

61:85-5/1173-4

ВОРОШИЛОВГРАДСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ЕФИМОВ Николай Алексеевич

УДК 621.434.03:537.2

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВЕЖЕГО
ЗАРЯДА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
КАРБЮРАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

05.04.02 – Тепловые двигатели

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Научный руководитель –
кандидат технических наук,
доцент В.А.ЗВОНОВ

Ворошиловград – 1984

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Стр.

В В Е Д Е Н И Е	5
I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.	13
I.1. Анализ процессов смесеобразования и сгорания в карбюраторных двигателях.	13
I.2. Обзор работ по электрическим воздействиям на ра- бочий процесс ДВС с целью улучшения его показа- телей	26
I.2.1. Воздействие электрического поля на пламя.	27
I.2.2. Воздействие электрических и магнитных полей на топливо.	31
I.2.3. Электрическая обработка топливовоздушной смеси	39
I.2.4. Ионизация и озонирование воздуха, поступаю- щего в двигатель	43
I.2.5. Влияние электрической обработки свежего заряда на параметры процесса смесеобразования.	47
I.3. Выводы и постановка задач исследования.	50
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ИСТЕЧЕНИЯ БЕНЗИНОВ НА БЕЗМОТОРНОЙ УСТАНОВКЕ В УСЛОВИЯХ ПРИЛОЖЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.	56
2.1. Методика исследований и экспериментальная уста- новка.	56
2.2. Выбор способа определения знака и величины заряда, переносимого топливом, и аппаратура для его осу- ществления.	62

2.3. Исследование влияния величины и полярности при- кладываемого электрического поля на режим истече- ния бензинов.	69
2.4. Исследование влияния характера прикладываемого напряжения на режим истечения бензинов.	74
3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И ЗАЖИГАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИЛОЖЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.	83
3.1. Особенности смесеобразования в условиях электри- ческого поля.	83
3.2. Анализ процесса пробоя искрового промежутка и развития начального очага горения при электри- ческой обработке топливовоздушной смеси.	93
Заклучение по 3 главе	97
4. МОТОРНАЯ УСТАНОВКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.	99
4.1. Программа и методика экспериментальных исследований	99
4.2. Экспериментальная установка	106
4.3. Ионизационный статистический метод исследования процесса сгорания.	123
4.4. Аппаратура и устройство для фоторегистрации нало- женных индикаторных диаграмм.	132
4.5. Измерение пробивных напряжений на свече зажигания .	138
4.6. Оценка токсичности отработавших газов.	141
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВЕЖЕГО ЗАРЯДА НА ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБО- ЧЕГО ПРОЦЕССА КАРБЮРАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ.	144

5.1. Исследование эффективности отдельных видов электрической обработки свежего заряда.	I44
5.1.1. Ионизация воздуха, поступающего в двигатель. . .	I45
5.1.2. Электризация топлива в процессе его распыливания.	I48
5.1.3. Электрическая обработка топливовоздушной смеси в поле коронного разряда.	I54
5.2. Результаты исследований влияния электрической обработки топливовоздушной смеси на показатели рабочего процесса двигателя.	I56
5.2.1. Скорость распространения фронта пламени. . . .	I57
5.2.2. Цикловая неравномерность процесса сгорания. . .	I63
5.2.3. Величина и разброс пробивных напряжений. . . .	I73
5.2.4. Внешние показатели двигателя и пределы обеднения топливовоздушной смеси.	I75
6. ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.	I81
6.1. Описание предлагаемого устройства для улучшения устойчивой работы карбюраторного двигателя на обедненной смеси.	I81
6.2. Расчет экономического эффекта от применения предлагаемого устройства.	I85
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.	I90
Л И Т Е Р А Т У Р А.	I97

В В Е Д Е Н И Е

Высокие темпы автомобилизации в нашей стране, с одной стороны, и ограниченные запасы топлив нефтяного происхождения, с другой, ставят экономию топлив в ряд важнейших проблем на современном этапе.

В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981-1985 гг. и на период до 1990 г.", а также в ряде постановлений ЦК КПСС и Совета Министров СССР, указывается на необходимость совершенствования показателей работы транспортных средств, повышения топливной экономичности двигателей внутреннего сгорания, перевода автомобилей, эксплуатируемых в городских условиях, на питание природным газом и принятия ряда других мер, направленных на расширение топливно-энергетической базы автомобильного транспорта и компенсации растущего дефицита традиционных нефтяных топлив.

Кроме того, в этих документах наряду с вопросами экономии топлива указывается на необходимость решения другой, не менее важной проблемы - уменьшения уровня загрязнения атмосферы токсичными выбросами автомобилей. При этом перспективными можно считать лишь те методы улучшения топливной экономичности, которые одновременно уменьшают токсичность или не приводят к её увеличению и не усложняют существенно конструкцию двигателя.

Особенно остро вопросы топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) встают применительно к автомобилям с карбюраторными двигателями, эксплуатируемыми в городских условиях, которые в силу ряда известных причин обладают относительно невысокой экономичностью и повышенной токсичностью ОГ. Дополнительно эта проблема усугубляется еще и тем, что подавляющее большинство легковых и легких грузовых автомобилей оборудо-

вано именно карбюраторными двигателями.

Отсюда становится очевидным, что существенная экономия топлива и уменьшение уровня загрязнения атмосферы может быть достигнута за счет улучшения экономических и токсических показателей работы именно этого типа двигателя.

Дизелизация указанного парка автомобилей позволит значительно повысить их топливную экономичность и уменьшить токсичность ОГ. Однако не следует ожидать, что в ближайшей перспективе карбюраторные двигатели будут полностью вытеснены дизелями, так как это требует значительного времени и больших первоначальных затрат. К тому же рост дефицита дизельного топлива, который ощущается уже сегодня, предопределил снижение темпов дизелизации /25/.

Поскольку основным эксплуатационным режимом работы автомобиля в городских условиях является режим частичных нагрузок, то именно для него, в первую очередь, должны разрабатываться мероприятия по снижению расхода топлива и токсичности ОГ.

В качестве таких мероприятий в настоящее время рассматриваются: совершенствование рабочего процесса карбюраторного двигателя, обеспечение устойчивой работы двигателя на обедненных составах смеси, повышение степени сжатия, отключение части цилиндров и др.

Увеличение степени сжатия, как средства улучшения топливной экономичности, требует для предотвращения детонации или использование бензинов с более высоким октановым числом, а, следовательно, и более дорогих, или снижение (от оптимального значения) угла опережения зажигания на полных нагрузках. В последнем случае обычно наблюдается некоторое ухудшение мощностных и экономических показателей двигателя. Поэтому, возможность повышения степени сжатия как средства повышения топливной экономичности

карбюраторного двигателя весьма ограничена.

Отключение части цилиндров на режимах частичных нагрузок позволяет уменьшить расход топлива, но оно трудно осуществимо и применимо, главным образом, для двигателей с числом цилиндров больше четырех.

Существенное улучшение топливной экономичности карбюраторных двигателей при одновременном снижении токсичности ОГ может быть достигнуто за счет обеспечения устойчивой работы двигателя на обедненных смесях. Однако на режимах частичных нагрузок этому мешает существенное снижение скорости сгорания топливовоздушной смеси, обусловленное относительно низкими давлениями и температурами в момент проскакивания искры, а также большой степенью разбавления смеси остаточными газами. Это обстоятельство вызывает необходимость в обогащении топливовоздушной смеси для получения надежного и стабильного зажигания на частичных нагрузках, что, в свою очередь, приводит к ухудшению экономических и токсических показателей работы двигателя. Поэтому интенсификация зажигания обедненных смесей на отмеченных режимах является актуальной задачей и имеет народно-хозяйственное значение с точки зрения улучшения топливной экономичности и снижения токсичности ОГ.

Наиболее успешно эта задача может быть решена в двигателях с послойным смесеобразованием, которые способны обеспечить устойчивую работу на бедных составах смеси. Однако эти двигатели конструктивно более сложны, требуют соответствующей перестройки прежней технологии производства и в настоящее время пока еще далеки от своего совершенства, главным образом, из-за трудностей обеспечения управляемого расслоения заряда в камере сгорания в широко меняющемся диапазоне режимов работы двигателя, что

мешает их широкому внедрению в серийное производство.

Улучшение топливной экономичности и снижение токсичности ОГ, в известной степени, может быть также получено за счет совершенствования рабочего процесса двигателя и, в первую очередь, процессов смесеобразования и воспламенения, что одновременно позволит расширить и пределы обеднения смеси. Однако использование для этих целей традиционных методов: теплового и гидродинамического воздействия на процесс смесеобразования и повышения энергии искрового разряда для интенсификации зажигания, в большинстве случаев не приводит к ощутимому улучшению показателей двигателя, так как возможности этих методов в настоящее время практически исчерпаны.

Одним из способов дальнейшего совершенствования процессов смесеобразования и сгорания может быть электрическая обработка свежего заряда полями повышенной напряженности, так называемый метод электронно-ионной технологии ЭИТ, получивший такое название в промышленной технологии, где используются сильные электрические поля. Этот метод широко применяется в различных областях техники и, в частности, в газоочистке, в окраске и покрытии различных изделий, в сепарации порошковых материалов, печати, ворсовании и т.п. /14,51-54,75/.

Основными достоинствами метода ЭИТ являются: высокая экономичность, обусловленная непосредственным преобразованием электрической энергии в механическую энергию движения частиц и химическую энергию ионов и электронов; конструктивная простота аппаратов; возможность непрерывного и тонкого регулирования и управления процессами путем изменения интенсивности и направления приложенного электрического поля. Однако эти достоинства метода ЭИТ до сих пор не используются для улучшения процессов

смесеобразования и сгорания в двигателях внутреннего сгорания.

Имеющиеся немногочисленные экспериментальные данные по влиянию электрических полей на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя отрывочны, противоречивы, несопоставимы и, в ряде случаев, спорны и поэтому не позволяют сделать окончательный вывод о целесообразности их использования для улучшения экономических и токсических показателей работы двигателя.

Целью настоящей работы является определение степени влияния электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя, в первую очередь, на его топливную экономичность при работе на частичных нагрузках, а также целесообразности практического использования электрической обработки как средства повышения топливной экономичности двигателя.

Учитывая важность и актуальность уменьшения загрязнения окружающей среды, было признано целесообразным также оценить влияние электрической обработки свежего заряда и на токсичность ОГ.

Решение поставленных задач осуществлялось исследованиями на безмоторной установке, основной целью которых являлось получение дополнительных и проверка имеющихся противоречивых данных о влиянии характеристик электрического поля на режим истечения топлива и его поверхностное натяжение, и моторными исследованиями, на созданной для этих целей одноцилиндровой установке, где определялась степень влияния электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя.

Н а у ч н а я н о в и з н а работы заключается в том, что для улучшения основных показателей работы карбюраторного двигателя предлагается использовать не традиционные методы их улучшения, а электрическую обработку свежего заряда (метод ЭИТ), позволяющую обеспечить повышение топливной экономичности и сни-

жения токсичности двигателя.

Впервые комплексно исследовано влияние электрической обработки свежего заряда на основные параметры рабочего процесса двигателя — топливную экономичность, токсичность ОГ, скорость распространения пламени на различных стадиях сгорания, цикловую неравномерность процесса сгорания, расширение пределов обеднения смеси, а также величину и разброс пробивных напряжений.

Оценена возможность повышения топливной экономичности и снижения токсичности ОГ при разных видах электрической обработки свежего заряда.

Выявлена возможность регулирования состава смеси и организации послойного смесеобразования при электрической обработке топлива и топливовоздушной смеси.

Показана целесообразность практического использования электрической обработки топливовоздушной смеси для улучшения экономических и токсических показателей на частичных нагрузках и повышения устойчивой работы двигателя на бедных составах смеси.

А в т о р з а щ и щ а е т:

- теоретические исследования по особенностям смесеобразования и зажигания в условиях электрического поля;
- результаты экспериментальных исследований по влиянию электрической обработки свежего заряда в карбюраторном двигателе на топливную экономичность, скорость распространения пламени, расширение пределов обеднения смеси, снижение величины и разброса пробивных напряжений, регулирование состава смеси, а также возможность организации послойного смесеобразования в двигателе за счет электрической обработки горючей смеси на впуске и подачи на центральный электрод свечи зажигания напряжения противоположной полярности;
- методику моторных исследований по влиянию электрической обра-

ботки свежего заряда на основные параметры рабочего процесса карбюраторного двигателя;

- методику и результаты безмоторных исследований по изучению режима истечения топлива в условиях приложенного электрического поля;

- устройство для улучшения основных показателей рабочего процесса карбюраторного двигателя, которое обеспечивает электрическую обработку топливовоздушной смеси на впуске и подачу на центральные электроды свечей зажигания напряжения противоположной полярности.

П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь работы состоит в возможности:

- улучшения экономических и токсических показателей работы карбюраторного двигателя на частичных нагрузках и повышения устойчивости его работы на обедненных смесях;

- снижения требований к системе зажигания по вторичному напряжению;

- более простого и эффективного способа организации послойного смесеобразования;

- регулирования расхода топлива через жиклер.

А п р о б а ц и я р а б о т н. Диссертационная работа и основные ее результаты доложены, обсуждены и одобрены на Всесоюзных научных конференциях: "Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания", 1982г., в г.Москве; "Современный уровень и пути совершенствования экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания", 1983г., в г.Ворошиловграде; республиканской научно-технической конференции "Охрана природы и рациональное использование природных ресурсов", 1978г., в г.Киеве; научно-технической конференции профессорско-преподава-

тельского состава ВМИ (Ворошиловград, 1976г.); научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ДПИ (Горловка, 1980, 1982гг.); на техническом совете МемЗ в 1983г.

По теме диссертационного исследования опубликовано 6 печатных работ и получено одно положительное решение по заявке на изобретение.

Работа выполнена на кафедре ДВС и теплотехники Ворошиловградского машиностроительного института.

Автор приносит свою благодарность сотрудникам кафедры с.н.с. Ляшко Н.А. и м.н.с. Зайцевой Л.С. за консультации и содействие по изготовлению специальной измерительной аппаратуры.

I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным направлением развития поршневых ДВС на современном этапе является повышение топливной экономичности и снижение токсичности отработавших газов ОГ. Причем эти вопросы нельзя решать обособленно друг от друга, так как в большинстве случаев традиционные методы снижения токсичности приводят к заметному ухудшению его экономических и динамических показателей.

Решение этих задач связано с дальнейшим улучшением рабочего процесса двигателя и, в первую очередь, процессов смесеобразования и сгорания, хорошая организация которых способствует более полному и быстрому сгоранию топливовоздушной смеси, уменьшению цикловой неравномерности процесса сгорания и расширению предела эффективного обеднения горючей смеси. Этим вопросам посвящено большое количество исследований. Однако до настоящего времени еще нет достаточно эффективных способов дальнейшего их совершенствования.

Исходя из вышесказанного, основной задачей этой главы, с одной стороны, является анализ процессов смесеобразования и сгорания в карбюраторных двигателях с целью вскрытия их основных недостатков и влияния последних на показатели работы двигателя, с другой стороны, – рассмотрение возможных способов совершенствования этих процессов и постановка задач дальнейшего исследования.

I.I. Анализ процессов смесеобразования и сгорания в карбюраторных двигателях

Процесс смесеобразования в карбюраторных двигателях характеризуется рядом особенностей. Одной из них является очень ма-

лое время, отводимое на испарение топлива и перемешивание его паров с воздухом, которое в этих двигателях составляет 0,05... 0,005 с /3/. Поэтому с целью ускорения указанных процессов подаваемое жидкое топливо стараются распылить как можно тоньше, что достигается увеличением скорости воздушного потока в диффузоре карбюратора.

Для обеспечения достаточно высокой скорости воздуха в диффузоре его размеры обычно подбирают так, чтобы на максимальной частоте вращения вала двигателя разрежение в нем не превышало 1000 мм. вод.ст./3/, что примерно соответствует скорости воздушного потока 100...125 м/с и скорости струи топлива 4...5 м/с. При большем разрежении улучшение распыливания топлива не компенсирует падение мощности двигателя из-за уменьшения коэффициента наполнения η_v вследствие возрастания аэродинамических потерь, что особенно остро проявляется в современных быстроходных двигателях.

Здесь также следует учитывать и то, что увеличение скорости воздуха в диффузоре карбюратора W_8 имеет вполне определенный предел. Так, по данным /99/, увеличение W_8 свыше 100 м/с практически уже не улучшает тонкость распыливания топлива, что указывает на ограниченность данного способа совершенствования процесса смесеобразования.

Другой характерной особенностью процесса смесеобразования в карбюраторных двигателях является неоднородность распыливания топлива, т.е. образующиеся капли имеют разные размеры. В результате этого капли малого размера быстро достигают скорости потока воздуха, а капли большого размера приобретают поперечную составляющую скорости относительно основного потока и оседают на стенки впускного трубопровода, образуя жидкую топ-

ливную пленку по всему его периметру, движущуюся значительно медленнее (приблизительно в 40..60 раз) основного потока /41,85/. В зависимости от частоты вращения, нагрузки, интенсивности подогрева и др. толщина и скорость перемещения пленки могут меняться в значительных пределах /35, 36/.

Наличие топливной пленки во впускном трубопроводе, испарение с которой протекает довольно медленно из-за малой ее поверхности, являются своеобразным аккумулятором топлива, задерживающим его попадание в цилиндры двигателя /92 /. Вследствие этого при неустановившихся режимах нарушается баланс между количеством топлива, подаваемым карбюратором, и количеством топлива, поступающим в цилиндры двигателя. Особенно резко инерционные свойства топливной пленки проявляются при резком открытии дроссельной заслонки. При этом возникает кратковременное обеднение смеси, что и обуславливает необходимость введения в схему карбюратора ускорительного насоса, предотвращающего переобеднение смеси в этот период.

Также наличие топливной пленки на стенках впускного трубопровода многоцилиндровых карбюраторных двигателей и различная длина патрубков отдельных цилиндров являются основной причиной неравномерного распределения смеси по цилиндрам двигателя. При этом неодинаковыми могут оказаться не только общее количество топлива в смеси, попадающее в тот или иной цилиндр, но и его фракционный состав, а также концентрация в нем различных присадок, например, антидетонатора. Поэтому следует различать неравномерность распределения горючей смеси как по коэффициенту избытка воздуха, так и по составу топлива, т.е. по качеству (фракционному составу и концентрации в нем присадок) /99/. Как тот, так и другой вид неравномерного распределения смеси по цилинд-

рам, могут оказать существенное влияние на показатели двигателя и его токсичность ОГ.

Это определяется тем, что индикаторная мощность, удельный расход топлива, требования к октановому числу топлива и токсичность ОГ непосредственно зависят от состава горючей смеси (рис. I.1.). При неравномерности состава смеси показатели работы отдельных цилиндров будут различны. В этом случае суммарная мощность, экономичность и токсичность двигателя будут иметь худшие показатели, чем при равномерном распределении смеси по цилиндрам.

Сказанное выше хорошо подтверждается данными исследований /12, 72, 86/, показывающими снижение мощности двигателя на 4... 5%, увеличение удельного расхода топлива на 9...12%, а также токсичности ОГ с ухудшением равномерности распределения смеси по цилиндрам двигателя. Однако здесь следует заметить, что влияние неравномерности состава смеси по цилиндрам на содержание окислов азота NO_x проявляется в отработавших газах неоднозначно и определяется исходными регулировками карбюратора, в зависимости от которых NO_x может как уменьшаться, так и увеличиваться /99 /.

Так как неравномерность распределения горючей смеси по цилиндрам карбюраторного двигателя в основном зависит от количества жидкой фазы топлива во впускном тракте, находящейся как в виде капель, так и в виде пленки, то очевидно, что все факторы, от которых зависит соотношения паровой и жидкой фаз топлива, должны влиять и на неравномерность распределения смеси.

К этим факторам прежде всего относят: скорость потока смеси, температуру воздуха, топлива и стенок впускного трубопровода, испаряемость топлива, тонкость его распыливания и др./36/.

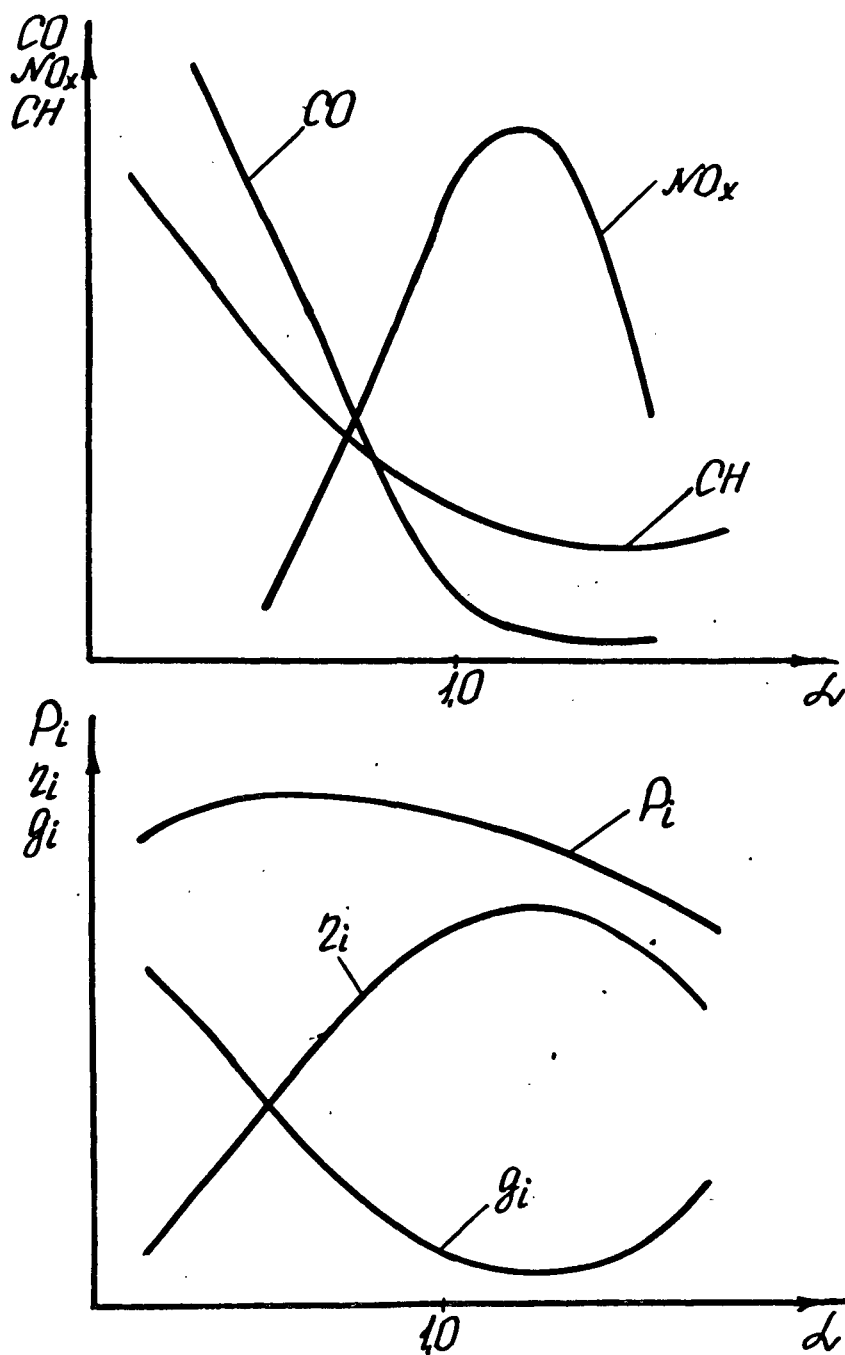


Рис. I.I. Влияние состава смеси на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя и токсичность его ОГ /99/

В ряде работ /41, 49, 85, 92, 112/ с целью совершенствования процесса смесеобразования в карбюраторных двигателях были проведены исследования процесса испарения топлива с поверхности капель и топливной пленки. Эти исследования показали, что на долю топливной пленки на некоторых режимах приходится до 15... 26% от расхода топлива, и количество ее значительно уменьшается по мере увеличения скорости воздушного потока. При этом отмечается, что процесс испарения происходит при относительно невысоких температурах воздуха и топлива и в чрезвычайно сложных условиях, которые характеризуются: изменением температуры его компонентов как вследствие испарения, так и из-за местного подогрева; непостоянством скорости обдува из-за пульсаций воздушного потока и, наконец, изменением физических свойств топлива вследствие его фракционирования. Интенсификация испарения в этих условиях может быть обеспечена за счет увеличения поверхности испарения топлива в результате более мелкого его распыливания и повышения скорости отвода паров с поверхности испаряющихся капель и пленки. Как первое, так и второе в настоящее время пытаются, в основном, обеспечить путем увеличения скорости воздуха в диффузоре W_6 . Однако, как уже было показано выше, увеличение W_6 имеет вполне определенный предел, свыше которого тонкость распыливания топлива практически не улучшается. К тому же увеличение W_6 приводит к сокращению времени, отводимого на испарение топлива, что снижает количество его паровой фазы. Таким образом, этот способ дальнейшего совершенствования процесса смесеобразования не может привести к его существенному улучшению.

Интенсификация испарения топлива может быть получена также за счет повышения температуры воздуха и топлива. В этом слу-

чае более сильное влияние оказывает температура топлива, но практически легче осуществить подогрев воздуха. Однако последнее связано с уменьшением η_v на полных нагрузках и повышением потребного октанового числа топлива на 2...2,3 единицы при увеличении температуры смеси на 100С /105/. В связи с этим данным способом не представляется возможным добиться полного испарения топлива без заметного ухудшения показателей работы двигателя.

Другим способом улучшения качества процесса смесеобразования в карбюраторных двигателях является вторичное распыливание топливной пленки. В некоторых конструкциях это достигается применением различного рода механических приспособлений, например, при помощи крыльчаток, захватывающих пленку своими лопастями и разбрызгивающих ее. В других конструкциях осуществляют сбор топливной пленки при помощи вставок с последующим ее распыливанием. Преимуществом подобных способов борьбы с топливной пленкой является то, что при этом не увеличивается температура топливовоздушной смеси и, тем самым, не уменьшается коэффициент наполнения, как это имеет место при использовании подогрева впускного трубопровода.

В заключение этого вопроса следует заметить, что испарение капель и пленки, так же как и их образование и движение по впускному тракту, представляет собой слабоорганизованные процессы, и поэтому способов для активного управления их протеканием при различных режимах работы двигателя в настоящих впускных системах по существу нет.

Также характерной особенностью процесса смесеобразования в карбюраторных двигателях является фракционирование топлива, вызванное его испарением с поверхности капель и пленки при движении их по впускному тракту двигателя. При этом быстрее всего ис-

паряются более легкие фракции топлива, в результате чего капли и пленка постепенно обогащаются высококипящими, а пары топлива — низкокипящими углеводородами.

Так как наиболее неравномерно по цилиндрам распределяются тяжелые фракции топлива, которые остаются в трубопроводе в жидкой фазе, то это приводит к тому, что отдельные цилиндры будут иметь не только больше или меньше топлива, но и различную концентрацию легких и тяжелых фракций в смеси. Это в свою очередь вызовет различие антидетонационных качеств отдельных цилиндров, что подтверждается данными работы /105/, где при эксперименте на шестицилиндровом двигателе были зарегистрированы следующие октановые числа (ОЧ): в первом цилиндре — 77, во втором — 84, в третьем — 82, в четвертом — 81, в пятом — 85, в шестом — 87. В этом случае требования двигателя к октановому числу топлива будут определяться по цилиндру, имеющему наименьшее ОЧ, т.е. там, где наиболее благоприятные условия для возникновения детонационного сгорания.

Кроме того, антидетонационные качества двигателя будут зависеть и от неравномерности распределения антидетонатора по цилиндрам, что в свою очередь также создает неодинаковые условия в цилиндрах с точки зрения возможности возникновения детонационного сгорания. Различие в концентрации антидетонатора в заряде по цилиндрам приводит к снижению фактического октанового числа топлива и неэффективному его использованию, так как антидетонационные качества двигателя будут определяться по тому цилиндру, где октановое число топлива минимально. При этом избыток антидетонатора в других цилиндрах будет расходоваться без пользы. В первом приближении оценить качество распределения антидетонатора можно относительной величиной потерянного антидетонатора β_a /99/:

$$\beta_a = \frac{C_{\text{ср}} - C_{\text{min}}}{C_{\text{ср}}} 100\%$$

где $C_{\text{ср}}$ - концентрация антидетонатора в исходном топливе;

C_{min} - минимальная концентрация антидетонатора в топливе, поступившем в цилиндры.

В /99/ отмечается, что величина β_a может достигать 20..30%, а иногда и больше.

Более точная оценка эффективности использования антидетонатора в двигателе требует учета распределения октанового числа по фракциям топлива и их антидетонационных свойств.

Следует отметить, что помимо воздействия на антидетонационные и эффективные показатели двигателя, неравномерность распределения смеси по цилиндрам может повлиять на его долговечность и надежность. Так неравномерное распределение антидетонатора по цилиндрам является причиной повышенного отложения нагара в камере сгорания, что увеличивает склонность двигателя к детонации и может привести к нарушениям в работе свечей зажигания вследствие их шунтирования токопроводящим нагаром и прогоранию выпускных клапанов и поршней /99/.

Повышенная концентрация высококипящих фракций в рабочей смеси повышает износ цилиндров в результате смывания масляной пленки со стенок цилиндров неиспарившейся частью топлива /84, 105/.

Это положение хорошо согласуется с данными /50/, откуда следует, что износ двигателя возрастает почти пропорционально количеству жидкой пленки.

Уменьшение влияния фракционирования топлива на работу двигателя может быть достигнуто за счет более тонкого и однородного распыливания топлива, приводящего к увеличению степени его испарения и снижению образования топливной пленки во впускном тракте, а, следовательно, и к улучшению количества процесса смесеоб-

разования.

Таким образом, все вышеотмеченные сложности, возникающие в результате неравномерного распределения горючей смеси по цилиндрам двигателя, являются результатом низкого качества процесса смесеобразования, который в значительной степени оказывает влияние на эффективные показатели двигателя и его токсичность.

Любые мероприятия, направленные на улучшение общих условий смесеобразования (увеличение тонкости и однородности распыливания топлива, улучшение перемешивания, увеличение скорости потока смеси во впускном тракте и т.д.), должны способствовать улучшению качества процесса смесеобразования.

В качестве таких мер помимо подогрева впускного тракта двигателя рассматривают следующие мероприятия. Это, во-первых, совершенствование конструкции впускной системы, карбюратора, формы камеры сгорания и использование многокамерных систем впуска, а, во-вторых, применение различного рода турбулизационных камер, приставок, тепловых трубок и т.п. Однако указанные мероприятия лишь в некоторой (далеко не полной) степени приводят к улучшению процесса смесеобразования и распределения горючей смеси по цилиндрам двигателя.

Другой характерной особенностью рабочего процесса карбюраторного двигателя является цикловая неравномерность процесса сгорания, которая также является следствием недостаточного качества смесеобразования.

Неидентичность последовательных циклов зависит от режима работы двигателя и резко возрастает по мере обеднения смеси. Существует мнение, что именно рост невоспроизводимости сгорания в последовательных циклах определяет предел эффективного обеднения смеси, при котором достигается наименьший удельный

расход топлива. Считают, что в основном цикловая неравномерность процесса сгорания обусловлена различиями в скоростях сгорания в отдельных рабочих циклах, являющихся следствием случайных сочетаний условий, благоприятствующих или, наоборот, неблагоприятствующих развитию, в первую очередь, начального очага горения. К ним относятся: различия турбулентных характеристик заряда и движения заряда в зоне свечи, неоднородность заряда в последовательных циклах и, в первую очередь, состава рабочей смеси в зоне свечи зажигания, колебания в характеристиках искрового разряда и, наконец, неидентичность состава горючей смеси в последовательных циклах.

Отмеченные факторы определяют термодинамическое и электрическое состояние искрового промежутка и, тем самым, оказывают влияние на стабильность зажигания, а также на величину и разброс пробивных напряжений.

При обеднении смеси (выше $\alpha > 1$), а также при дросселировании двигателя, цикловая неравномерность процесса сгорания резко возрастает. Это проявляется в увеличении колебаний длительностей начальной фазы сгорания, что в свою очередь приводит к более позднему и замедленному сгоранию в последующих фазах, в увеличении разброса пробивных напряжений и в резком снижении максимальных и средних значений индикаторного давления в отдельных циклах. При этом, соответственно, возрастает удельный расход топлива, уменьшается мощность двигателя, и его работа становится менее равномерной. С дальнейшим обеднением смеси работа двигателя делается неустойчивой вследствие появления пропусков зажигания.

Улучшение цикловой неравномерности процесса сгорания при улучшении смесеобразования может быть связано не только с по-

вышением степени цикловой однородности смеси, но и с уменьшением различия состава смеси в последовательных циклах. Из данных ЦНИТА /56, 58/ следует, что неидентичность смеси в последовательных циклах, в первую очередь, связана с неравномерностью топливоподачи во времени, причем на отдельных режимах неравномерность топливоподачи может быть соизмерима с величиной цикловой подачи топлива. В этих же опытах было показано существенное улучшение работы двигателя при стабилизации топливоподачи.

Таким образом, неидентичность состава смеси в последовательных циклах вызывает смещение мощностной и экономической регулировки двигателя в область более богатых α , снижает мощность двигателя и увеличивает удельный расход топлива. Кроме того, с ростом цикловой неидентичности по α может быть связано увеличение токсичности отработавших газов /34, 74, II0/.

Типичный вид индикаторных диаграмм ряда последовательных циклов при работе двигателя на смеси различных составов приведен на рис. I.2, а, б, в /I8/. Из этих фоторегистраций видно, как по мере обеднения смеси возрастает невоспроизводимость процесса сгорания. Повышение степени однородности смеси, а также интенсивности ее турбулизации, приводят к уменьшению разброса в протекании отдельных циклов и, одновременно, способствуют расширению пределов эффективного обеднения смеси /I8/.

Это влияние было показано экспериментально сравнением рабочего процесса двигателя при впрыске топлива и питании его заранее приготовленной однородной смесью паров топлива с воздухом. /79/. При работе на однородной топливовоздушной смеси протекание сгорания стало более стабильным, расширились пределы эффективного обеднения смеси и повысилась экономичность двигателя. Из этого следует очевидное влияние на цикловую неравномерность

процесса смесеобразования.

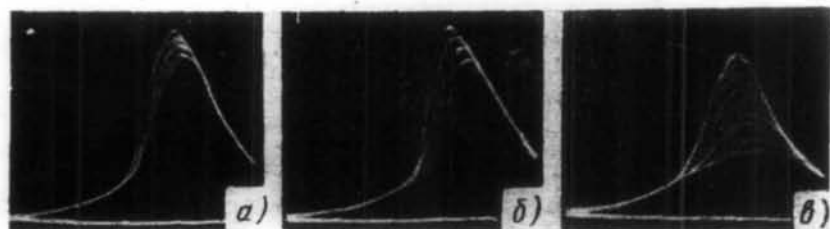


Рис.1.2. Влияние состава смеси на характер индикаторных диаграмм карбюраторного двигателя, полученных для ряда последовательных циклов:

$a - \alpha = 0,87$; $б - \alpha = 0,98$; $в - \alpha = 1,14$

З а к л ю ч е н и е

Из результатов рассмотрения процессов смесеобразования и сгорания в карбюраторных двигателях можно заключить, что они имеют ряд существенных недостатков (недостаточная тонкость и однородность распыливания топлива, наличие топливной пленки во впускном трубопроводе, значительная неравномерность распределения горючей смеси по цилиндрам двигателя, а также цикловая неидентичность процесса сгорания), приводящих к заметному ухудшению основных показателей работы двигателя. Причем наиболее неблагоприятно процессы смесеобразования и сгорания протекают на частичных нагрузках, которые являются основными рабочими режимами в городских условиях.

Одной из причин высоких удельных расходов топлива и значительной цикловой нестабильности процесса сгорания при работе двигателя на частичных нагрузках является дисбаланс между потребной энергией для зажигания и располагаемой в искровом разряде. Поэтому интенсификация зажигания обедненных смесей на этих режимах является актуальной задачей и имеет важное народно-хозяйственное значение с точки зрения улучшения топливной экономичности и сни-

жения токсичности ОГ. Одним из возможных способов ее решения является улучшение условий для образования начального очага горения и последующего его превращения в развитый фронт турбулентного пламени, что в определенной степени обеспечивается улучшением однородности и реакционной способности топливовоздушной смеси.

Улучшение качества процесса смесеобразования может быть достигнуто за счет более тонкого распыливания топлива. При этом целесообразно решать этот вопрос не за счет увеличения аэродинамических воздействий, а путем снижения величины поверхностного натяжения топлива каким-либо из способов, приемлимым для условий ДВС. Это позволит при прочих равных условиях добиться улучшения тонкости и однородности распыливания топлива, а, значит, и в целом процесса смесеобразования.

Таким образом, для дальнейшего совершенствования процессов смесеобразования и зажигания необходимо разработать принципиально новые способы, позволяющие в первую очередь улучшить тонкость и однородность распыливания топлива на частичных нагрузках и обеспечить надежность и стабильность зажигания обедненных смесей.

Одним из таких способов, не требующих увеличения скорости воздушного потока и повышения энергии искрового разряда, может быть электрическая обработка свежего заряда.

Обзор литературных источников и патентной информации по этому вопросу приводится в следующем параграфе.

I.2. Обзор работ по электрическим воздействиям на рабочий процесс ДВС с целью улучшения его показателей

Процессы смесеобразования, воспламенения и горения топливовоздушной смеси тесно связаны между собой и являются важнейшими

в рабочем процессе двигателя внутреннего сгорания. Вследствие этого задачи их совершенствования являются актуальными как с точки зрения улучшения эффективных показателей двигателя, так и снижения токсичности ОГ.

Однако применение только традиционных методов воздействия на рабочий процесс двигателя в большинстве случаев не приводит к ощутимому улучшению его показателей. В связи с этим в последние годы появился повышенный интерес к использованию различного рода физических методов воздействия на процессы смесеобразования и сгорания, которые помимо прямого влияния на них могут способствовать увеличению числа возбужденных и ионизированных частиц в горючей смеси (активных радикалов). Наличие таких частиц может оказать положительное влияние на интенсивность протекания процессов смесеобразования и сгорания, а использование этих способов, по-видимому, даст возможность в той или иной степени управлять ими.

К числу таких физических способов воздействия можно отнести магнитные и электрические поля повышенной напряженности.

Следует заметить, что свежий заряд (топливовоздушная смесь) может быть подвергнут обработке указанными способами как непосредственно в камере сгорания, так и на впуске в двигатель. В последнем случае может быть обработан воздух, топливо или топливовоздушная смесь.

1.2.1. Воздействие электрического поля на пламя

Началом работ в направлении использования электрических воздействий в ДВС для улучшения показателей их работы послужило установление собственных электрических свойств пламени, т.е. электропроводности пламени, которые впервые были исследованы

Джилбертом в 1600 году и продолжены Аррениусом в 1890...1891 годах /104/. Эти исследования натолкнули на мысль, что применяя различные варианты наложения электрических и электромагнитных полей на зону горения в двигателе можно, воздействуя на заряженные электрические частицы в пламени, носителями которых являются ионы, регулировать скорость процесса горения как в целом, так и на отдельных его стадиях, и тем самым, получить параметры процесса сгорания близкие к оптимальным / 2, 33, 113/.

В дальнейшем работы в этом направлении развивались следующим образом.

Одним из первых взаимодействие пламени и внешнего электрического поля наблюдал Бранд, заметивший слабое притяжение пламени отрицательно заряженными телами. Далее эти работы были продолжены Томсоном. Однако первые эксперименты, ставящие целью выявить влияние на скорость горения поперечного магнитного поля в $4 \cdot 10^3$ Гаус, не дали положительного результата /62 /.

После ряда неудачных попыток / 60, 94/ положительное влияние электрического поля на процесс горения впервые наблюдался Малиновским с сотрудниками / 61, 63/ и, в дальнейшем, рядом других авторов /5, 21, 26, 47, 89, 95, 102, 104, 113/ , которые указывают, что независимо от механизма влияния электрического поля на процесс горения топлива, сам факт этого влияния является бесспорным. Задача практического использования электрического поля с целью интенсификации процесса горения заключается в выявлении наиболее эффективных путей его воздействия в различного рода устройствах, использующих жидкие и газообразные виды топлив, в получении необходимых закономерностей и в разработке конструкций соответствующих устройств.

Однако, здесь не существует единого мнения об эффективности

воздействия электрических полей на пламя. Если авторы вышеупомянутых работ утверждают, что, воздействуя электрическим полем на пламя, можно значительно интенсифицировать процесс горения, то Даггер, Симон и Герстейн / 24/ считают, что электрические поля в незначительной степени оказывают влияние на горение топлива.

Работы позднего периода (по отношению к /24 /), выполненные Асакавой /5 /, Чхеидзе /104/, Салимовым с сотрудниками /95/, Степановым и Дьячковым /102/, Дьячковым и Нефедовой /26/, однозначно свидетельствуют о положительном влиянии электрических полей на процесс сгорания, что в условиях открытого пламени выражается в изменении его структуры, конфигурации и скорости выгорания топлива / 5,95,102,104/, а в условиях безмоторных установок - в увеличении скорости распространения фронта пламени /26,95/.

Следует отметить, что до настоящего времени нет единого объяснения механизма влияния электрического поля на пламя. Одни исследователи /57/ объясняют это газодинамическим воздействием, т.е. образованием электрического ветра, причиной которого является ускоренное движение положительных ионов в сторону отрицательного потенциала, другие /82/ предполагают, что электрическое поле влияет на концентрацию заряженных частиц в зоне горения, которые, в свою очередь, интенсифицируют химические реакции горения.

