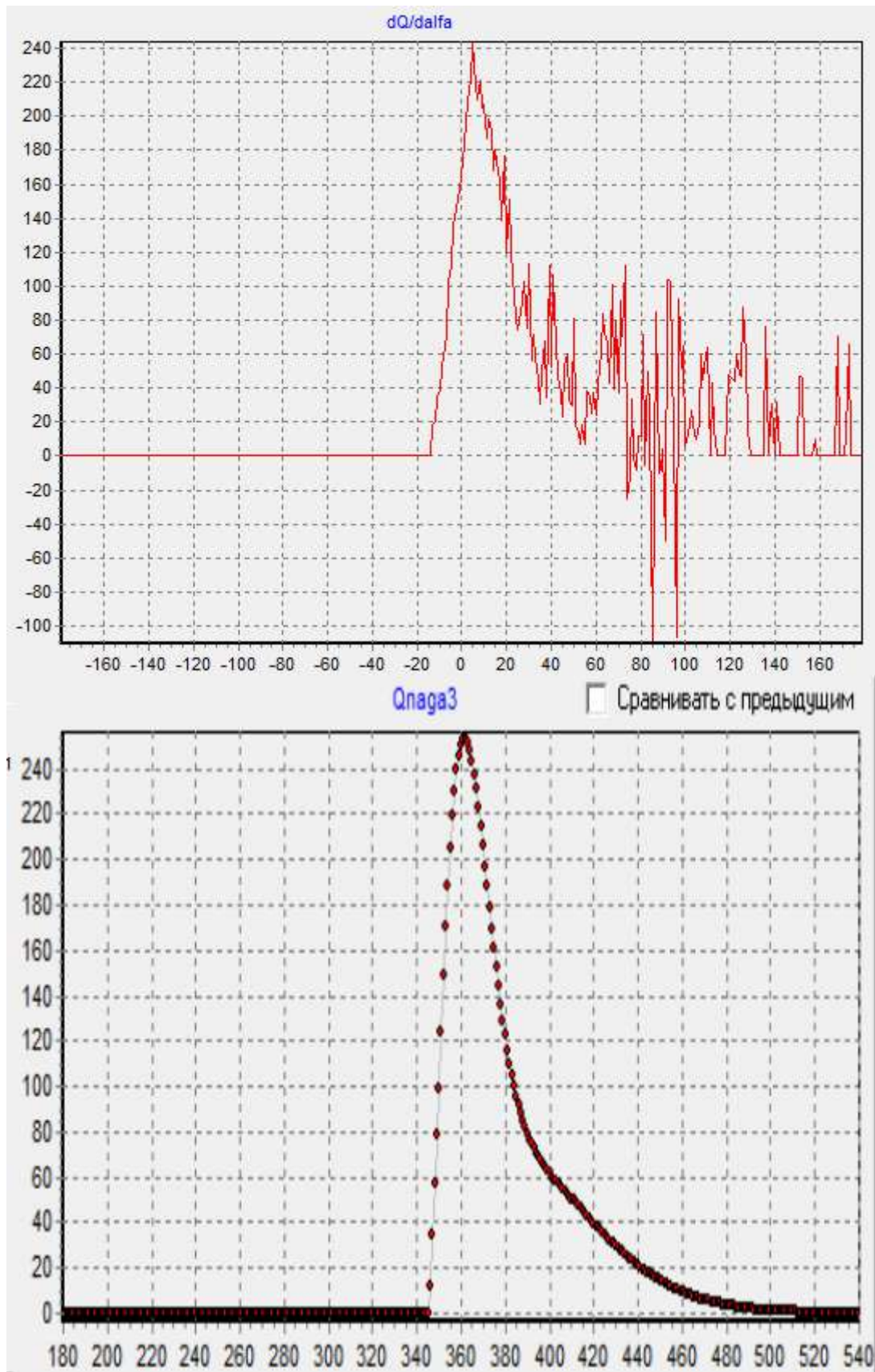


Рисунок 32 – Графики тепловыделения из программ анализа и расчета на режиме 500 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

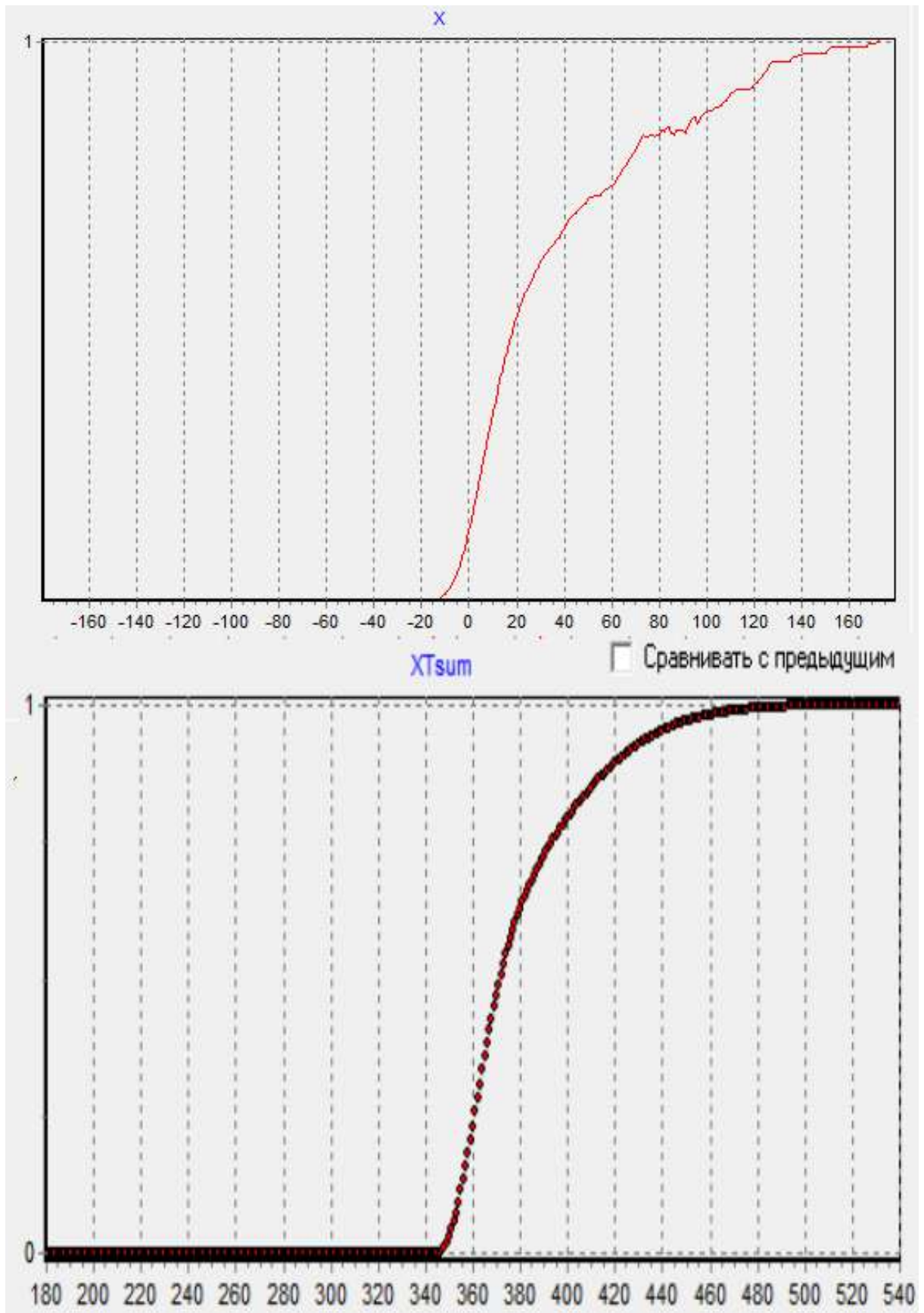


Рисунок 33 – Графики выгорания топлива из программ анализа и расчета на режиме 500 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

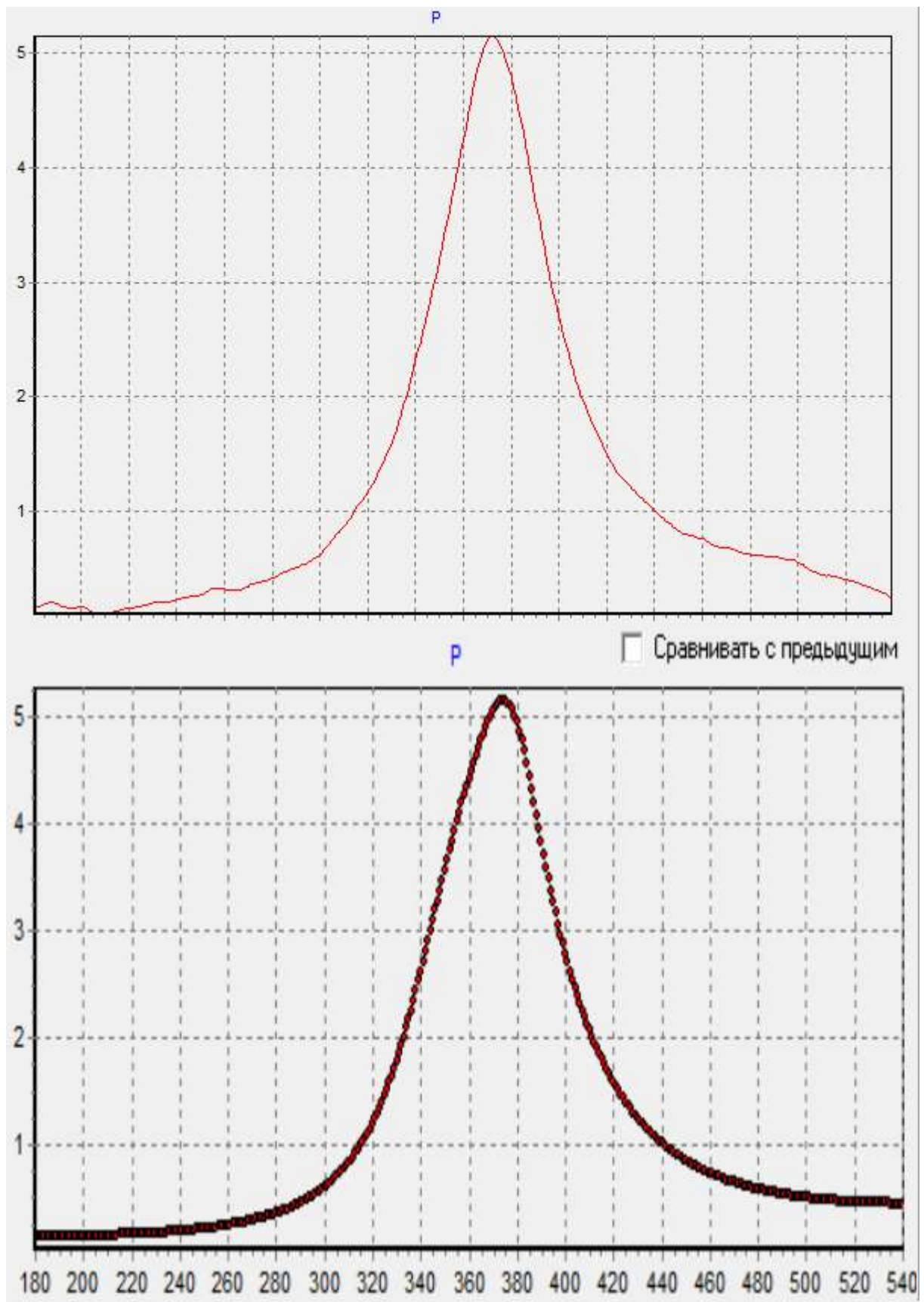


Рисунок 34 – Графики давления из программ анализа и расчета на режиме 400 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

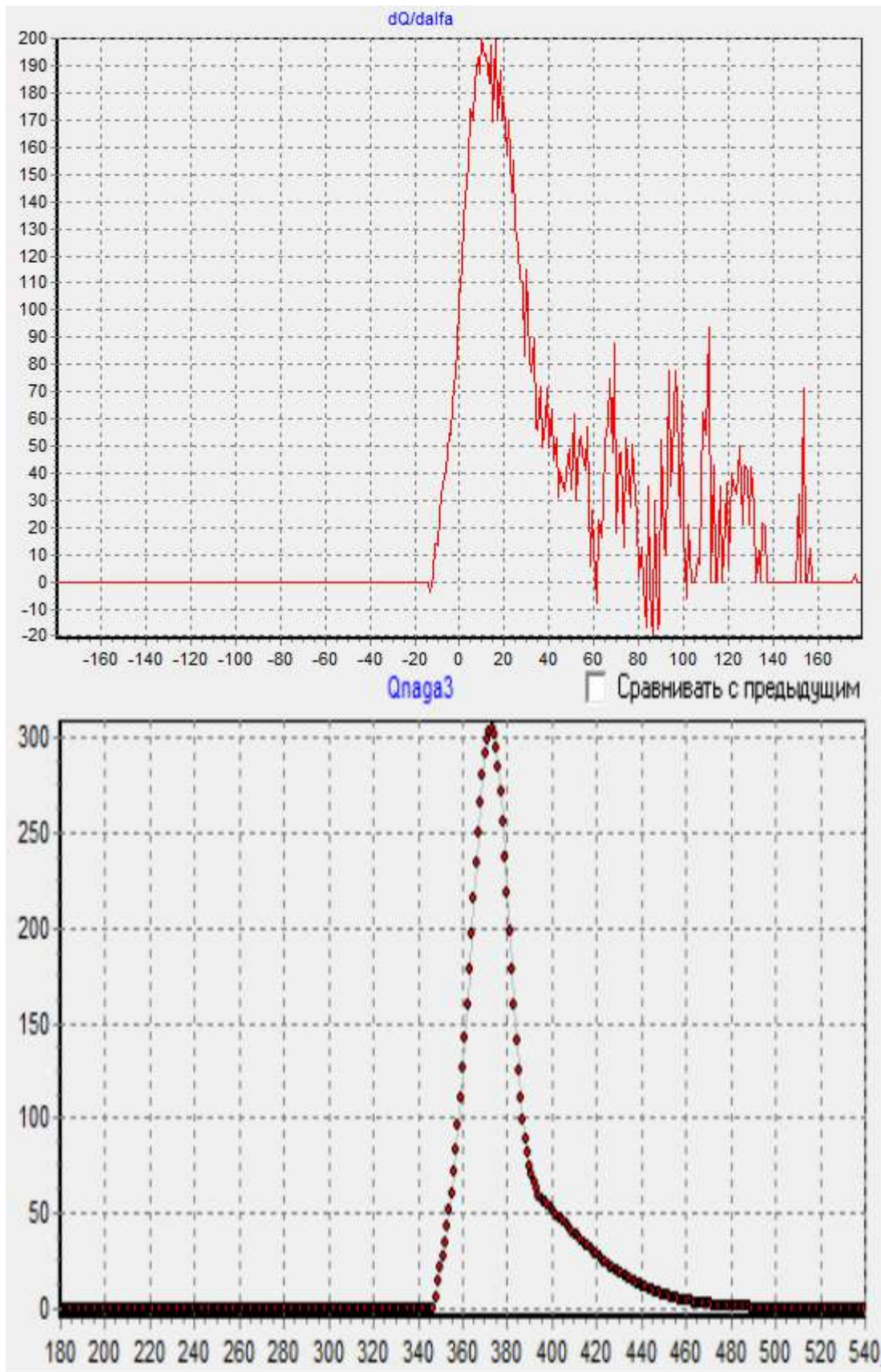


Рисунок 35 – Графики тепловыделения из программ анализа и расчета на режиме 400 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