По мнению Салимова /96/ имеющиеся противоречия о влиянии электрического поля на пламя во многом объясняются различной методикой проведения экспериментов, а разное объяснение механизма действия электрического поля - неучетом некоторых физико-химических явлений, имеющих место в предпламенной зоне, и, в

частности, наличием избыточной ионизации газовой смеси. Последнее обстоятельство способствует интенсификации процесса горения вследствие присутствия дополнительных ионов, которые, как считают авторы /4,96/, играют роль свободных ион-радикалов с избыточным зарядом, обеспечивающих более интенсивное протекание окислительных реакций в свежих слоях смеси.

Если все это так, то регулируя концентрацию ионов, например, ионизацией топливоздушной смеси или электризацией топлива при его распыливании, можно регулировать, в определенном смысле этого слова, и развитие процесса горения. Это предположение подтверждается опытами Салимова и др. /95/, а также Степанова и Дьячкова /102/, проведенными на открытых турбулентных пламенах, где при сжигании распыливаемых жидких топлив в результате подведения высокого напряжения к распылителю горелки процесс горения значительно интенсифицировался. Основной причиной наблюдаемого эффекта авторы считают электризацию сжигаемого топлива, которая помимо увеличения концентрации ионов в предпламенной зоне способствует получению более высокой степени дисперсности среды, что также является одной из причин интенсификации процесса горения.

Необходимо заметить, что степень воздействия внешнего электрического поля на пламя, кроме его характеристик (вида поля, его направления и величины), также зависит и от начальной скорости распространения пламени. Если на спокойном пламени эффект воздействия внешнего поля ярко выражен как внешне (в изменении формы пламени), так и внутренне (в увеличении скорости сгорания), то с увеличением начальной скорости сгорания эффект резко уменьшается. Так, например, по данным Чхеидзе /104/ воздействие высокого напряжения до 40кВ на высокоскоростную струю горящего газа

сварочной горелки не оказало никакого эффекта.

Это обстоятельство делает маловероятным получение значительного эффекта от воздействия высокого напряжения непосредственно на зону горения в условиях камеры сгорания реального двигателя ввиду относительно высокой скорости сгорания в ДВС.

Однако этот факт не может отрицать вообще влияние электрического поля на рабочий процесс двигателя, т.к. имеется возможность воздействия электрическим полем как на топливовоздушную смесь, так и на один из её компонентов либо на впуске, либо в камере сгорания непосредственно перед ее воспламенением.

1.2.2. Воздействие электрических и магнитных полей на топливо

Воздействие электрических и магнитных полей на различные жидкости издавна привлекало внимание исследователей, которые отмечают, что воздействие магнитных полей на воду вызывает изменение её поверхностного натяжения, вязкости и плотности /66, 67, 70/, что эти "новые" свойства имеют тенденцию сохраняться после снятия приложенного поля, и эффект "омагничивания" зависит от напряженности магнитного поля и скорости протекания жидкости /68/.

Вопрос электромагнитных воздействий на горючие жидкости и их смеси изучен менее полно. Дальнейшее рассмотрение влияния электрических и магнитных полей на топливо удобнее провести отдельно.

В настоящее время по магнитной обработке жидкого топлива применительно к условиям реального двигателя с целью улучшения его показателей известен ряд экспериментальных данных и предложений.

Так, итальянский изобретатель Мели /23/ предлагает обработку топлива, поступающего в двигатель, производить в устройстве, представляющем собой катушку индуктивности, охватывающую топливопровод, через обмотки которой пропускается пульсирующий ток частотой $1,0 \dots 1,2$ кГц, т.е. обработку топлива в данном случае предлагается осуществлять электромагнитным пульсирующим полем.

По мнению автора, это устройство позволит интенсифицировать процесс сгорания, предотвратить нагарообразование и другие отложения на стенках камеры сгорания, а также улучшить экономичность работы двигателя.

С той же целью аналогичное устройство для обработки топлива, но уже с использованием сильного поля постоянного магнита, предлагает японский изобретатель Сабура Мията Мориа /122/.

Наряду с этими способами, предлагаются комбинированные методы обработки, например, электростатическим и магнитным полями /115, 118, 120/. В этом случае вдоль цилиндра, в котором обрабатывается топливо, устанавливаются два электрода, между которыми создается электростатическое поле. Вдоль оси этих электродов установлены кольцевые магниты с полюсами на торцах так, чтобы их одноименные полюсы были обращены друг к другу, образуя взаимоотталкивающие магнитные поля.

Испытание подобного устройства английского изобретателя Саранга показало улучшение эффективности сгорания топлива, что выразилось в увеличении концентрации CO_2 в продуктах сгорания на 14% и в увеличении температуры пламени /115/. Условия испытания автором не приводятся.

Значительный практический интерес вызывают испытания устройств вышеупомянутого японского изобретателя Сабура Мията Мориа, проведенные в США /108/. Эти устройства устанавливаются в топливной

системе перед карбюратором или форсункой и предназначены для обработки топлива, поступающего в двигатель, под действием интенсивных магнитных полей. В результате испытаний этих устройств выявлено, что при обработке топлива обеспечивается более быстрое и полное его сгорание, значительное уменьшение нагарообразования на поверхности камеры сгорания и более благоприятные условия для работы свечей зажигания. При этом приросты мощности серийных двигателей в среднем составили около 10%, а пробег в километрах на 1 литр топлива увеличился с 7,35 до 8,0 км.

Однако в этом вопросе нет единого мнения, о чем свидетельствуют опыты Чхеидзе /104/, которые были проведены в условиях реального полноразмерного двигателя как с магнитной, так и с комбинированной (электрической и магнитной) обработкой топлива полями повышенной напряженности. Такая обработка топлива не привела, как это ожидалось, к заметному улучшению мощностных и экономических показателей двигателя.

Отсутствие эффекта автор объясняет деионизацией ионизированного топлива металлическими стенками впускного трубопровода при движении его по последнему.

Здесь также следует иметь ввиду, что в случае наличия незначительного эффекта от обработки топлива он вообще мог быть не зарегистрирован, т.к. оценка осуществлялась не по скорости распространения пламени $U_{пл}$, а по величине эффективной мощности. При этом, если учесть, что исследования проводились на полноразмерном двигателе ЗИЛ-120 с использованием обкаточно-тормозного стенда типа СТУ, который обеспечивает довольно грубую регистрацию величины тормозного момента, то, по-видимому, полностью отрицать влияние магнитной и комбинированной обработки топлива нельзя.

Для окончательного выяснения вопроса здесь нужны дополнительные более корректные эксперименты с исследованием, в первую очередь, характеристик процесса сгорания, например, измерением $U_{пл}$ в начальной и основной фазах сгорания.

Возможно, что использование более современной методики исследований и контрольно-измерительной аппаратуры поможет выявить оптимальные условия и режимы обработки топлива, а применение впускных трубопроводов, выполненных из диэлектрических материалов или покрытых ими, позволит значительно уменьшить деионизацию топлива и тем самым увеличить эффективность воздействия поля на топливо.

Другим возможным способом обработки топлива может быть обработка его электрическими полями повышенной напряженности (E). В этом случае, как правило, топливо подвергается электризации в процессе его истечения контактным или индуктивным способом.

Этим видом обработки топлива продолжительное время занимались Асакава /5/, Салимов с сотрудниками /95/ и Страубел^ж, которые в условиях свободного истечения различных жидкостей, в том числе и дизельного топлива, прикладывали к ним электрические поля различной напряженности и вида.

В результате этих исследований Асакавой было выявлено, что наложение электрического поля повышенной E вызывает электризацию жидкости, т.е. её зарядку знаком того потенциала, который подведен к соплу, из которого истекает жидкость. При этом, в результате взаимного отталкивания топлива при выходе его из сопла происходило резкое увеличение угла раскрытия струи от 0° при потенциале $U = 0$, до 100° при $U = 10$ кВ. Кроме этого, име-

^ж Данные взяты из /101/.

ло место увеличение скорости истечения жидкостей. Так, при воздействии на дизельное топливо высокого напряжения постоянного тока $U = 10$ кВ скорость его истечения увеличилась на 20%. Увеличение скорости истечения наблюдалось и при наложении переменного электрического поля, но в меньшей мере /5/.

Подобный эффект при наложении электрического поля высокой напряженности наблюдался в опытах Страубела, Ревзина /88/ и Викторова с соавторами /15/.

Желая дополнительно увеличить скорость истечения топлива, Асакава произвел вторичную обработку предварительно электризованного топлива и в результате получил увеличение скорости истечения. Таким образом, эти результаты подтверждают возможность регулирования расхода топлива путем наложения дополнительного электрического поля на предварительно электризованное топливо.

Значительное изменение режима истечения (увеличение числа капель и уменьшение их размеров) в результате наложения на топливо электрического поля высокой E было получено в работах Салимова /95/ и Ревзина /91/.

Авторы этих работ наблюдаемый эффект объясняют снижением поверхностного натяжения σ топлива вследствие его электризации. Так, по данным Ревзина /90/ при $E = 2$ кВ/см поверхностное натяжение топлива снизилось на 22%. Результаты экспериментов Копейкиной /46/ также подтверждают снижение σ под действием приложенного электрического поля.

Положительное влияние электрической обработки топлива на некоторые его характеристики отмечается в работах Салимова с соавторами /94/ и Акбарова /4/, где в условиях безмоторных ус-

тановок было получено снижение температуры и периода задержки воспламенения топлива при его электризации. Электрическое поле также оказывает положительное действие и на испаряемость топлива /4,10,15,38/. В работе Викторова и др. /15/ в статических условиях исследовалась скорость испарения топлива, предварительно обработанного электрическим полем. В результате установлено, что скорость испарения наэлектризованного топлива значительно выше, чем необработанного. При этом наибольшая разница в скорости испарения наблюдается в первые 5 минут и составляет 20%. С увеличением времени испарения эта разница постепенно уменьшается и через 200 минут практически исчезает.

Положительный эффект увеличения скорости испарения различных жидкостей, в том числе и топлива, но уже в условиях непосредственно наложенного электрического поля как в статических условиях, так и при испарении в воздушный поток, отмечается в работах Ревзина /88/, Бологи и Руденко /10/. При этом наибольший эффект достигается при наложении переменного поля. Объясняют это авторы тем, что переменное поле в результате усиления колебаний паровоздушного слоя, который непосредственно примыкает к поверхности испаряющейся жидкости и является основным сопротивлением испарению, будет способствовать его разрушению.

В этом же направлении проведена работа и Акбаровым /4/, где также исследовался процесс испарения с неподвижной поверхности и в динамическом режиме (при наличии относительного движения между газовой средой и поверхностью испарения жидкости).

Как показали опыты по испарению в неподвижный воздух, наложение электрического поля существенно увеличивает скорость испарения топлива.

Аналогичные результаты были получены Акбаровым и при дина-

мическом испарении свободно падающих наэлектризованных капель в нагретой среде, что уже более близко соответствует условиям в ДВС. Эффект увеличения скорости испарения капель топлива, несущих на себе электрический заряд, автор объясняет увеличением теплопритока от воздушной среды к капле под действием электрического поля (при условии положительного градиента температуры между каплей топлива и воздушной средой).

Об усилении конвективного теплообмена в жидкостях и газах под действием электрического поля также отмечается в работах /6, 102, 138/. Авторы этих работ считают, что одной из возможных причин интенсификации теплообмена является возникновение электрического ветра в результате движения заряженных частиц под действием электрического поля. При этом отмечается, что степень влияния электрического поля на условия теплообмена зависит не только от электрических свойств молекул жидкости и градиента температур в объеме, но и от типа поля, его однородности и напряженности.

Бабоев, Болога и Семенов /6/, проведя сравнительные исследования по влиянию постоянного и переменного электрических полей на конвективный теплообмен в трансформаторном масле, отмечают, что при E до 312 кВ/см эффективнее постоянное поле. С дальнейшим повышением напряженности лучшие результаты дает переменное поле: так отношение коэффициентов теплоотдачи с полем и без поля $\alpha_E/\alpha_0 = 5$ достигается при переменном напряжении, равном 17 кВ, а при постоянном около 23 кВ.

Рассмотренные выше результаты опытов, а также экспериментальные данные Степанова и Дьячкова /102/ убедительно свидетельствуют об интенсификации теплообмена как в газах, так и в жидкостях, посредством наложения на них электрического поля.

Кроме того, здесь следует обратить внимание еще на одно возможное действие электрического поля на топливо, которое сводится к следующему. Известно, что в электрическом поле всегда существует дополнительная, так называемая пондеромоторная сила, действующая на заряженное тело. Эта сила в неоднородном поле всегда направлена в область большей напряженности. Следовательно, если во впускном трубопроводе двигателя создать неоднородное поле с максимальной напряженностью по его оси, то можно ожидать интенсификации процесса испарения с поверхности топливной пленки. Об этом, в частности, отмечается и в работе Ревзина /89/.

Положительное влияние электрической обработки топлива на процесс его сгорания получено в опытах Степанова и Дьячкова, а также Салимова с соавторами /95/, выполненных на открытом турбулентном пламени. Как отмечают авторы, в результате подведения высокого напряжения к распылителю горелки происходила значительная интенсификация процесса горения, что выражалось в увеличении температуры пламени, полноты и скорости сгорания топлива, концентрации ионов в пламени, а также в некоторых видимых изменениях формы, структуры, стабилизации пламени и уменьшении копоти пламени.

Основной и решающей причиной интенсификации процесса сгорания эти авторы считают электризацию сжигаемого топлива, обеспечивающую улучшение и ускорение подготовки горючей смеси за счет более тонкого диспергирования и более быстрого испарения капель, а также иницирующего воздействия ионизированных молекул топлива на протекание окислительных реакций.

Это предположение подтверждается дальнейшими опытами Салимова и др. /95/, где в условиях безмоторной установки было зарегистрировано заметное снижение температуры появления холодно-

го пламени для бензина, керосина и дизельного топлива при их электризации. Это обстоятельство свидетельствует о более интенсивном протекании окислительных реакций низкотемпературного воспламенения вследствие активизирующего воздействия ионизированных молекул топлива на кинетику предпламенных реакций.

В заключение рассмотрения этого вида обработки необходимо отметить, что конечный результат от электрической обработки топлива существенным образом зависит от способа организации электрического поля. Этот вывод вытекает из работы /5/, где показано, что обработка жидких топлив электрическим полем, образованным плоскими электродами (однородное поле), не влияет на скорость сгорания. В то же время обработка топлива в неоднородном поле приводит к заметному увеличению скорости сгорания топлива.

1.2.3. Электрическая обработка топливовоздушной смеси

Согласно литературным данным возможны следующие виды обработки топливовоздушной смеси: магнитным полем /104/, электростатическим /71/ и в поле коронного разряда /87,95,104/.

Из перечисленных видов обработки наиболее широко используется коронный разряд, который образуется вокруг проводника, помещенного в потоке топливовоздушной смеси при подаче на него высокого напряжения.

Согласно мнению Салимова и его соавторов /95/, при обработке топливовоздушной смеси в поле коронного разряда происходит как электризация топлива, так и ионизация воздуха с образованием озона O_3 , т.е. образуется значительное количество активных частиц, которые легко вступают в реакцию с исходными или промежуточными продуктами без какой-либо значительной активации, а это, как уже отмечалось выше, способствует интенсификации процесса

зажигания и сгорания, что в конечном случае должно привести к улучшению показателей рабочего процесса двигателя.

Подтверждением сказанному является ряд работ /59, 71, 92, 104/, в которых получено положительное влияние предварительной ионизации топливовоздушной смеси на параметры процесса сгорания и выходные показатели двигателя.

Так Миятой /71/ в условиях реального двигателя в результате приложения высокого напряжения на электрод, размещенный внутри камеры сгорания, получено значительное (в 1,5 раза) увеличение эффективной мощности двигателя. При этом напряжение подавалось на электрод в течение процессов наполнения и сжатия и составляло 10 кВ. Этот прирост мощности автор объясняет за счет увеличения количества ионов в горючей смеси, которые облегчают условия воспламенения горючей смеси и приводят к возрастанию скорости ее горения.

Аналогичный прирост мощности, но значительно меньший (на 6...7%), был получен Чхеидзе /104/ в результате применения специальной "ионосвечи", которая обеспечивала предварительную ионизацию топливовоздушной смеси непосредственно в области искрового промежутка. Малым объемом ионизации смеси, оказывающим влияние в первую очередь на условия зажигания, по-видимому, можно объяснить меньший прирост мощности по сравнению с опытами Мията, где, по мнению самого автора, имела место ионизация топливовоздушной смеси в значительном объеме камеры сгорания.

Положительное влияние предварительной ионизации смеси в зоне искрового промежутка на величину и разброс пробивных напряжений $U_{пр}$ отмечается в работах Загрязькина и Мещерякова /31, 32/. Льюисом и Крейтцем /III/ получено значительное снижение температуры зажигания метано-воздушной смеси в результате пропуска-

ния одного из компонентов смеси через электрический разряд непосредственно перед смешением с другим компонентом. Авторы делают заключение, что действие искры создает некоторый активный носитель (электрически заряженные ионы), который, попадая в поток метана, делает последний более легко воспламенимым.

Результаты опытов Семенова с сотрудниками /137/ и Налбандяна /114/ также свидетельствуют о расширении области самовоспламенения газовой смеси при дополнительной ее ионизации в результате пропускания через искровой разряд или присадки атомов кислорода.

Известно, что проблема повышения экономичности и снижения токсичности ОГ ДВС в значительной степени может быть решена за счет сжигания в двигателях обедненных смесей. Однако, этому препятствует ухудшение условий воспламенения, что приводит к неустойчивой работе двигателя и к пропускам зажигания. В связи с этим получает значение работа /106/, где в результате предварительной ионизации топливовоздушной смеси специальными ионизаторами, установленными в камере сгорания, удалось расширить предел устойчивой работы двигателя до $\alpha_{пред} = 2$.

Значительный эффект от предварительной обработки однородной топливовоздушной смеси в поле коронного разряда был получен Салимовым с соавторами /95/, где в условиях трубы было зарегистрировано значительное уменьшение дымления, увеличение полноты сгорания, сокращение длительности начальной фазы сгорания и увеличение скорости распространения фронта пламени $U_{пл}$. Так, для бензина А-72 наблюдалось увеличение $U_{пл}$ с 8,7 до 20 м/с; для А-66 с 10,7 до 37,5 м/с и для бензина А-95 с 16,9 до 18,4 м/с.

Позднее в этом же направлении были проведены опыты Майоровым /59/ и Викторовым с сотрудниками /15/, которые получили

аналогичный эффект увеличения скорости сгорания топливовоздушной смеси в результате ее электрической обработки полями высокой напряженности.

Увеличение $U_{пл}$ авторы работы /95/ объясняют образованием значительного количества активных частиц в горючей смеси, в том числе и озона, что приводит к повышению ее реакционной способности, а, следовательно, и к возрастанию скорости химической реакции.

Косвенным доказательством положительной роли ионизации топливовоздушной смеси на процесс сгорания могут служить результаты исследований /19,42,44,137/, в которых улучшение условий воспламенения достигалось увеличением содержания активных частиц в смеси путем присадки к ней химически активного озона и кислорода.

Приведенные выше экспериментальные данные подтверждают мысль о роли ионизированных атомов и молекул как активных центров химической реакции в процессах воспламенения и распространения пламени. Однако имеющиеся данные вышеупомянутой работы Чхеидзе /104/, полученные им в условиях реального двигателя при обработке горючей смеси на впуске как магнитными, так и электрическими полями повышенной напряженности также, как и при обработке топлива, не привели к приросту мощности двигателя по возможным причинам, изложенным на стр.33. Это обстоятельство на данном этапе не позволяет сделать окончательный вывод о целесообразности использования электрической обработки топливовоздушной смеси с целью улучшения показателей работы двигателя, и поэтому требуется более комплексная и совершенная экспериментальная проверка.

1.2.4. Ионизация и озонирование воздуха, поступающего в двигатель

Как уже ранее отмечалось, при электрической обработке топливовоздушной смеси в поле коронного разряда в результате её ионизации происходит образование значительного количества активных частиц, в том числе и озона O_3 , являющегося сильным окислителем.

Из теории теплового взрыва следует, что вещества, ускоряющие медленную реакцию окисления углеводородов, "активаторы", должны также изменять условия воспламенения /II,97/. Эти изменения должны заключаться в уменьшении периода задержки воспламенения и снижении температуры воспламенения. Действие таких "активаторов", по-видимому, главным образом, заключается в облегчении образования начальных активных центров цепной реакции.

Применение озона как одного из активаторов в процессах медленного окисления исследовалось в ряде работ. Как было обнаружено Налбандяном с сотрудниками /45/, при окислении метана действие озона проявляется в условиях, когда в результате диссоциации O_3 образуется атомарный кислород, что заметно наблюдается при температуре выше $1000^{\circ}C$. Однако, как показали Пиз и Шуберт /135/, уже при $300^{\circ}C$ озон непосредственно взаимодействует с углеводородами.

В работе Каменецкой и др. /44/ исследовалось влияние озона на воспламенение газообразных смесей некоторых углеводородов с кислородом. Исследования проводились в реакционном сосуде путем частичной замены кислорода озоном с таким расчетом, чтобы общее количество атомов кислорода в смеси оставалось постоянным. В результате оказалось, что озон сокращает период задержки воспламенения. Величина эффекта возрастает с увеличением содержания O_3 в смеси и понижением температуры. Так, при температуре порядка

500°С действие его невелико.

Такое же действие озона, но уже на жидкое (дизельное) топливо, было получено в опытах Казанцева, Сидорова и Калашникова/43/ при пропускании озона через топливо, где происходило его растворение. При этом было зарегистрировано снижение температуры самовоспламенения и повышение полноты сгорания топлива. Наблюдаемый эффект авторы объясняют двумя причинами. Во-первых, озон, растворяясь в топливе, частично реагирует с его молекулами, образуя при этом нестойкие соединения и свободные валентности (радикалы). Пары такого топлива уже с момента их образования содержат значительное количество активных центров, что способствует интенсивному ускорению цепной реакции самовоспламенения при более низких температурах. Во-вторых, озон, не вступивший в реакцию с молекулами топлива при его растворении, выделяется в дальнейшем при испарении топлива и разлагается под действием высокой температуры с образованием атомарного кислорода. Так как атомарный кислород гораздо активнее молекулярного, то первоначальные активные центры образуются с большей скоростью и при более низких температурах. Об этом свидетельствует и анализ газов, который в отсутствие горения показал, что топливо, обработанное озоном, частично окисляется (концентрация $\text{CO} = 2\%$), в то время как у обычного топлива $\text{CO} = 0\%$.

Этими же авторами были проведены моторные исследования на дизеле /42/, где в результате подмешивания O_3 к воздуху, поступающему в двигатель, было получено уменьшение периода задержки воспламенения на 25%. Авторы объясняют это химическим фактором и отмечают при этом, что эффект от присадки O_3 может быть получен при условии, если между обработкой топлива озоном и его сжиганием в двигателе пройдет не более двух-трех часов. Авторы счи-

тают, что за более длительное время озон успевает прореагировать с топливом, образовав при этом кислородосодержащие соединения, играющие незначительную роль в химических реакциях воспламенения.

По данным Гаврилова /20/ и Каменецкой с соавторами / 44/, присадка O_3 к топливовоздушной смеси приводит к снижению энергии активации. Так, для бутановоздушной смеси без присадки O_3 энергия активации составляет 44 ккал/моль, при добавке озона в количестве 2,5 – 30 ккал/моль, а добавка 7,4% O_3 к указанной смеси уже приводит к отсутствию задержки воспламенения.

В условиях реального двигателя электрическая активация воздуха, поступающего в двигатель, т.е. увеличение в нем доли химически активных частиц может быть обеспечено различными способами.

Так, в /116,125,128/ для обогащения воздуха озоном предлагается использовать тихий электрический разряд, а в / 124/ для обогащения воздуха кислородом – магнитный способ. Последний основан на парамагнитных свойствах кислорода и диамагнитных свойствах азота. В устройствах этого типа вследствие отталкивания молекул азота и притяжения молекул кислорода постоянными магнитами, установленными по ходу воздушного потока, центральная струя его будет обогащаться кислородом, а обедненный воздух отводится наружу в атмосферу.

Другой способ обогащения воздуха кислородом O_2 предлагается автором /126/, где кислород может быть получен либо путем разложения химических соединений типа $K_2S_2O_{11}$, $K_2Rh_2O_{11}$; CaO_2 , $K_4P_2O_7 \cdot 3H_2O$ и т.п. при подогреве от электрической спирали, питаемой от аккумуляторных батарей, либо электролизом дистиллированной воды, смешанной с 10% H_2SO_4 .

В ряде патентов /119,129,130,132-134/ предлагается озонирование воздуха, поступающего в двигатель, осуществлять в устройствах-озонаторах, размещаемых в корпусе воздушного фильтра или в других местах впускной системы. В качестве источников питающего напряжения могут быть использованы источники переменного или импульсного напряжения величиной до 10-20 кВ. Производительность озона в подобных устройствах составляет около 1,0 г O_3 в минуту на 1 м³ воздуха, входящего в двигатель, и считается достаточной для обеспечения хорошего качества процесса сгорания.

Для ионизации воздуха, поступающего в двигатель с целью улучшения процесса сгорания, некоторые авторы предлагают использовать искровой разряд. Так, в /121/ предлагается использовать полость под крышкой прерывателя-распределителя системы зажигания, где происходит ионизация воздуха под действием искровых разрядов. Далее ионизированный воздух за счет разрежения в диффузоре по токонепроводящему газопроводу поступает в диффузор карбюратора и ионизирует основной входящий поток воздуха.

Аналогичный вариант, но с размещением искровых промежутков непосредственно во впускной системе двигателя, связанных с системой зажигания, предлагается в /131/.

Реальность подобных устройств подтверждается опытами Викторова, Нефедовой и Попова /15/, где в результате предварительной ионизации воздуха искровым разрядом от индукционной катушки зажигания с последующим сжиганием в нем топлива было получено увеличение скорости его сгорания на 25...30%. При этом авторы отмечают, что наблюдаемый эффект в значительной степени будет определяться влажностью воздуха.

Такое же действие искрового разряда на условия воспламенения газозвудушных смесей было получено в уже ранее упоминавших-

ся работах Льюиса с Крейтцем /III/ и Семенова с сотрудниками /I37/.

Также возможна ионизация воздуха, поступающего в двигатель, за счет использования коронного разряда, или облучением его γ, β или α лучами в специальных устройствах /II7, I23, I27/.

Так, авторами патента /I23/ для повышения мощности карбюраторного двигателя предлагается часть воздуха, поступающего в двигатель, ионизировать продуванием его через ячейку, содержащую радиоактивное вещество, например, урановую, радиевую или ториевую руду.

Таким образом, приведенные данные позволяют предполагать, что ионизация и озонирование воздуха, поступающего в двигатель, может оказать заметное влияние на условия воспламенения и сгорания топливовоздушной смеси, главным образом, вследствие увеличения относительной доли образования активных центров химической реакции.

I.2.5. Влияние электрической обработки свежего заряда на параметры процесса смесеобразования

До сих пор речь шла, в основном, о влиянии электрической обработки топлива и топливовоздушной смеси на процесс их сгорания, исходя из химического фактора. Кроме того, при всех видах электрической обработки свежего заряда (ионизации воздуха, электризации топлива и обработки топливовоздушной смеси) помимо ионизации, приводящей к увеличению концентрации активных частиц в смеси, оказывающих влияние на условия воспламенения и сгорания, будет происходить и электризация капель распыленного топлива, т.е. образование на них электрических зарядов. В этом случае на каплях, кроме молекулярных сил, направленных внутрь и опре-

деляющих поверхностное натяжение σ или, другими словами, прочность капли, будут иметь место и электрические силы, направленные в противоположную сторону и уменьшающие прочность капли /81,95/. Вследствие этого, закономерности поведения заряженных капель в ряде процессов будут отличными от незаряженных.

Во многих технологических процессах, где применяются диспергированные жидкости, электризация их приводит к заметному улучшению эффективности их использования /8,9,14, 17,39,52,75, 95/.

Положительные эффекты, связанные с электризацией распыливаемых жидкостей, используются во многих областях техники, но наиболее широко при электроосаждении /14,17,39,51,52,75/, например, в таких процессах, как электроокраска и электроэмалирование /14,51,53,54,75,76/.

Электризация жидкостей при их распыливании применяется также в биологии, сельском хозяйстве и медицине /16,48,52,80,101/.

Явление электризации распыливаемых жидкостей в электрическом поле лежит в основе электронно-ионной технологии ЭИТ /14/, основанной на использовании силового взаимодействия электрических полей и зарядов, переносимых материалами. Наиболее широко ЭИТ используется при электроокраске, в результате чего уменьшается потеря краски и улучшается качество и прочность покрытий /75/. Так, при окраске изделий путем пневматического распыливания краски и переноса капель к изделию потоком воздуха из распылителя, потеря краски (которая не попадает на изделие) составляет около 50%, в то же время при распыливании краски в условиях электрического поля потеря краски не превышает 5%.

Следует заметить, что неоспоримые достоинства, которые заложены в ЭИТ, до сих пор еще не используются в ДВС для совер-

шенствования процессов смесеобразования и сгорания.

Первые попытки в направлении улучшения тонкости и однородности распыливания жидкостей и, в частности, топлив за счет их электризации были предприняты в ряде советских /4,87,89,95/ и зарубежных исследований /78,107/. К сожалению все эти исследования, кроме опытов Ревзина /87/, были поставлены в условиях безмоторных установок, далеко не соответствующих условиям впускной системы реального двигателя. К тому же полученные данные по влиянию электрического поля на поверхностное натяжение топлива противоречивы /46,90,95/ (начиная с некоторого значения напряженности электрического поля) и практически несопоставимы из-за разных способов наложения электрического поля и методик измерения величины **б**.

Также в этих исследованиях не был выяснен вопрос о влиянии характера и полярности прикладываемого напряжения, а также способа электризации топлива на процесс его истечения и поверхностное натяжение. Все это не позволяет сделать окончательный вывод о целесообразности практического использования электризации топлива для улучшения процесса смесеобразования.

Наиболее ценной и, пожалуй, пока единственной работой в плане исследования влияния электризации топлива на качество процесса смесеобразования является работа Ревзина /87,89/, в которой исследовалось влияние электрической обработки топливовоздушной смеси в поле коронного разряда на процесс смесеобразования в условиях близких к реальному двигателю. В результате было зарегистрировано уменьшение выпадания топлива в пленку на 27% и уменьшение степени неравномерности распределения смеси по отдельным ветвям впускного трубопровода на 9%. Полученный эффект автор объясняет снижением поверхностного натяжения бензина в резуль-

тате электризации капель топлива, что приводит к уменьшению сил сцепления между молекулами топлива и, следовательно, к улучшению тонкости его распыливания.

Данные безмоторных исследований хорошо согласуются с его опытом, проведенным на полноразмерном двигателе УАЗ-451 /87/, где в результате электрической обработки горючей смеси в поле коронного разряда было отмечено снижение концентрации CO в ОГ на некоторых режимах его работы.

Однако эти опыты нельзя считать достаточными для решения вопроса о целесообразности практического использования электризации в карбюраторных двигателях, т.к. в них не определена степень влияния ее на показатели рабочего процесса и, в первую очередь, на его топливную экономичность. К тому же эти опыты были проведены без исследования процесса сгорания (индицирования, регистрации скорости сгорания, цикловой неравномерности и т.п.) и в них был исследован только один из возможных способов электризации.

Для окончательного выяснения целесообразности электризации необходимы более комплексные исследования рабочего процесса двигателя и, в частности, процесса сгорания, начиная с условий пробоя искрового промежутка свечи зажигания и включая все стадии его протекания при различных способах электризации.

1.3. Выводы и постановка задач исследования

Из анализа по электрическим воздействиям на рабочий процесс поршневых двигателей и рассмотрения особенностей смесеобразования и сгорания в них можно сделать следующие выводы:

I. Анализ процессов смесеобразования и зажигания в карбюраторных двигателях показал, что они имеют ряд существенных не-

достатков, приводящих к заметному ухудшению основных показателей рабочего процесса, и что традиционные методы в большинстве случаев не приводят к ощутимому их улучшению.

2. Для дальнейшего совершенствования процессов смесеобразования и сгорания необходимо разработать принципиально новые способы, позволяющие, в первую очередь, улучшить тонкость и однородность распыливания топлива на частичных нагрузках, и обеспечить надежность и стабильность зажигания при работе двигателя на бедных смесях.

3. Одним из способов, не требующий увеличения скорости воздушного потока и повышения энергии искрового разряда, может быть электрическая обработка свежего заряда (воздуха, топлива и топливовоздушной смеси), которая оказывает положительное влияние на процессы смесеобразования и сгорания следующим образом:

- ионизация и озонирование воздуха, поступающего в двигатель, приводит к снижению температуры и периода задержки воспламенения, а также к уменьшению энергии активации;

- электрическая обработка топлива, вследствие его электризации и снижения кажущегося поверхностного натяжения, обеспечивает увеличение скорости истечения, уменьшение диаметра капель и увеличение скорости их испарения;

- электрическая обработка топливовоздушной смеси приводит к уменьшению выпадания топлива в пленку и снижению неравномерности распределения горючей смеси по цилиндрам, а также к увеличению скорости и полноты сгорания топлива.

4. Приведенные данные свидетельствуют о том, что в условиях реального двигателя электрическая обработка свежего заряда может явиться эффективным средством улучшения рабочего процесса карбюраторного двигателя и, в частности, его топливной экономич-

ности.

5. Электрическая обработка свежего заряда повышает однородность и реакционную способность топливовоздушной смеси в результате улучшения тонкости распыливания топлива и образования в ней значительного количества химически активных частиц.

6. Можно предположить, что наибольший эффект из всех рассмотренных видов электрических воздействий на рабочий процесс ДВС может быть получен от электрической обработки свежего заряда.

7. Положительные результаты, полученные различными авторами по интенсификации процесса горения в результате наложения электрического поля на зону горения, представляют собой достаточно реальную основу для его практического использования, например, в различного рода устройствах (печах, топках), использующих пламенные горелки. В двигателях же внутреннего сгорания получение аналогичного эффекта посредством наложения электрического поля на зону горения является проблематичным, во-первых, из-за сложности его организации в камере сгорания и, во-вторых, из-за достаточно высокой скорости горения топливовоздушной смеси.

8. Одно из преимуществ электрической обработки свежего заряда, по сравнению с магнитной и электромагнитной обработкой, заключается в относительно простой её конструктивной схеме и несложности организации на двигателе без каких-либо существенных изменений в его конструкции. Другое достоинство этого вида обработки состоит в том, что все вещества как проводящие, так и диэлектрические, к которым относятся и топлива, могут быть заряжены и затем подвергнуты силовому воздействию со стороны внешнего электрического поля, что дает возможность регулирования потоком заряженных капель в нужном направлении.

9. В настоящее время практически отсутствуют теоретические и экспериментальные данные о степени влияния электрической обработки свежего заряда как на процессы смесеобразования и сгорания, так и на входные показатели двигателя при различных способах обработки. Немногочисленные опубликованные материалы по данному вопросу отрывочны, противоречивы, а во многих случаях спорны, и поэтому не позволяют сделать окончательный вывод о целесообразности практического использования электрических воздействий на рабочий процесс двигателя с целью улучшения его показателей.

Несмотря на некоторую противоречивость результатов, полученных различными авторами, и трудность на этом этапе четкого теоретического обоснования влияния электрических воздействий на рабочий процесс двигателя, приведенный выше экспериментальный материал достаточно убедительно свидетельствует о значительном влиянии отдельных видов электрической обработки свежего заряда на некоторые показатели двигателя, что дает основание считать целесообразным проведение дальнейших исследований в этом направлении.

Исходя из вышеизложенного, в настоящей работе ставится задача определения степени влияния электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя и, в первую очередь, на его топливную экономичность при работе на частичных нагрузках, а также целесообразности ее практического использования.

Учитывая важность и актуальность проблемы охраны окружающей среды, было признано целесообразным также оценить влияние электрической обработки свежего заряда и на токсичность ОГ.

Ограниченность экспериментальных данных по влиянию величины, характера, полярности прикладываемого поля и способа электриза-

ции топлива на процесс его истечения и поверхностное натяжение **Б**, а также необходимость проверки имеющихся противоречивых данных по влиянию электрического поля на **Б**, обусловило проведение предварительных безмоторных исследований. Для этого потребовалось решить ряд следующих вопросов:

- разработать методику экспериментального исследования по влиянию электрического поля на режим истечения бензинов;
- создать источники высокого напряжения с различным характером выходного напряжения;
- разработать способ оценки поверхностного натяжения бензинов при их электрической обработке (электризации);
- разработать методику определения знака и величины заряда, переносимого каплями, для сравнительной оценки эффективности различных способов электризации бензинов при их истечении;
- создать безмоторную установку для проведения указанных исследований.

На основании результатов, полученных на безмоторной установке, дальнейшие исследования по определению степени влияния электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса двигателя необходимо провести в условиях реального двигателя.

Для этого необходимо:

- разработать методику экспериментальных исследований по оценке влияния электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса двигателя, характеризующие его топливную экономичность и токсичность ОГ, а также условия воспламенения и сгорания топливовоздушной смеси;
- создать моторную установку, обеспечивающую различные виды электрической обработки свежего заряда и их сочетания, и разра-

ботать соответствующую регистрирующую аппаратуру для оценки оказываемого влияния электрической обработки на вышеуказанные показатели рабочего процесса двигателя;

- рассмотреть особенности процессов смесеобразования и зажигания в условиях электрического поля;

- исследовать влияние различных видов электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя;

- провести комплексное исследование наиболее эффективного вида электрической обработки свежего заряда на основные показатели рабочего процесса двигателя.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ИСТЕЧЕНИЯ БЕНЗИНОВ НА БЕЗМОТОРНОЙ УСТАНОВКЕ В УСЛОВИЯХ ПРИЛОЖЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Основной целью данного исследования является получение отмеченных в параг. I.3. недостающих экспериментальных данных и проверка имеющихся противоречивых результатов по влиянию электрического поля на процесс истечения топлив и их поверхностное натяжение. Это потребовало создание экспериментальной установки, разработки методики исследований и специальной регистрирующей аппаратуры, а также проведение комплексного исследования по влиянию электрического поля на процесс истечения автомобильных топлив.

Исследования проводились на автомобильных бензинах А-72 и А-76, отличающихся между собой диэлектрической проницаемостью ϵ .

2.1. Методика исследований и экспериментальная установка

Ввиду практической сложности получения интересующих данных в условиях впускной системы двигателя, исследования на этом этапе выполняли на безмоторной установке, но с организацией электрического поля для обработки топлива близкой к условиям его реализации в реальном карбюраторе. На рис. 2.1. показана принципиальная схема экспериментальной установки, а ее общий вид - на рис. 2.2.

Для оценки величины поверхностного натяжения σ при выбранной организации электрического поля, т.е. при непосредственном наложении последнего на истекающее топливо, был выбран метод "счета капель", который позволяет установить действительный эффект от воздействия поля на σ в условиях истечения топлива.

Метод "отрыва кольца" с использованием торсионных весов I (рис.2.3) не позволяет определить действительную величину изменения ϵ , поскольку не учитывает силовое взаимодействие электрического поля с заряженной каплей. Кроме того, неизбежны дополнительные погрешности, связанные с электризацией или поляризацией кольца 2 (в зависимости от применяемого материала) под действием заряда обработанного топлива.

Определение зависимости коэффициента поверхностного натяжения топлива от величины приложенного напряжения производилось следующим образом.

Топливо в цилиндре 6 (см.рис.2.I), в котором с помощью бачка 7 поддерживается постоянный уровень, через канал игольчатого вентиля 5 поступает к отверстию в жиклере 4 и под действием собственного веса вытекает из него. Жиклер 4, одновременно являющийся и электродом, выполнен в виде усеченного конуса, нижняя часть которого отшлифована, что способствует формированию капли. Посредством вентиля 5 устанавливается капельный режим истечения определенного расхода. Отрыв капли происходит в тот момент, когда ее вес становится равным или превысит силу поверхностного натяжения, которая удерживает каплю на электроде 4. На некотором расстоянии l от электрода 4 размещали второй электрод 3, выполненный в виде полого цилиндра. Напряжение подводилось к электродам 3 и 4 через клеммы 8,9 от высоковольтного источника постоянного тока, которое контролировалось с помощью киловольтметра С-96. Отрывающиеся от электрода 4 капли считали и собирали в мерную бюретку I с ценой деления 0,1 мл до момента образования одного и того же объема топлива.