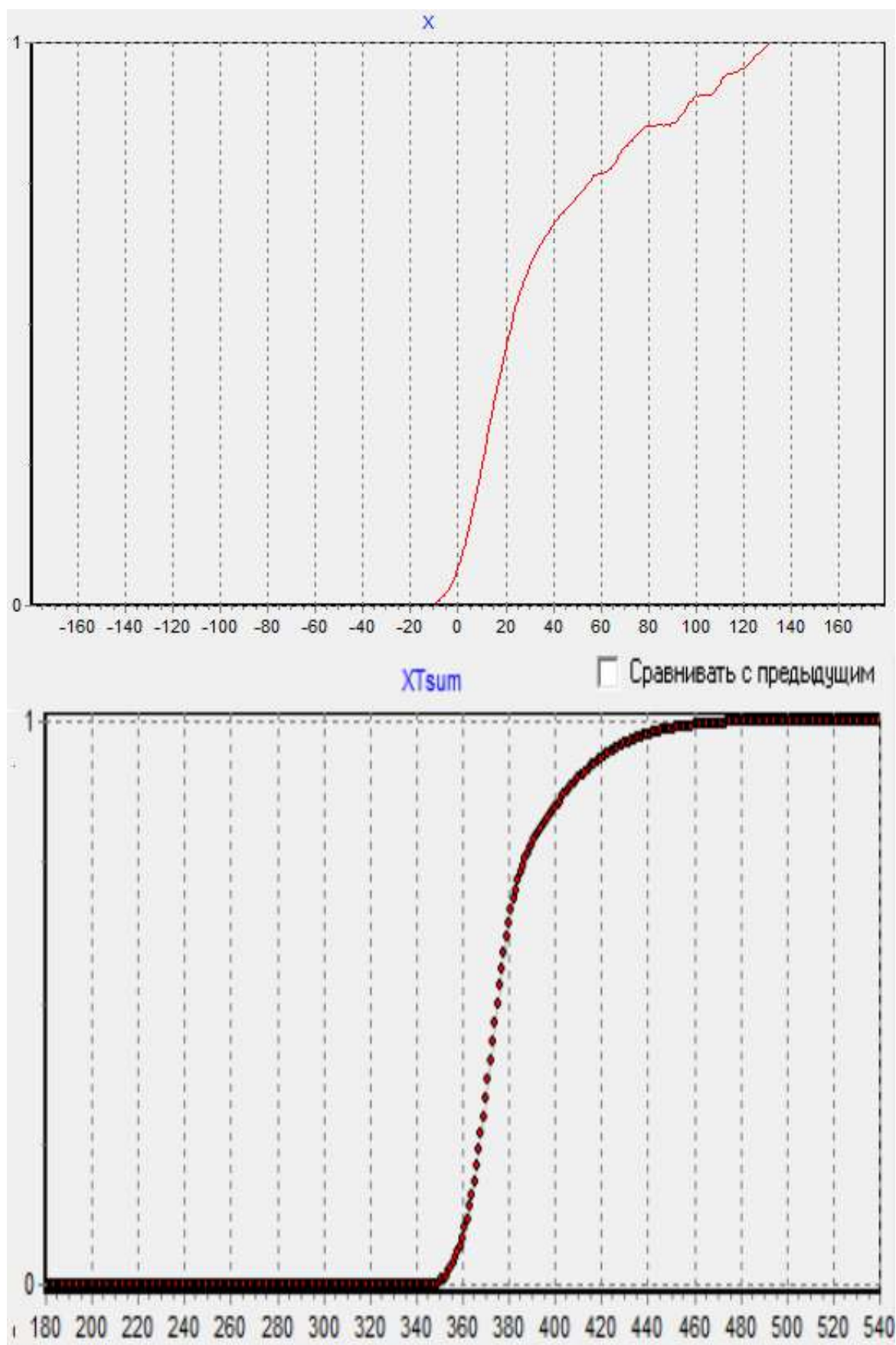


Рисунок 36 – Графики выгорания топлива из программ анализа и расчета на режиме 400 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

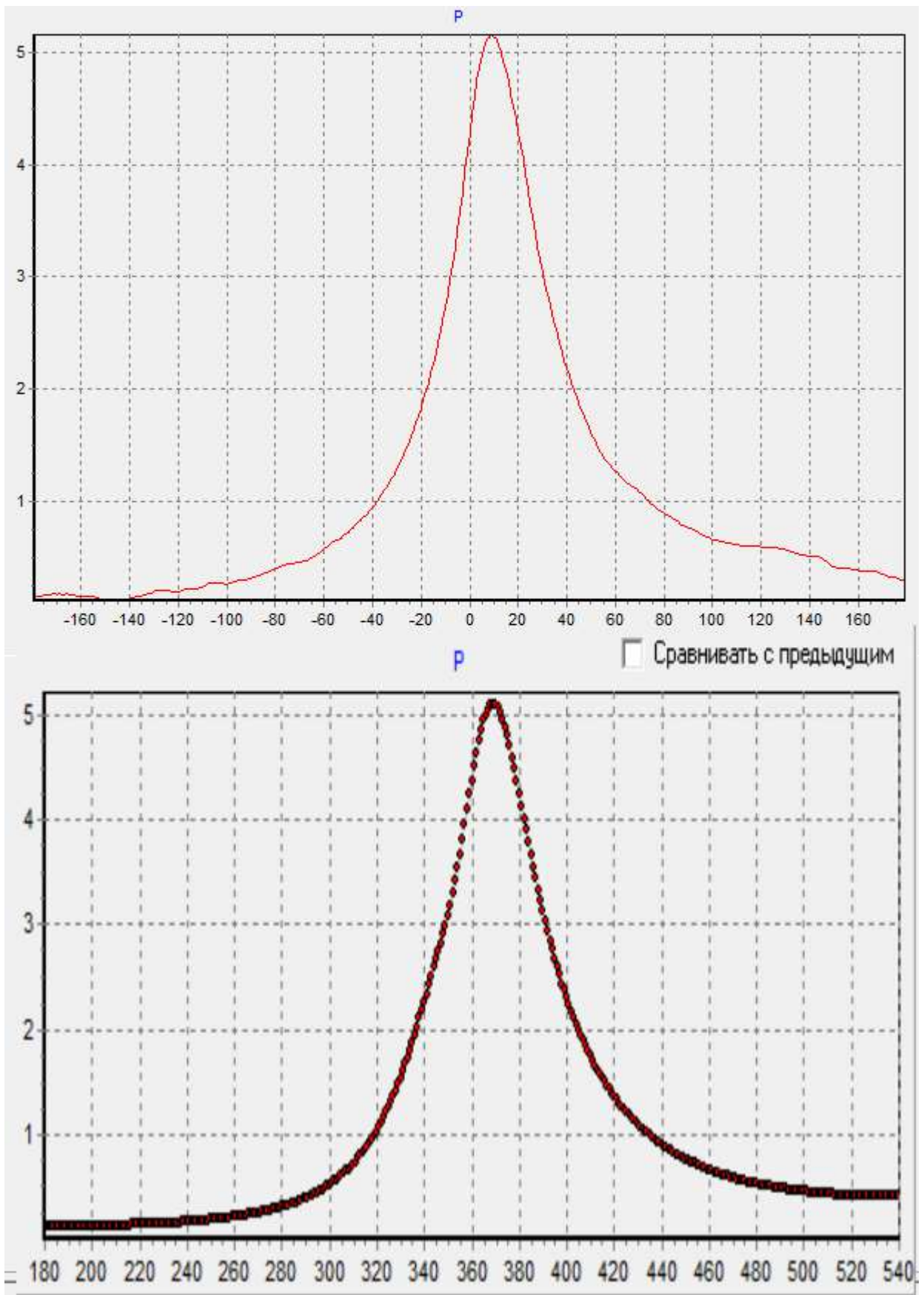


Рисунок 37 – Графики давления из программ анализа и расчета на режиме 300 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