До начала непосредственного эксперимента устанавливали стабильный режим каплеобразования, после чего к электродам 3 и 4

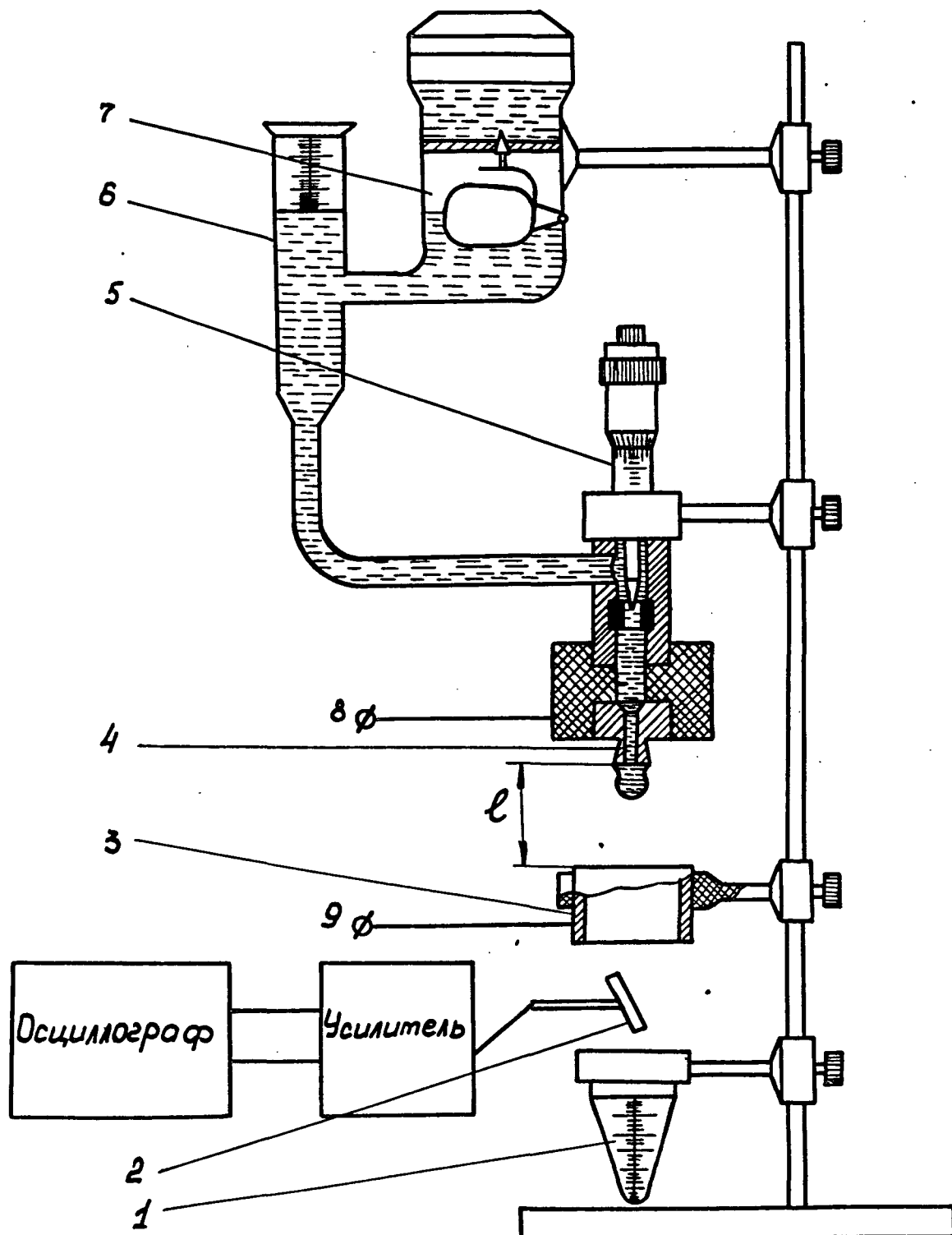


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки

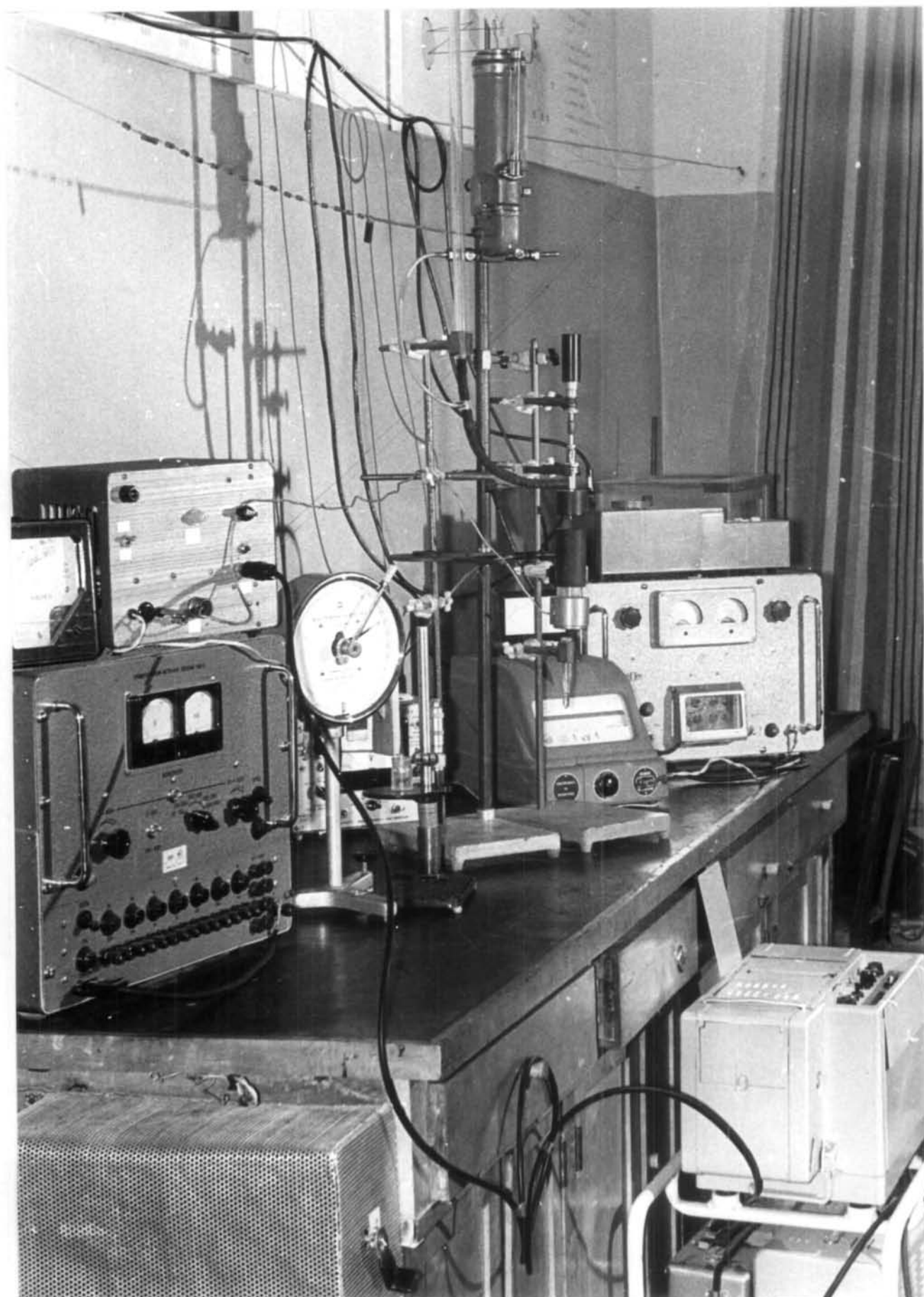


Рис.2.2. Общий вид безмоторной установки

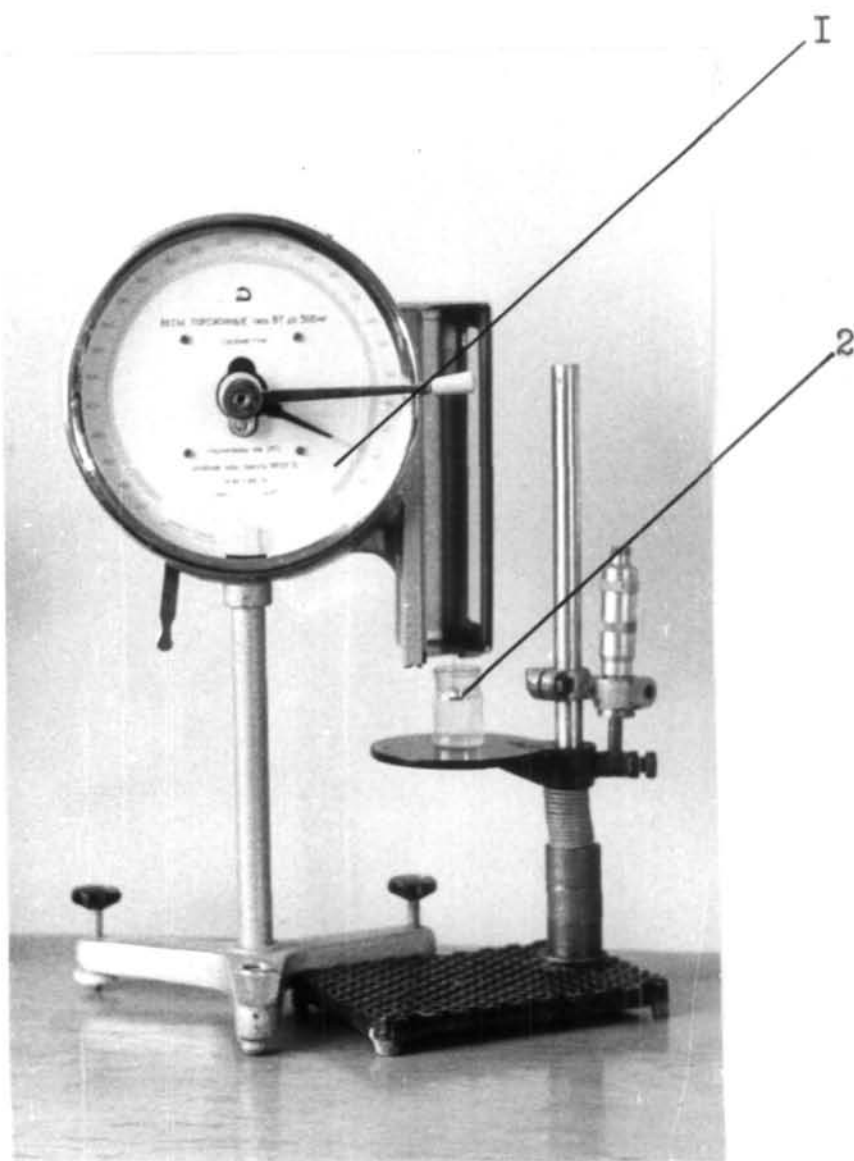


Рис.2.3. Измерение поверхностного натяжения методом "отрыва кольца" с использованием торсионных весов

подводили напряжение. При этом процесс каплеобразования на электроде 4 изменялся, т.е. увеличивалось количество капель и соответственно изменялись их диаметр и объем. Если учесть, что объем собираемого топлива в бюретке I выдерживался строго постоянным, то в этом случае изменение процесса каплеобразования является следствием уменьшения коэффициента поверхностного натяжения, который можно найти из соотношения:

$$\sigma_u = \sigma_0 \frac{n_0}{n_u}, \quad (2.1)$$

где σ_u, n_u и σ_0, n_0 - поверхностное натяжение и количество капель соответственно в присутствии поля и без него.

Поверхностное натяжение σ_0 определялось по формуле /55/

$$\sigma_0 = \frac{v \rho g}{n_0 2 \pi r}, \quad (2.2)$$

которая справедлива для условия, что в момент отрыва капли ее вес $\frac{v \rho g}{n_0}$ равен силе поверхностного натяжения $2 \pi r \sigma$ /55/,

где n_0 - количество капель бензина с плотностью ρ , образующих объем v ;

$2 \pi r$ - длина окружности нижней части электрода 4, от которого отрываются капли;

g - ускорение силы тяжести.

В задачу исследования входило также определение знака и величины заряда, транспортируемого каплями, по методике, изложенной в следующем параграфе.

2.2. Выбор способа определения знака и величины заряда, переносимого топливом, и аппаратура для его осуществления

Экспериментальное определение величины заряда, транспортируемого каплями бензина, в условиях безмоторной установки было вызвано необходимостью оценки эффективности различных способов электризации бензина при его истечении. При этом нужно было решить две задачи: измерение суммарного заряда, переносимого бензином в процессе его истечения, и измерение заряда отдельных капель.

Заряд отдельных капель топлива является основой как для сравнительной оценки эффективности различных способов электризации, так и для определения наиболее оптимальных характеристик и параметров прикладываемого напряжения, а также для определения влияния расхода и сорта бензина на степень его электризации.

Для измерения зарядов отдельных частиц на практике чаще всего используются следующие три способа: метод с улавливающей ячейкой (цилиндром) Фарадея, индукционный метод и метод, основанный на отклонении заряженной частицы в электрическом поле.

При методе отклонения контролируемые заряженные частицы перемещаются одновременно и под действием силы тяжести, и под действием искусственно созданной силы электрического поля. По смещению частиц под действием этих сил судят об их заряде. Смещение частиц можно наблюдать, например, в микроскоп или фотографировать траектории их движения /14/.

К недостаткам метода измерения заряда по отклонению заряженных частиц в электрическом поле следует отнести: невозможность учета изменения заряда капли при входе и выходе её из

зоны электрического поля, создаваемого двумя заряженными пластинами, неравномерность напряженности электрического поля (а значит, силового действия со стороны поля) и, наконец, значительные трудности конструктивного и методического плана в нашем случае, связанные с исследованием эффективности различных способов зарядки бензинов при их истечении. В связи с этим метод был отвергнут, как не полностью удовлетворяющий задачам эксперимента.

Измерение заряда отдельных частиц улавливанием их в ячейку Фарадея является частным случаем определения суммарного заряда этим способом и рассматривается ниже. Однако поскольку здесь приходится иметь дело с одиночными частицами, обладающими малыми зарядами, то и условия измерения существенно усложняются и, в первую очередь, за счет необходимости в использовании достаточно чувствительных и точных электрометрических измерителей зарядов.

Сущность индукционного метода заключается в регистрации с помощью электрометрического измерителя индукционного заряда, возникающего в кольцевом электроде при пролете через него заряженной частицы. Метод позволяет измерить заряды частиц в диапазоне $3 \cdot 10^{-15} \dots 3 \cdot 10^{-10}$ Кл. Принципиальная схема измерительной установки, работающей по этому методу, показана на рис. 2.4.

Индукционный датчик (рис. 2.4) состоит из верхней I и нижней 3 половин корпуса, соединенных резьбой, и изолированного от корпуса кольцевого электрода 2, в котором при пролете заряженной частицы наводится заряд противоположного знака, регистрируемый электрометрическим измерителем заряда 4.

Суммарный заряд необходим для определения удельного заряда, т.е. величины заряда, приходящегося на единицу объема бензина, и служит для оценки средней степени электризации топлива при струйном его истечении.

Принцип измерения суммарного заряда основан на накоплении заряда капель путем их сбора в специальную ячейку (цилиндр) Фарадея 2 (рис. 2.7), которая представляет собой замкнутое проводящее тело, изолированное от окружающих объектов. При попадании внутрь ячейки заряженных частиц, их заряд передается ячейке и может быть измерен с помощью электрометрического измерителя зарядов. Здесь следует отметить, что на практике в системах с ячейкой Фарадея чаще измеряется не заряд ячейки, а ее потенциал, и по значению потенциала и емкости ячейки подсчитывается заряд. Такой способ определения заряда связан с тем, что электрометрические измерители заряда распространены не столь широко, как электрометрические измерители напряжения.

Для измерения суммарного заряда, переносимого заряженными частицами в движущемся воздушном потоке, может быть использовано измерительное устройство, показанное на рис. 2.5 /14/. Основным элементом этого устройства является пробозаборный датчик 2, вводимый в поток электрозаряженных частиц, которые засасываются через сменный насадок 1 и, оседая на фильтр 3 внутреннего электрода 2, создают разность потенциалов между внутренним 2 и заземленным наружным 4 электродами, которая регистрируется измерителем напряжения 7.

Накопленный заряд будет равен:

$$\sum q = C \cdot U, \quad (2.3)$$

где C – емкость внутреннего электрода вместе с присоединенным к нему измерителем относительно земли;

U – потенциал внутреннего электрода относительно земли.

Определив объем V собранных капель, удельный заряд определится как

$$\bar{q} = \sum q / V. \quad (2.4)$$

Во всех рассмотренных выше способах измерения величины зарядов, кроме метода, основанного на отклонении заряженных час-

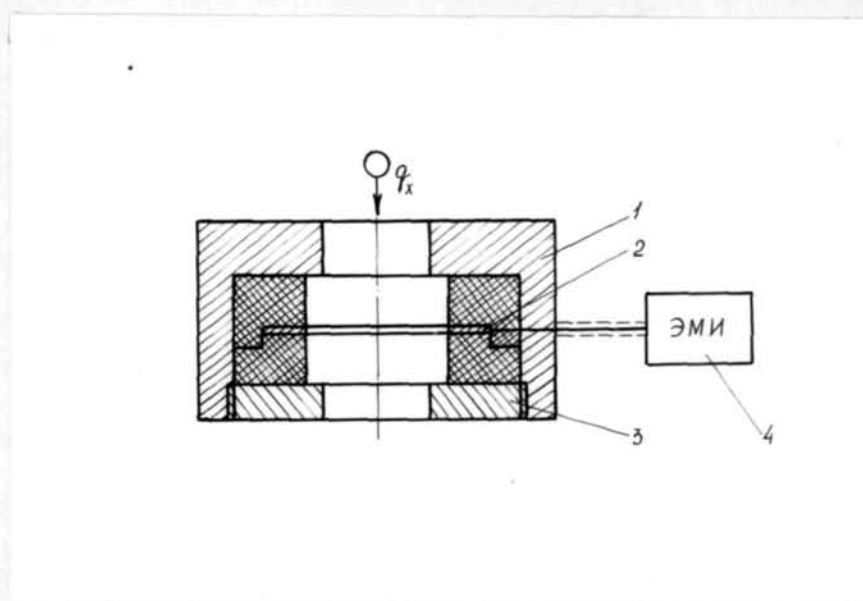


Рис.2.4. Измерение заряда индукционным методом

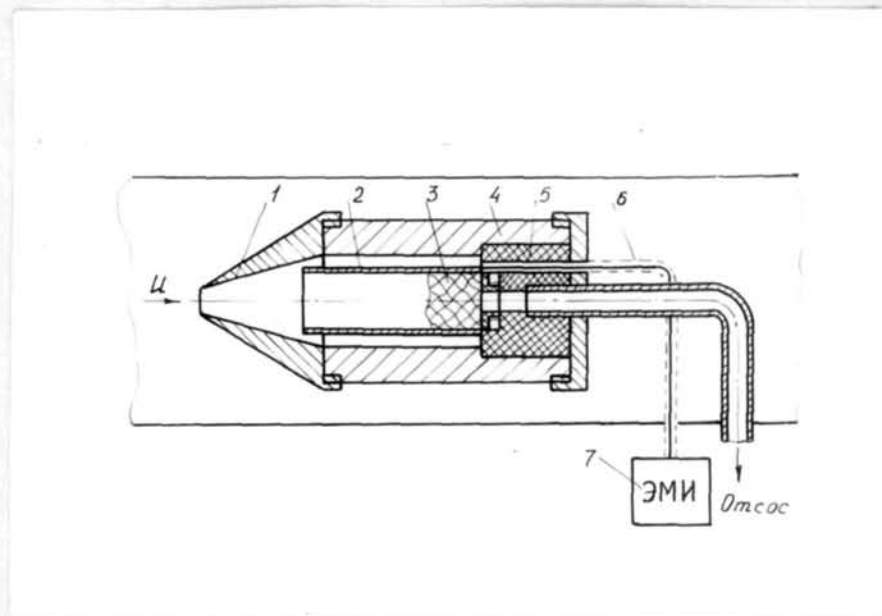


Рис.2.5. Измерение суммарного заряда в движущемся воздушном потоке

тиц в электрическом поле, осуществляется с помощью электрометрических измерителей зарядов, в которых измеряемый заряд с помощью высококачественного конденсатора или конструктивной емкости преобразуется в напряжение, которое затем определяется электрометрическим измерителем напряжения. В современной практике для измерения зарядов применяются электрометрические измерители напряжения с параллельной обратной связью через конденсатор C_0 (рис.2.6). При этом обеспечиваются непрерывность измерений, малое влияние входной емкости электрометрического измерителя на результаты измерений, стабильный коэффициент передачи и ряд других положительных свойств /40/.

В электрометрических измерителях напряжения, используемых для измерений малых зарядов, в качестве входных преобразователей напряжения, практическое применение получили системы на электрометрических лампах, полевых транзисторах и динамических конденсаторах. Первые используются и в широкополосных, и узкополосных измерителях зарядов специализированного назначения, а преобразователи на динамических конденсаторах — только в универсальных электрометрических измерителях для лабораторных целей, когда широкой полосы пропускания не требуется.

Погрешность электрометрических измерителей зарядов обусловлена погрешностями конденсатора и измерителя напряжений. На чувствительных пределах измерений сказываются собственные помехи измерителя. К точности измерителей зарядов редко предъявляются высокие требования, поэтому выходное напряжение в них измеряется встроенными приборами, если измеритель узкополосный или с помощью осциллографа, если измеритель широкополосный. Как правило, результирующая погрешность в электрометрических измерителях заряда лежит на уровне 2...10% /40/.

В нашем случае для измерения знака и величины заряда, перенос-

симого каплями топлива, использовался индукционный способ и способ с использованием ячейки Фарадея как более простые и наиболее полно удовлетворяющие задачам исследования.

Способ с ячейкой Фарадея использовался как для измерения заряда отдельных капель, так и для определения суммарного заряда топлива при струйном его истечении. В первом случае, для увеличения чувствительности измерительной системы из-за малой величины зарядов, переносимых одиночными каплями, в ячейку Фарадея 2 (рис. 2.7) вводилась измерительная пластина 3 (контактный датчик). На нее происходило падение заряженных капель и отдача их заряда пластине, соединенной с электрометрическим измерителем. Индукционный метод применяли для записи процесса на ленту осциллографа, что позволяет получить полную информацию о процессе, то есть количество капель, знак и величину переносимого заряда в зависимости от режима истечения и параметров наложенного поля.

Общая схема измерения заряда топлива в условиях безмоторной установки, основанная на этих способах, показана на рис. 2.7, где в качестве электрометрического измерителя зарядов использовался измеритель заряда ЦНИДИ ПШС-БМ, имеющий встроенный выходной прибор и выход на шлейфовый осциллограф, что позволяет вести непрерывную запись процесса на ленте осциллографа. Указанный измеритель включает в себя входной преобразователь, трехкаскадный усилитель и источник анодного напряжения. В качестве входной лампы преобразователя используется специальная электрометрическая лампа IЭП, обладающая большим входным сопротивлением.

Для возможности выполнения первоначальной калибровки измерителя по заряду и ее периодического контроля, в конструкцию измерителя было встроено калибровочное устройство I (рис. 2.6). Такое устройство представляет собой последовательное соединение источника калибровочного напряжения U_k и калибровочного конденсатора

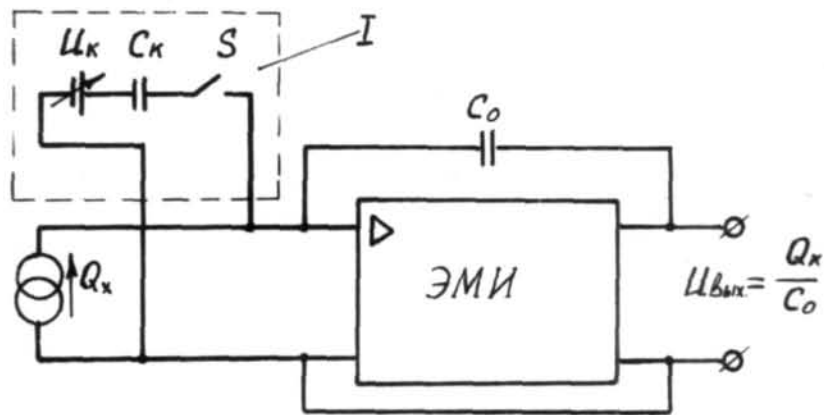


Рис.2.6. Схема электрометрического измерителя зарядов с встроенным калибровочным устройством

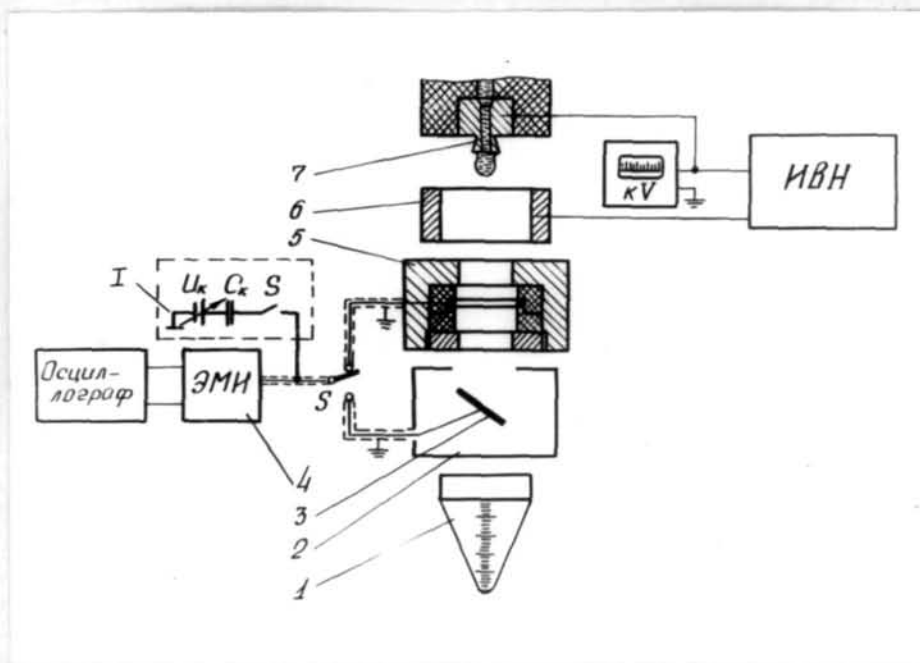


Рис.2.7. Общая схема измерения заряда в условиях безмоторной установки

C_k , которые ключом S могут подсоединяться к входу измерителя параллельно источнику зарядов Q_x . На вход измерителя подается известный заряд $Q_k = U_k C_k$, и тем самым производится калибровка всей электроизмерительной части с учетом емкости кабеля и датчика. В качестве U_k использовалось постоянное напряжение, хотя, в принципе, может быть использовано и синусоидальное или прямоугольное, что может оказаться в ряде случаев более удобным. В частности, имеется возможность проверить частотную характеристику измерителя.

С целью получения меньших погрешностей при измерении зарядов длина соединительных кабелей была минимальной, а для избежания вредного влияния внешних электрических и магнитных полей они были коаксиальными и находились в относительном покое, так как при их колебании в них возникают токи, которые могут внести погрешности при измерении.

2.3. Исследование влияния величины и полярности прикладываемого электрического поля на режим истечения бензинов

Данное исследование проводилось на установке и по методике, описания которых приведено в /27/ и параграфе 2.1.

На рис. 2.8 представлены результаты экспериментальных исследований в виде зависимости изменения относительного коэффициента поверхностного натяжения σ_u/σ_0 бензинов А-76 и А-72 от величины и полярности приложенного напряжения к электродам, при двух расстояниях между ними: $l = 87$ мм и $l = 39$ мм.

Условно считали прямой полярностью подведение высокого напряжения к электроду 4 и соединение электрода 3 с землей (см. рис. 2.1); обратной – противоположное соединение.

Прежде, чем перейти к обсуждению полученных результатов, дадим качественную картину истечения бензина в условиях приложен-

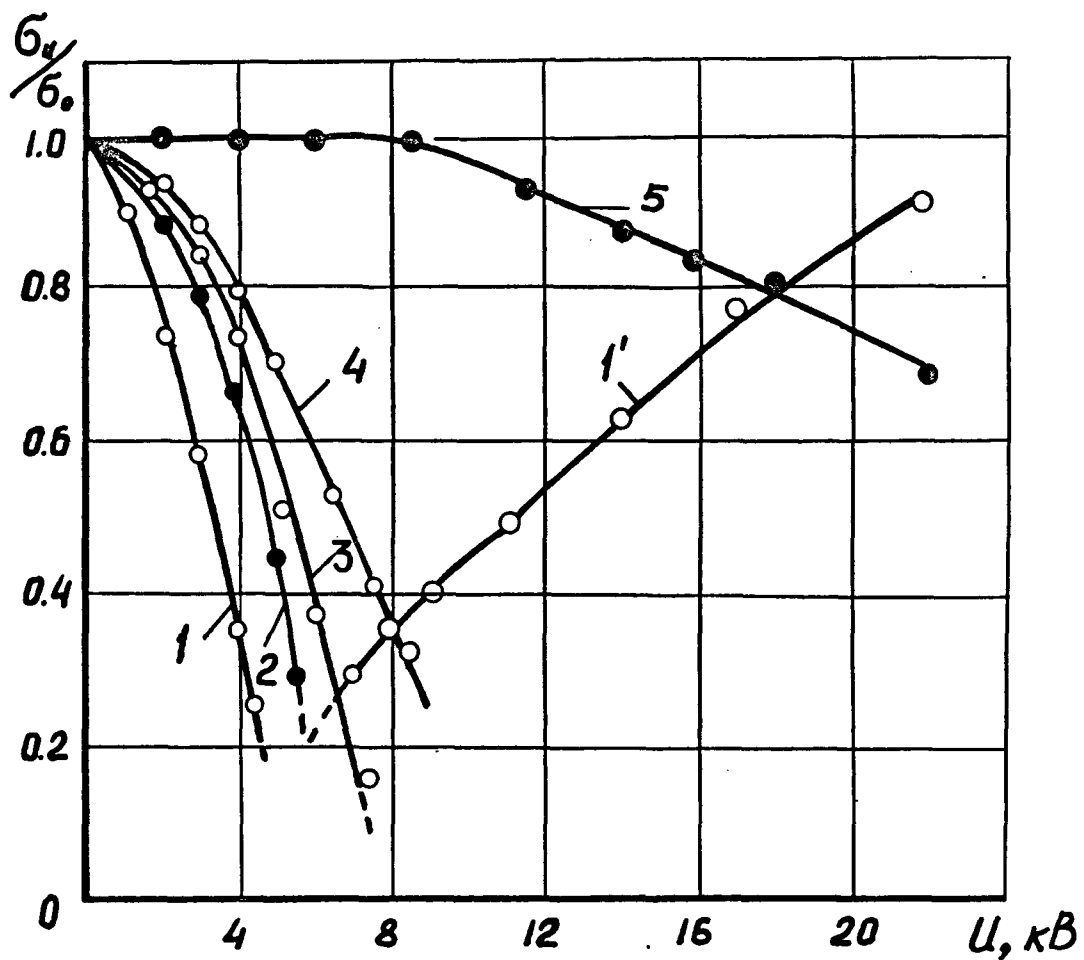


Рис. 2.8. Влияние приложенного напряжения на величину коэффициента поверхностного натяжения бензинов:
 —○— — бензин А-76; —●— — бензин А-72;
 l — расстояние между электродами; 1, 1' — полярность прямая, $l = 39$ мм; 2 — полярность прямая, $l = 87$ мм; 3 — полярность прямая, $l = 87$ мм; 4 — полярность обратная, $l = 39$ мм; 5 — полярность обратная, $l = 87$ мм

ного электрического поля, исходя из визуальных наблюдений, и попытаемся объяснить механизм его воздействия.

С повышением приложенной разности потенциалов к электродам постоянно растет число отрывающихся капель от электрода 4. Затем при некоторой величине напряжения происходит переход от капельного режима истечения к струйному. Напряжение, при котором наблюдается этот режим, назовем критическим $U_{кр}$. Если $U \leq U_{кр}$ имеет место режим с периодическим отрывом капель (нарушение устойчивости поверхности) у основания электрода 4.

Особо следует отметить, что по мере повышения подводимого напряжения выше $U_{кр}$, характер истечения резко меняется, переходя в нитевидный выброс бензина с конца капли, который представляет интерес, в первую очередь, с точки зрения электростатического распыливания. Его появление и существование связано с нарушением устойчивости поверхности на конце капли, а это возможно в том случае, когда напряженность в этом месте будет выше, чем где-либо. Визуальные наблюдения показывают при этом, что капля имеет форму конуса, "вытянутого" по оси вниз, что является следствием силового действия электрического поля на заряженную каплю.

Механизм существования нитевидного выброса можно описать следующим образом. При нарушении поверхности на конце капли появляется как бы небольшой "канал", через который под действием электрического поля происходит истечение бензина. Причем, этот режим будет стабильным в том случае, когда количество бензина, вытекающего через "канал" и поступающего из электрода 4, будет одинаковым. В противном случае, если это условие не соблюдается, т.е. поступление бензина из электрода 4 больше, чем выходит через "канал", будет происходить постепенное увеличение капли. В момент, когда ее вес превысит силу поверхностного натяжения, капля отрывается вместе с нитевидным выбросом, после чего процесс бу-

дет повторяться. С дальнейшим повышением напряжения нитевидный выброс исчезает, а наблюдается только отрыв капель с постоянно снижающейся частотой, причем они становятся менее вытянутыми, а их форма похожа на полуэллипсоид вращения. Нарушение поверхности (место отрыва капель) постепенно смещается к основанию капли, т.к. наибольшая напряженность уже достигается не на конце, а как бы перемещается к основанию. При этом наблюдается постоянный рост поверхностного натяжения. Последнее можно объяснить ростом объемного заряда в межэлектродном пространстве, снижающим силовое действие электрического поля на каплю, и коронным разрядом с жиклер-электрода, который препятствует возрастанию напряженности на капле при последующем увеличении подводимого напряжения. Об этом свидетельствует снижение заряда капель при $U > U_{кр}$. Так, для бензина А-76 при $U = 11$ кВ по отношению к $U = 5$ кВ заряд капель уменьшается в 3,5 раза.

Описанная выше качественная картина истечения характерна для обоих бензинов лишь с некоторой разницей в величинах подводимого напряжения, при которых наступает описанное выше явление. Приблизленно (погрешность на нитевидный выброс) подобная картина истечения для бензина А-76 при $U > U_{кр}$ и $l = 39$ мм выражается кривой I' (рис. 2.8). В этом состоит отличие от данных Салимова с соавторами /95/, где было получено постоянное снижение G по мере увеличения подводимого напряжения, и совпадение с данными Ревзина /90/.

Оценивая полученные результаты, будем исходить из следующих соображений. При обеих полярностях под действием приложенного электрического поля происходит электризация капель, под которой понимается возникновение избыточного заряда. В случае прямой полярности происходит контактная электризация, т.е. контактно-переданный заряд, при этом знак заряда соответствует знаку под-

веденного потенциала. При обратной полярности имеет место электризация под действием электростатической индукции, что подтверждается знаком заряда, транспортируемого каплями, который противоположен знаку подведенного к электроду 3 потенциала (см. рис. 2.1). При этом абсолютная величина заряда капли значительно меньше, чем в случае прямой полярности (так, при $U = 2,0$ кВ заряд меньше в 2,5 раза), что связано с несколько иным механизмом электризации. В этом случае наблюдается более сложная взаимосвязь между величиной приобретаемого каплями заряда и подведенным напряжением, зависящим, главным образом, от степени поляризации капли (величины дипольного момента). Последняя прямо пропорциональна напряжению приложенного поля, а силовое действие внешнего электрического поля на диполь, в свою очередь, пропорционально величине дипольного момента, что подтверждается кривыми 4 и 5 (рис. 2.8), полученными при обратной полярности и разных расстояниях между электродами.

Большая величина заряда, получаемая каплями при прямой полярности (контактной электризации), обуславливает и большее снижение поверхностного натяжения (кривые 1, 2) по сравнению с обратной (кривые 4, 5).

Таким образом, при наложении электрического поля происходит электризация капель, в результате которой на капле, кроме молекулярных сил, определяющих поверхностное натяжение σ , действуют и электрические силы (рис. 2.9). В результате взаимодействия последних между собой и с зарядами противоположного знака, имеющимися на противоположном электроде, кажущееся поверхностное натяжение будет уменьшено на величину этого взаимодействия. Причем, это снижение будет пропорционально величине заряда капли и напряженности электрического поля.

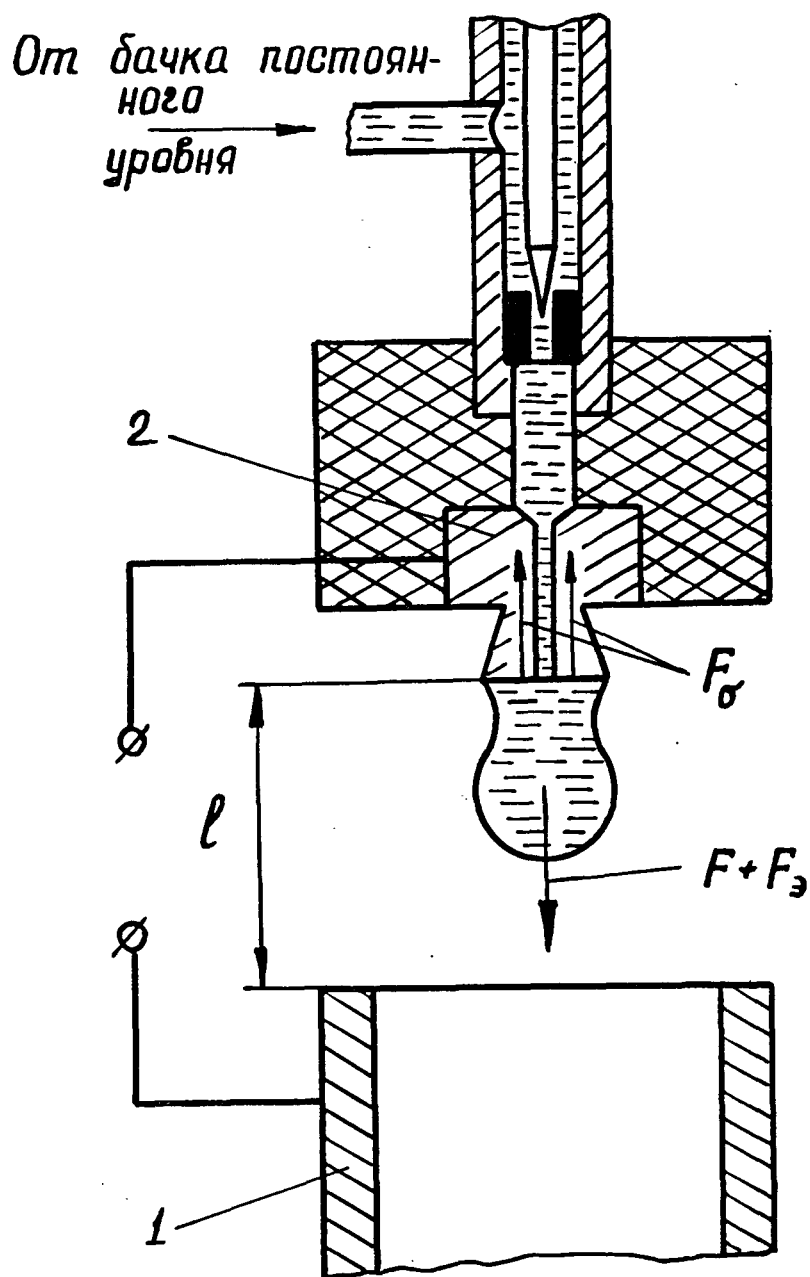


Рис. 2.9. Схема действия сил на заряженной капле:

F_σ - сила поверхностного натяжения;
 F - сила тяжести капли; F_3 - электрические
 силы; 1 - кольцевой электрод; 2 - жиклер-электрод

Рассмотрим действие указанных выше сил на заряженную каплю.

При истечении бензина в капельном режиме в отсутствии поля отрыв капле от жиклера 2 (рис.2.9) происходит в тот момент, когда сила тяжести F становится равной или превышает силу поверхностного натяжения F_{σ} , удерживающую каплю на жиклере, т.е. когда

$$F \geq F_{\sigma} \quad . \quad (2.6)$$

При наложении электрического поля, в результате электризации топлива, происходит изменение режима каплеобразования, т.е. увеличение количества капель и уменьшение их размеров, что является следствием действия на каплю электрических сил $F_{\text{э}}$, снижающих ее G . В этом случае условие (2.6) запишется в виде

$$F + F_{\text{э}} \geq F_{\sigma} \quad . \quad (2.7)$$

Рассмотрим составляющие условия (2.7). В течение всего времени формирования капли на нее действует всевозрастающая сила тяжести, которая стремится оторвать каплю от жиклера, но ей препятствует сила поверхностного натяжения, направленная в противоположную сторону. Одновременно с ростом капли происходит электризация молекул. При этом капля будет подвержена действию разрывающей электрической силы от взаимодействия ее зарядов и силового действия со стороны электрического поля на заряженную каплю, которые, как и сила тяжести F , будут стремиться оторвать ее от жиклера. Причем, эффективность воздействия электрических сил будет зависеть от величины приобретенного заряда капель и от напряженности приложенного поля. Таким образом, в условиях приложенного электрического поля на каплю действует два вида сил. Одни из них стремятся удержать каплю в положении равновесия (сила поверхностного натяжения F_{σ}); другие (сила тяжести F и электрические силы $F_{\text{э}}$) – оторвать ее от жиклера.

Следует отметить, что силы F и $F_{\text{э}}$, способствующие отрыву

капли в процессе ее формирования при различных напряжениях поле E , оказывают различное действие. При малых значениях E основной вклад в отрыв капли от жиклера, вследствие малого заряда, приобретенного каплями, вносит сила тяжести, при этом нарушение устойчивости поверхности капли (место отрыва) наблюдается у основания жиклера. По мере дальнейшего увеличения E растет и величина заряда капель, а значит, и действие электрических сил на каплю: капли становятся мельче, а место отрыва постепенно смещается к концу капли и при некоторой величине подводимого напряжения наступает описанный выше нитевидный выброс бензина. В этом случае основной вклад в нарушение устойчивости поверхности вносят уже электрические силы.

Значительную разницу в снижении ζ между бензинами (при одинаковых условиях), по всей видимости, можно объяснить тем, что они отличаются по величине диэлектрической проницаемости ϵ , которая в значительной мере определяет степень электризации $/I_4, 8I/$. Так с уменьшением ϵ влияние электрических сил на отрыв капель от электрода 4 становится все слабее из-за меньшего заряда, приобретаемого каплями.

На основании полученных данных (см. рис. 2.8), до напряжений, меньших критического, найдена зависимость поверхностного натяжения ζ_u от величины подводимого напряжения :

$$\zeta_u = \zeta_0 - \lambda U^2, \quad (2.8)$$

где λ — эмпирический коэффициент, учитывающий расстояние между электродами и диэлектрическую проницаемость бензина.