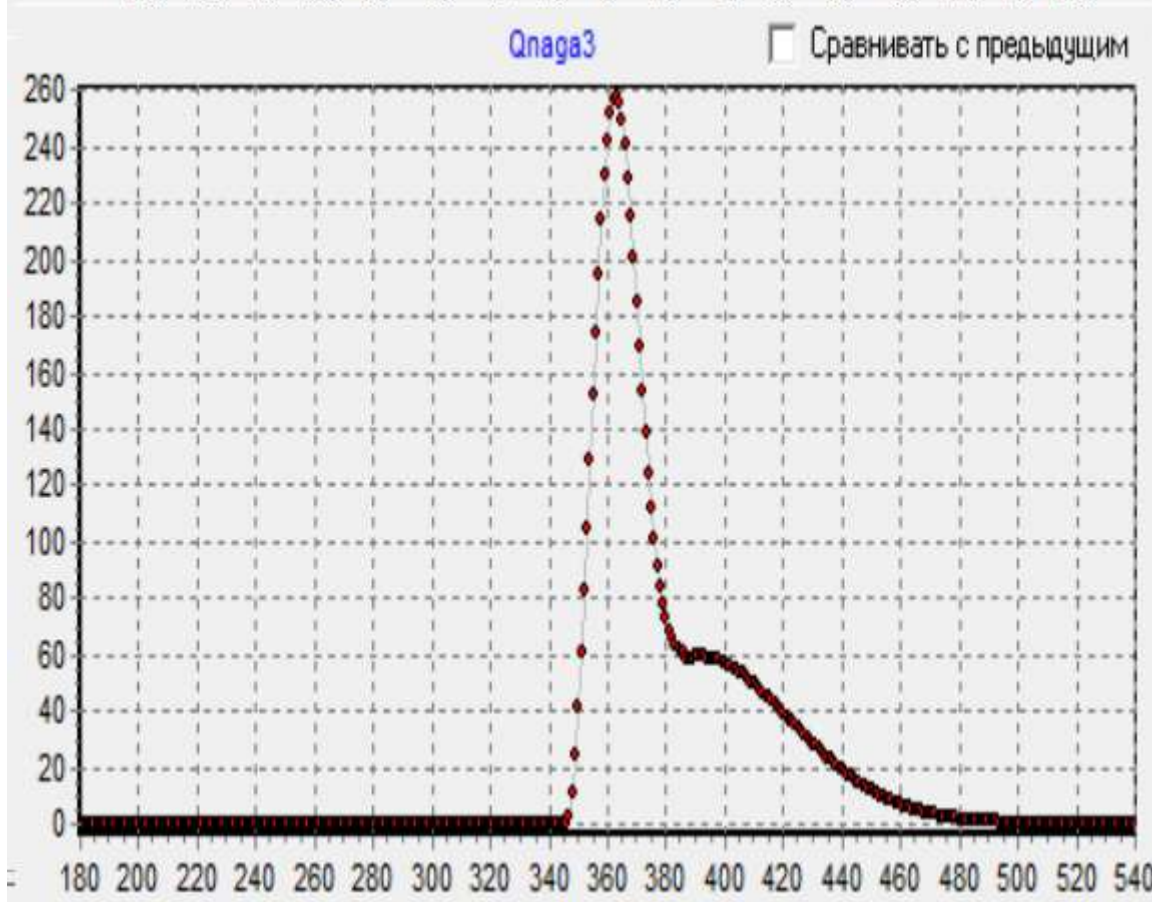


Рисунок 38 – Графики тепловыделения из программ анализа и расчета на режиме 300 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

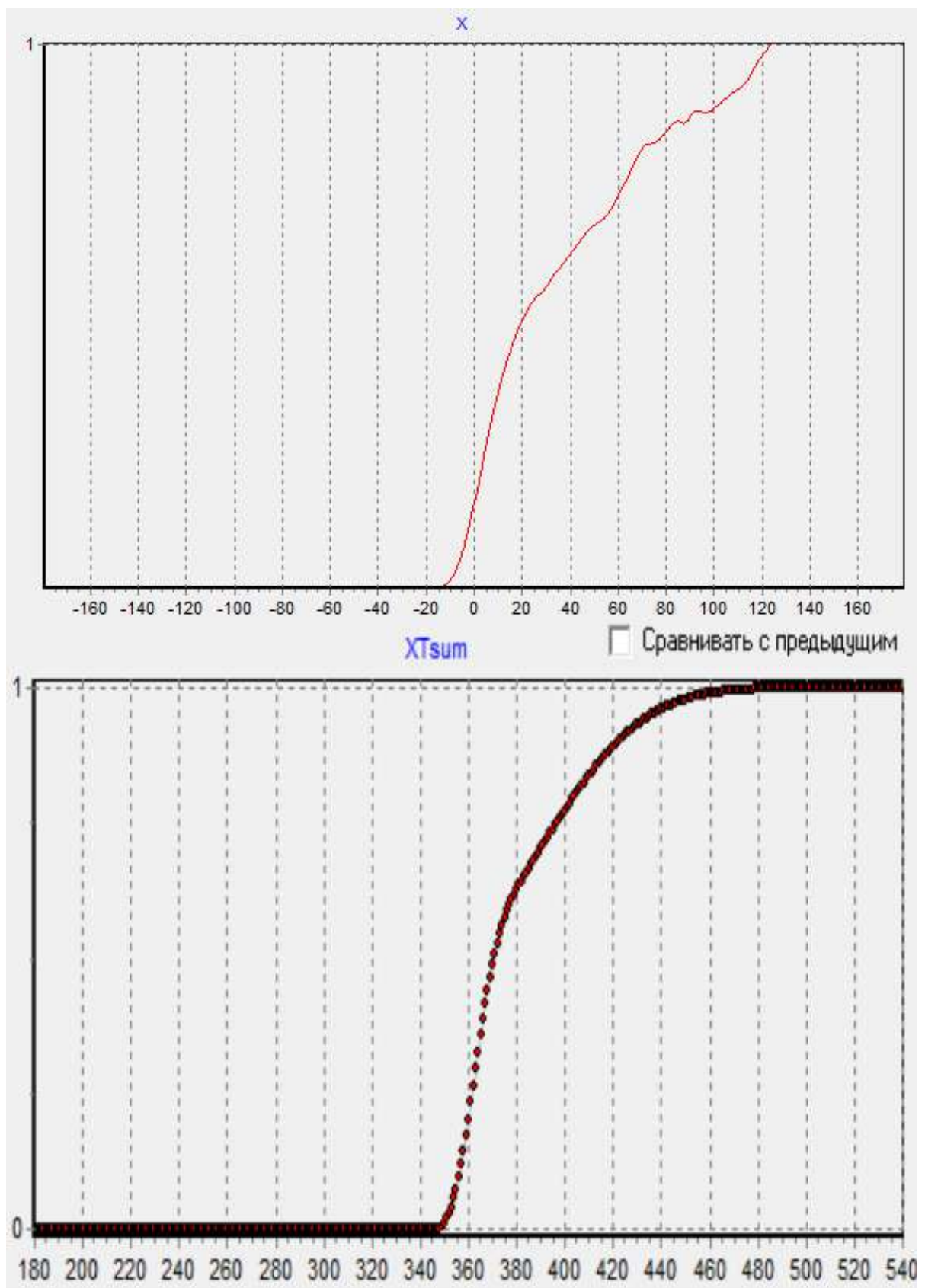


Рисунок 39 – Графики выгорания топлива из программ анализа и расчета на режиме 300 кВт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