Из формулы (2.8) видно, что с увеличением подводимого напряжения ζ_u постоянно уменьшается и, когда $\zeta_u = \lambda U^2$, наступает струйный режим истечения. С физической точки зрения это обусловлено тем, что при некоторой величине заряда электрические силы

превышают силы поверхностного натяжения, в результате чего происходит нарушение устойчивости поверхности.

Следует отметить, что могут быть использованы прямая и обратная полярности, однако первая наиболее эффективна с точки зрения наибольшего снижения поверхностного натяжения.

Установлено, что знак подводимого напряжения (плюс или минус) не оказывает заметного влияния на величину поверхностного натяжения.

2.4. Исследование влияния характера прикладываемого напряжения на режим истечения бензинов

Для получения наиболее полной картины воздействия электрического поля на процесс истечения топлива необходимо исследовать влияние на него характера прикладываемого напряжения. С этой целью была исследована эффективность ряда источников высокого напряжения:

- 1.- постоянного напряжения;
- 2.- постоянного напряжения с пульсирующей составляющей;
- 3.- с однополупериодной характеристикой напряжения;
- 4.- переменного напряжения;
- 5.- импульсного напряжения.

Форма и характеристики напряжения этих источников (рис. 2.10) были определены с помощью омического делителя напряжения с коэффициентом деления $K = 14450$ и осциллографа С1-16.

Указанные источники напряжения можно объединить в три группы. В первую из них входят первые два, у которых основной характеристикой напряжения является постоянная составляющая. Различие между ними состоит в наличии пульсирующей составляющей частоты 4 кГц у источника 2. Ко второй группе можно отнести 4 и 5-й источники с переменными напряжениями, отличающимися тем, что 5-й имеет затухающую амплитуду колебаний. Промежуточное положение

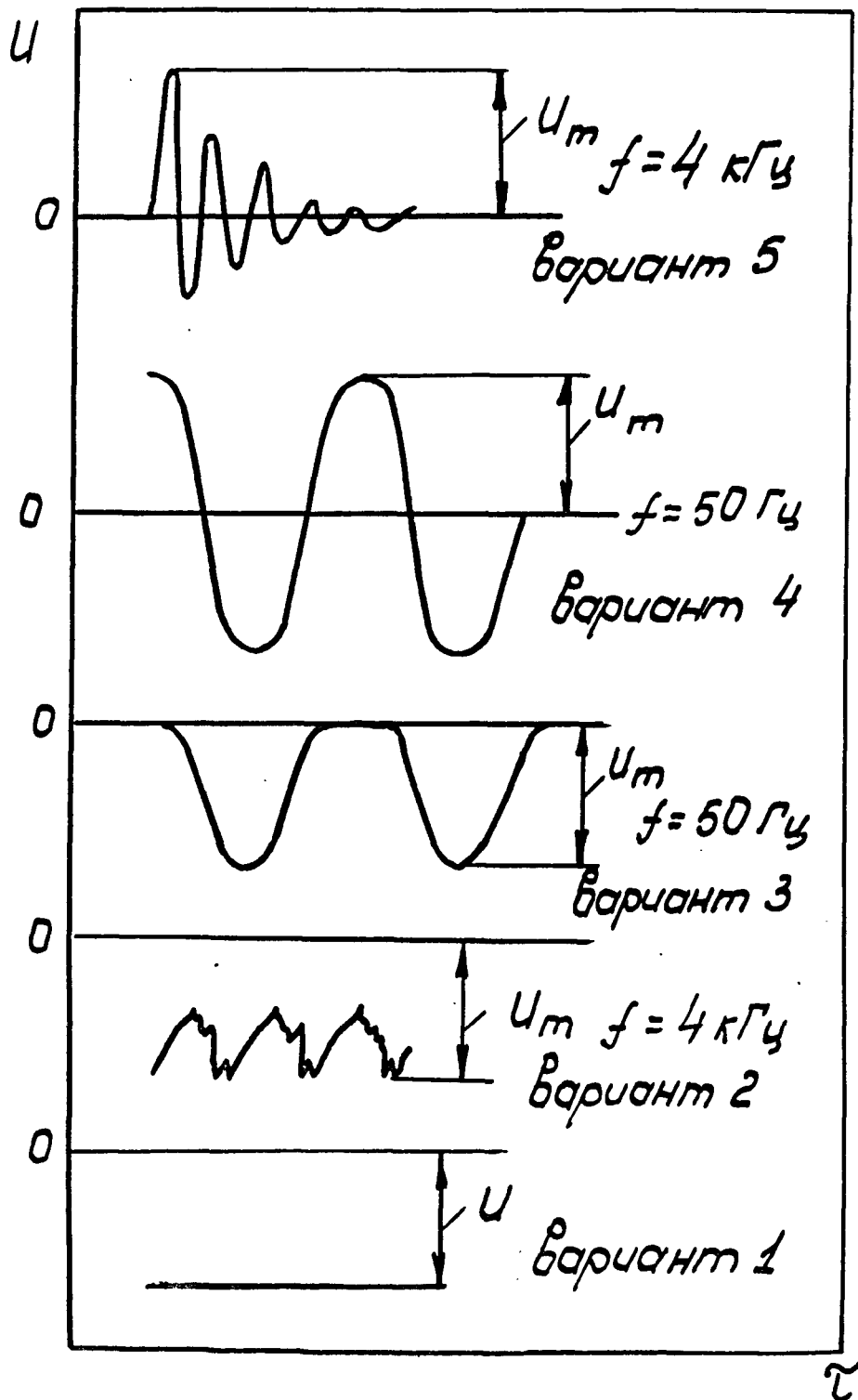


Рис. 2.10. Характер напряжения источников:
 U_m - наибольшее напряжение, принятое при
 сравнении источников; f - частота колебаний

между этими группами занимает 3-й источник с однополупериодной характеристикой напряжения частотой 50 Гц.

Оценка влияния характера подводимого напряжения на поверхностное натяжение σ бензина и величину заряда, переносимого топливом в условиях истечения последнего, производилась на безмоторной установке, описание которой и методика исследований изложена в параг. 2.1 и 2.2. Сравнение эффективности источников проведено по максимальной величине U_m каждого вида напряжения для прямой полярности, которая является наиболее эффективной с точки зрения оказываемого влияния поля на σ бензина.

При наложении электрического поля на топливо, находящееся в капельном режиме истечения, происходит изменение режима для всех источников, кроме 4-го, т.е. увеличение количества капель и уменьшение их размеров. Это является результатом действия электрических сил F на каплю вследствие ее электризации, приводящих к снижению кажущегося поверхностного натяжения топлива.

Оценивая полученные результаты (см. табл. 2, I), будем исходить из того, в каком случае, в зависимости от характера прикладываемого напряжения, капли будут переносить наибольшее количество заряда Q/r^3 , т.к. при всех равных условиях именно величина Q/r^3 будет характеризовать эффективность воздействия электрических сил на режим каплеобразования.

При наложении постоянного электрического поля на топливо эффект от его воздействия наибольший. Это можно объяснить тем, что наибольшее значение Q/r^3 и меньший ее разброс по величине, приобретаемый каплями, получается вследствие неизменности величины и направления приложенного напряжения, т.е. как бы увеличивается время действия электрического поля на каплю.

: П о д в о д и м о е н а п р я ж е н и е									
U, кВ	: Вариант 1		: Вариант 2		: Вариант 3		: Вариант 4		: Вариант 5
	$\frac{Q_u}{Q_0}$	$\frac{Q}{r^3 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{Q_u}{Q_0}$	$\frac{Q}{r^3 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{Q_u}{Q_0}$	$\frac{Q}{r^3 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{Q_u}{Q_0}$	$\frac{Q}{r^3 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{Q_u}{Q_0}$
	$\frac{Q_u}{Q_0}$	кЛ/м ³	$\frac{Q_u}{Q_0}$	кЛ/м ³	$\frac{Q_u}{Q_0}$	кЛ/м ³	$\frac{Q_u}{Q_0}$	кЛ/м ³	$\frac{Q_u}{Q_0}$
0	: I	: 0	: I	: 0	: I	: 0	:	:	:
I	0,8II	5,87÷	0,85I	4,9÷	0,896	4,35÷	эффекта нет		эффект
		6,33		6,02		5,27	в диапазоне		незначи-
							U =		тельный
2	0,68I	13,5÷	0,710	12,2÷	0,774	10,6÷	0÷ 20 кВ		при U =
		13,98		13,50		12,26			=20 кВ
2,5	0,523	20,2÷	0,587	17,4÷	0,630	15,9÷	(выходное напряжение источника не регули- руется)		
		20,6		18,68		17,62			
4	0,239	32,4÷	0,274	29,15÷	0,415	19,5÷			
		32,9		30,43		21,52			

где Q и r – соответственно заряд и радиус капель.

Меньшая величина Q/r^3 , а значит, и меньший эффект от воздействия постоянного напряжения с пульсирующей составляющей вызван тем, что несмотря на высокую частоту пульсации (4 кГц), время действия наибольшей величины напряжения меньше, чем при постоянном напряжении.

Действие источника напряжения с однополупериодной схемой выпрямления и частотой колебаний 50 Гц по эффективности приближается к двум рассмотренным выше источникам, но несколько уступает им. Это также связано с уменьшением, примерно в два раза, времени действия максимального напряжения, что и влечет за собой меньшее количество заряда, переносимого каплями с большим разбросом его по величине (см. табл. 2.1).

Наложение переменного напряжения частотой 50 Гц не вызывает заметного изменения режима каплеобразования, т.е. не происхо-

дит увеличение частоты отрыва и уменьшение размера капель. Отсутствие эффекта попытаемся объяснить исходя из следующих соображений. При переменном напряжении, в течение периода его изменения, напряжение трижды приобретает нулевые и дважды максимальные значения противоположных знаков. Следовательно, за время формирования капли на жиклер-электроре многократно меняется напряжение как по величине, так и по знаку и, соответственно, меняется знак зарядов отдельных элементарных объемов бензина, поступающих через канал в жиклер. При этом каплю можно представить в виде "слойки", состоящей из разноименно заряженных объемов бензина. Принимая во внимание, что расход бензина, за период формирования капли остается неизменным, а отрыв капли приходится на четное число полупериодов, то величина разноименно заряженных объемов бензинов будет одинаковой, и в целом капля останется нейтральной. В случае, если отрыв придется на нечетное число полупериодов, то возможно появление незначительного избыточного заряда того знака фазы периода колебания, на которую приходится отрыв капли. Следовательно, при наложении переменного напряжения возможно, что если одна капля получила некоторый избыточный заряд одного знака, то следующая за ней капля может получить заряд противоположного знака или же быть электрически нейтральной. Наличие незначительной величины заряда капель того или другого знака обусловлено очень малым объемом электризации бензина, который приходится на момент отрыва, что и подтверждается отсутствием заряда капель при их регистрации.

Наложение импульсного напряжения приводит к незначительному изменению режима каплеобразования вследствие некоторой электризации капли амплитудой полупериодов (1, 3, 5 и т.д.), имеющих большую амплитуду по отношению к соответствующим четным полупериодам (2, 4, 6 и т.д.) на величину коэффициента затухания K .

Полученные результаты по исследованию эффективности источников высокого напряжения свидетельствуют, что при контактной электризации наибольший эффект от действия электрического поля на поверхностное натяжение бензина наблюдается при наложении постоянного напряжения. Несколько меньший — при $E > 2,5$ кВ/см на постоянном напряжении с пульсирующей составляющей и по однополупериодной схеме выпрямления.

Практически, эффект отсутствует при наложении переменного и импульсного напряжений.

З а к л ю ч е н и е

Результаты, полученные в условиях безмоторной установки, показали, что непосредственное наложение электрического поля на истекающее топливо (контактная электризация) приводит к значительному снижению кажущегося поверхностного натяжения, что в свою очередь ведет к увеличению числа капель и суммарной поверхности их. Это обстоятельство дает основание предполагать, что совместное сочетание электрического поля с распыливанием в карбюраторе может быть эффективным средством улучшения тонкости и однородности распыливания топлива в условиях реального ДВС. При этом следует иметь в виду, что наибольший эффект от действия электрического поля на поверхностное натяжение топлива достигается при контактной электризации и наложении постоянного напряжения.

Практически поверхностное натяжение топлива не зависит от знака (+ или -) подводимого напряжения.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И ЗАЖИГАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИЛОЖЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Отсутствие теоретических исследований по оказываемому влиянию электрической обработки свежего заряда на процессы смесеобразования и сгорания, применительно к условиям реального двигателя, а, следовательно, и механизма воздействия электрического поля, послужило причиной написания данной главы, где предпринята попытка дать качественную картину особенностей смесеобразования и зажигания в условиях электрического поля. Это поможет пониманию механизма воздействия электрического поля на указанные процессы и облегчит анализ полученных экспериментальных данных.

3.1. Особенности смесеобразования в условиях электрического поля

Как уже было рассмотрено выше (параграф 1.1), эффективные показатели и токсичность отработавших газов карбюраторных двигателей во многом зависят от качества процесса смесеобразования, который в значительной мере определяется тонкостью и однородностью распыливания топлива. Последнее в этих двигателях достигается при помощи аэродинамического воздействия воздушного потока на медленно вытекающую струю топлива.

При этом средний радиус образующихся капель r_k при дроблении струи топлива может быть оценен по выражению [77]:

$$r_k = k g \frac{\sigma}{W_0^2}, \quad (3.1)$$

где k — постоянная распылителя;

W_0 — скорость воздуха в диффузоре.

Из формулы (3.1) следует, что тонкость распыливания зависит от величины поверхностного натяжения топлива и скорости воздуха в диффузоре, которая в современных двигателях на режиме максимальной мощности составляет 100...150 м/с и, как было показано выше,

дальнейшее ее увеличение в большинстве случаев не приводит к заметному улучшению тонкости распыливания топлива, что говорит о неэффективности этого пути совершенствования процесса смесеобразования. Поэтому целесообразно дальнейшее улучшение тонкости и однородности распыливания топлива обеспечивать путем воздействия на его физические характеристики и, в первую очередь, на его поверхностное натяжение за счет, например, его электрической обработки. При этом, вследствие электризации капель топлива, на них, кроме молекулярных сил, определяющих прочность капли, будут иметь место и электрические силы, направленные в противоположную сторону и снижающие ее поверхностное натяжение, что приводит к более мелкому дроблению топлива.

Исходя из этого основного фактора (электризации топлива), рассмотрим особенности процесса смесеобразования в условиях электрического поля и, в частности, силовое взаимодействие электростатически заряженной капли с воздушным потоком. Для этого необходимо рассмотреть два давления, то, которое препятствует разрушению капли, и то, которое старается деформировать (разрушить) её. Первое давление, обусловленное силами поверхностного натяжения, называется капиллярным или лапласовским и определяется хорошо известной формулой/20/.

$$P_{\lambda} = \frac{2\sigma}{r_k} \quad (3.2)$$

Теперь о давлении, которое деформирует каплю – это аэродинамическое давление воздушного потока, равное

$$P_{\delta} = \frac{\rho_{\delta} W_{\delta}^2}{2} \quad (3.3)$$

где ρ_{δ} – плотность воздуха.

Остальные обозначения, входящие в P_{λ} и P_{δ} те же, что в выражении (3.1).

Под действием аэродинамического давления капля топлива начинает сжиматься в направлении движения потока. Далее наступает бо-

лее глубокое развитие деформации, которое завершается разрушением капли на более мелкие. В связи с этим, условие неустойчивого состояния капли будет

$$\frac{\rho_b W_b^2}{2} > \frac{2\sigma}{r_k} \quad (3.4)$$

Из выражений (3.2-3.4) следует, что с уменьшением диаметра капель P_A увеличивается, а P_B остается постоянным и, следовательно, должен быть такой размер капли, ниже которого P_A будет превосходить P_B , а, значит, дальнейшего дробления капли не будет. Этим, по-видимому, и можно объяснить снижение эффективности дробления топлива, наблюдаемое при увеличении скорости воздушного потока свыше 100 м/с.

В случае электрoзаряженной капли, находящейся в воздушном потоке, на нее, кроме аэродинамического давления P_B , стремящегося нарушить поверхность капли, и давления поверхностного натяжения P_A , препятствующего этому, действует электростатическое давление P_3 , стремящееся разорвать каплю. Это давление складывается из электростатического разрывающего давления $P_{q,r}$, вызванного взаимным отталкиванием одноименных зарядов, находящихся на поверхности капли, и давления P_E , обусловленного действием пондермоторных сил электрического поля на заряженную каплю, стремящегося растянуть каплю вдоль поля и сжать ее в поперечном направлении, т.е. действие P_E на каплю аналогично действию аэродинамического давления воздушного потока. Следовательно, на электрoзаряженной капле, кроме молекулярных сил, направленных внутрь и определяющих поверхностное натяжение, или, другими словами, прочность капли, будут иметь место и электрические силы, направленные в противоположную сторону и уменьшающие прочность капли.

Таким образом, внутреннее (лапласовское) давление заряженной капли будет уменьшено на величину электростатического давления P_3 и составит $P_q = P_A - P_3$, (3.5)

где $P_{\lambda} = \frac{2\sigma}{r_k}$ - внутреннее давление незаряженной капли;
 $P_z = P_{qp} + P_e$ - электростатическое давление заряженной капли.

Величину электростатического разрывающего давления P_{qp} можно найти условно рассматривая разрыв капли как деление ее на две полусферы, которые в результате взаимодействия одноименных зарядов взаимно отталкиваются, подчиняясь закону Кулона. Тогда сила, разрывающая каплю радиусом r_k и имеющую заряд q , будет равна:

$$F_{qp} = \frac{q^2}{16\pi\epsilon\epsilon_0 r_k^2} \quad (3.6)$$

Следовательно, разрывающее давление

$$P_{qp} = \frac{F_{qp}}{\pi r_k^2} = \frac{q^2}{16\pi^2\epsilon\epsilon_0 r_k^4} \quad (3.7)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная;

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость.

Если взаимодействие между зарядами происходит в воздухе или в пустоте, то $\epsilon = 1$.

Из выражения (3.7) следует, что величина электростатического давления, разрывающего каплю, зависит от заряда и радиуса капли. Поскольку с увеличением размеров капли ее внутреннее (лапласовское) давление будет уменьшаться пропорционально увеличению ее радиуса, а электростатическое разрывающее давление увеличиваться (вследствие того, что заряд капли пропорционален $r_k^3 / 8I$), то наибольшую эффективность от электрической обработки топлива следует ожидать при грубодисперсном распыливании, которое имеет место при работе двигателя на частичных нагрузках.

Величину давления P_e можно найти, если рассматривать взаимодействие заряженной капли с зарядами противоположного знака, имеющимися на стенках впускного коллектора (рис.3.1), как взаимодействие пластин плоского конденсатора, когда одной из пластин является капля, а другой - стенки коллектора (рис.3.2). В этом случае электростатическое давление на поверхности заряженной

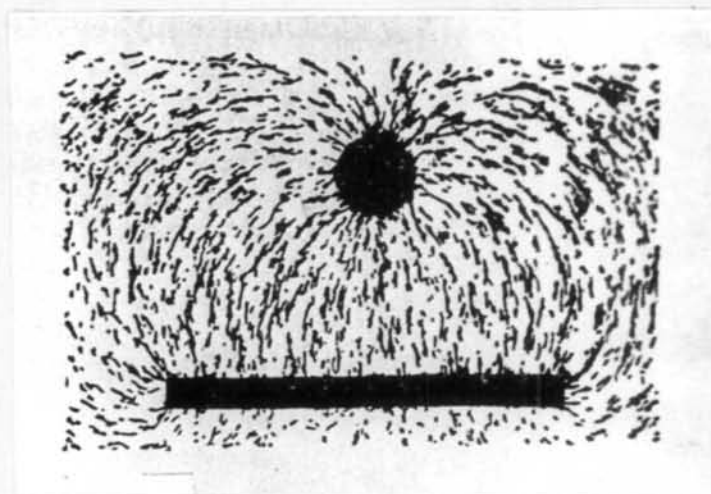


Рис.3.1. Линии электрического поля между заряженной каплей и поверхностью тела /81/

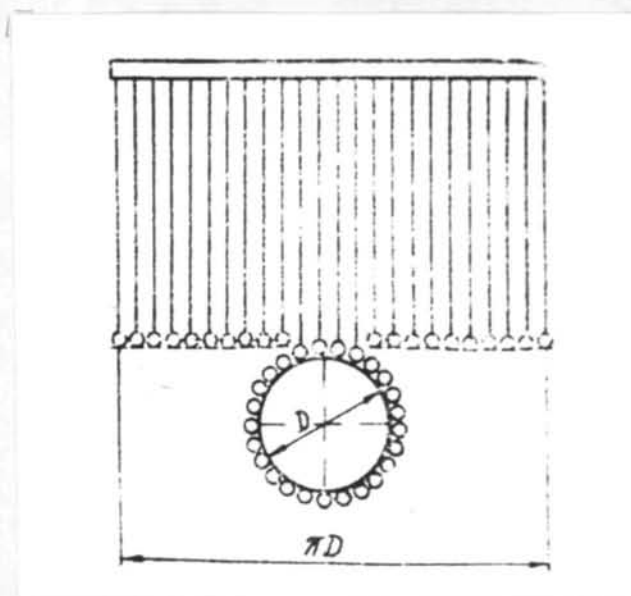


Рис.3.2. Схема замещения взаимодействия заряженной капли со стенкой впускного патрубка

капли будет определяться выражением, аналогичным давлению от взаимодействия пластин плоского конденсатора/8I/.

$$P_E = \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} E^2, \quad (3.8)$$

где E - напряженность поля у поверхности капли.

Если напряжение между заряженной каплей и далеко находящимися носителями противоположных зарядов (впускного трубопровода) будет U , то напряженность на поверхности шара (капли) составит /8I/

$$E = \frac{U}{r_k}. \quad (3.9)$$

Подставляя это значение E в (3.8), получим выражение электростатического давления на поверхности заряженной капли в зависимости от напряжения и радиуса капли

$$P_E = \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} \frac{U^2}{r_k^2}. \quad (3.10)$$

Это давление направлено наружу и уменьшает поверхностное натяжение σ , которое обуславливает внутреннее (лапласовское) давление капли P_A .

Тогда внутреннее давление заряженной капли с учетом двух рассмотренных давлений P_{qp} и P_E составит

$$P_q = P_A - \left(\frac{q^2}{16\pi^2 \epsilon \epsilon_0 r_k^4} + \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} E^2 \right). \quad (3.11)$$

Анализ полученного выражения (3.11) показывает, что при электризации капель их внутреннее давление оказывается уменьшенным на величину электростатического давления, которое прямо пропорционально квадрату заряда и напряженности поля вблизи поверхности капли. Уменьшение внутреннего давления (т.е. прочности) капли увеличивает эффективность аэродинамического воздействия воздушного потока, что способствует более тонкому и однородному распыливанию топлива.

Итак, дробление электростатически заряженной капли, находящейся в воздушном потоке, происходит под влиянием аэродинамического и

электростатического давлений, которые воздействуют против сил поверхностного натяжения, стремящихся сохранить целостность капли. В этом случае условие дробления заряженной капли будет:

$$P_8 + P_3 > P_A \quad (3.12)$$

Подставляя вместо P_8 , P_3 и P_A их значения, получим формулу, описывающую силовое взаимодействие заряженных капель с воздушным потоком:

$$P_8 \frac{W_8^2}{2} + \frac{q^2}{16 \pi^2 \epsilon \epsilon_0 r_k^4} + \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} E^2 > \frac{2 \sigma}{r_k} \quad (3.13)$$

Прежде, чем приступить к дальнейшему рассмотрению смесеобразования в условиях электрического поля, остановимся на одной из особенностей, присущей обычному пневматическому распыливанию топлива, т.е. в отсутствие электрического поля, которая, как правило, не учитывается, но может отрицательно влиять на качество смесеобразования, а в условиях электрического поля, наоборот, оказывать положительное влияние.

Одним из физических процессов, происходящих при обычном распыливании топлива, является естественная электризация образуемых капель [48, 101], т.е. капли приобретают некоторый статический, — балло- и трибоэлектрический заряд. При этом капли могут приобретать заряды как положительного, так и отрицательного знака, вследствие чего разноименно заряженные капли под действием электрических сил притяжения коагулируют, т.е. укрупняются.

В отличие от этого, при распыливании топлива в условиях электрического поля образующиеся капли получают униполярный заряд, причем их полярность соответствует знаку того потенциала, который подведен к распылителю (при контактной электризации) или к коронирующему электроду (при электризации в поле коронного разряда). Униполярная электризация капель препятствует их коагуляции и снижает вероятность их выпадания в пленку.

Последнее происходит по двум причинам: во-первых, при электризации капле обеспечивается более тонкое и однородное распыливание топлива (было показано выше), вследствие чего капли малого размера быстро достигают скорости воздушного потока, не имея при этом значительной поперечной составляющей скорости относительно основного потока, в результате чего снижается осаждение капель на стенки коллектора. Во-вторых, за счет отталкивания заряженных капель поверхностным слоем топливной пленки, заряд которой постепенно увеличивается в результате оседания этих капель в пленку и их медленной разрядкой (вследствие большого удельного сопротивления бензина). В результате этого, в определенный момент времени, поверхностный слой пленки будет обладать достаточным зарядом, который будет препятствовать осаждению новых заряженных капель в пленку. Скорость разрядки осевших капель, а значит время и величина образования необходимого заряда поверхностным слоем пленки, будет зависеть от проводимости топлива и переходного сопротивления в месте контакта капель со стенками впускного коллектора. Снижение скорости разрядки может быть обеспечено путем покрытия внутренних поверхностей впускного трубопровода диэлектрическим материалом или изготовлением его из жаростойкого диэлектрика типа феноловой смолы или акрилового полимера.

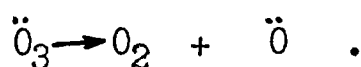
Более значительный эффект по снижению выпадания электростатически заряженных капель топлива в пленку может быть достигнут при подаче на впускной трубопровод потенциала того же знака, что и у капли.

В пользу вышеотмеченного говорят экспериментальные данные /87/, полученные в условиях безмоторной установки, которые свидетельствуют об улучшении процесса смесеобразования при электрической обработке топливовоздушной смеси. Так, выпадание бензина в пленку уменьшилось на 27%, а снижение неравномерности распределения горючей смеси по цилиндрам — на 9%.

Кроме того, при электрической обработке возможно использовать принцип силового взаимодействия внешнего электрического поля с зарядами, переносимыми каплями, что в принципе позволяет регулировать и управлять потоком заряженных капель топлива в нужном направлении. Последнее может быть достигнуто установкой во впускном трубопроводе электродов определенной конфигурации, а регулирование расхода топлива — изменением интенсивности и направления приложенного поля по отношению к заряду капель.

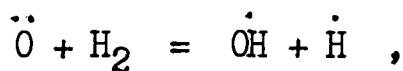
Итак, особенностью процесса дробления топлива в условиях электрического поля является его электризация, которая обеспечивает более тонкое распыливание топлива, снижает вероятность укрупнения капель и их выпадание в пленку, а также уменьшает неравномерность распределения горючей смеси по цилиндрам двигателя.

В процессе образования горючей смеси в карбюраторных двигателях обработке электрическим полем может быть подвергнуто как само топливо в процессе его распыления, так и топливовоздушная смесь. В обоих случаях происходит электризация капель распыленного топлива. В первом случае — в момент их образования (дробления струи топлива) контактным или индуктивным способами, а во-втором, уже находясь во взвешенном состоянии, — в поле коронного разряда [17, 101]. В последнем случае имеет место не только электризация капель топлива, способствующая получению более мелкого и однородного распыливания (было рассмотрено выше), но также ионизация воздуха и образование озона (O_3) [95], который является активным радикалом и обладает большой окислительной способностью. В результате распада O_3 , образуется молекулярный и атомарный кислород (бирадикал):



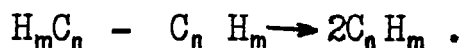
При этом энергия распада озона составляет всего лишь 24 ккал/моль [44]. Характерной особенностью бирадикалов и, в частности,

\ddot{O} , является то, что они более активны, чем O_3 и, вступая в реакции с насыщенными молекулами, способны создавать два новых моно-радикала $\dot{O}H$ и \dot{H}

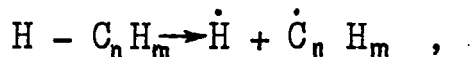


которые дают начало разветвленной цепной реакции /18/.

Часть углеводородов, подверженных воздействию коронного разряда, может разрушаться по связи C-C с образованием двух активных радикалов



Если связь рвется между H - C, тогда



т.е. образуется два активных радикала \dot{H} и $\dot{C}_n H_m$.

Итак, если в обычных условиях активные центры реакции возникают в результате первичного окисления или действия искрового разряда, то при электрической обработке горючей смеси в поле коронного разряда происходит образование большого количества активных центров, дающих сразу же в начале реакции разветвленные цепи.

Наличие активных центров может явиться причиной появления холоднопламенного окисления, в результате которого образуются активные перекисные радикалы $\dot{R}OO$, дающие начало образованию гидроперекисей $ROOH$ и формальдегида $HCHO$ /11/, которые под действием активных радикалов и возбужденных атомов и молекул дают цепное развитие холоднопламенного процесса при низкой температуре. При этом повышенное количество активных частиц в объеме камеры сгорания, а, следовательно, и в зоне свечи зажигания, обеспечивает более быстрое и устойчивое образование первоначального очага горения и формирование его в развитый фронт турбулентного пламени, что в итоге должно способствовать более быстрому и полному сгоранию горючей смеси.

Подтверждением вышесказанному является ряд работ /15, 42-44, 95/, в которых получено положительное влияние наличия озона в сме-

си на параметры процесса сгорания. Обзор этих работ приводится в параграфе I.2.

Таким образом, основной особенностью процесса смесеобразования в условиях электрического поля является то, что вследствие улучшения тонкости распыливания топлива и образования в топливовоздушной смеси значительного количества химически активных частиц повышается степень однородности смеси и её реакционная способность.

3.2. Анализ процесса пробоя искрового промежутка и развития начального очага горения при электрической обработке топливовоздушной смеси

Необходимым условием проскакивания искры является предварительная подготовка искрового промежутка, которая заключается в его ионизации. Каждый газ, в том числе и воздух, за счет естественной ионизации содержит некоторое число носителей зарядов в виде заряженных молекул (положительных или отрицательных ионов) и свободных электронов, которые и обеспечивают некоторую первоначальную ионизацию искрового промежутка и создают условия, облегчающие дальнейшую его ионизацию под действием высокого напряжения, приложенного к свече зажигания.

Поскольку появление искры требует предварительной подготовки (ионизации) искрового промежутка, то должен пройти некоторый короткий промежуток времени между моментом приложения высокого напряжения и моментом появления искры. В течение этого времени напряжение продолжает возрастать. Максимальная величина напряжения будет зависеть от времени превращения искрового промежутка в проводник, которое, в свою очередь, определяется первоначальной ионизацией промежутка. Следовательно, влияя каким-либо образом на степень ионизации искрового промежутка, можно добиться существенного улучшения стабильности зажигания и снижения величины про-

бивного напряжения $U_{пр}$.

Увеличение ионизации искрового промежутка может быть обеспечено, например, облучением его электронами и гамма-лучами /7/, ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами /65,83/, а также в результате предварительного пробоя вспомогательного промежутка с дополнительного электрода, создающего интенсивную ионизацию в главном искровом промежутке, или предварительной ионизацией топливовоздушной смеси /31,32/. Так, в работе /7/, в результате облучения разрядного промежутка электронами и гамма-лучами было получено снижение пробивного напряжения на 30–45%.

Рассмотрим особенности возникновения и развития начального очага горения при электрической обработке топливовоздушной смеси. Здесь следует отметить, что процессы, происходящие в камере сгорания от начала возникновения электрического разряда до момента образования фронта турбулентного пламени, до сих пор полностью не исследованы, а полученные результаты в ряде случаев противоречивы /69,73,98/.

Под воспламенением топливовоздушной смеси от искры понимается возникновение начального очага горения, способного к дальнейшему самопроизвольному распространению и превращению его в развитый фронт турбулентного пламени. Искровой разряд является одновременно как источником тепла, так и источником весьма сильной ионизации. До настоящего времени не установлено, какое значение в искровом зажигании имеет создаваемая электрическим разрядом сильная ионизация газа и, соответственно, высокая местная концентрация активных частиц, и какое — тепловыделение. Одни исследователи подходят к процессу зажигания от искры с позиций тепловой теории, а другие с позиций диффузии активных центров в окружающую смесь. Вследствие подобия процессов теплопередачи и диффузии, оба эти пути дают сходные математические результаты и, в принципе, не

противоречат друг другу /18/.

Принимая во внимание высокую концентрацию активных частиц в результате ионизации топливовоздушной смеси в поле коронного разряда и действия искрового разряда свечи зажигания, здесь не представляется возможным применение только концепции температуры. Поэтому чисто тепловая теория воспламенения при электрической обработке горючей смеси представляется недостаточной. Видимо, в этом случае будет правильнее рассматривать процесс зарождения начального очага горения с позиции тепловой теории, т.е. в результате теплового действия искры, приводящего к практически мгновенному нагреванию газа в искровом канале до температур, превышающих 10^4 градусов, при которых любые горючие смеси реагируют с огромными скоростями. Процесс же дальнейшего развития очажка горения в развитый фронт турбулентного пламени — с позиции цепочно-тепловой теории, т.е. диффузии активных центров и передачи тепла путем теплопроводности от начального очага горения в окружающую смесь, при обязательном участии активных частиц (атомов и радикалов), первоначально образующихся в результате ионизации топливовоздушной смеси в поле коронного разряда, и за счет искрового разряда. Причем на начальных стадиях его развития самоускорение реакций предпочтительнее всего носит чисто цепной характер, но в конечном итоге, рождение фронта турбулентного пламени всегда является результатом нарушения равновесия между скоростями тепловыделения и теплоотвода в окружающую смесь, приводящему к прогрессивному их саморазогреву, вызывающему, в свою очередь, самоускорение химических реакций и делающим возможным дальнейшее распространение фронта пламени.

При электрической обработке топливовоздушной смеси в поле коронного разряда происходит образование значительного количества химически активных частиц, в том числе и озона O_3 , которые

являются активными центрами цепной реакции, легко вступающими в реакцию с исходными или промежуточными продуктами без какой-либо значительной активации. Таким образом, уже в процессе сжатия в такой смеси будут иметь место предпламенные цепные реакции низкотемпературного окисления, которые сопровождаются выделением тепла и образованием новых активных центров и промежуточных продуктов. Наличие повышенного количества ионизированных частиц в объеме камеры сгорания, а, следовательно, и в зоне искрового промежутка, облегчает процесс пробоя его (при меньшей величине и разбросе пробивного напряжения) и способствует более быстрому и стабильному превращению начального очага горения в развитый фронт турбулентного пламени, что является следствием увеличения скорости распространения фронта пламени в начальной фазе сгорания.

Следовательно, при электрической обработке топливовоздушной смеси, в результате улучшения тонкости распыливания топлива и образования значительного количества активных частиц в рабочей смеси, будет повышаться ее однородность и реакционная способность, что приводит к возрастанию скорости химической реакции. Подтверждением последнему являются результаты /44/, где показано снижение эффективной энергии активации при добавке озона в реакционную смесь и увеличение скорости химической реакции. Влияние электрической обработки горючей смеси на увеличение скорости распространения пламени в начальной и основной фазах сгорания следует ожидать не одинаковым, вследствие разных закономерностей турбулентного горения в них. Так, процесс сгорания в начальной фазе, где скорость пламени близка к скорости ламинарного горения, в основном подчиняется закономерностям мелкомасштабного турбулентного горения, скорость которого существенно зависит от физико-химических свойств топливовоздушной смеси. Увеличение в горючей смеси количества активных частиц будет способствовать возрастанию

нию скорости пламени и более быстрому и устойчивому превращению начального очага горения в развитый фронт турбулентного пламени.

Скорость распространения пламени в основной фазе подчиняется закономерностям крупномасштабного турбулентного горения. Она мало зависит от физико-химических свойств горючей смеси и, практически, почти целиком определяется скоростями крупных турбулентных пульсаций, влияние которых в суммарном эффекте становится доминирующим. Кроме того, должно уменьшаться влияние озона в этой фазе, действие которого на реакцию окисления проявляется сильнее при относительно низких температурах и становится незначительным при температурах порядка 500°C /44/. Следовательно, влияние электрической обработки топливовоздушной смеси на увеличение скорости распространения пламени в основной фазе сгорания должно быть менее значительным.

З а к л ю ч е н и е

Исходя из вышеизложенного, электрическую обработку топливовоздушной смеси, прежде всего, следует рассматривать как дополнительный фактор, способствующий зажиганию, т.е. образованию начального очага горения и более быстрому и стабильному превращению его в развитый фронт турбулентного пламени. Это позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя на более бедных составах смеси с лучшей топливной экономичностью и меньшей токсичностью ОГ. Причем это влияние электрической обработки должно проявляться сильнее при работе двигателя на бедных составах смеси и малых нагрузках, когда (по причинам, отмеченным в параг. I. I) имеет место существенное ухудшение процесса воспламенения горючей смеси. Поэтому на фоне всё ухудшающихся условий для образования и развития начального очага горения увеличение скорости пламени

при электрической обработке топливовоздушной смеси, вследствие повышения ее однородности и реакционной способности, будет проявляться все более значительно. К тому же, с обеднением смеси повышается относительная доля образования озона, что, в свою очередь, увеличивает скорость химической реакции и облегчает процесс ее зажигания.

Подтверждением сказанному является работа Льюиса и Крейтца /III/, где показано, что прохождение одного из компонентов смеси метан-воздух через электрический разряд непосредственно перед смешением с другим компонентом приводит к значительному снижению температуры зажигания. Авторы приходят к выводу, что наиболее вероятной причиной этого следует считать электрически заряженные ионы, образовавшиеся благодаря искре, которые, попадая в поток метана, оказывают действие, облегчающее горение, т.е. они полагают, что ионы оказывают только вспомогательное действие, способствуя в значительной степени тепловой энергии искры осуществить зажигание.

4. МОТОРНАЯ УСТАНОВКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Программа и методика экспериментальных исследований

Основной целью экспериментального исследования являлось определение степени влияния электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя и, в первую очередь, на его топливную экономичность.

В качестве оценочных показателей рабочего процесса, характеризующих его экономические и токсические показатели, а также условия воспламенения и сгорания смеси были приняты: удельный эффективный расход топлива q_e , концентрация окиси углерода CO в ОГ, величина и разброс пробивных напряжений $U_{пр}$, скорость распространения фронта пламени $U_{пл}$ и цикловая неравномерность процесса сгорания.

Все исследования включали в себя снятие сравнительных регулировочных характеристик по составу смеси, с оценкой отмеченных выше показателей рабочего процесса, и предусматривали следующую программу исследований:

1. Получить сравнительную оценку влияния отдельных видов электрической обработки свежего заряда (ионизации воздуха, поступающего в двигатель, электризации топлива в процессе его распыливания и электрической обработки топливовоздушной смеси) на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя.

2. Проведение комплексного исследования наиболее эффективного вида электрической обработки свежего заряда, которое ставило перед собой следующие задачи:

- выявить отличия в скоростях и степени невоспроизводимости процесса сгорания на различных его стадиях, включая и начальный период развития очага горения;

- провести сравнительные исследования процесса пробоя искрового промежутка свечи зажигания в условиях электрической обработки и в её отсутствие;

- оценить влияние электрической обработки свежего заряда на внешние показатели двигателя (мощность, экономичность, токсичность ОГ), а также на возможность расширения области устойчивой работы двигателя.

3. Провести сравнительные исследования влияния наиболее эффективного вида электрической обработки свежего заряда и различных систем зажигания на процесс сгорания в начальный период его развития.

Вследствие того, что в городских условиях эксплуатации автомобильные двигатели преимущественно работают на частичных нагрузках, для которых определяющими вопросами являются экономичность и токсичность ОГ, за исследуемый режим был выбран режим частичной нагрузки, отвечающей постоянной частоте вращения $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ и двум значениям коэффициента наполнения $\eta_v = 0,45$ и $0,63$.

При снятии регулировочных характеристик состав смеси изменялся с помощью регулировочной иглы топливного жиклера. Все характеристики по составу смеси снимались по 6-7 точкам до предела устойчивой работы двигателя, оцениваемого по появлению свыше 10% пропусков зажигания в последовательных циклах /135/. На каждой снимаемой точке подбирался оптимальный угол опережения зажигания из условия получения максимального крутящего момента по тормозу.

Исследование процесса пробоя межэлектродного пространства свечи зажигания заключалось в измерении величины и разброса пробивных напряжений $U_{пр}$ при различных составах смеси. Учитывая, что величина $U_{пр}$ зависит от давления и температуры в цилиндре, частоты вращения, состава смеси, угла опережения и т.п., методика исследований заключалась в сравнении пробивных напряжений, замеренных на каждой опытной точке как в условиях электрической обработки

свежего заряда, так и в её отсутствие. Это обеспечивало постоянство отмеченных выше параметров и позволяло получить наиболее достоверные данные по $U_{пр}$. Величина $U_{пр}$ оценивалась по максимальному его значению из 20 последовательных циклов, а разброс — по разности между максимальным и минимальным значениями пробивных напряжений.

Измерение скорости распространения фронта пламени статистическим методом производилось во время снятия регулировочных характеристик по составу смеси. Одновременно с этим для оценки цикловой неравномерности процесса сгорания осуществлялась фоторегистрация индикаторных диаграмм двадцати последовательных рабочих циклов. Параллельно фотографированию индикаторных диаграмм и регистрации скорости распространения фронта пламени производился непрерывный анализ ОГ на содержание в них CO и CO₂ с помощью оптикоакустических газоанализаторов.

Оценка цикловой неравномерности процесса сгорания осуществлялась двумя независимыми способами: по степени разброса δ максимального давления сгорания из фоторегистраций 20 последовательных циклов и по среднему квадратическому отклонению продолжительности (времени) прихода пламени к ионизационным датчикам из статистических кривых распределения, полученных в 300 последовательных циклах. Такая комплексная оценка позволяет оценить как общую цикловую неравномерность процесса сгорания, так и степень невоспроизводимости распространения пламени на различных стадиях процесса сгорания, что позволяет выявить причины появления цикловой неравномерности.

Для повышения точности опытов и уменьшения возможных ошибок, связанных с действием неуправляемых факторов, были предусмотрены следующие мероприятия:

- все испытания проводились на одной партии бензина (А-76) и масла, которые резервировались;
- сравнительные характеристики снимались в один день, что уменьшало влияние изменения атмосферных условий на измеряемые показатели;
- перед началом испытаний и периодически, по мере необходимости, между сериями сравнительных характеристик, в частности, снимаемых при различных системах зажигания, и при оценке условий пробоя искрового промежутка свечи зажигания, контролировался межэлектродный зазор свечи и зазоры в прерывательных узлах системы зажигания и цепи управления ионизационными датчиками. Также производилась стабилизация нагара путем работы двигателя на полной нагрузке в течение 10 минут;
- питание системы зажигания осуществлялось от аккумулятора с непрерывной его подзарядкой от выпрямителя и периодическим контролем напряжения в первичной цепи;
- измерение всех контролируемых величин: частоты вращения, времени расхода доз топлива и воздуха, величины пробивных напряжений, крутящего момента, концентрации CO и CO_2 , а также фоторегистрация индикаторных диаграмм, производилось одновременно;
- для каждой серии сравнительных опытов температурный режим двигателя поддерживался неизменным и соответствовал температуре охлаждающей воды $80 \pm 2^\circ\text{C}$ и температуре масла $65 \pm 2^\circ\text{C}$;
- все замеры производились на установившемся режиме работы двигателя, который контролировался по постоянству температуры ОГ и частоте вращения вала двигателя;
- применяемое оборудование и аппаратура обеспечивали необходимую точность замеров согласно требованиям ГОСТа 14846-81;
- для исключения влияния наводок от системы зажигания на работу прибора для статистического исследования процесса сгора-

ния ионизационным методом была предусмотрена экранировка как цепи ионизационных датчиков, так и высоковольтного провода катушки зажигания;

— перед каждой серией опытов проверялись отсутствие наводки от системы зажигания и чувствительность каналов усилителя ионизационных датчиков.

Проверка на наводку осуществлялась по показаниям импульсных счетчиков в режиме прокрутки двигателя без подачи топлива, а также при установке прерывателя 8 (рис. 4.15), управляющего работой регистрирующей схемы, в положение, когда схема регистрации отключалась в момент проскакивания искры, т.е. когда угол поворота коленчатого вала в градусах после подачи искры θ° п.к.в. был равен нулю. Если при этих условиях электромагнитные счетчики не срабатывали, то это свидетельствовало об отсутствии наводок.

Необходимая чувствительность каждого канала усилителей ионизационных датчиков устанавливалась из условия 100% срабатывания всех счетчиков. Для этого прерыватель 8 устанавливали в крайнее положение, когда схема регистрации отключалась после прихода фронта пламени ко всем ионизационным датчикам, и потенциометрами усилителя (рис. 4.16) добивались 100% срабатывания счетчиков.

Также осуществлялся периодический контроль степени загрязнения ионизационных датчиков путем замера сопротивления между центральными электродами и корпусами датчиков с помощью ампервольтметра типа АВО-5м. При снижении их сопротивления ниже 65 кОм производилась очистка датчиков от нагара вследствие неудовлетворительной работы.

Было установлено, что при работе двигателя на малых нагрузках и холостом ходу на ионизационных датчиках происходило быстрое образование токопроводящего нагара, который затруднял измерение скорости распространения фронта пламени и практически исключал

возможность использования данного метода на этих режимах. Поэтому за исследуемый режим был выбран режим частичной нагрузки, отвечающий $\eta_v = 0,45$, при котором еще достигалась удовлетворительная работа ионизационных датчиков.

При обработке результатов испытаний, оценивающих основные показатели двигателя, использовались следующие расчетные формулы:

1. Эффективная мощность двигателя

$$N_e = \frac{M_{кр} n}{974} \quad \text{кВт},$$

где $M_{кр} = P_{вес} \ell_t$ - крутящий момент на валу двигателя в кгс·м;
 $P_{вес}$ - показание измерительного устройства тормоза в кгс;
 ℓ_t - плечо весового устройства тормоза в м;
 n - частота вращения коленчатого вала в мин⁻¹.

2. Часовой расход топлива

$$G_t = 3,6 \frac{\Delta V_t \rho_t}{\tilde{t}} \quad \text{кг/ч},$$

где ΔV_t - объем дозы топлива в см³, израсходованный за время замера \tilde{t} (объем мерных паров);
 ρ_t - плотность топлива при испытании в г/см³;
 \tilde{t} - продолжительность замера расхода топлива в с.

3. Частота вращения вала двигателя

$$n = \Delta n / \tilde{t} \cdot 60 \text{ мин}^{-1},$$

где Δn - суммарное число оборотов (число циклов вращения),
 замеренное по суммарному счетчику за время \tilde{t} ;
 \tilde{t} - продолжительность замера в с.

4. Часовой расход воздуха

$$G_b = \frac{\Delta V_b \rho_b}{\tilde{t}} \quad \text{кг/ч},$$

где ΔV_b - объем воздуха в м³, израсходованный двигателем за время замера \tilde{t} ;

ρ_b - плотность воздуха при испытании в кг/м³.

$$\rho_b = 0,465 \frac{B_0}{273 + t_0},$$

где B_0 – барометрическое давление воздуха при испытании в мм.рт.ст.;

t_0 – температура воздуха в $^{\circ}\text{C}$ перед входом в расходомер.

5. Коэффициент наполнения

$$\eta_v = \frac{G_b}{30 n V_h p_b} \cdot 10^3,$$

где V_h – рабочий объем цилиндра в л.

6. Удельный эффективный расход топлива

$$g_e = \frac{G_r}{N_e} \cdot 10^3 \text{ г/кВт.ч.}$$

7. Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = G_b / 14,9 G_r.$$

Специальные показатели, характеризующие рабочий процесс по зажиганию и сгоранию, оценивались следующим образом:

1. Среднестатистические скорости распространения фронта пламени определялись по выражению

$$U_{\text{пл}} = \frac{n \cdot \ell}{\theta_{\text{н.к.в.}}^{\circ}} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ м/с},$$

где ℓ – расстояние от свечи зажигания до ионизационного датчика в мм;

$\theta_{\text{н.к.в.}}^{\circ}$ – угол поворота, соответствующий среднему значению времени от момента подачи искры до момента прихода пламени к датчику в град. поворота коленчатого вала – есть математическое ожидание $M(X)$, определяемое из графиков интегральных функций распределения моментов прихода пламени к тем или иным датчикам (см. рис. 4.17).

2. Величина и разброс пробивных напряжений $U_{\text{пр}}$ по киловольтметру С-96:

а) за величину $U_{\text{пр}}$ принималось максимальное значение пробивного напряжения из 20 последовательных циклов;

б) за разброс $\Delta U_{\text{пр}}$ – разность между максимальным и минимальными значениями $U_{\text{пр}}$, также из 20 циклов.

3. Цикловая неравномерность процесса сгорания:

а) средним квадратическим отклонением времени σ_{τ} прихода пламени к ионизационным датчикам определяемым из статистических кривых распределения;

б) степенью неравномерности максимального давления сгорания δ из фоторегистраций 20 наложенных индикаторных диаграмм последовательных циклов

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(P_{\max i} - P_{\max \text{ ср}})^2}{m}} / P_{\max \text{ ср}},$$

где $P_{\max i}$ - максимальное давление сгорания отдельного цикла;

m - число циклов;

$$P_{\max \text{ ср}} = \sum_{i=1}^m P_{\max i} / m \quad - \text{среднее значение разброса максимального давления на данном режиме работы.}$$

4.2. Экспериментальная установка

На рис.4.1 и 4.2 показана исследовательская установка, которая оснащена соответствующей аппаратурой и оборудованием, позволяющими проводить указанный круг исследований рабочего процесса, включая его индицирование, ионизационный метод исследования процесса сгорания и непосредственное измерение концентрации CO и CO₂ в отработавших газах. Установка позволяет варьировать в широких пределах такие параметры двигателя, как частота вращения коленчатого вала, наполнение, коэффициент избытка воздуха, угол опережения зажигания и различные способы и сочетания электрической обработки свежего заряда.

В экспериментальной установке использован одноцилиндровый двигатель УД-1, но в его конструкцию внесен ряд существенных изменений и дополнений в соответствии с задачами и целями данного исследования. Так, для изучения процесса сгорания на различных стадиях его протекания спроектирована и изготовлена специальная го-

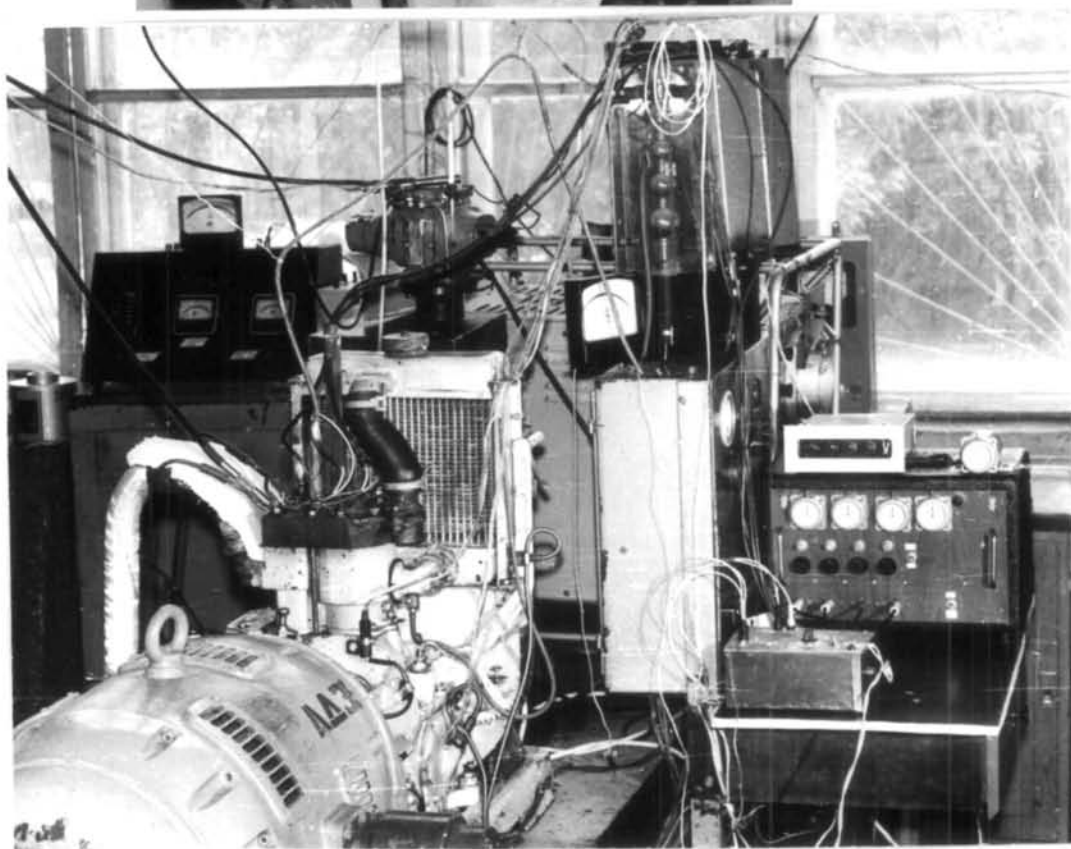
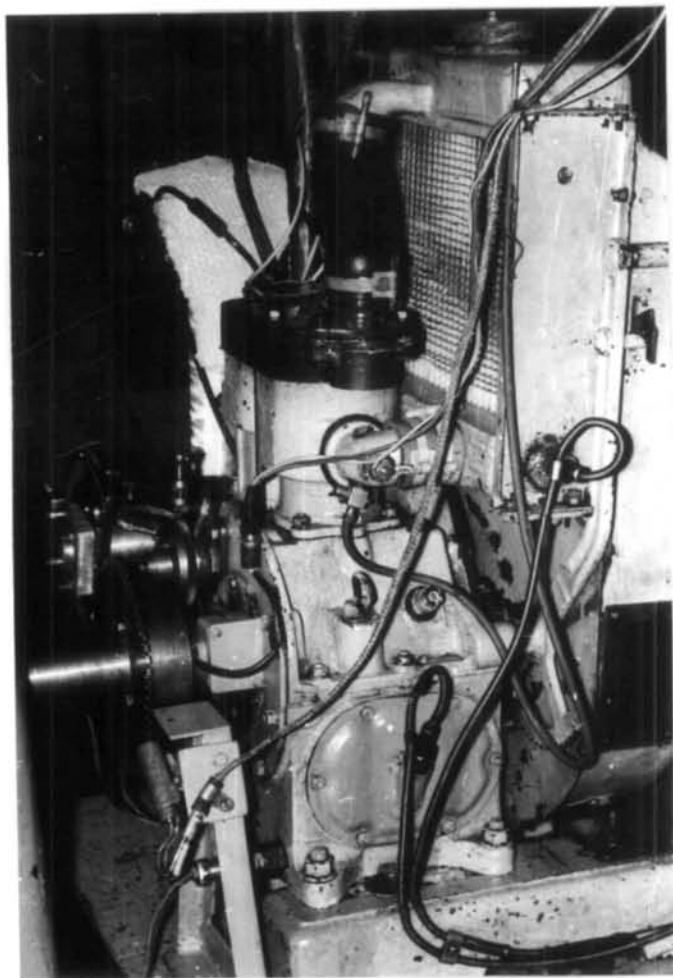
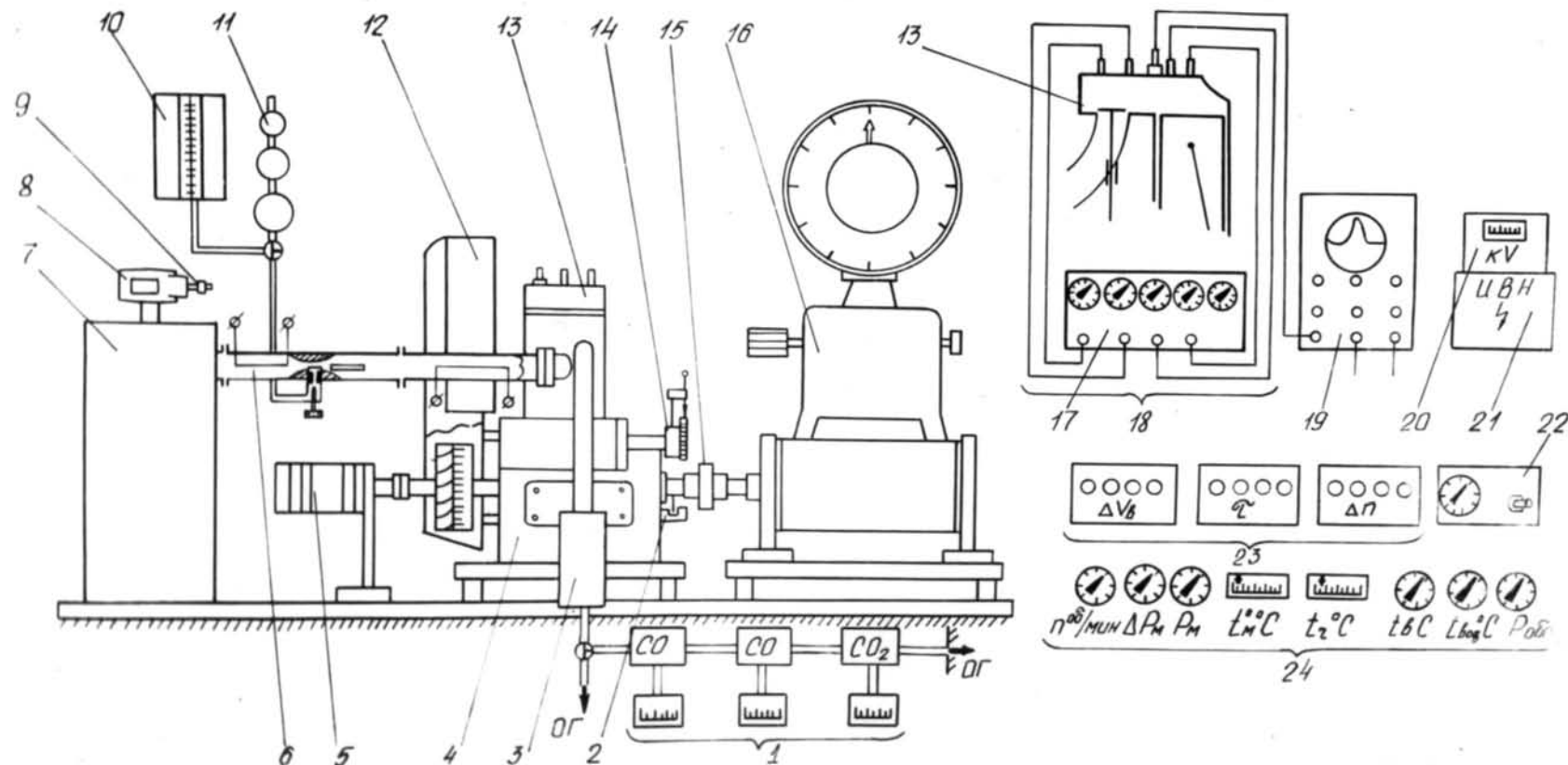


Рис.4.1. Общий вид установки

ОБЩАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ



1 - блок газоанализаторов; 2, 9 - датчики числа оборотов; 3 - смеситель ОГ; 4 - двигатель; 5 - генератор развертки; 6 - карбюратор комбинированный; 7 - ресивер; 8 - счетчик газа типа РГ-40; 10 - бак топливный, разгерметизированный; 11 - карбюратор комбинированный; 12 - термосифонный испаритель системы охлаждения; 13 - головка цилиндра; 14 - прерыватель; 15 - муфта соединительная; 16 - весовое устройство; 17 - усилитель сигналов ионизированных датчиков; 18 - система регистрации моментов прихода пламени к ионизированным датчикам; 19 - 2-х лучевой индикатор давления типа 2780-S; 20 - киловольтметр типа С-98; 21 - источник высокого напряжения; 22 - устройство для фоторегистрации наложенных индикаторных диаграмм; 23 - система замера φ , ΔV_b и Δp ; 24 - система контроля параметров двигателя.

Рис. 4.2.

ловка цилиндра^{*}(рис.4.3), которая отлита из серого чугуна с сохранением стандартной формы камеры сгорания и местоположения свечи зажигания. В экспериментальной головке, кроме свечи зажигания 3, размещены семь ионизационных датчиков 2, регистрирующих моменты прихода фронта пламени от искры и пьезокварцевый датчик давления I для записи изменения давления в цилиндре двигателя на 2-х канальный катодно-лучевой осциллограф "Орион".

Двигатель снабжен системой охлаждения термосифонно-испарительного типа и регулируемым обдувом воздуха, что позволяет достаточно точно поддерживать заданное тепловое состояние при различных режимах его работы.

В качестве тормозного устройства для регулирования скоростного и нагрузочного режимов использовалась балансирная машина, работающая по схеме двигатель-генератор, с измерением крутящего момента с помощью весовой головки.

Чтобы иметь возможность изменять угол опережения зажигания в достаточно больших пределах (до 50°) без значительного снижения величины вторичного напряжения, как это имеет место в магнето, последнее заменено батарейной системой зажигания с необходимыми дополнениями. Питание системы зажигания осуществлялось от аккумулятора 6СТ-128 с непрерывной его подзарядкой от выпрямителя ВСА-5.

Было изготовлено специальное прерывательное устройство (рис. 4.4), установленное вместо магнето и состоящее из корпуса и двух смонтированных в нем прерывательных узлов (системы зажигания и цепи ионизационных датчиков). Устройство обеспечивает угловые смещения любого из прерывателей на угол до 180° , что позволяет изменять в широких пределах угол опережения зажигания и управлять схемой работы ионизационных датчиков.

^{*}В разработке и изготовлении головки принимал участие ст.инженер НИСа Красносельский А.М.

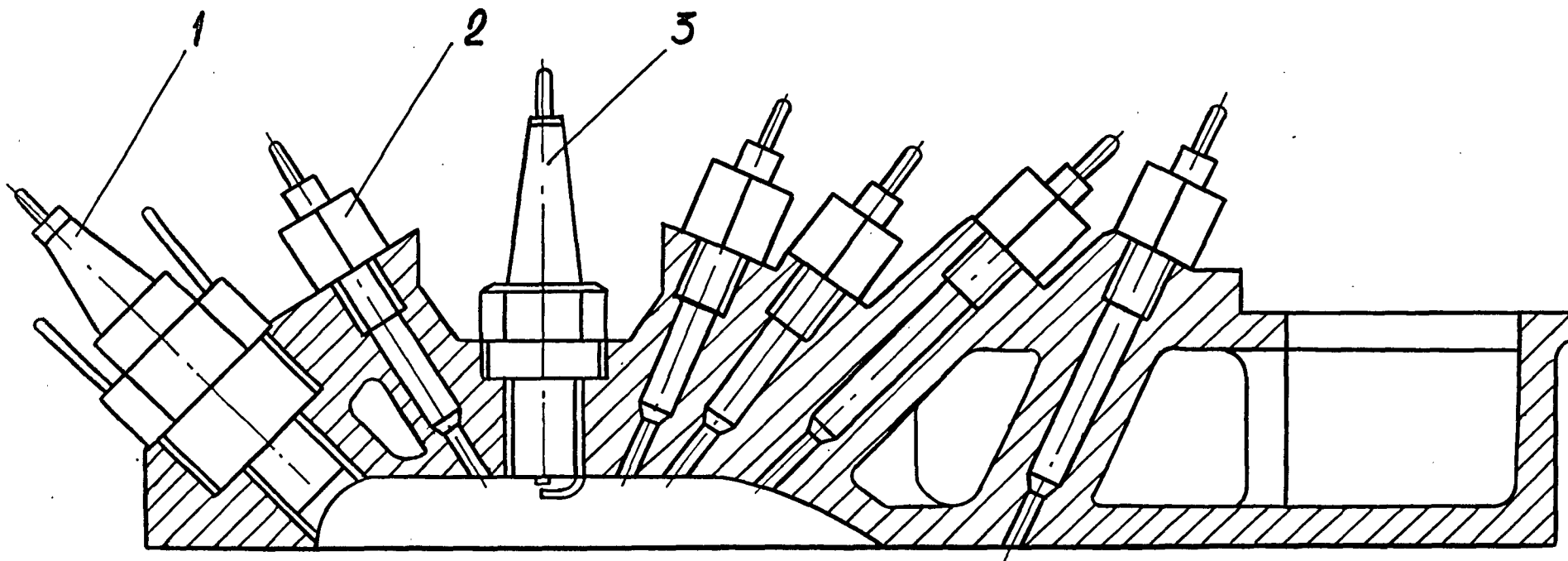


Рис. 4.3. Экспериментальная головка цилиндра

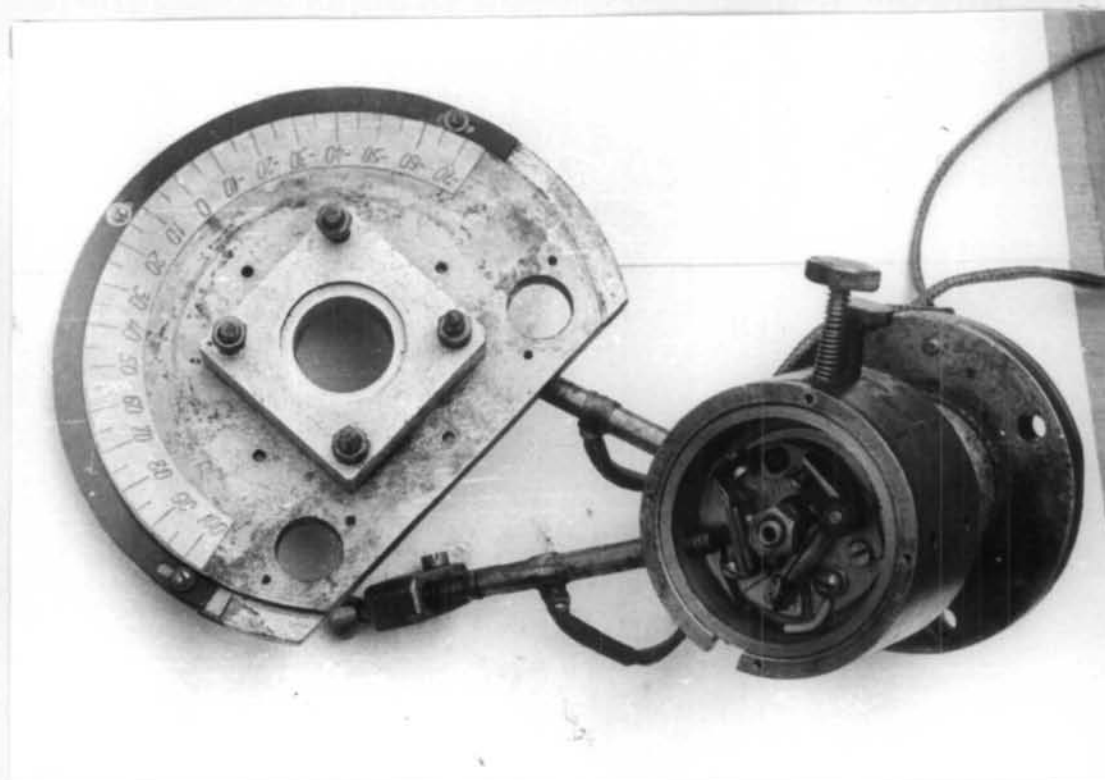


Рис.4.4 Прерывательное устройство системы зажигания
и цепи ионизационных датчиков

Измерение угла опережения зажигания осуществлялось с помощью стробоскопа типа ПСТ-1М и градуированной шкалы, установленной на маховике-вентиляторе.

Двойной прерывательный узел (рис.4.5), по конструкции аналогичный вышеописанному, был установлен с торца распределительного вала и предназначен для управления устройством получения диаграммы сжатия при фоторегистрации наложенных индикаторных диаграмм ряда последовательных рабочих циклов и регистрации общего числа рабочих циклов, задаваемых экспериментатором.

Расход воздуха измерялся при помощи ротационного счетчика РС-40, фотодатчика числа оборотов (рис.4.6) и цифрового электронного счетчика импульсов Ф-5007. Для сглаживания пульсаций давления, вызываемых работой двигателя перед счетчиком, в системе замера был установлен ресивер. Атмосферные условия на входе в ротационный счетчик определялись барометром типа "Анероид" и ртутным термометром с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$.

Расход топлива определялся объемным способом с использованием штихпробера, имеющего три протарированных объема, что позволяет получать приблизительно одно и то же время расхода топлива (около 60 с) на различных режимах работы двигателя. Измерение времени расхода мерной дозы топлива осуществлялось цифровым электронным счетчиком Ф-5007, работающим в режиме секундомера, работа которого заблокирована с работой таких же счетчиков количества оборотов двигателя и расхода воздуха, т.е. включение их на время замера выбранной дозы топлива происходит от одной кнопки, что позволяет производить замеры с минимальной погрешностью.

В измерении частоты вращения вала двигателя и расхода воздуха используется принцип суммарного счетчика оборотов, который заключается в следующем: флажок 2 (рис.4.7) фотодатчика оборотов, вращаясь, при каждом обороте один раз, прерывает световой

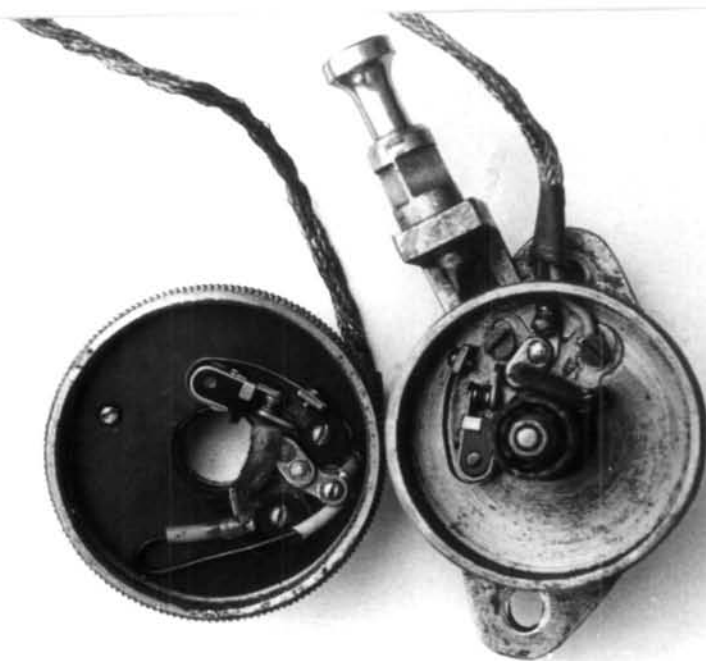


Рис.4.5. Прерывательный узел числа рабочих циклов
и устройства фоторегистрации индикаторных диаграмм

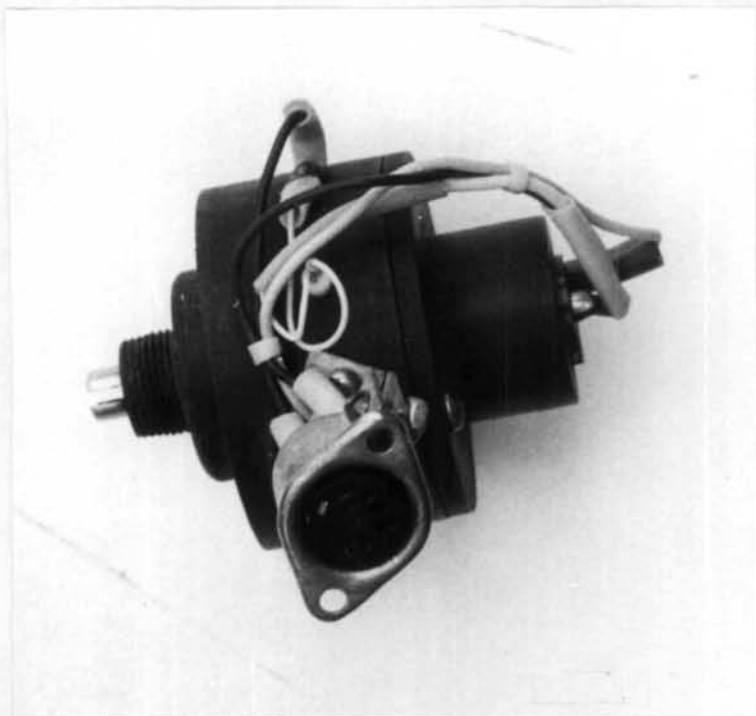


Рис.4.6. Фотодатчик импульсов (оборотов)

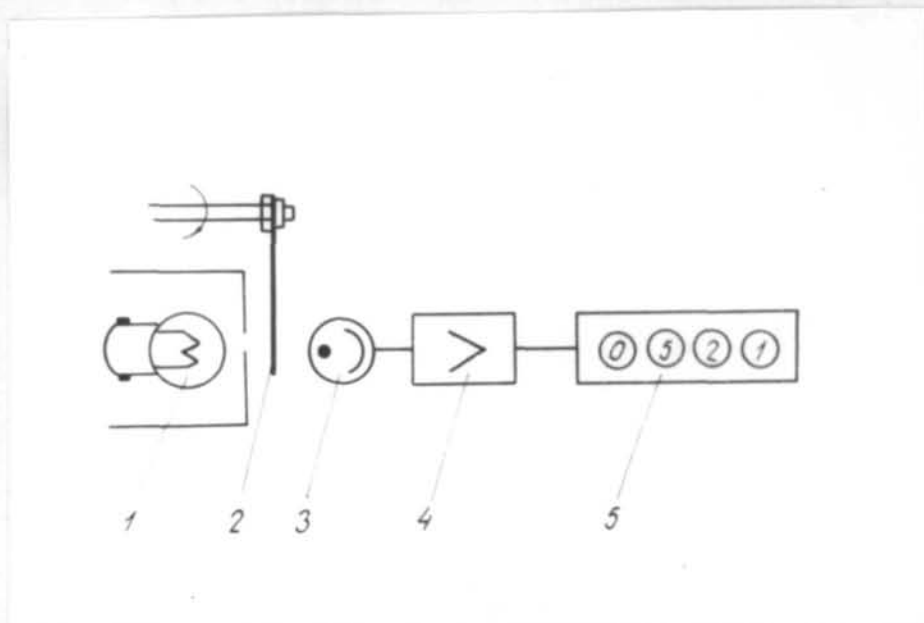


Рис.4.7. Схема замера суммарного числа оборотов

поток, падающий от осветителя I на фотозаэлемент 3. Возникающий при этом в цепи фотозаэлемента электрический сигнал усиливается усилителем 4, специально изготовленным для этих целей (рис.4.8), и поступает на цифровой электронный счетчик импульсов типа Ф-5007, по показаниям которого после его остановки определяют, какое количество оборотов сделал фляжок за время счета. На рис.4.9 показан общий вид приборов для измерения суммарного числа оборотов вала двигателя и ротационного счетчика.

Предварительная установка частоты вращения коленчатого вала двигателя и визуальное её слежение осуществлялось при помощи цифрового прибора ЦАТ-2м.

Измерение температуры отработавших газов осуществлялось хромель-алюмелевой термопарой, а температуры масла и воды-авиационными термометрами сопротивления типа П-I.

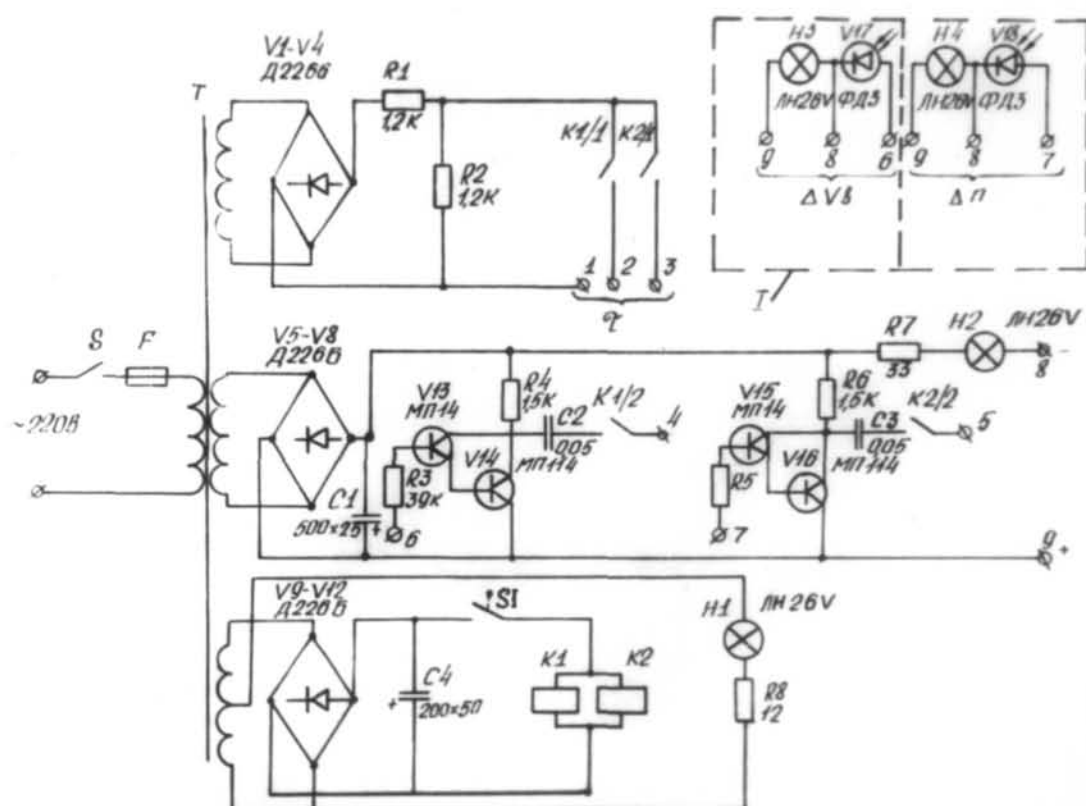
Указанные выше приборы и оборудование обеспечивают проведение экспериментов и измерений в соответствии с требованиями ГОСТа I4846-8I.

Ниже приведены данные, относящиеся к двигателю:

- число цилиндров I
- диаметр цилиндра, мм 72
- ход поршня, мм 75
- рабочий объем цилиндра, см³. 305
- степень сжатия 5,5
- номинальная мощность, кВт (л.с.). 3,7(5)
- частота вращения, мин^{-I}. 3000
- охлаждение жидкостное, термосифонно-
испарительного типа
- охлаждающая жидкость вода
- зажигание. от батарейной системы зажигания.

Для электрической обработки свежей смеси, поступающей в ци-

а)



б)



Рис.4.8. Усилитель сигналов фотодатчиков оборотов:
а - принципиальная схема; б- общий вид

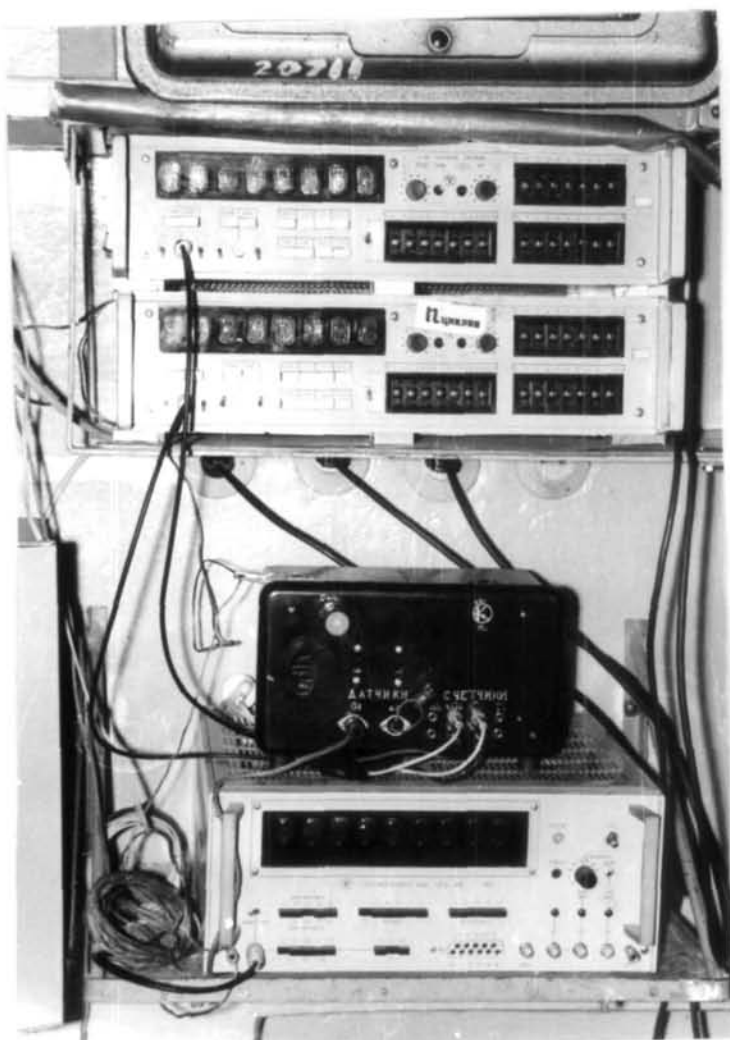


Рис.4.9. Общий вид приборов для измерения суммарного числа оборотов и времени

цилиндр двигателя, предусмотрены различные способы и сочетания электрической обработки. С этой целью разработан и изготовлен комбинированный карбюратор с горизонтальным потоком (см.рис.4.10), состоящий из трех основных частей: собственно карбюратора Б и двух ионизаторов А и В.

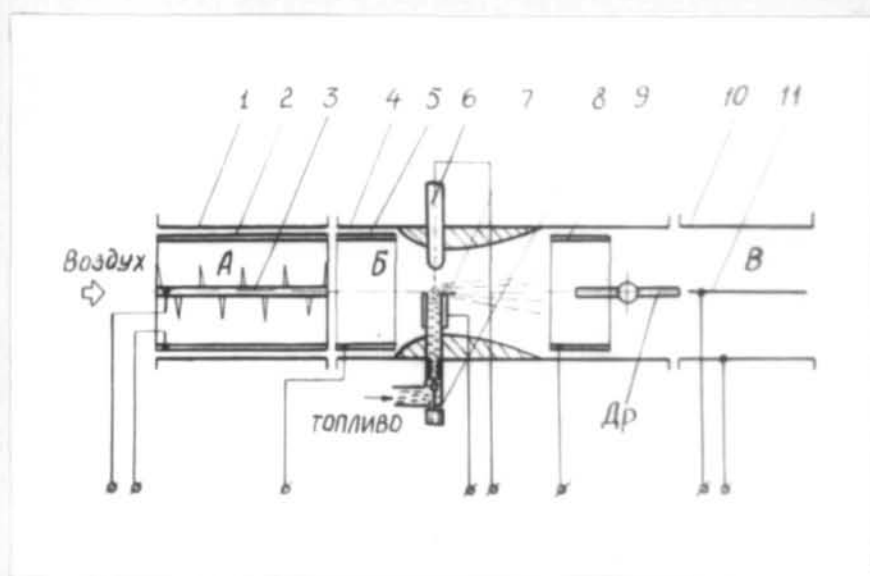
Организация электрического поля в карбюраторе Б позволяет в процессе распыливания топлива воздушным потоком передавать бензину электрический заряд, что способствует снижению поверхностного натяжения и более тонкому и однородному распыливанию топлива. С целью обработки топлива различными способами (контактной электризацией и методом электростатической индукции) в карбюраторе предусмотрены электроды 5, 6, 7 и 9, имеющие клеммы для соединения их с источником высокого напряжения, а корпус его выполнен из диэлектрического материала (оргстекла), что позволяет вести визуальное наблюдение за процессом истечения топлива из распылителя, его распыливанием и характером движения топливной пленки.