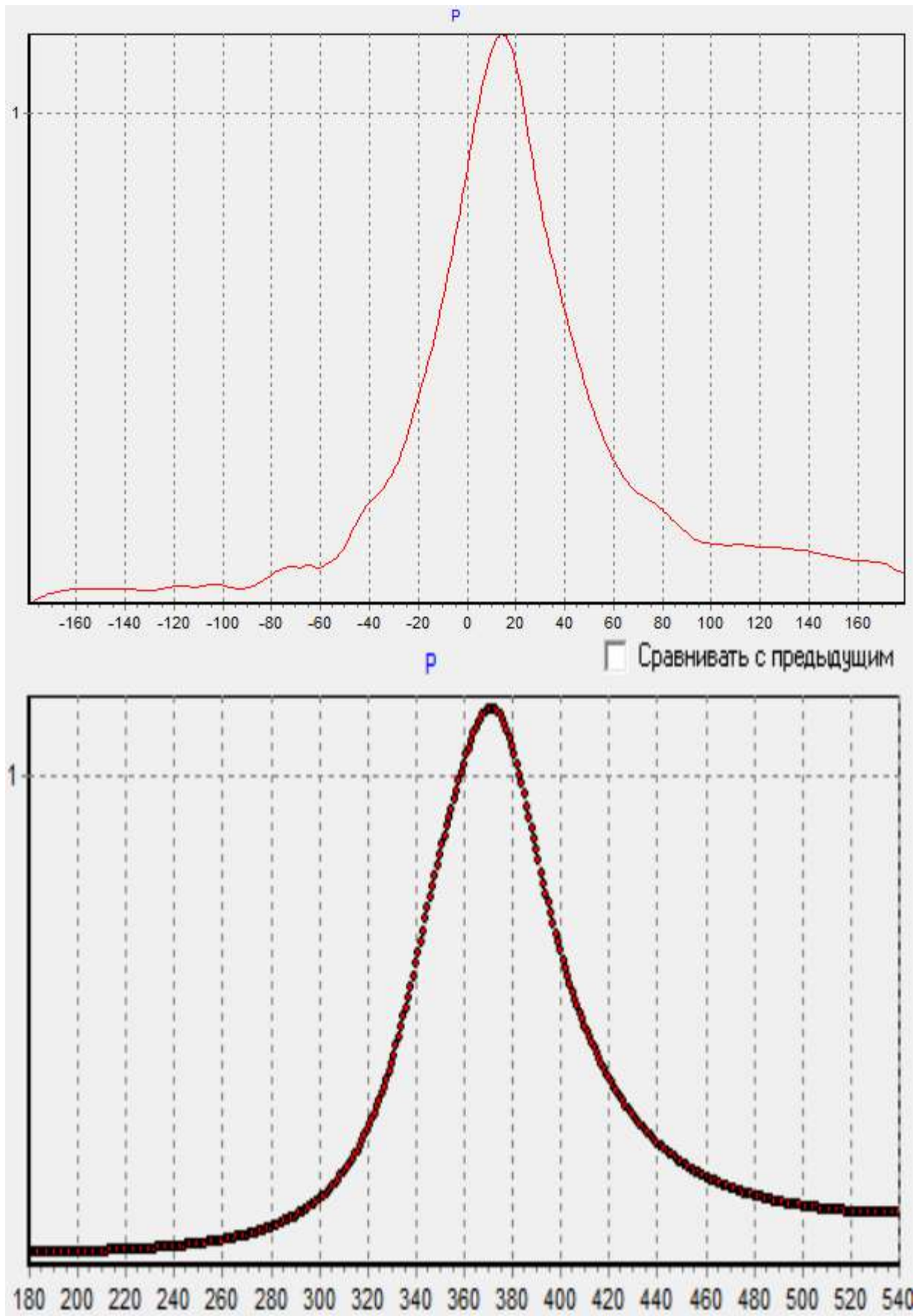


Рисунок 40 – Графики давления из программ анализа и расчета на режиме холостого хода

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

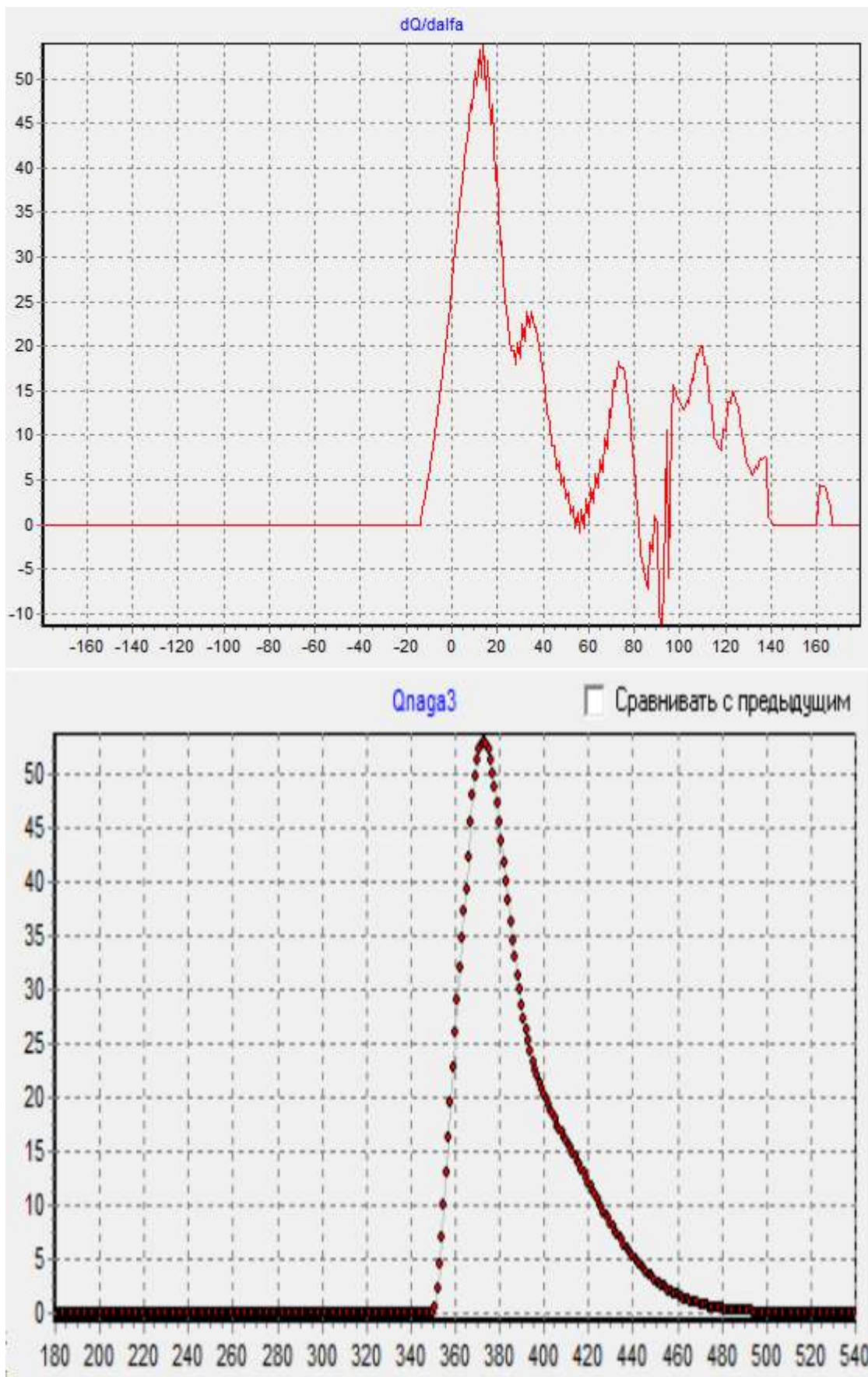


Рисунок 41 – Графики тепловыделения из программ анализа и расчета на режиме холостого хода