Размеры проточной части корпуса 4 соответствуют размерам стандартного карбюратора К-16В. Изменение состава смеси производится с помощью регулировочной иглы 8.

Ионизатор воздуха А (рис.4.10) конструктивно представляет собой металлическую втулку 2 длиной 90 мм и внутренним диаметром 28 мм, помещенную в корпусе 1, выполненном из эбонита. По оси втулки 2 расположен коронирующий электрод 3, выполненный в виде колючей проволоки. При подаче на электроды ионизатора достаточной разности потенциалов на иглах электрода 3 возникает коронный разряд, который ионизирует воздух, поступающий в карбюратор Б. Кроме данной конструкции в опытах использовались и два других типа ионизатора с системой электродов в виде: а) острие - плоскость; и б) концентрические цилиндры с отношением радиусов, равным 90.

Ионизатор В (рис.4.10) служит для электрической обработки в по-

а)



б)

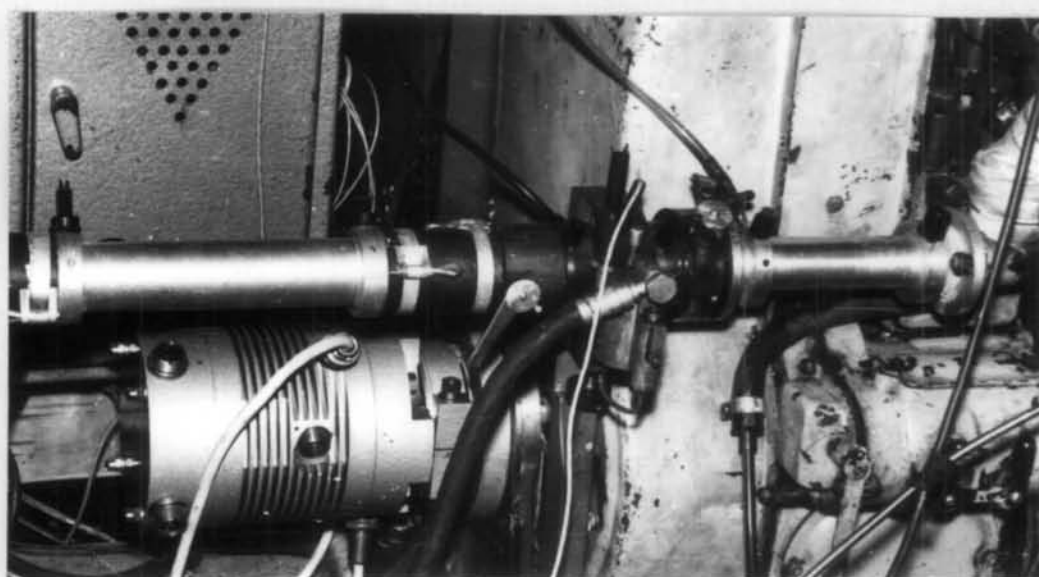


Рис.4.10. Экспериментальный карбюратор:

а - схема электрической обработки свежего заряда;
б - вид на двигателе

ле коронного разряда горючей смеси на входе в двигатель. Он имеет два электрода, один из которых выполнен в виде металлической трубы IО, изолированной от двигателя, а другой - в виде тонкой натянутой проволоки II, расположенной внутри электрода IО. Оба электрода имеют выводы для подключения источника высокого напряжения.

Электрическое поле в комбинированном карбюраторе создается с помощью источников высокого напряжения постоянного тока с пульсирующей составляющей частотой 4 кГц, а параметры поля (величина приложенной разности потенциалов к электродам ионизаторов и ток коронного разряда) контролируются соответственно статическим киловольтметром С-96 и микроамперметром типа М-266М.

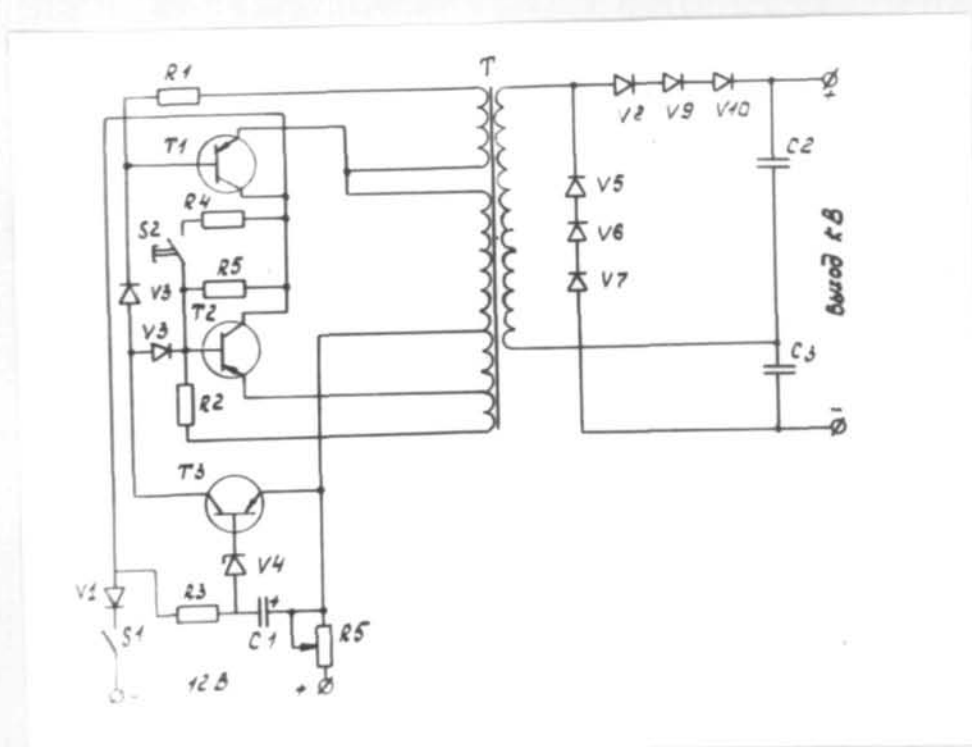
На рис. 4.II,а показана принципиальная схема источников высокого напряжения, а общий вид источников и киловольтметра - на рис. 4.II,б.

Для ионизации воздуха и топливовоздушной смеси использовалась отрицательная корона, т.е. на коронирующий электрод подавалось отрицательное напряжение постоянного тока. Это связано с тем, что, во-первых, отрицательные ионы обладают большой подвижностью по сравнению с положительными, а во-вторых, при отрицательной короне удастся поддерживать более высокое напряжение без искрового пробоя между электродами.

Кроме того, испытательный стенд был оборудован газоанализаторами для непрерывного анализа отработавших газов и специальной аппаратурой, предназначенной для исследования процесса сгорания и пробоя искрового промежутка свечи зажигания, описание которой приводится в последующих параграфах.

Ниже приводится принципиальная схема (рис. 4.I2) и описание системы зажигания, содержащей подпитывающий источник (в дальней-

a)



б)



Рис. 4.II. Аппаратура для создания электрического поля высокого напряжения: а — принципиальная схема источника высокого напряжения; б — общий вид источников и киловольтметра

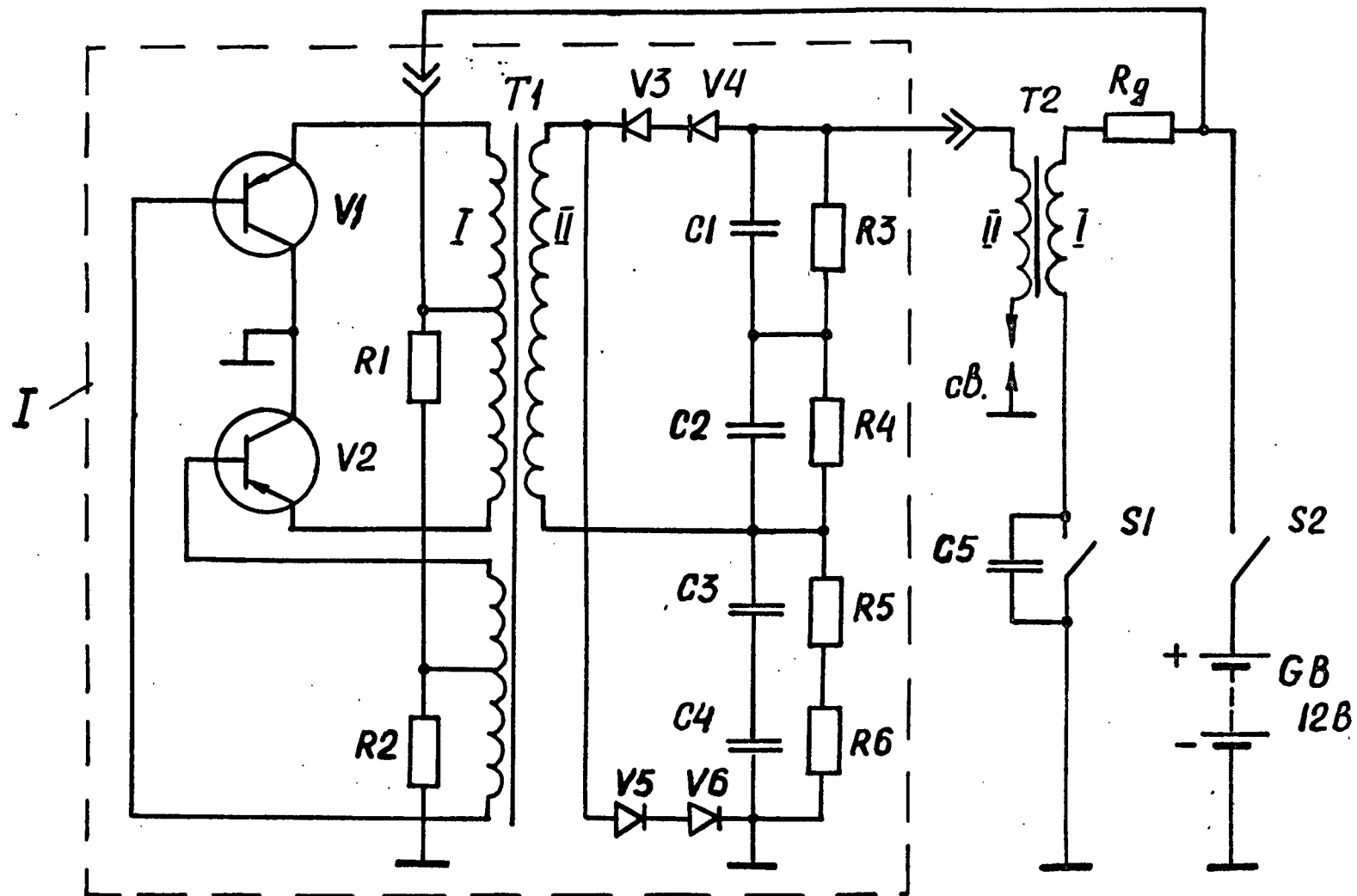


Рис. 4.12. Принципиальная схема системы зажигания с подпитывающим источником (СЭПИ)

шем - СЗПИ), которая также использовалась в опытах по исследованию электрической обработки топливовоздушной смеси, обеспечивая подачу на протяжении тактов наполнения и сжатия на центральный электрод свечи зажигания постоянного высокого напряжения положительной полярности.

Система зажигания состоит из обычной батарейной системы зажигания и подпитывающего источника I, который представляет собой статический двухтактный преобразователь напряжения. Выходная обмотка II трансформатора T I через выпрямитель, собранный на диодах V3 - V6 и конденсаторах C1-C4, присоединена к началу вторичной обмотки II катушки зажигания T2.

При включенном замке зажигания S2 преобразователь начинает работать и на выходе его появляется высокое постоянное напряжение около 4,5 кВ. Этого напряжения недостаточно, чтобы пробить искровой промежуток свечи зажигания, но оно создает некоторую предварительную ионизацию межэлектродного промежутка и тем самым облегчает условия его дальнейшего пробоя.

При размыкании контактов прерывателя SI системы зажигания на выходе катушки появляется высокое напряжение, под действием которого искровой промежуток пробивается. При этом сопротивление его резко падает, и конденсаторы C1- C2 или C3-C4, в зависимости от полярности выходного напряжения преобразователя, начинают разряжаться через вторичную обмотку II катушки зажигания T2 на искровой промежуток, сообщая ему дополнительную энергию.

4.3. Ионизационный статистический метод исследования процесса сгорания

С целью выявления особенностей в протекании процесса горения, связанных с электрической обработкой свежего заряда, использовался ионизационный метод, основанный на регистрации тока ионизации с помощью ионизационных датчиков (проволочных зондов)

в момент прихода к ним фронта пламени. Сущность этого метода (рис.4.13) состоит в том, что в момент касания фронтом пламени 1, помещенного на его пути изолированного электрода 2, к которому приложен некоторый положительный потенциал относительно стенок камеры сгорания, сопротивление в цепи ионизационного датчика резко уменьшается вследствие наличия ионизации в зоне горения. Образующиеся в пламени свободные электроны притягиваются к положительно заряженному электроду 2, в результате чего в цепи датчика появляется ионизационный ток, который после соответствующего усиления в усилителе 4 регистрируется при помощи счетчиков импульсов 3 или иным путем, например, — осциллографом. Размещая на пути фронта пламени ряд подобных ионизационных датчиков, можно регистрировать скорость распространения пламени на отдельных стадиях процесса сгорания, а также в различных направлениях камеры сгорания.

Положительным свойством ионизационного метода является то, что ионизационные датчики могут быть миниатюрными, например, отрезки платиновой проволоки диаметром 0,3..0,5 мм, пропущенной через тонкие фарфоровые трубочки, что делает возможным их размещение в камере сгорания любой конфигурации, практически никак не нарушая условия охлаждения и распространения пламени.

На рис.4.14 показано устройство ионизационного датчика, состоящего из стального корпуса 2, фарфоровой трубочки 3, с пропущенной в ней платиновой проволокой 6 диаметром 0,5 мм, служащей электродом датчика, и посеребренного разъема 1. Фарфоровая трубочка герметизирована в корпусе с помощью термоцемента 4. Конец платинового электрода выступает в камеру сгорания на 1,5 мм. Медная прокладка 5 служит для предотвращения прорыва газов из камеры сгорания.

Для изучения развития начального очага горения расстояния от

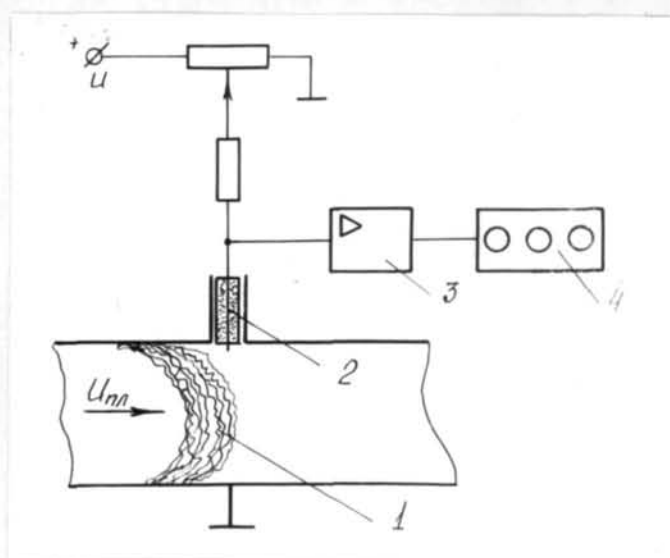
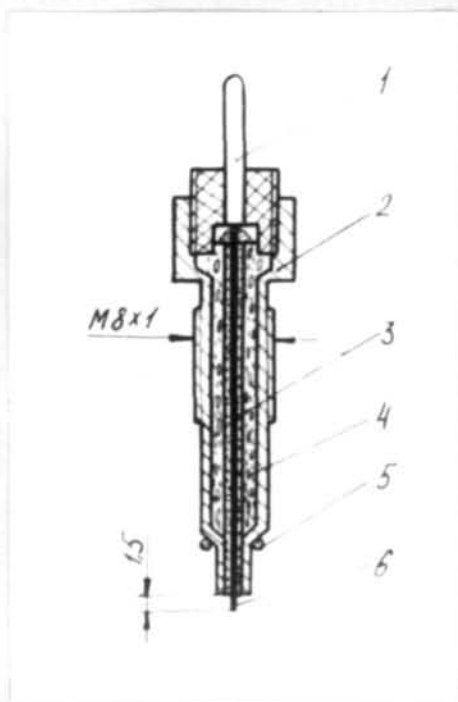


Рис.4.13. Ионизационный метод измерения скорости пламени

а)



б)

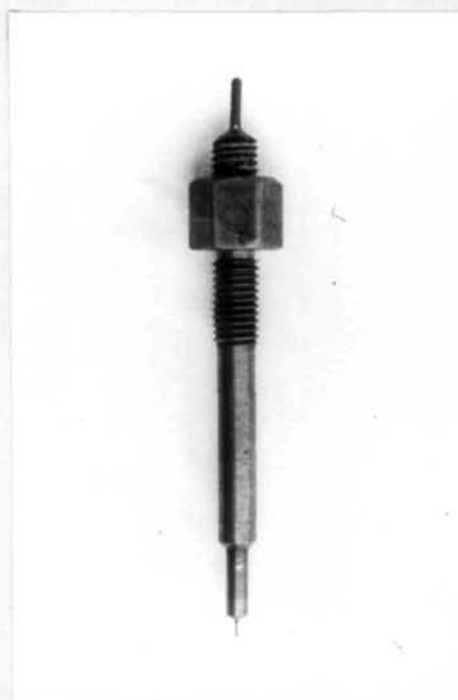


Рис.4.14. Ионизационный датчик:
а- осевое сечение; б - общий вид

свечи зажигания до ионизационных датчиков выбирались исходя из условия, что за период начальной фазы сгорает 5% массы заряда /18/, а также из конструктивных возможностей их размещения.

Выбор начальной фазы горения в качестве оценочного показателя обусловлен тем обстоятельством, что её длительность, в основном, зависит от состава смеси, температуры, давления, турбулентности в зоне свечи зажигания и состояния искрового промежутка, определяемого степенью ионизации и флуктуациями состава смеси в зоне свечи зажигания.

Как известно, в карбюраторных двигателях всегда имеет место цикловая неравномерность процесса сгорания в отдельных рабочих циклах. Поэтому с целью получения достаточно полных и объективных сведений о процессе распространения пламени в ряде последовательных циклов был использован известный статистический метод исследования процесса сгорания /64/, основанный на получении накопленного ряда частот моментов прихода фронта пламени к ионизационным датчикам, установленным в различных местах камеры сгорания за интервалы времени, задаваемые экспериментатором.

Этот метод успешно применялся в ряде работ как для оценки общей продолжительности процесса сгорания и его цикловой неравномерности /64/, так и для выявления отличий в протекании процесса сгорания, связанных с использованием различных систем зажигания /69/.

Использование статистического метода и различного удаления ионизационных датчиков от свечи зажигания позволяет при электрической обработке свежего заряда выявить отличия в скоростях и степень невоспроизводимости развития процесса сгорания на различных его стадиях, включая и начальный период развития очага горения в развитый фронт турбулентного пламени.

Общая схема статистической регистрации распространения фронта пламени в камере сгорания исследуемого двигателя с использованием семи ионизационных датчиков I...7 показана на рис.4.15. Ионизационные датчики 6 и 4 установлены от свечи зажигания на расстояниях 9 и 12,5 мм и предназначены для регистрации скорости распространения фронта пламени в начальной стадии процесса сгорания, а датчики 1,2,3,5,7 - на расстояниях 77,5; 33; 23; 33 и 23 мм - для выявления отличий в распространении турбулентного фронта пламени.

Для того, чтобы одновременно регистрировать моменты прихода пламени к четырем ионизационным датчикам, изготовлен четырехканальный усилитель прямоугольных импульсов, поступающих к электромагнитным счетчикам 9-12 типа МЭС-54. Его принципиальная схема и общий вид показан на рис.4.16. Электромагнитные счетчики считают количество циклов, в которых пламя достигает того или иного датчика за данный промежуток времени, выраженный в град. п.к.в., от момента проскакивания искры до отключения регистрирующей схемы специальным прерывателем 8 (рис.4.15), смонтированным в корпусе прерывательного устройства (рис.4.2) и снабженным зубчатым сектором с шагом в 1 градус.

Суммарным счетчиком 13, который срабатывает от прерывателя 14, установленного на конце распределительного вала, задается по желанию экспериментатора общее количество рабочих циклов за время регистрации.

Управление схемой регистрации осуществляется следующим образом. Включают тумблер S (рис.4.15) и по суммарному счетчику 13 отсчитывают наперед заданное число рабочих циклов (в опытах принято 300), по достижении которого схему регистрации отключают тем же тумблером. После этого снимают показания счетчиков 9-12. По результатам измерений строились статистические кривые

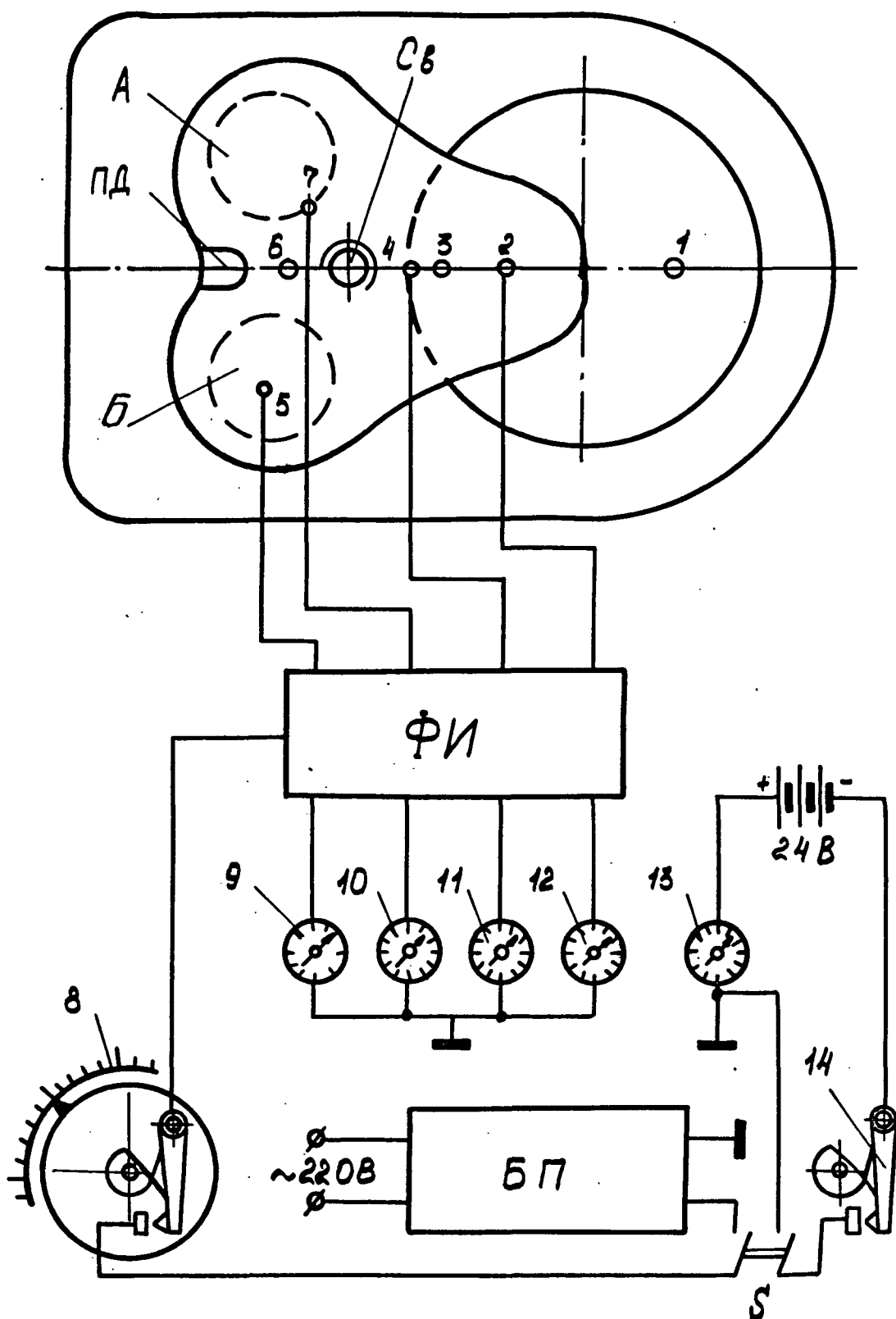


Рис. 4.15. Схема статистической регистрации распространения фронта пламени:

А и Б — зоны соответственно впускного и выпускного клапанов; С_з — свеча зажигания; ПД — пьезокварцевый датчик давления; ФН — усилитель с формирователем прямоугольных импульсов; БП — блок питания

распределения моментов прихода пламени к каждому из ионизационных датчиков. По оси ординат откладывалось относительное число циклов Δ , в которых фронт пламени достигал соответствующего датчика за период, отвечающий тому или иному числу градусов поворота коленчатого вала в соответствии с положением прерывателя 8.

На рис. 4.17 в качестве примера приведены статистические кривые распределения моментов прихода пламени к датчикам 2, 3, 4 и 7, полученные описанным способом для режима работы двигателя: $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$; $\eta_v = 0,45$; $\alpha = 1,04$ и оптимальном угле опережения зажигания.

Анализ полученных статистических кривых позволил предположить, что распределение имеет характер близкий к нормальному. Применив критерий согласия " χ^2 " к его проверке, было установлено, что высказанное предположение верно, т.е. распределение имеет характер достаточно близкий к нормальному, но с наличием некоторой ассиметрии и эксцесса, значение которых для кривых, полученных при различных условиях работы двигателя, неодинаковы. Так для всех кривых распределения ассиметрия всегда положительная, на что указывает "длинная часть" этих кривых, расположенная справа от центра рассеивания и растущая по мере обеднения топливовоздушной смеси. Что же касается эксцесса, то он при различных условиях меняется и по величине, и по знаку. Характер изменения ассиметрии и эксцесса хорошо согласуется с данными /69/.

Исходя из того, что математическое ожидание $M(x)$ для нормального закона распределения соответствует центру рассеивания, то по его значению, соответствующему среднему времени распространения пламени от свечи до того или иного датчика, и по расстоянию от этих датчиков до свечи зажигания можно определить среднее значение скорости распространения фронта пламени, как отношение пути пламени к среднему времени его прохождения.

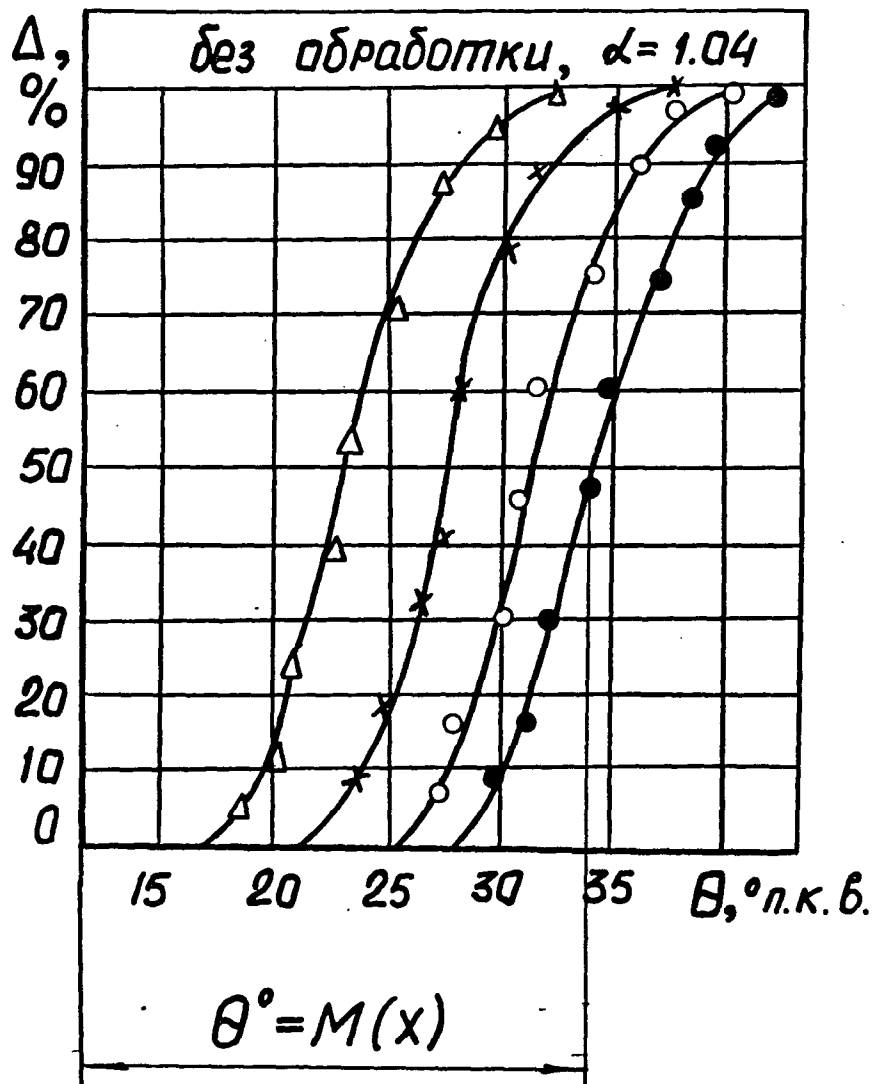


Рис. 4.17. К определению средней скорости пламени из статистических кривых моментов прихода пламени к ионизационным датчикам:

Δ - 7; x - 4; o - 3; \bullet - 2

Подсчитанное по известной формуле /13/ математическое ожидание хорошо согласуется со средним значением, взятым из кривой распределения для доверительного интервала $K_{ср} = 50\%$.

Было установлено, что асимметрия и эксцесс заметно влияют на величины минимальных и максимальных скоростей, условно подсчитанных соответственно при нижнем и верхнем доверительных интервалах $K_{min} = 5\%$ и $K_{max} = 95\%$. Поэтому при исследованиях была принята методика определения среднестатистической скорости распространения фронта пламени по параметру распределения — математическому ожиданию $M(X) = \theta_{п.к.в.}^{\circ}$, определяемому из интегральных кривых распределения для частоты (50%) прихода пламени от свечи зажигания к ионизационным датчикам, в град.п.к.в., как показано на рис. 4.17. Далее, по известным значениям $\theta_{п.к.в.}^{\circ}$ и расстояниям от свечи зажигания до ионизационных датчиков ℓ вычислялись средние скорости распространения фронта пламени U по выражению /30/:

$$U_{пл} = \frac{n \cdot \ell}{\theta_{п.к.в.}^{\circ}} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Также этим методом (по статистическим кривым распределения) осуществлялась оценка цикловой неравномерности процесса сгорания на различных стадиях его протекания: качественная — по крутизне статистических кривых, а количественная — по среднему квадратическому отклонению σ_t продолжительности (времени) прихода пламени к ионизационным датчикам.

4.4. Аппаратура и устройство для фоторегистрации наложенных индикаторных диаграмм

Для проведения общего анализа процесса сгорания при электрической обработке свежего заряда и, в частности, его цикловой неравномерности, являющейся одним из важнейших показателей рабочего процесса двигателя, наряду с ионизационным методом, который применялся для определения скорости распространения пламени, ис-

пользовался метод фоторегистрации наложенных друг на друга индикаторных диаграмм ряда последовательных рабочих циклов.

Визуальная наглядность и непосредственная запись действительной величины давления в цилиндре двигателя на фоторегистрации индикаторных диаграмм является одним из основных достоинств данного метода.

Индицирование двигателя осуществлялось с помощью комплекса аппаратуры венгерского производства фирмы "Орион": 2-х лучевого индикатора, генератора развертки и пьезокварцевого датчика, которые специально предназначены для измерения и фотозаписи давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

Генератор развертки 5 (рис.4.2), установленный с торца вала двигателя, предназначен для развертки индикаторной диаграммы по углу поворота кривошипа посредством подачи напряжения на горизонтальный усилитель осциллографа пропорционально углу поворота коленчатого вала, а также нанесения характерных отметок (в.м.т. и калибровочных меток угла поворота кривошипа) и управления затвором фотоаппарата.

Как известно, фотографирующее устройство индикатора в заводском исполнении не позволяет производить регистрацию строго заданного числа наложенных индикаторных диаграмм ряда последовательных рабочих циклов и диаграммы сжатия. Отсутствие последней снижает точность оценки параметров процесса сгорания по индикаторным диаграммам, в частности, не позволяет определить достоверно длительность начальной фазы сгорания. Кроме того, в устройстве не предусмотрено автоматическое управление процессом фоторегистрации с одновременным нанесением порядкового номера кадра. Необходимость в нумерации кадров после проявления пленки приводит к значительной потере времени и к возможным ошибкам.

С целью устранения отмеченных выше недостатков было разрабо-

тано устройство автоматической фоторегистрации наложенных индикаторных диаграмм ряда последовательных рабочих циклов с одновременным нанесением диаграммы сжатия в последнем по порядку цикле и порядкового номера кадра, принципиальная схема которого показана на рис.4.18.

Фоторегистрация индикаторных диаграмм и порядкового номера кадра производилась с экрана осциллографа посредством фотоаппарата "Зенит-ТТЛ". При нажатии на кнопку микропереключателя SI (рис.4.18) срабатывает электромагнит открытия шторки фотоаппарата K и реле KI , которое своими контактами $KI.1...KI.4$ соответственно блокирует микропереключатель SI , включает обмотку шагового искателя нумератора кадров $K4$, а также цепь питания цифровых ламп $H1$, $H2$ нумератора и электромагнитного счетчика числа циклов типа МЭС-54.

Второй конец обмотки счетчика через гнездо I подключается к прерывателю, установленному на конце распределительного вала. Когда показания счетчика МЭС будут равны выбранному числу циклов, кнопка микропереключателя SI отпускается.

В момент возвращения микропереключателя SI в исходное положение происходит замыкание цепи питания реле $K2$, которое срабатывает при замыкании контактов прерывателя, специально установленного на распределительном валу двигателя и подключенного параллельно контактам $K2.1$ через гнездо 2. Срабатывая, реле $K2$ контактами $K2.4$ закорачивает первичную цепь катушки зажигания на массу помимо прерывателя зажигания, а контактами $K2.2$ подключает к цепи питания реле $K3$. Последнее срабатывает с регулируемой задержкой, которая определяется цепочкой $R1 - R2 - C2$, достаточной для того, чтобы в одном цикле не произошло воспламенения. Затем, как только срабатывает реле $K3$, разрывается цепь питания всей схемы и прекращается фоторегистрация процесса.

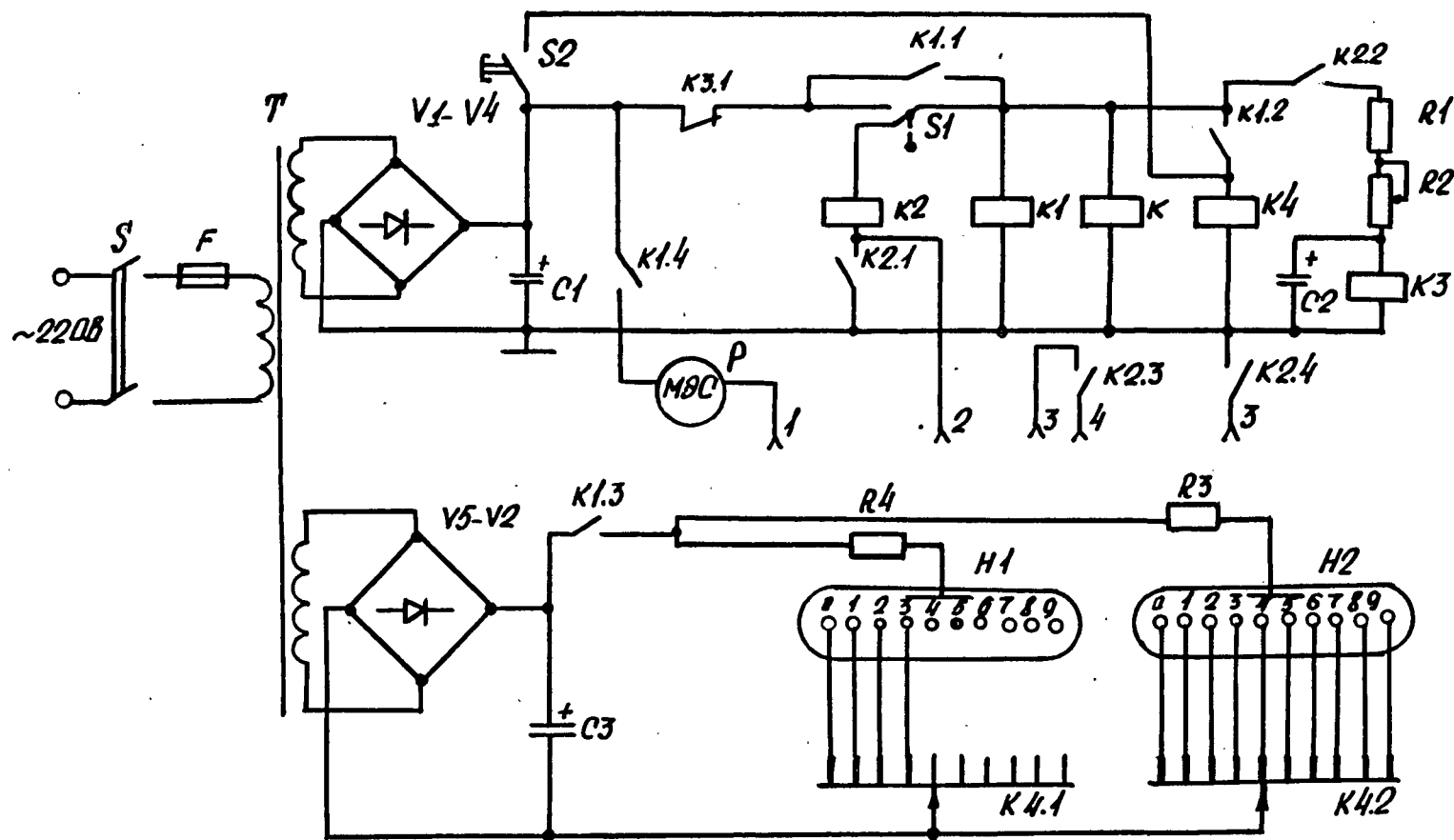


Рис.4.18. Принципиальная схема устройства фоторегистрации наложенных индикаторных диаграмм

С целью получения необходимой задержки времени в схеме предусмотрены свободные контакты реле К2.3 для подключения электрического измерителя времени, например, частотомер - хронометра Ф5080, с помощью которого можно предварительно откалибровать угол поворота движка потенциометра R 2 цепочки " RC" в миллисекундах или контролировать задержку в процессе фоторегистрации.

Требуемое время задержки для данной частоты вращения четырехтактного двигателя определяется как

$$\tau = \frac{120}{n} \text{ с},$$

где n - частота вращения в мин⁻¹.

В качестве нумератора кадров использованы миниатюрные индикаторы тлеющего разряда ИИ-2 (цифровые лампы), установленные в левой части экрана осциллографа (рис.4.19). С целью автоматического изменения порядкового номера кадра при каждом очередном нажатии микропереключателя S I использован шаговый искатель К4, который своими контактами К4.1 и К4.2 включает очередной номер кадра. Для ручной установки номера кадра, если такая требуется, служит кнопка S 2.

Описанное устройство работает надежно, просто в эксплуатации, не требует дополнительного времени и внимания при фоторегистрации и исключает возможность ошибок при последующей обработке фотопленки.

Образец фоторегистрации 20-ти наложенных индикаторных диаграмм, полученный с помощью разработанного устройства, приведен на рис.4.20. Располагая подобными диаграммами, проводился общий анализ процесса сгорания в двигателе и, в частности, оценивалась его цикловая неравномерность по степени разброса максимального давления сгорания в 20-ти последовательных циклах, которое подсчитывалось по формуле, приведенной в параграфе 4.1.

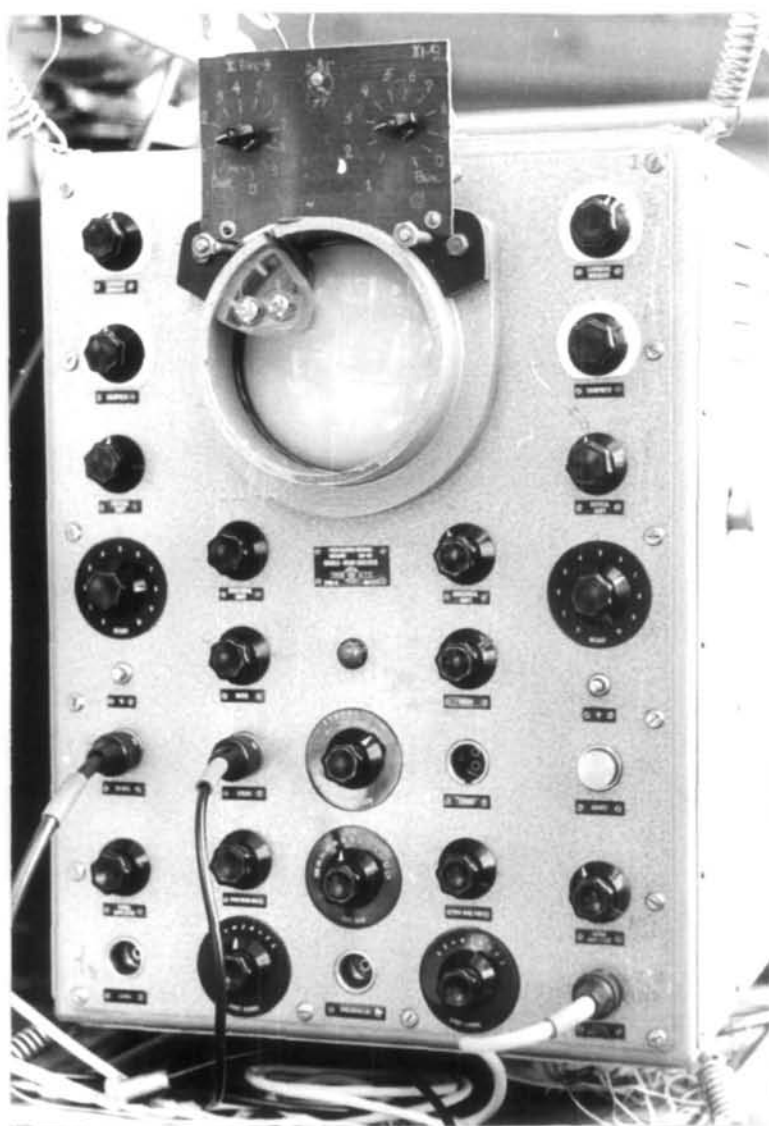


Рис. 4.19. Осциллограф с цифровым нумератором кадров

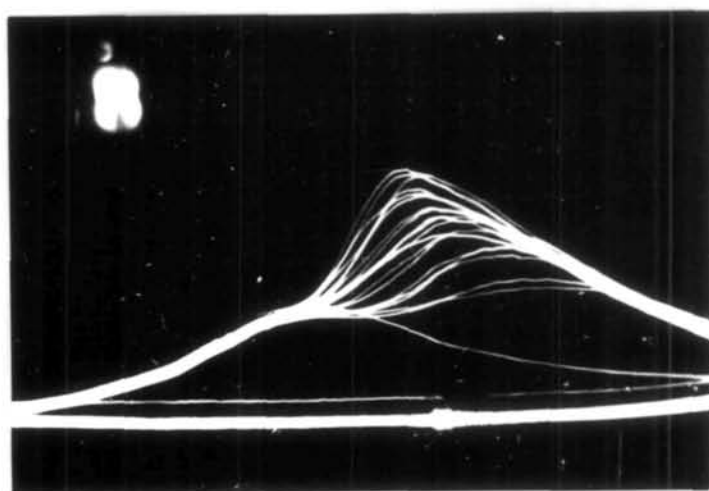


Рис. 4.20. Образец фоторегистрации наложенных индикаторных диаграмм

4.5. Измерение пробивных напряжений на свече зажигания

Надежное образование начального очага горения и превращения его в развитый фронт турбулентного пламени, т.е. воспламенение в двигателях с искровым зажиганием зависит от многих факторов: давления, температуры, турбулентности в зоне свечи зажигания, состава топливовоздушной смеси, параметров искрового разряда, количества остаточных газов и состояния искрового промежутка^{*}. Причем влияние отмеченных факторов на условия возникновения и развития начального очага горения проявляется неоднозначно и, в значительной степени, зависит от режима работы двигателя.

При работе двигателя на малых нагрузках, вследствие уменьшения температуры и давления, увеличения степени разбавления горючей смеси остаточными газами и ухудшения распыливания топлива из-за уменьшения скорости воздуха в диффузоре, топливовоздушная смесь становится менее склонной к воспламенению. При этих условиях резко увеличивается потребная энергия для воспламенения и, соответственно, величина пробивного напряжения (по сравнению с энергией на полном дросселе, где она минимальна), что приводит к повышению требований к системе зажигания по вторичному напряжению.

Вполне очевидно, что в широком диапазоне режимов работы автомобильного двигателя невозможно обеспечить оптимальными все вышеперечисленные условия для воспламенения. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к системе зажигания, является надежное воспламенение топливовоздушных смесей при неблагоприятных условиях. По этой причине является обязательным требованием для системы зажигания наличие запаса по вторичному напряжению /22/, т.е. превышение выходного напряжения над пробивным на величину

^{*} Здесь и далее под состоянием искрового промежутка понимается его термодинамическое состояние, определяемое однородностью смеси, и электрическое – определяемое его ионизацией.

$$K_3 = \frac{U_{2м}}{U_{пр}} \geq 1,4 \dots 1,5 ,$$

где $U_{2м}$ — наибольшая величина выходного напряжения, развиваемого системой зажигания;

K_3 — коэффициент запаса по вторичному напряжению.

Согласно закону Пашена /73/, пробивное напряжение искрового промежутка зависит от давления P и температуры T среды, через которую происходит электрический пробой, а также от величины межэлектродного промежутка $h_{сб}$ и в общем виде может быть представлено следующим выражением $U_{пр} = f(P \cdot h_{сб} / T)$.

Кроме того, величина $U_{пр}$ зависит от температуры центрального электрода, состава смеси, состояния искрового промежутка, обдува его и т.д.

Учитывая непосредственную связь между величиной $U_{пр}$ и потребной энергией E для воспламенения ($E \sim U_{кр}^2$), становится очевидным целесообразность снижения пробивного напряжения с точки зрения уменьшения требований к системе зажигания по вторичному напряжению.

С этой целью было проведено исследование по влиянию электрической обработки топливовоздушной смеси на условия пробоя искрового промежутка свечи зажигания, которое заключалось в измерении величины и разброса пробивных напряжений электростатическим киловольтметром С-96 (рис.4.11б) с высоковольтным выпрямителем.

В заводском исполнении киловольтметр С-96 предназначен для измерения постоянного и переменного напряжения синусоидальной формы в диапазонах 0...7,5; 0...15 и 0...30 кВ. Для измерения импульсных напряжений, создаваемых катушками зажигания, к киловольтметру присоединялся высоковольтный выпрямитель, собранный по схеме, приведенной на рис.4.21. Схема состоит из четырех последовательно включенных диодов $V1-V4$ (типа Д-1008) с допусти-

мым обратным напряжением 10 кВ, электростатического киловольтметра (типа С-96), накопительной емкости C (200 пф) и кнопки S , предназначенной для снятия заряда с конденсатора.

В процессе измерения высокое импульсное напряжение, развиваемое системой зажигания, через диоды $V1 - V4$ заряжает конденсатор C , при этом киловольтметр V показывает величину этого напряжения. Описанный прибор позволяет также измерять вторичное напряжение катушки зажигания. В этом случае используется более высокий диапазон 15...30 кВ.

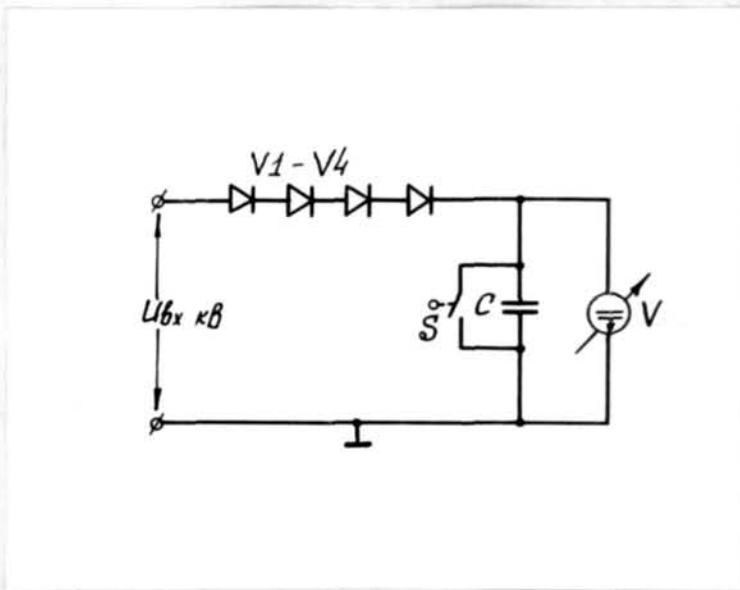


Рис.4.21. Принципиальная схема высоковольтного выпрямителя

Кроме того оценка величины $U_{пр}$ производилась с помощью делителя напряжения и импульсного осциллографа Э-206, специально предназначенных для диагностирования систем зажигания.

При проведении данных исследований за основу была взята методика сравнения пробивных напряжений, измеренных в условиях электрической обработки свежего заряда и в её отсутствие, на каждой опытной точке регулировочной характеристики по составу смеси. Данная методика позволяет получить достаточно достоверные результаты вследствие соблюдения одинаковых условий при испытаниях (тепловоб-

го состояния, состава смеси, нагрузки, угла опережения зажигания, скорости вращения и т.п.), влияющих на величину пробивного напряжения.

Оценка величины и разброса пробивных напряжений, соответственно, проводилась по максимальному его значению и по разности между максимальным и минимальным значениями $U_{пр}$ в 20-ти последовательных циклах.

4.6. Оценка токсичности отработавших газов

С целью оценки оказываемого влияния электрической обработки свежего заряда на токсичность отработавших газов ОГ осуществлялся их непрерывный анализ по двум компонентам—окиси углерода CO и углекислому газу CO₂ с помощью оптико-акустических газоанализаторов ОА-2109 и ОА-2209. Для возможности измерения концентрации CO в широких пределах и с достаточной точностью при малых ее значениях в комплект установки входили два газоанализатора на CO с пределами измерения 0...1 и 0...10 об. процентов и один на CO₂ с пределами 0...20 об. процентов (рис.4.22).

Соединение газоанализаторов с выпускной системой двигателя осуществлялось с помощью трубки—заборника газа, выполненной из нержавеющей стали.

Для получения средней пробы газа, соответствующей данному режиму работы двигателя, газ отбирался после специального смесителя 3 (рис.4.2), встроенного в выпускную систему.

В указанных газоанализаторах время переходного процесса (τ пер.), от момента изменения концентрации газов до изменения положения стрелки самописца, при использовании стандартных вспомогательных устройств (блоков подготовки и регулировки газов), обладающих значительными газовыми объемами, составляет от 90 до 120 сек., что является не совсем удобным при проведении опытов на двигателе. Для уменьшения времени переходного процесса необ-

ходимо до минимума уменьшить все газовые объемы подводящей части, т.е. от места забора ОГ до приемников газоанализаторов. С этой целью часть вспомогательных устройств (регулятор расхода, редуктор давления и т.п.) были исключены ввиду их ненужности, а все оставшиеся стандартные устройства были заменены на вновь изготовленные, но с гораздо меньшими газовыми объемами, что, в конечном итоге, позволило добиться времени переходного процесса газоанализаторов не более 35 сек.

На рис. 4.22 показана измененная газовая схема газоанализаторов, в которой для приведения параметров газовой смеси в соответствие с требованиями на эксплуатацию оптико-акустических газоанализаторов, предусмотрены соответствующие элементы. Так для очистки анализируемого газа от твердых частиц, снижения влажностного содержания и контроля его чистоты предусмотрены: фильтр предварительной очистки 2, фильтр - осушитель 3 и контрольный фильтр 4, а необходимый расход, создаваемый побудителем расхода 7, обеспечивается с помощью ротаметра 4 и вентиля 6.

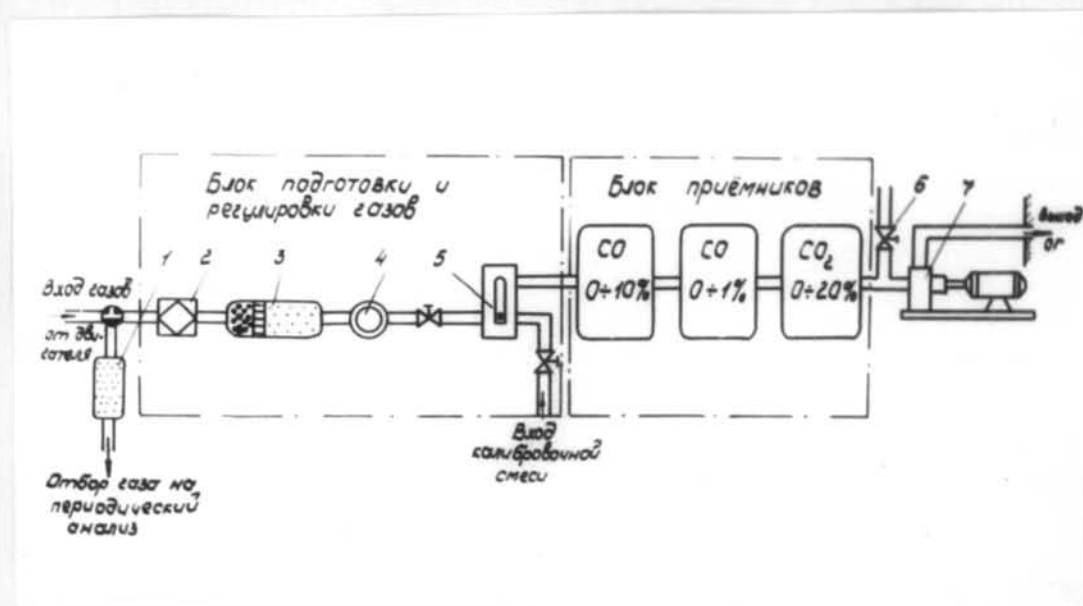


Рис. 4.22. Газовая схема газоанализаторов

Первоначальная калибровка газоанализаторов была проведена с помощью контрольной газовой смеси согласно заводской инструкции, а в дальнейшем периодически осуществлялся контроль и корректировка нулевой точки.

Ведение непрерывного анализа ОГ значительно упростило проведение эксперимента и позволило оперативно получать информацию с большей её достоверностью, чем при методике с отбором проб газа в емкости и его последующем анализе.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВЕЖЕГО ЗАРЯДА НА ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАРБЮРАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Анализ литературных источников и патентной информации, а также результаты безмоторных испытаний и теоретических исследований процессов смесеобразования и сгорания, показывают, что одним из способов дальнейшего совершенствования рабочего процесса может быть электрическая обработка свежего заряда полями повышенной напряженности, которая в результате улучшения тонкости распыливания топлива и образования значительного количества химически активных частиц в смеси может оказать положительное влияние на процессы смесеобразования и зажигания.

Задачей настоящей главы является экспериментальное определение степени влияния электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя и, в первую очередь, на его топливную экономичность, а также целесообразность ее практического использования.

5.1. Исследование эффективности отдельных видов электрической обработки свежего заряда

Перед проведением основной программы исследований по влиянию электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса двигателя была проведена сравнительная оценка эффективности каждого вида электрической обработки свежего заряда: ионизации воздуха, поступающего в двигатель, электризации топлива в процессе его распыливания и электрической обработки топливовоздушной смеси в поле коронного разряда.

Эти исследования были проведены для режима работы двигателя, отвечающего $\eta_v = 0,45$ и $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ путем снятия регулировочных характеристик по составу смеси с регистрацией параметров рабочего процесса, в качестве которых на данном этапе были выбра-

ны: скорость распространения фронта пламени для 4-го датчика $U_{пл}$, величина и разброс пробивных напряжений $U_{пр}$, цикловая неравномерность начальной стадии процесса сгорания и токсичность отработавших газов по CO.

Источниками высокого напряжения для электрической обработки свежего заряда являлись источники постоянного напряжения с пульсирующей составляющей частотой 4 кГц.

5.1.1. Ионизация воздуха, поступающего в двигатель

В опытах по ионизации воздуха в поле коронного разряда использовались три типа ионизаторов с системой электродов:

1. острие-плоскость - рис.5.1;
2. концентрические цилиндры - рис.5.2,а;
3. коронирующий электрод в виде колючей проволоки - рис.5.2,б.

Результаты этих исследований представлены на рис.5.3.

Как следует из полученных зависимостей, ионизация воздуха в указанных ионизаторах при токах коронного разряда ($I_{кр}$) от 300 до 700 мкА не оказывает существенного влияния на вышеотмеченные характеристики рабочего процесса.

Наибольший эффект из сравниваемых ионизаторов достигается при ионизации воздуха в поле коронного разряда, образованного коронирующей проволокой, расположенной вдоль оси потока (второй тип). Этот эффект при $I_{кр} = 400$ мкА в области бедных составов смеси выражается в увеличении $U_{пл}$, регистрируемой датчиком 4, характеризующим развитие начальной стадии процесса сгорания, в среднем на 11%; в снижении величины $U_{пр}$ на 4...7% при явной тенденции к уменьшению их разброса; в снижении на 5...8% цикловой неравномерности, а также в уменьшении концентрации окиси углерода в отработавших газах в области значений $\alpha < 1$ на 4...6%.

Практическое отсутствие эффекта при использовании первого и третьего ионизаторов можно объяснить, исходя из основного фак-



Рис.5.1. Один из вариантов коронирующих электродов ионизатора воздуха

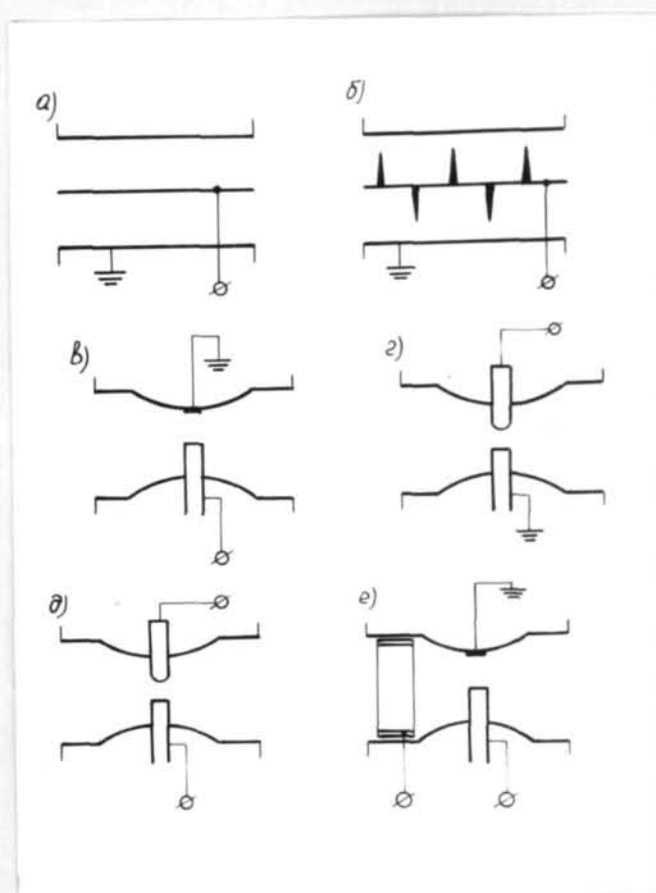


Рис.5.2. Способы электрической обработки свежего заряда

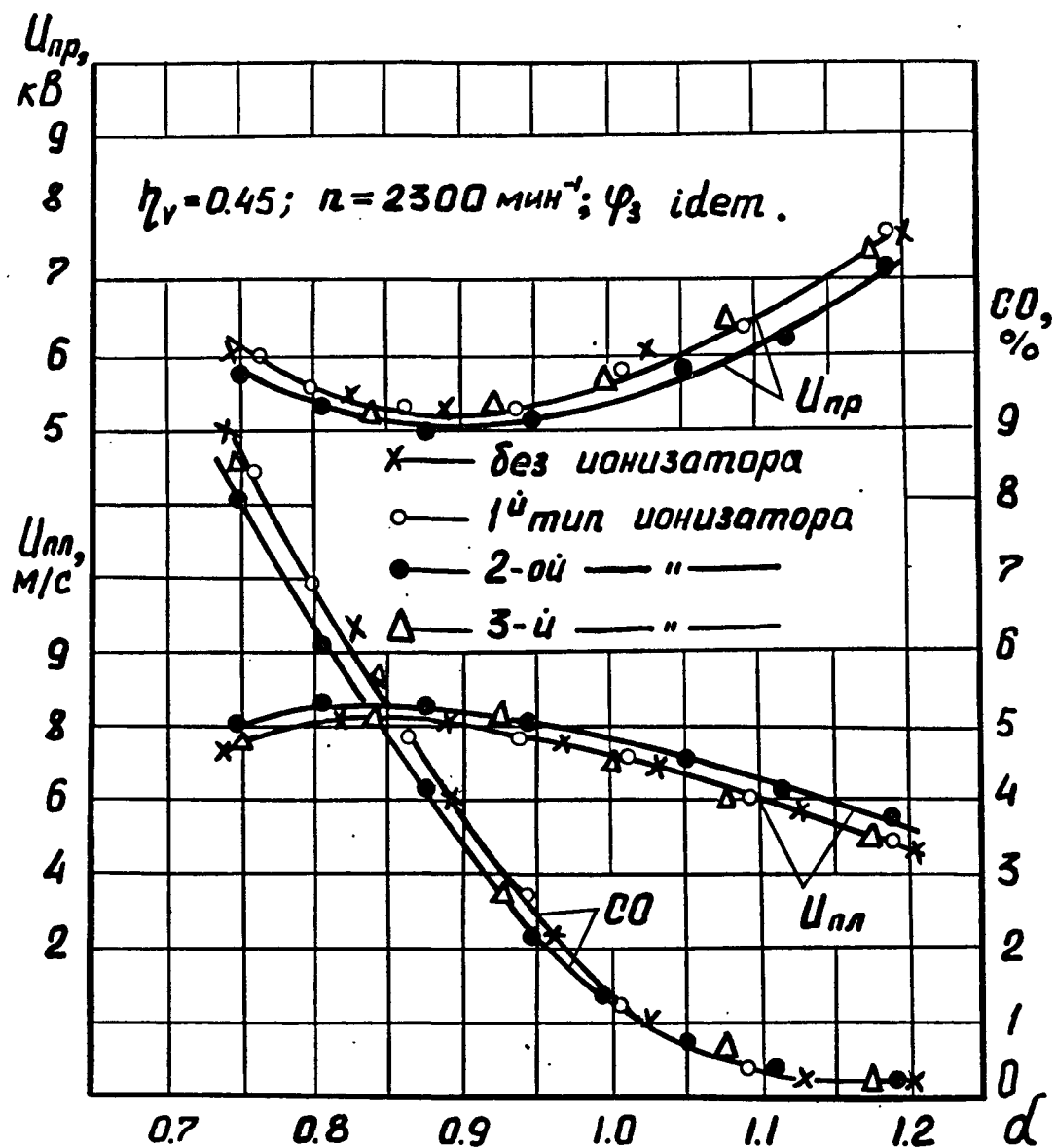


Рис. 5.3. Влияние ионизации воздуха на концентрацию CO в ОГ, скорость распространения пламени $U_{пл}$ и величину пробивных напряжений $U_{пр}$ (при $I_{кр} = 300 \dots 700 \text{ мкА}$)

тора, определяющего степень ионизации газов, — времени пребывания воздуха в поле коронного разряда, которое, главным образом, зависит от скорости потока воздуха и активной зоны ионизатора. В ионизаторах I и 3-го типа, представляющих собой коронирующие электроды в виде отдельных игл, активная зона ионизации при одинаковой общей длине ионизаторов меньше, чем во втором типе, где ею является вся длина коронирующего электрода (проволоки). Влияние фактора времени пребывания воздуха в поле коронного разряда на степень его ионизации было проверено при работе двигателя на режиме холостого хода. В результате было зафиксировано увеличение эффективности 2-го типа ионизатора и наличие некоторого эффекта при использовании I и 3-го ионизаторов, что при одинаковых значениях тока коронного разряда для различных режимов работы двигателя является следствием увеличения времени пребывания воздуха в поле коронного разряда, определяющего степень его ионизации. Эта проверка была произведена без оценки скорости распространения пламени вследствие причин, изложенных в параг.4.1.

Как следует из полученных результатов, ионизация воздуха в поле коронного разряда не привела к существенному улучшению показателей рабочего процесса и, по-видимому, она, сама по себе, не может являться эффективным средством улучшения рабочего процесса двигателя и снижения его токсичности ОГ.

5.1.2. Электризация топлива в процессе его распыливания

При электрической обработке топлива в процессе его распыливания (в дальнейшем — электризация топлива) были, в основном, опробованы два вида электризации: контактная, когда к распылителю 7 подводилось постоянное высокое напряжение, а электрод 6 заземлялся (см. рис.4.10,а), и электризация методом электростатической индукции — с противоположным соединением электродов.

В результате указанных исследований было зарегистрировано

увеличение расхода бензина при том же положении регулировочной иглы и изменение показателей рабочего процесса двигателя. Это влияние наблюдалось при обоих видах электризации, однако наибольшим оно было при контактной электризации вследствие большей величины заряда, приобретаемого топливом.

Изменение расхода бензина при его электризации является результатом силового действия электрического поля на топливо, т.е. сильное неоднородное поле, возникающее между распылителем 7 и электродом 6 в результате приложения высокого напряжения, способствует вытягиванию бензина из распылителя. Аналогичный процесс наблюдался нами в условиях безмоторной установки и описан в параг. 2.3 и /27/.

Подобный эффект при наложении электрического поля высокой напряженности в условиях свободного истечения различных жидкостей и, в том числе, дизельного топлива, наблюдали Асакава /5,23/ и Страубел /101/.

Следует заметить, что при прочих равных условиях отмеченный эффект, в первую очередь, будет зависеть от напряженности приложенного электрического поля между электродами. В нашем случае $E = 12 \text{ кВ/см}$ являлась предельной с точки зрения возникновения искрового пробоя между распылителем 7 и электродом 6.

В дальнейшем опыты по влиянию электрической обработки топлива на выбранные показатели рабочего процесса были проведены только для контактной электризации, которая, как и при безмоторных исследованиях, оказалась наиболее эффективной по сравнению с электризацией методом электростатической индукции. Результаты этих исследований представлены на рис.5.4 и 5.5.

Из анализа кривых 1,2 рис.5.4, характеризующих расход топлива, следует, что изменение его при положениях иглы, соответствующих бедным составам смеси ($\alpha > 1$), менее значительно, чем при

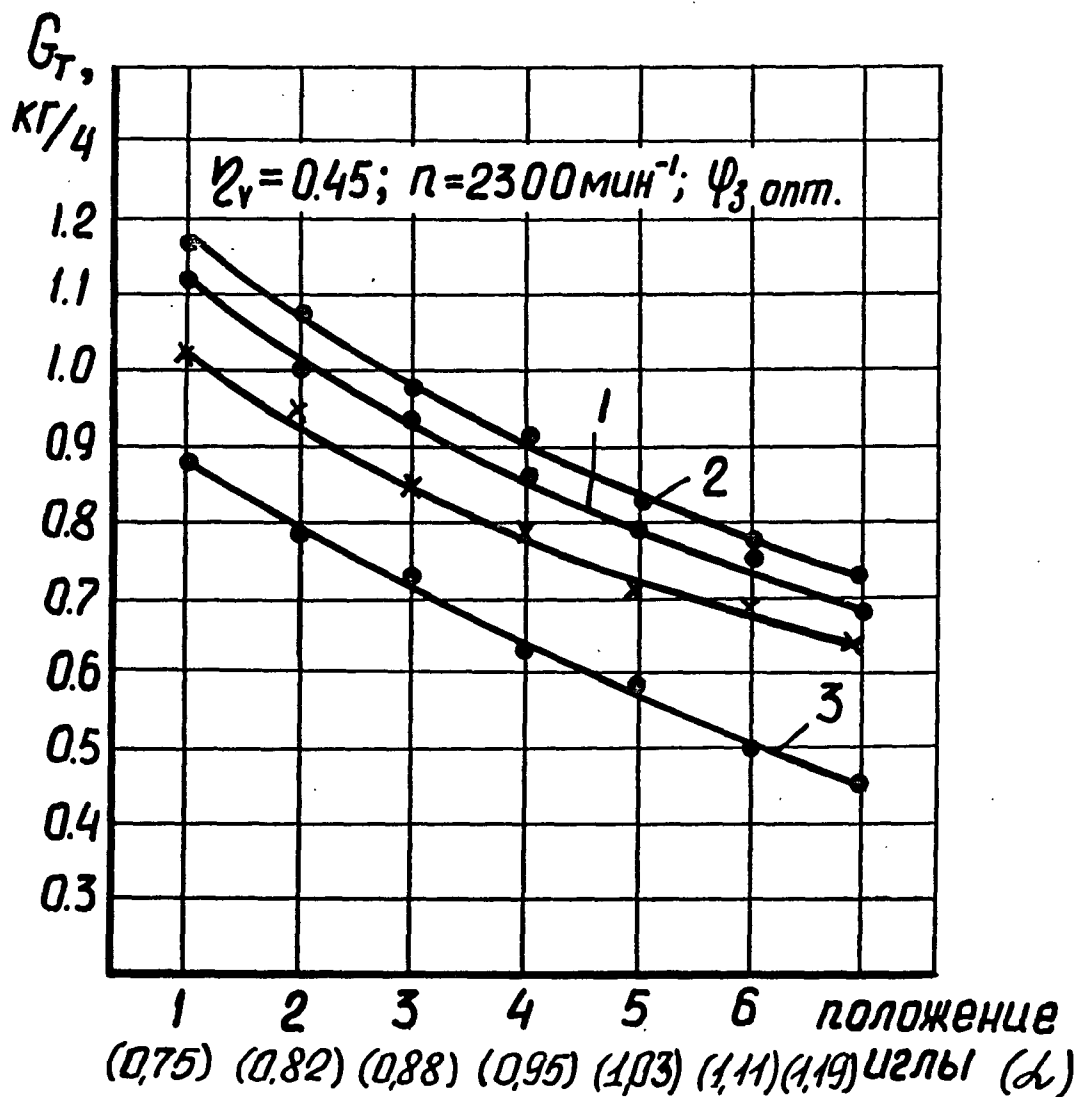


Рис. 5.4. Изменение расхода топлива G_T при его электризации и различных соединениях электродов:
 1 – соединение по схеме б (рис.5.2);
 2,3 – соединение по схеме д (рис.5.2);
 x – без обработки (электризации) топлива;
 • – с обработкой

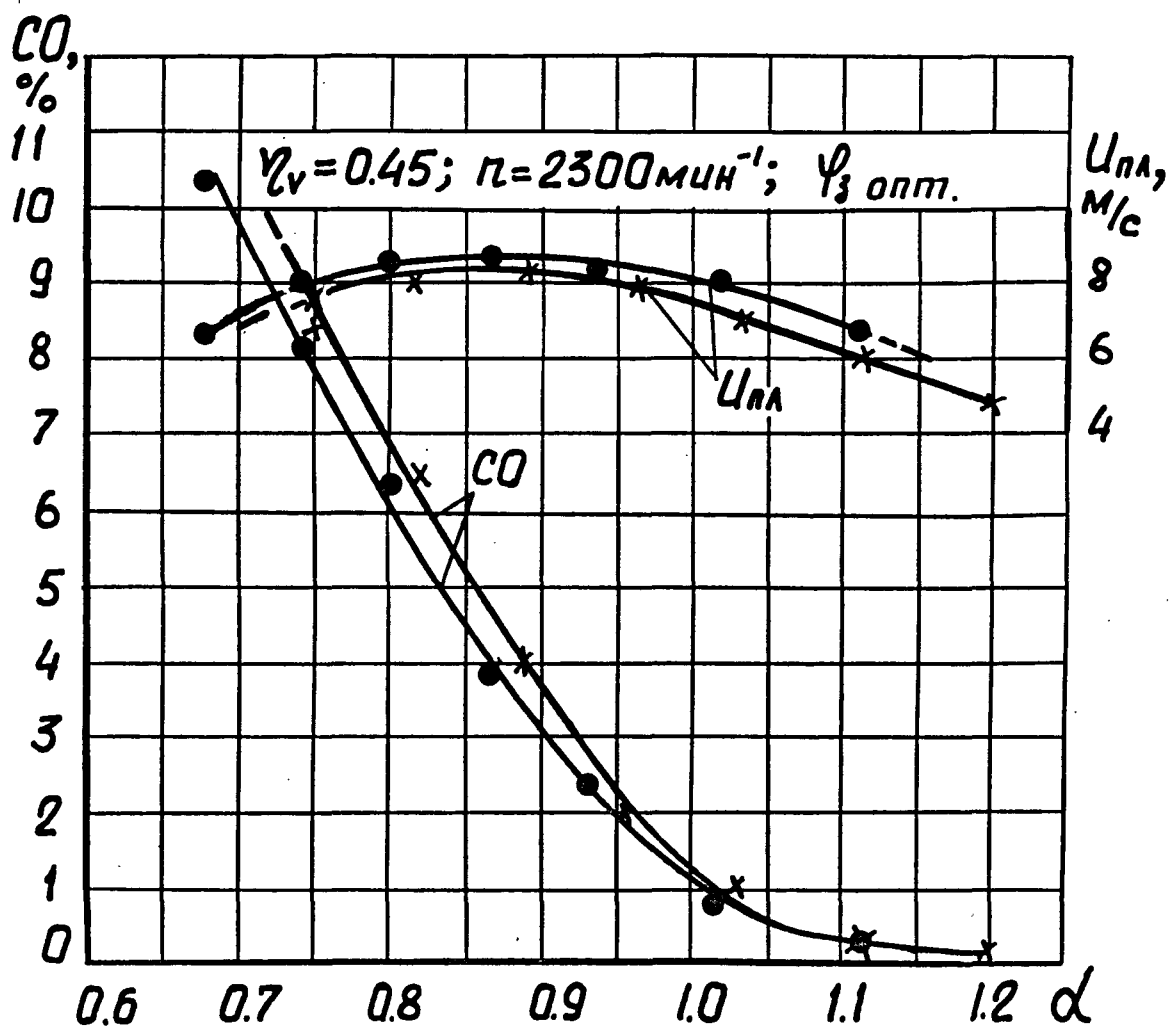


Рис. 5.5. Влияние электризации топлива на концентрацию CO в ОГ и скорость распространения пламени:
 -x- - без электризации; -o- - с электризацией

$\alpha < 1$ и, по-видимому, это связано с дросселирующим влиянием проходного сечения жиклера, которое снижает силовое действие электрического поля на топливо.

В среднем увеличение расхода топлива (кривая 1) при данном соединении электродов, т.е. по схеме б (рис.5.2), и напряженности электрического поля между распылителем 7 и электродом 6 $E = 12$ кВ/см составило порядка 9% при положениях иглы, соответствующих α от 0,75 до 1,19, а максимальное — 10% при положении иглы, соответствующей $\alpha = 0,75$.

С целью выявления возможности регулирования расхода бензина при его электризации была осуществлена проверка действия ускоряющего и замедляющего электрода (по схеме соединения электродов рис.5.2,д). Для этого распылитель 7 (рис.4.10,а) экспериментального карбюратора соединялся с отрицательным полюсом источника высокого напряжения и постоянно на него подавалось напряжение 12,5 кВ, а электрод 6 в одном случае соединялся с положительным (первый вариант), а в другом — с отрицательным полюсом второго источника постоянного напряжения (второй вариант).

При соединении электродов по первому варианту и подаче на электрод 6 напряжения $U = 1,0$ кВ происходило дополнительное (по сравнению, когда электрод 6 соединялся с землей, кривая 1) увеличение расхода бензина (кривая 2), среднее значение которого составило 14%, а максимальное — 15%. Дальнейшее повышение напряжения свыше 1,0 кВ приводило к искровому пробою. Величина этого напряжения была предварительно определена в режиме прокрутки двигателя.

Соединение электродов по второму варианту, напротив, приводило к уменьшению расхода топлива (кривая 3) и при величине подводимого напряжения к электроду 6, равного 11,5 кВ, в среднем составило 20%. В этом случае, в противоположность соединения

электродов по первому варианту, наибольшее снижение расхода топлива от замедляющего действия поля имело место при положениях иглы, соответствующих бедным составам смеси, и при $\alpha = 1,19$ составило 26%, по сравнению с 14% при $\alpha = 0,75$. В основе этого лежит все тоже дросселирующее влияние сечения жиклера на силовое действие поля, но здесь уменьшение проходного сечения, увеличивающего сопротивление истечению топлива, способствует увеличению замедляющего действия поля на топливо.

Как уже отмечалось выше, при электризации топлива происходило изменение и других показателей рабочего процесса двигателя. Сопоставление значений скорости пламени и концентрации CO в ОГ при одинаковых α (рис.5.5) показало, что при электризации топлива происходит увеличение скорости пламени для 4-го датчика, причем более значительное (на 7...8%) - в области бедных составов смеси. Наибольшее снижение концентрации CO в отработавших газах (до 4%) наблюдалось, наоборот, в области богатых α .

Снижение CO в отработавших газах при тех же α , видимо является следствием лучшего использования кислорода топливовоздушной смеси за счет ее более совершенной подготовки: лучшей тонкости и однородности распыливания топлива при его электризации.

В процессе опытов с электризацией топлива было обнаружено улучшение стабильности топливоподачи во времени, что особенно явно наблюдалось при малых открытиях дроссельной заслонки. Отмеченный факт проявлялся в устойчивости показаний газоанализаторов на CO и CO₂ и стабильности частоты вращения вала двигателя, а также в уменьшении разброса давлений сгорания в последовательных циклах и пробивных напряжений на свече зажигания.

Следует отметить, что с увеличением нагрузки двигателя эффект от действия электризации уменьшается, становясь практически нулевым при $\eta_v = 0,63$ и $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$. Это происходит

по следующим причинам. Во-первых, с увеличением нагрузки уменьшается степень электризации топлива, вследствие сокращения времени из-за больших расходов топлива, что будет в меньшей мере влиять на изменение расхода топлива и приводить к снижению эффективности аэродинамического воздействия воздушного потока на топливо, т.е. к его более грубому распыливанию. Во-вторых, увеличение нагрузки приводит к росту сил аэродинамического потока, а, следовательно, и к улучшению распыливания топлива. В этих условиях определяющим фактором (в суммарном балансе действующих сил) будут являться все возрастающие силы аэродинамического воздействия воздушного потока, а влияние же электризации топлива будет все менее значительным.

Заметим, что результаты опытов по электризации топлива не представлены сравнительными зависимостями пробивных напряжений от α по причине невозможности их строгого сопоставления из-за некоторых различий в оптимальных углах опережения зажигания при одинаковых α , оказывающих значительное влияние на величину U_{np} . Одинаково принятыми они быть не могли, т.к. при электризации топлива происходит изменение α , а, значит, и изменение процесса сгорания вследствие смещения фаз сгорания по циклу и изменение их длительности. Это в особенности характерно для начальной фазы процесса сгорания.

Как следует из полученных результатов (рис.5.4), электризация топлива не приводит к существенному улучшению параметров рабочего процесса ($U_{пл}$ и CO) и, в первую очередь, ее следует рассматривать с позиции возможного способа регулирования состава смеси.

5.1.3. Электрическая обработка топливовоздушной смеси в поле коронного разряда.

Этот вид электрической обработки осуществлялся в поле корон-

ного разряда ионизатора В (см.рис.4.10,а), образованного коронирующей проволокой II, расположенной внутри электрода IO.

В результате исследований при токе коронного разряда $I_{кр} = 400$ мкА было зарегистрировано увеличение скорости распространения пламени, регистрируемой датчиком 4, до 33%, снижение пробивных напряжений до 12% и улучшение цикловой неравномерности процесса сгорания до 40% в области бедных составов смеси ($\alpha = 1,19$), а также снижение CO в ОГ до 12% при $\alpha < 1$.

Результаты этих исследований и их анализ представлены в параграфе 5.2.

Значительно больший эффект от электрической обработки топливовоздушной смеси, по сравнению с ионизацией воздуха или электрической обработкой топлива в процессе его распыливания, является результатом совместного действия как электризации капель топлива, так и ионизации воздуха с образованием озона, имеющих место при обработке горючей смеси в поле коронного разряда (см.параг.3.1), т.е. в этом случае эффект от отдельных видов обработки — электризации топлива и ионизации воздуха суммируется. В пользу этого свидетельствуют опыты /15/, где было установлено, что если обработанное топливо электрическим полем сжечь в необработанном воздухе, то скорость сгорания увеличивается на 10%, а если предварительно обработанное топливо сжечь в ионизированном воздухе, то эффекты от обработки топлива и воздуха суммируются, и топливо сгорает на 20% быстрее.

Из сопоставления полученных данных для отдельных видов электрической обработки обращает на себя внимание тот факт, что эффект от электрической обработки горючей смеси в поле коронного разряда превышает суммарный эффект от электризации топлива и ионизации воздуха. Это, по-видимому, можно объяснить за счет

большей влажности воздуха, находящегося в составе топливовоздушной смеси, по сравнению с его влажностью до момента смешения с топливом, а это, как свидетельствуют опыты /15,59,93/, оказывает влияние на степень его ионизации.

Таким образом, из трех видов электрической обработки свежего заряда наиболее эффективной оказалась электрическая обработка топливовоздушной смеси в поле коронного разряда.

Вся дальнейшая программа исследований была проведена применительно к этому виду электрической обработки за исключением тех опытов, которые велись с системой зажигания, содержащей подпитывающий источник. В этом случае, наряду с электрической обработкой топливовоздушной смеси, в поле коронного разряда осуществлялась также подача на центральный электрод свечи зажигания относительно невысокого напряжения противоположной полярности по отношению к полярности напряжения, которое подводилось к коронирующему электроду.

5.2. Результаты исследования влияния электрической обработки топливовоздушной смеси на показатели рабочего процесса двигателя

Результаты экспериментальных исследований по влиянию электрической обработки топливовоздушной смеси на параметры рабочего процесса карбюраторного двигателя представлены на рис.5.6...5.17, где на рис.5.6 и 5.7 в качестве примера приведены типичные статистические кривые моментов прихода пламени к ионизационным датчикам, а на рис.5.8 – полученные из них среднестатистические зависимости скорости распространения фронта пламени $U_{пл}$ для различных датчиков и составов смеси α .

На рис.5.15 и 5.16 показаны зависимости внешних показателей двигателя (N_e, η_e, CO) и пробивных напряжений $U_{пр}$ на свече зажигания в зависимости от α .