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

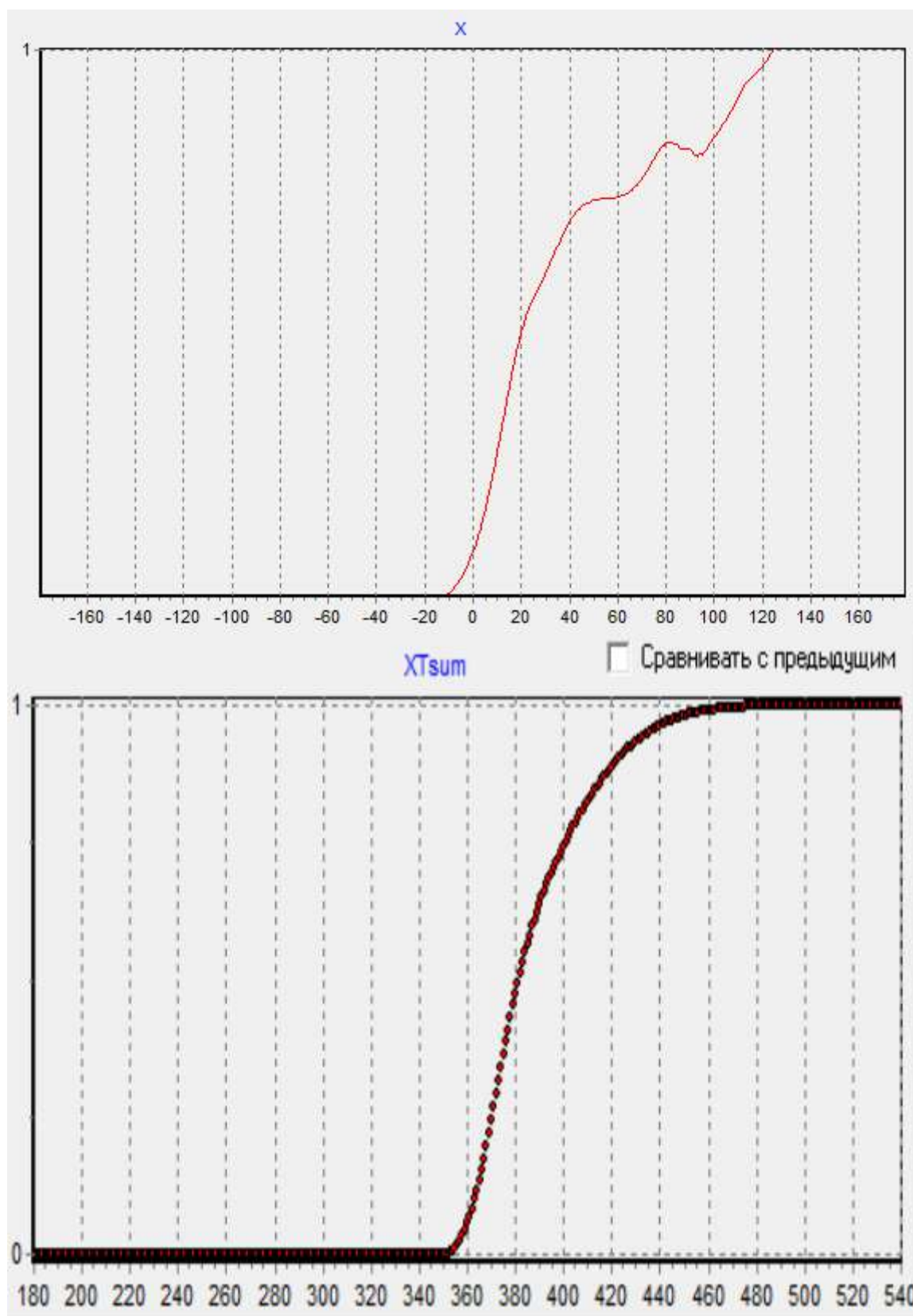


Рисунок 42 – Графики выгорания топлива из программ анализа и расчета на режиме холостого хода

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Таблица 9 – Индикаторные показатели, полученные при обработке экспериментальных индикаторных диаграмм

режим	L_i эксп, Дж	P_i эксп, Па	N_i эксп, Вт	g_i эксп, г/кВт*ч	η_i эксп	$P_{\text{макс}}$ эксп, МПа
хх	751,1001	196614	9388,751	211,4234	0,342605	1,156
300 кВт	2835,085	742134,7	35438,57	209,8295	0,345207	5,16
400 кВт	3190,398	835144,3	39879,98	203,3125	0,356272	5,14
500 кВт	3518,746	921095,1	43984,32	205,7908	0,350571	6,844
600 кВт	4433,738	1160611	55421,73	189,6432	0,381952	7,314

Таблица 10 – Индикаторные показатели, полученные расчётом по программе с двумя функциями Вибс

режим	L_i расч, Дж	P_i расчет, Па	N_i расчет, Вт	g_i расчет, г/кВт*ч	η_i расчет	$P_{\text{макс}}$ расчет, МПа
хх	750	196529,8	9384,754	210,9805	0,343324	1,1648
300 кВт	2832,015	741329,3	35400,19	209,7446	0,345347	5,1359
400 кВт	3190,722	835227	39884,03	203,088	0,356647	5,1428
500 кВт	3520,554	921566,3	44069,3	204,5132	0,354181	6,8876
600 кВт	4429,699	1159551	55371,23	189,7646	0,381077	7,25

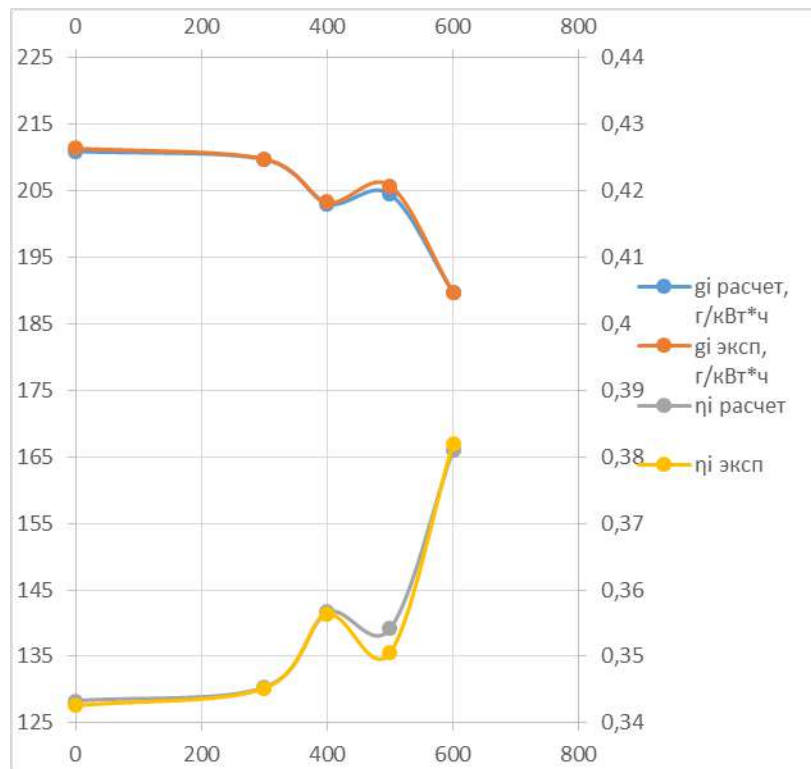


Рисунок 43 – Графики сравнения индикаторных показателей, полученных по программам анализа и расчета рабочего цикла

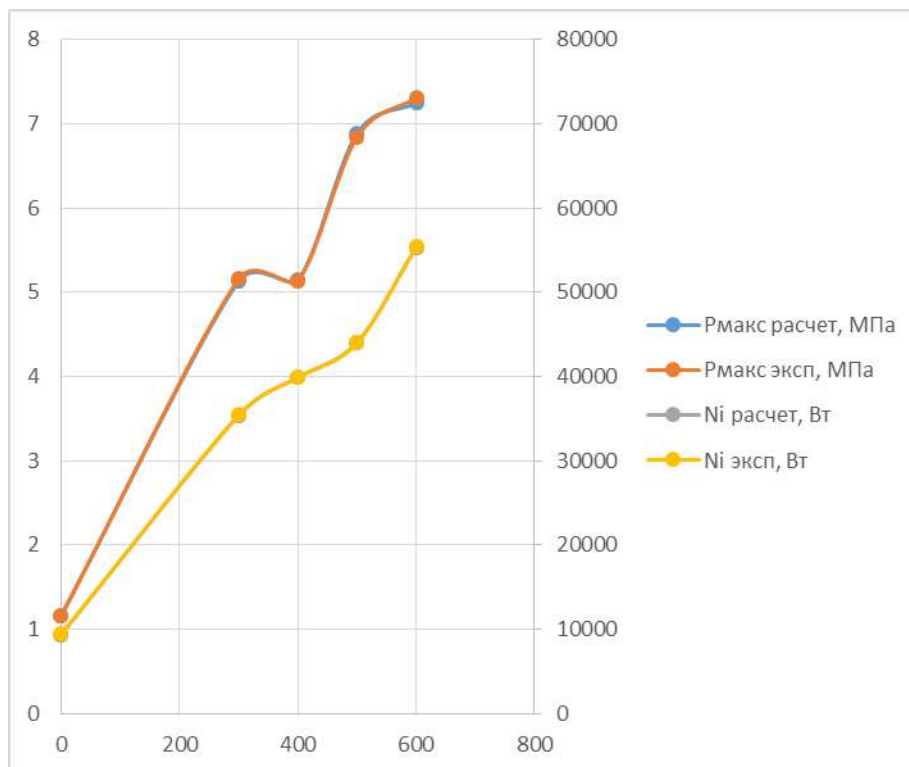


Рисунок 44 - Графики сравнения индикаторных показателей, полученных по программам анализа и расчета рабочего цикла

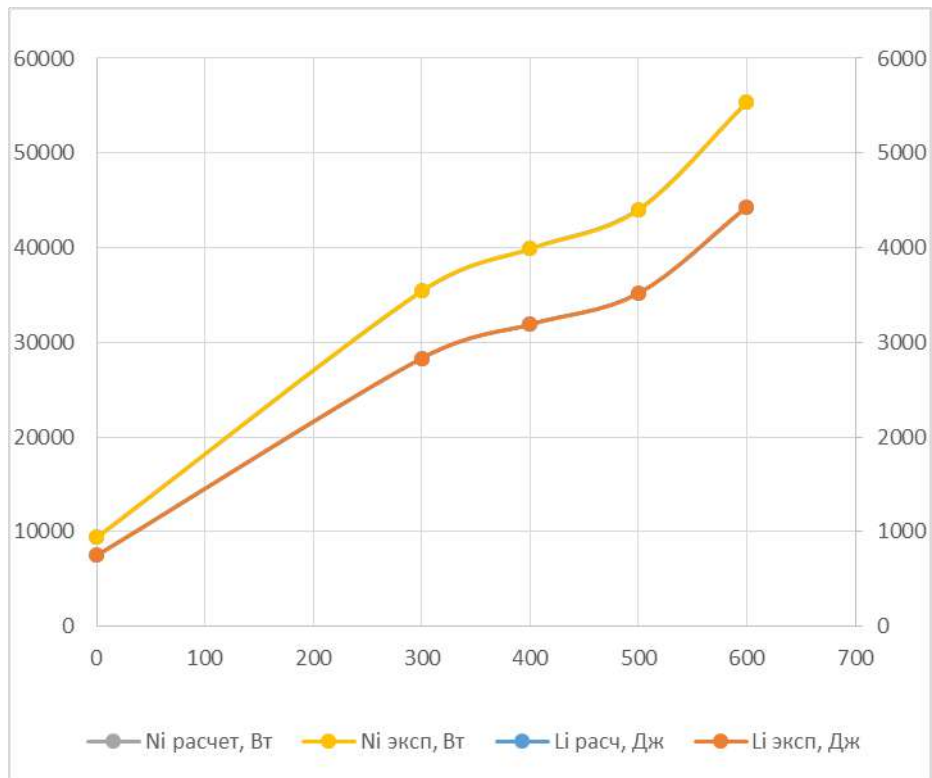


Рисунок 45 – Графики сравнения индикаторных показателей, полученных по программам анализа и расчета рабочего цикла

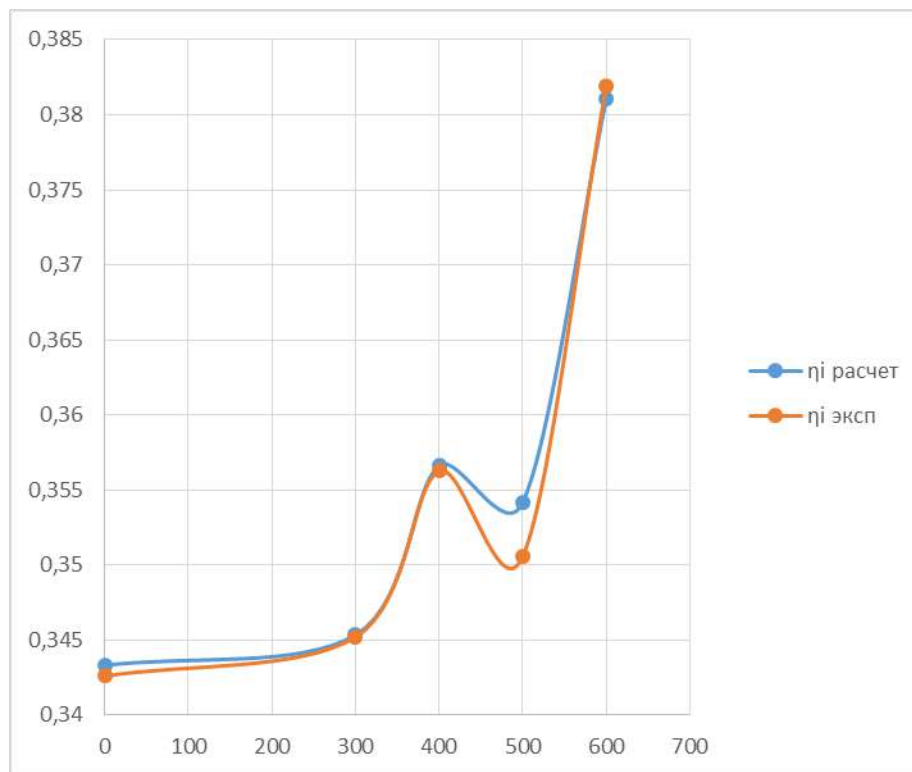


Рисунок 46 – Графики сравнения индикаторных показателей, полученных по программам анализа и расчета рабочего цикла

4.4 Сравнение результатов эксперимента со статистическими данными расхода топлива

Таблица 11 – Сравнение величин цикловых подач газа

	300	400	500	600
режим	300 кВт	400 кВт	500 кВт	600 кВт
G _г изм	94	125	151	172
g _i изм	209,3693	208,8125	201,7964	191,5507
g _i расчет	209,8295	203,3125	205,7908	189,6432
q _ц изм	0,116316	0,154676	0,186849	0,212834
q _ц расч	0,165	0,18	0,2	0,2336

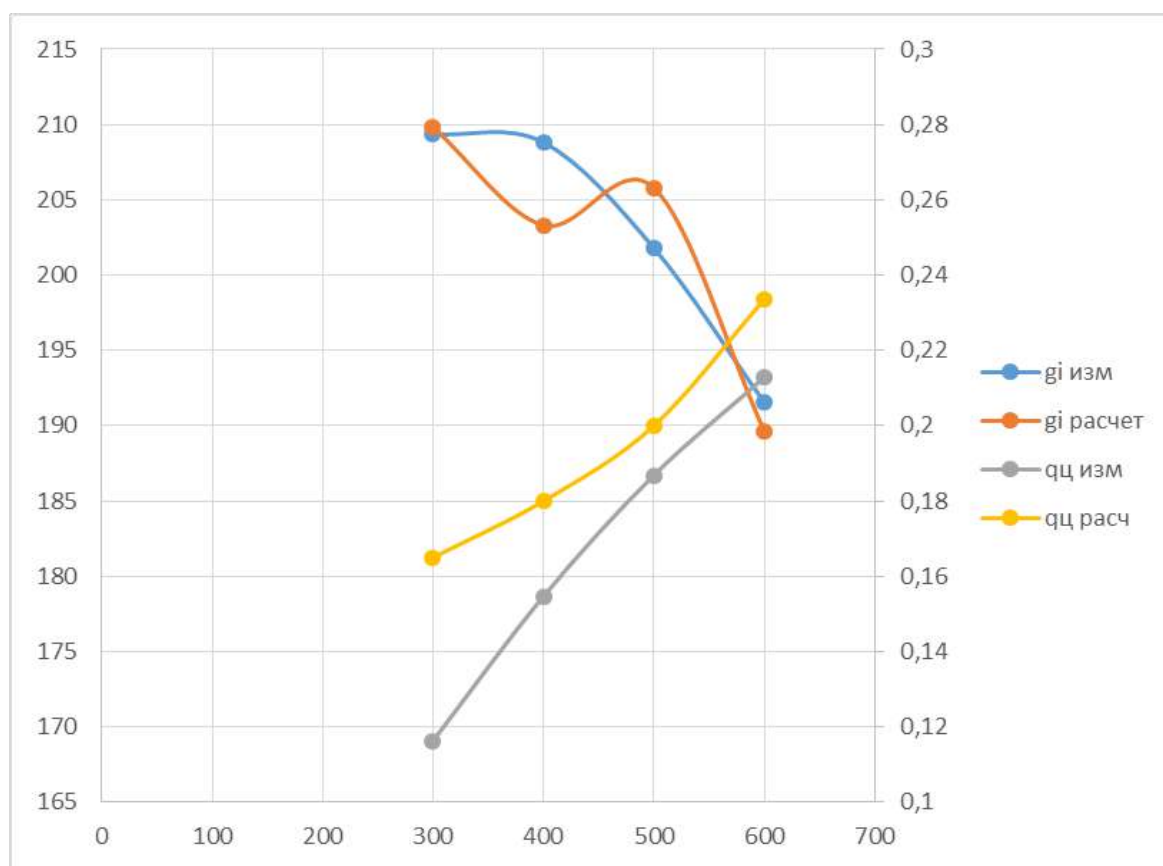


Рисунок 47 – Результаты экспериментальных показателей со статистическими данными расхода топлива

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённого исследования можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная программа и методика экспериментального исследования рабочего цикла газопоршневого двигателя Perkins 4012 TESI (12ГЧН16/19), установленного в энергоцентре ЮУрГУ, позволила произвести регистрацию индикаторных диаграмм давления в цилиндре в эксплуатационных условиях без препарирования двигателя и его систем.

2. Полученные индикаторные диаграммы позволили с помощью программы анализа индикаторных диаграмм по тепловыделению с шагом 1 град. п.к.в. определить индикаторные показатели рабочего цикла и закон тепловыделения на режимах холостого хода и нагрузках 300 кВт, 400 кВт, 500 кВт и 600 кВт.

3. Достоверность результатов индицирования и выбора исходных данных для обработки индикаторных диаграмм подтверждена расчётами рабочего цикла по «Программе расчета рабочего цикла дизеля «Double-Wiebe function».

4. При увеличении нагрузки на двигатель от 300 до 600 кВт индикаторная мощность цикла, среднее индикаторное давление, индикаторный КПД и максимальное давление сгорания увеличиваются от 35,44 до 55,42 кВт, от 0,742 до 1,16 МПа, от 0,345 до 0,382 и от 5,14 до 7,31 МПа, соответственно.

5. На всех исследованных режимах процесс сгорания получен состоящим из основной фазы активного тепловыделения, продолжительностью около 40–50 град. п.к.в. с догоранием около 40–50 град. п.к.в. По мере снижения нагрузки на двигатель максимальная скорость

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
						117
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

тепловыделения уменьшается от 400 Дж/град. п.к.в. (при 600 кВт) до 80 Дж/град. п.к.в. (на холостом ходу).

6. Сравнение величин цикловых подач газа, полученных при обработке индикаторных диаграмм и при измерении эксплуатационных расходов газа на соответствующих режимах, практически совпадают, что подтверждает достоверность выполненных расчётных исследований.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		118

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сапрыкин, И. В. Газопоршневые станции GE Jenbacher: энергия для агробизнеса / И. В. Сапрыкин, Д. А. Лашин, // Турбины и Дизели. – 2016. - №4. – С. 16-18.
2. Гото, С. Доработка и опыт эксплуатации газопоршневых двигателей серии 22AG / С. Гото, Т. Нашимото, Й. Ниши, // Турбины и Дизели. – 2008. - №4. – С. 16-19.
3. Waegar, N. Интеллектуальное производство энергии с применением газопоршневых энергоблоков / N. Waegar, M. Oestman, M. Wideskog, E. Linde, А. А. Никитин, // Турбины и Дизели. – 2013. - №1. – С. 4-8.
4. Никитин А. А. Крупнейшая газопоршневая ТЭС в России / А. А. Никитин, М. Б. Губашов, Я. Климстра, // Турбины и Дизели. – 2013. - №6. – С. 14-19
5. Шевцов О. Ю. Газопоршневые агрегаты MWM – надежное энергоснабжение / О. Ю. Шевцов, // Турбины и Дизели. – 2009. - №4. – С. 18-22.
6. Официальный сайт компании Gazecos / <http://www.gazecos.ru/>
7. Сайт официального представительства компании Elteco в России / <http://www.elteco.ru/>
8. Официальный сайт компании Perkins / <https://www.perkins.com/>
9. Kamaltdinov, V.G. Diesel Engine operating cycle optimization with simulation of combustion process by double-Wiebe function / V.G. Kamaltdinov, I.O. Lysov, S.S. Nikiforov // Procedia Engineering 129. 2015, P. 873–878, doi:
10. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2017610304. Программа расчета рабочего цикла дизеля «Double-Wiebe function». / Камалтдинов В.Г., Лысов И.О.; дата регистрации 10.01.2017 г.

					ЮУрГУ-13.04.03.2017.110.00 ПЗ МД	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		119