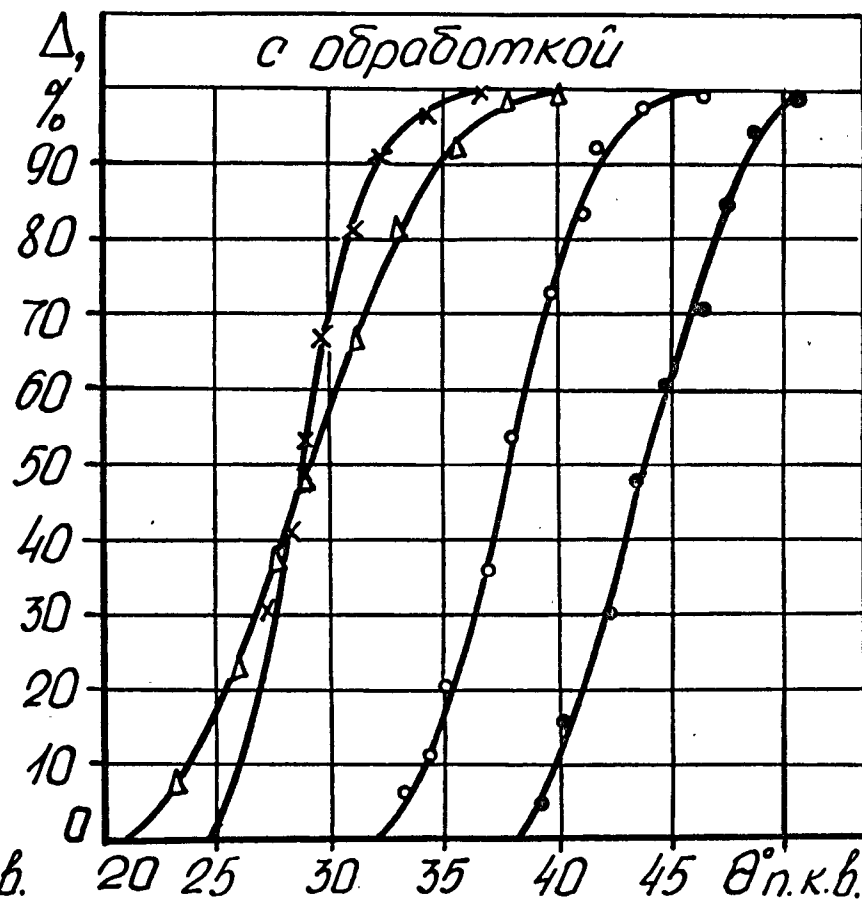
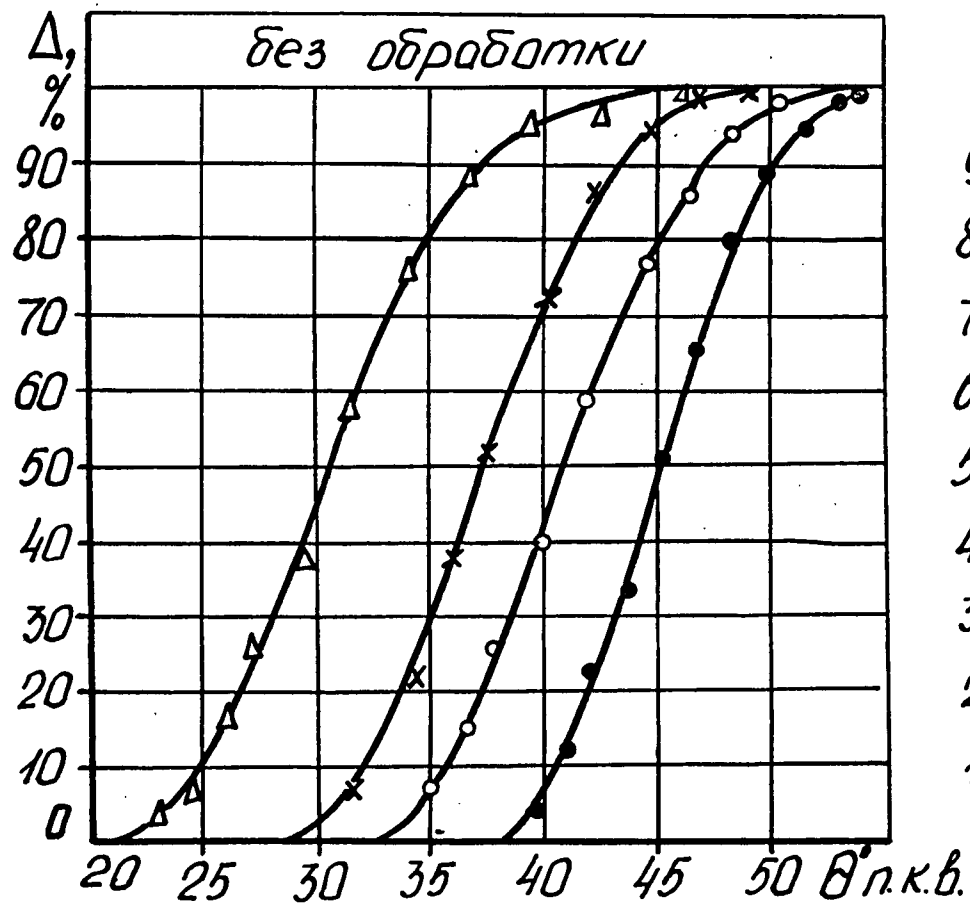


Рис. 5.6. Статистические кривые моментов прихода пламени к ионизационным датчикам (при $\alpha = 1, 2$);
 —●— 2; о — 3; ж — 4; Δ — 7 — датчики

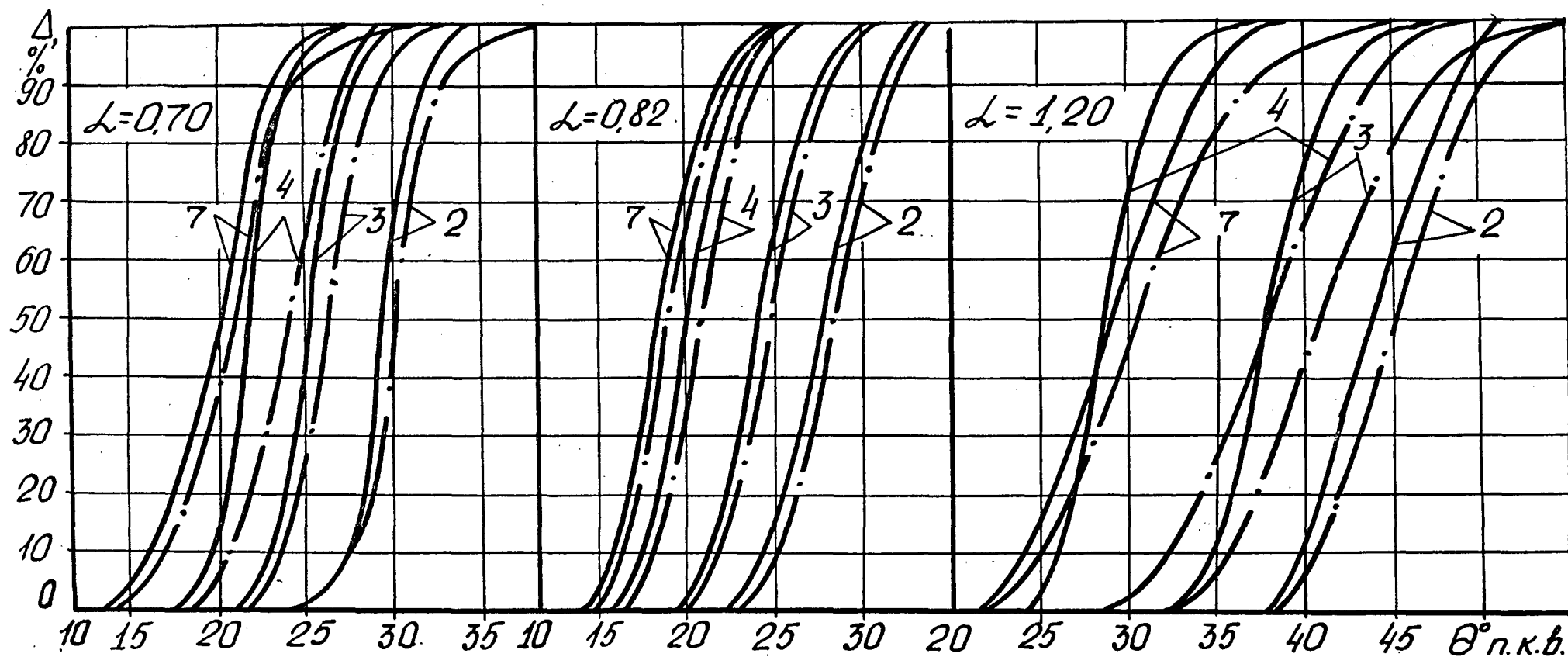


Рис. 5.7. Совмещенные статистические кривые моментов прихода пламени к ионизационным датчикам 2, 3, 4 и 7:

— · — — без обработки; — — — с обработкой

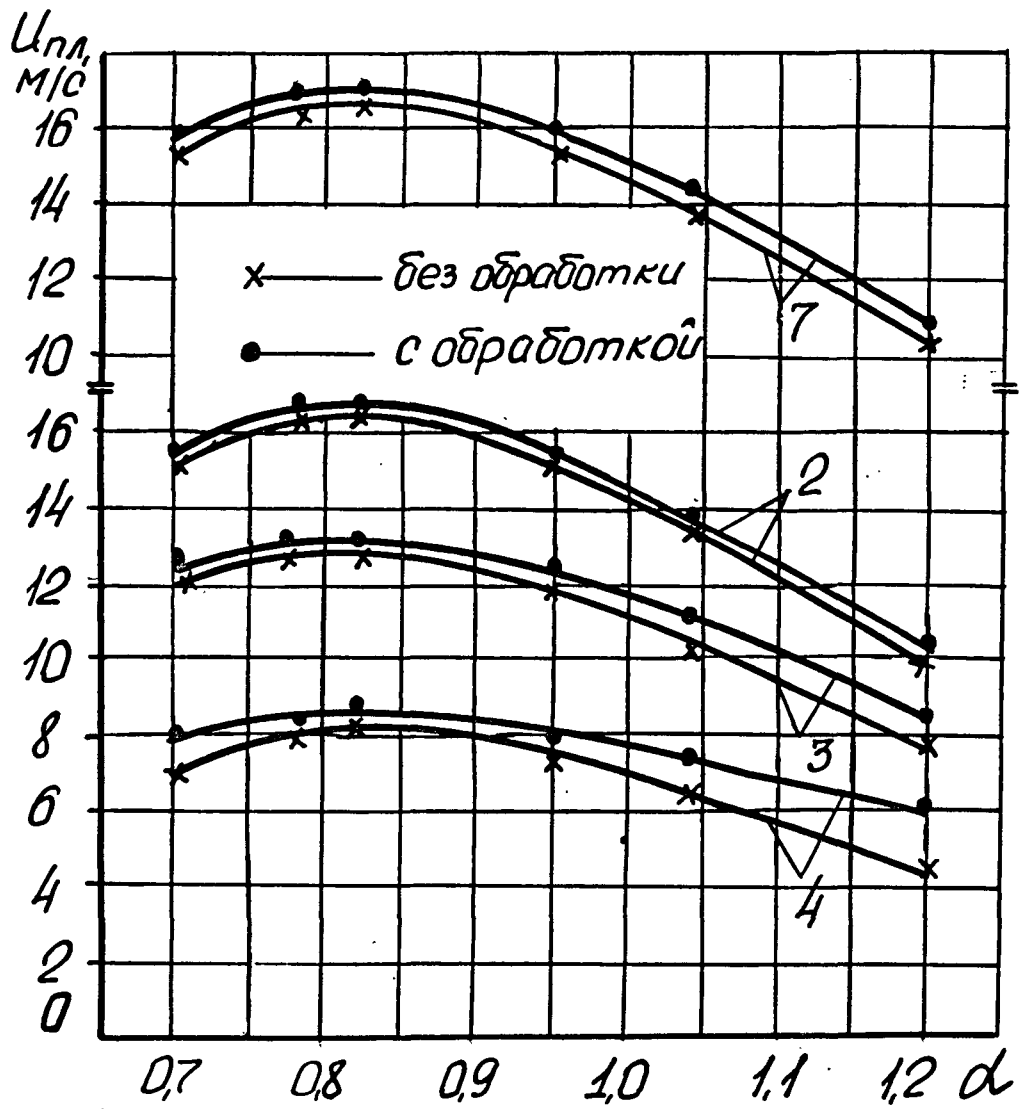


Рис. 5.8. Изменение среднестатистической скорости пламени, регистрируемой датчиками 2, 3, 4 и 7, в зависимости от d и электрической обработки

Указанные исследования проводились согласно методике, изложенной в параг.4.1, при постоянной частоте вращения вала двигателя $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ и двух значениях коэффициента наполнения $\eta_v = 0,45$ и $0,63$ путем снятия регулировочных характеристик по составу смеси при оптимальных углах опережения зажигания.

5.2.1. Скорость распространения фронта пламени

Из приведенных зависимостей (см.рис.5.8) следует, что в случае электрической обработки горючей смеси в поле коронного разряда среднестатистическая $U_{пл}$ на участках от свечи зажигания до соответствующих ионизационных датчиков (2...7), расположенных в различных местах камеры сгорания, во всех случаях выше, чем без обработки. Однако степень прироста $U_{пл}$ для разных датчиков и составов смеси не одинакова и заметно увеличивается по мере обеднения смеси.

При этом, характер изменения кривых $U_{пл}$ подчиняется известному закону возрастания скорости пламени до максимального значения при $\alpha = 0,8...0,9$ и соответствующему снижению $U_{пл}$ при обогащении и обеднении смеси от указанного состава.

Увеличение скорости распространения фронта пламени при электрической обработке горючей смеси происходит в результате повышения ее однородности и реакционной способности, вследствие улучшения тонкости распыливания топлива и образования значительного количества активных частиц в рабочей смеси, что приводит к возрастанию скорости химической реакции.

Наибольшая величина прироста соответствует четвертому ионизационному датчику, а наименьшая - второму и седьмому датчикам, которые характеризуют скорости распространения пламени на различных стадиях процесса горения.

Ионизационный датчик 4, установленный в непосредственной близости к свече зажигания на расстоянии 12,5 мм, характеризует $U_{пл}$ в начальной фазе процесса сгорания, т.е. в период развития началь-

ного очага горения, возникшего около электродов свечи, в развитый фронт турбулентного пламени. Датчики 2,3,7, установленные на значительно больших расстояниях от свечи зажигания (соответственно - 33, 23 и 23 мм), характеризуют $U_{пл}$ в основной фазе сгорания. Следует указать на то, что при проведении анализа по влиянию электрической обработки топливовоздушной смеси на процесс сгорания термин "скорость пламени в основной фазе" принят условно. На самом же деле эта скорость в чистом виде не соответствует основной фазе, так как включает в себя также $U_{пл}$ в начальной фазе сгорания.

На всех приведенных графиках кривые скоростей пламени, регистрируемые ионизационными датчиками 2, 3, 7 не отвечают истинному характеру изменения скорости пламени в основной фазе, т.к. характер изменения $U_{пл}$ здесь определяется существенным влиянием развития сгорания в начальной фазе.

Действительная же скорость распространения фронта пламени в этой фазе сгорания будет выше и, в меньшей степени, будет зависеть от состава смеси.

Эти различия в величинах $U_{пл}$ и степени ее прироста в начальной и основной фазах сгорания, главным образом, являются следствием разных закономерностей турбулентного горения в них и неодинаковой степенью влияния озона на различных стадиях процесса горения.

Процесс сгорания в начальной фазе, в основном, подчиняется закономерностям мелкомасштабного турбулентного горения, скорость которого существенно зависит от физико-химических свойств топливовоздушной смеси. Поэтому увеличение в горючей смеси при данном α количества химически активных частиц при электрической обработке приводит к заметному приросту $U_{пл}$, обеспечивая тем самым, более быстрое и стабильное превращение начального очага горения в развитый фронт турбулентного пламени.

Сравнительно небольшое приращение $U_{пл}$ в основной фазе сгора-

ния при электрической обработке топливовоздушной смеси (кривые 2,3,7 рис.5.8) объясняется тем, что скорость пламени в этой фазе мало зависит от физико-химических свойств топливовоздушной смеси, а определяется, в основном, скоростями крупных турбулентных пульсаций, влияние которых в суммарном эффекте становится доминирующим. В этом случае дополнительная активация горючей смеси за счет электрической обработки практически не оказывает существенного влияния на скорость пламени в этой фазе.

Из кривых 4 рис.5.8, характеризующих распространение пламени в начальной стадии процесса горения, следует, что прирост $U_{пл}$ с увеличением α не одинаков, и объяснить это, по-видимому, можно неодинаковым содержанием озона при различных составах смеси.

С увеличением α выше значения 0,82 прирост в скоростях пламени постоянно увеличивается и при $\alpha = 1,20$ достигает 33%, по сравнению с 4% при $\alpha = 0,82$. Это объясняется тем, что на фоне все убывающих скоростей пламени постоянно возрастающий эффект от действия электрического поля, вследствие увеличения количества O_3 с обеднением смеси, проявляется в большей степени. В области значений $\alpha < 0,82$ увеличение в скоростях $U_{пл}$ заметно ниже, по сравнению со значениями при $\alpha > 0,82$, главным образом, из-за меньшего образования O_3 вследствие меньшего содержания кислорода в богатой смеси и относительно большей степени разбавления горючей смеси остаточными газами.

При $\alpha \approx 0,82$, что отвечает мощностному составу смеси, прирост в $U_{пл}$ наименьший (в среднем 4%). Это обусловлено тем, что для данного α скорость распространения пламени наибольшая и она является определяющей в суммарном эффекте образования начального очажка горения и превращения его в развитый фронт турбулентного пламени.

Обращает на себя внимание и тот факт, что $U_{пл}$ для ионизаци-

онных датчиков 3 и 7 разная, хотя они и находятся на одинаковых расстояниях от свечи зажигания, что указывает на неравномерность скоростей пламени по различным направлениям объема камеры сгорания.

Причиной этого является то, что распространение фронта пламени от свечи зажигания в направлении датчика 3 происходит против потока свежего заряда, создаваемого поршнем в процессе сжатия, а для датчика 7 - по потоку свежего заряда (см.рис.4.15).

Из анализа оптимальных углов опережения зажигания (рис.5.9) установлено, что в случае электрической обработки топливовоздушной смеси, они в области составов смеси, соответствующих $\alpha > 0,82$ и $\alpha < 0,82$, несколько (на 2-40) меньше, что также свидетельствует об улучшении протекания процесса сгорания при электрической обработке горючей смеси.

Из результатов сравнительных опытов трех различных систем зажигания: классической, контактно-транзисторной и системы зажигания, содержащей подпитывающий источник (в дальнейшем - СЗПИ), отличающихся как общим уровнем энергии, так и длительностью искрового разряда, было установлено, что скорость пламени, регистрируемая датчиками 2,3 и 7, практически не зависит от типа системы зажигания. Для датчика 4 (рис.5.10), регистрирующего скорость развития начального очага горения, скорость пламени заметно увеличивается при работе двигателя с СЗПИ и практически не изменяется при остальных системах зажигания. Это хорошо согласуется с данными работы /38/ и объясняется тем, что система зажигания с подпитывающим источником обеспечивает подвод дополнительной энергии в искровой разряд, что способствует более быстрому образованию и развитию начального очага горения.

5.2.2. Цикловая неравномерность процесса сгорания

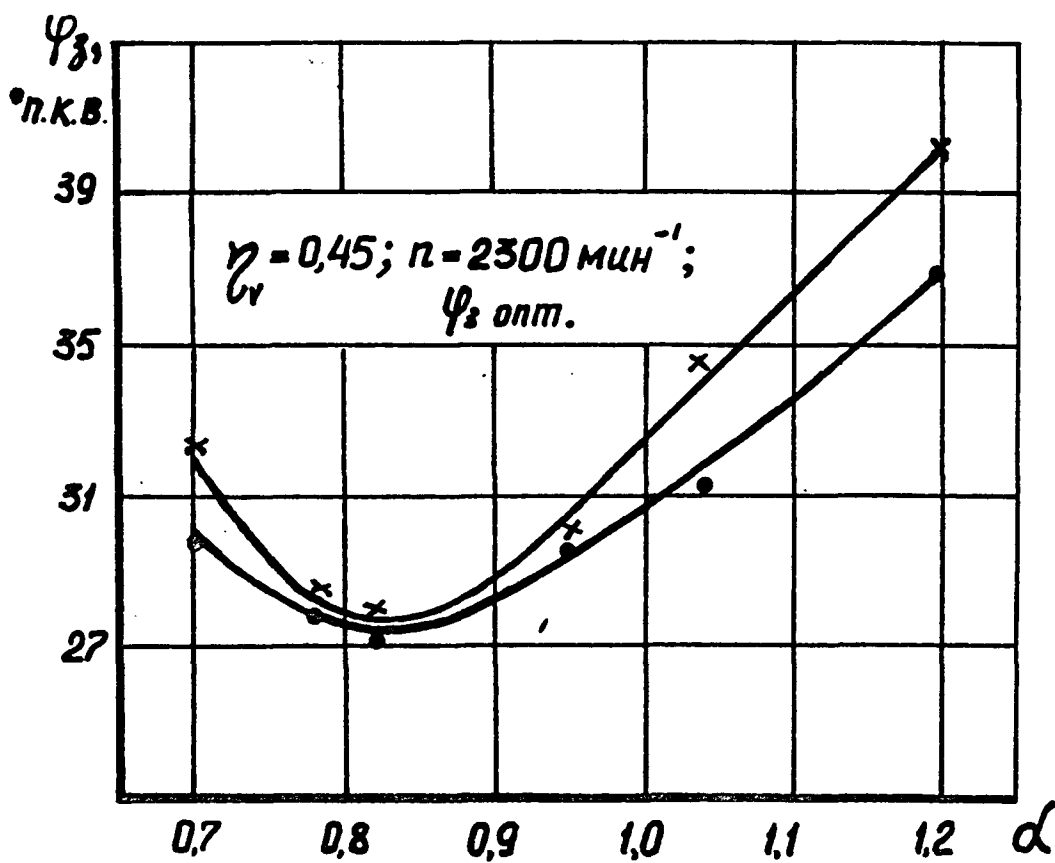


Рис. 5.9. Изменение оптимальных углов опережения зажигания $\varphi_{з, \text{опт.}}$ в зависимости от α и электрической обработки:
 —x— — без обработки; —•— — с обработкой

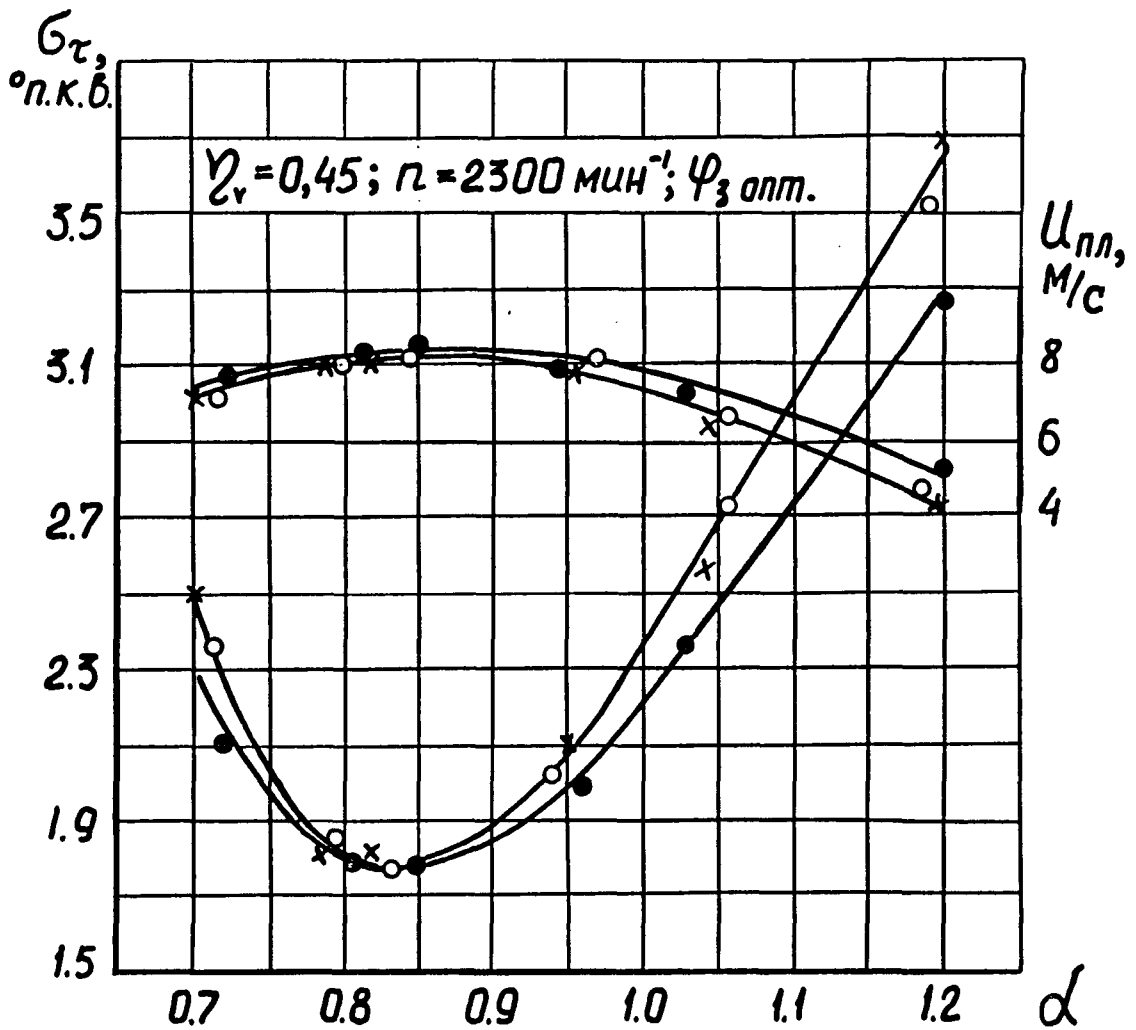


Рис. 5.10. Изменение среднестатистической скорости пламени $U_{пл}$ и цикловой неравномерности G_{τ} процесса сгорания на его начальной стадии протекания (датчик 4) от α и типа системы зажигания: —x— — классическая; —o— — контактно-транзисторная; —•— — СЗПИ

Оценка цикловой неидентичности сгорания осуществлялась двумя независимыми способами: по среднему квадратическому отклонению времени \bar{G}_T прихода пламени к ионизационным датчикам, полученному из статистических кривых распределения в 300 последовательных циклах, и по степени разброса максимального давления сгорания δ , определенному из фоторегистраций 20 последовательных циклов. Оба эти метода, дополняя друг друга, дают наглядное и объективное представление как об общей цикловой неравномерности процесса сгорания (по δ), так и о степени невоспроизводимости распространения пламени на различных стадиях его протекания.

Из результатов этих исследований (рис. 5.II...5.I3) установлено, что при электрической обработке топливовоздушной смеси в поле коронного разряда во всем диапазоне изменения λ заметно (на 2...40%) улучшается цикловая неравномерность процесса сгорания, что выражается в меньших значениях \bar{G}_T для всех датчиков и, соответственно, в большей крутизне статистических кривых распределения (см. рис. 5.6 и 5.7) и меньших значениях δ , т.е. меньшем разбросе максимальных давлений сгорания на фоторегистрациях. Все это говорит о значительном снижении разброса скоростей пламени в последовательных циклах. Причиной этому является более стабильное образование начального очага горения и увеличение скорости его развития в результате лучшей однородности и более высокой реакционной способности рабочей смеси при ее электрической обработке. Косвенным подтверждением этому является также снижение величины и разброса пробивных напряжений от цикла к циклу (более подробно см. параг. 5.2.3).

Сказанное выше хорошо согласуется с данными рис. 5.II, характеризующими невоспроизводимость распространения пламени на различных стадиях процесса сгорания, регистрируемые датчиками 2, 3, 4 и 7. Как следует из этих данных, наибольшая величина \bar{G}_T ,

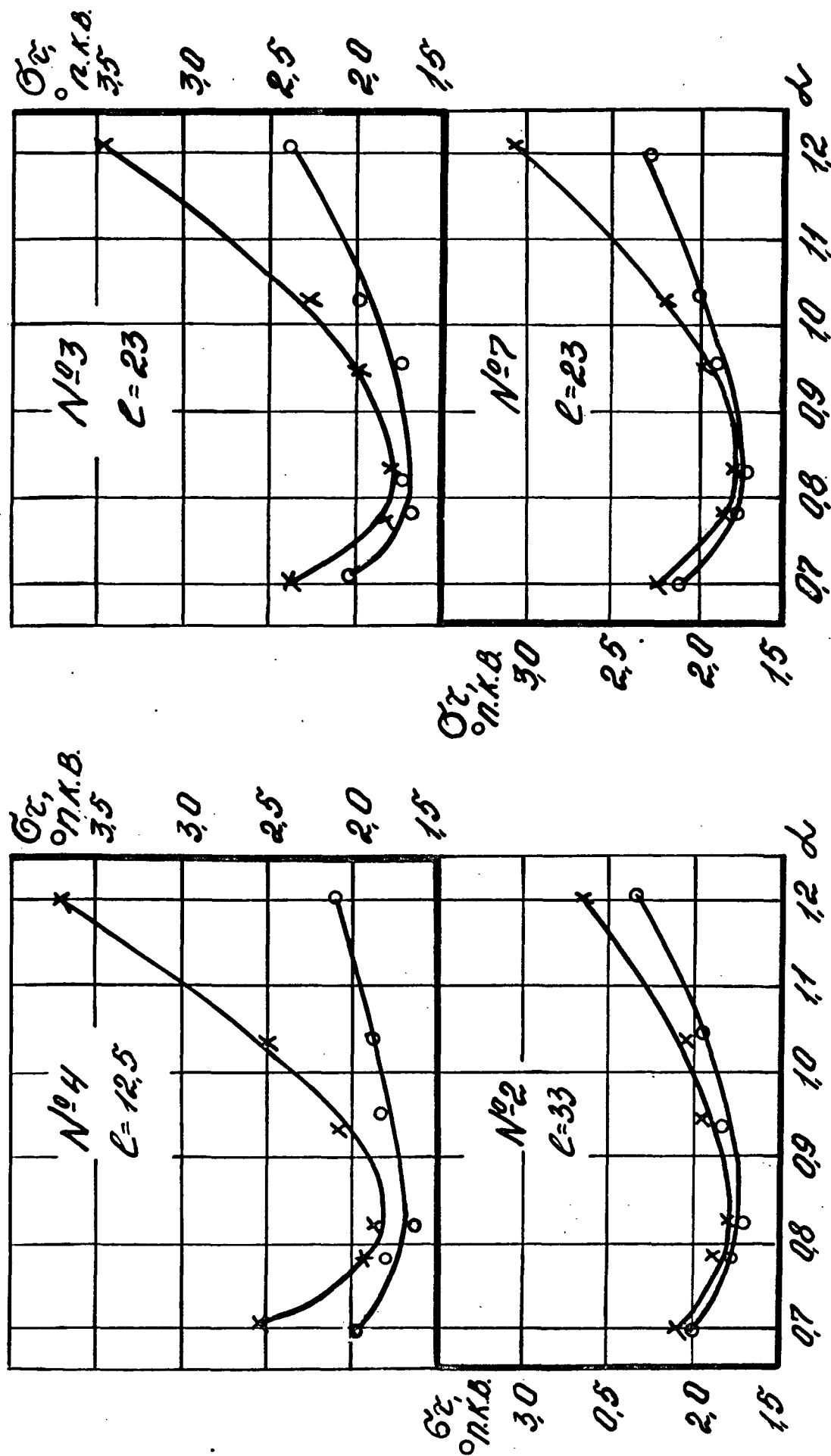


Рис. 5.11. Изменение цикловой неравномерности процесса сгорания σ_{γ} на различных его стадиях, отвечающих датчикам 2, 3, 4 и 7, от l и электрической обработки:

—x— без обработки; —o— — с обработкой; l — расстояние от свечи зажигания до датчиков, в мм

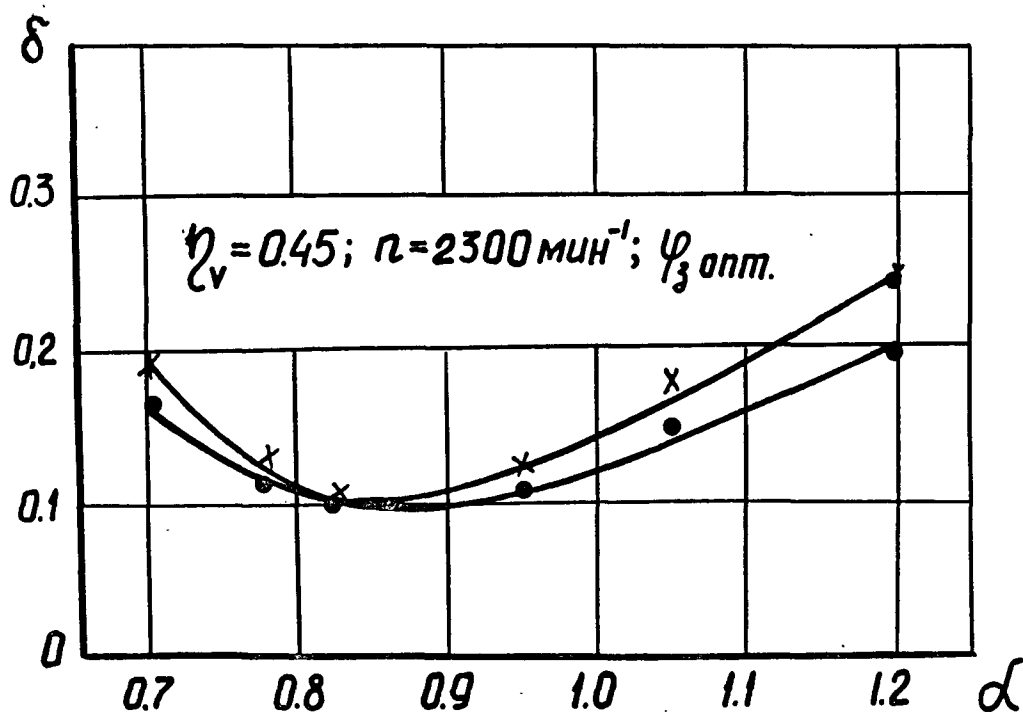


Рис. 5.12. Изменение цикловой неравномерности δ по разбросу максимального давления сгорания от α и электрической обработки:
 —x— — без обработки; —•— — с обработкой

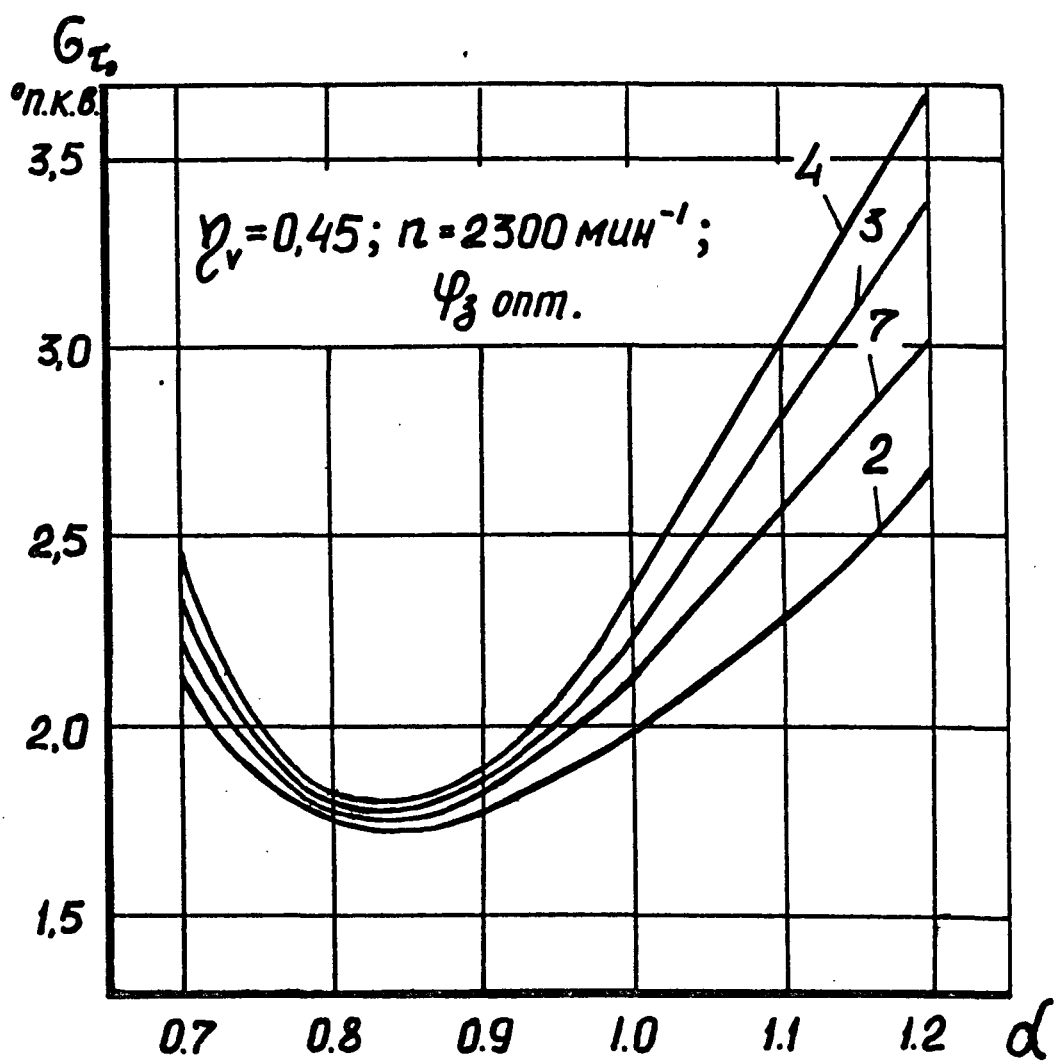


Рис. 5.13. Изменение цикловой неравномерности процесса сгорания G_c от α на различных стадиях его протекания, отвечающей датчикам 2, 3, 4 и 7

равная 3,68 град. п.к.в. без электрической обработки топливовоздушной смеси, и наибольшее ее снижение на 40% при $\alpha = 1,2$ в условиях обработки смеси соответствует начальной стадии процесса сгорания, регистрируемой ионизационным датчиком 4, где скорость распространения пламени, в основном, определяется физико-химическими свойствами топливовоздушной смеси. Поэтому увеличение скорости ее сгорания при электрической обработке, вследствие меньшей чувствительности процесса образования и развития начального очага горения к цикловым колебаниям состава смеси и характеристикам искрового разряда, способствует снижению величины \bar{G}_r на этой стадии процесса сгорания.

Из этих же рисунков следует, что для датчиков 2,3 и 7, характеризующих сгорание в основной фазе, величина \bar{G}_r и степень ее снижения, по сравнению с \bar{G}_r для датчика 4, сравнительно меньше. Это объясняется тем, что скорость сгорания в этой фазе в значительно меньшей мере зависит от физико-химических свойств топливовоздушной смеси.

Эти данные еще раз свидетельствуют о том, что определяющим фактором в общей цикловой неидентичности процесса сгорания является невоспроизводимость в скоростях развития начального очага горения в последовательных циклах. Поэтому, рассматривая мероприятия по ее снижению, в первую очередь необходимо обращать внимание на факторы, определяющие скорость пламени именно на этой стадии процесса сгорания.

Из рис.5.13 также следует, что оптимальным составом смеси по цикловой неравномерности процесса сгорания для всех ионизационных датчиков является состав, отвечающий $\alpha = 0,82..0,85$, при котором скорость пламени наибольшая (см.рис.5.8) и отклонение его в ту или иную сторону от этого значения приводит к резкому увеличению \bar{G}_r , вследствие снижения скорости сгорания. Это еще

раз говорит о значительном влиянии этого фактора на цикловую неравномерность процесса сгорания.

Как показали сравнительные исследования трех вышеуказанных систем зажигания, отличающихся параметрами искрового разряда, величина \bar{G}_r при составах смеси $\alpha = 0,80 \dots 0,90$, отвечающих максимальным скоростям пламени, для всех ионизационных датчиков практически не зависит от типа системы зажигания. Однако при $\alpha > 1,0$, т.е. в условиях, когда не обеспечивается надежное воспламенение смеси, параметры искрового разряда и, в частности, его длительность, оказывают заметное влияние на снижение \bar{G}_r в начальной фазе процесса сгорания (рис. 5.10 и 5.14), что хорошо согласуется с данными исследований /38/, где было получено аналогичное уменьшение цикловой неустойчивости процесса сгорания в этой фазе при работе с системой зажигания, имеющей большую длительность искрового разряда.

На рис. 5.14 показаны результаты сравнительных исследований по влиянию различных систем зажигания и электрической обработки топливовоздушной смеси в поле коронного разряда на цикловую неустойчивость процесса сгорания в начальной стадии его развития. Из этих данных следует, что наибольшее влияние на \bar{G}_r в этой фазе оказывает электрическая обработка топливовоздушной смеси, что является результатом лучших условий для образования и развития начального очага горения в развитый фронт турбулентного пламени из-за повышения однородности и реакционной способности горючей смеси. Так, при $\alpha = 1,2$ снижение \bar{G}_r , соответствующее системе зажигания с большей длительностью искрового разряда (СЗПИ), составляет 11%, а с электрической обработкой - 40%.

Таким образом, по результатам исследований цикловой неравномерности процесса сгорания можно отметить следующее:

- цикловая неустойчивость зарождается в начальной фазе процес-

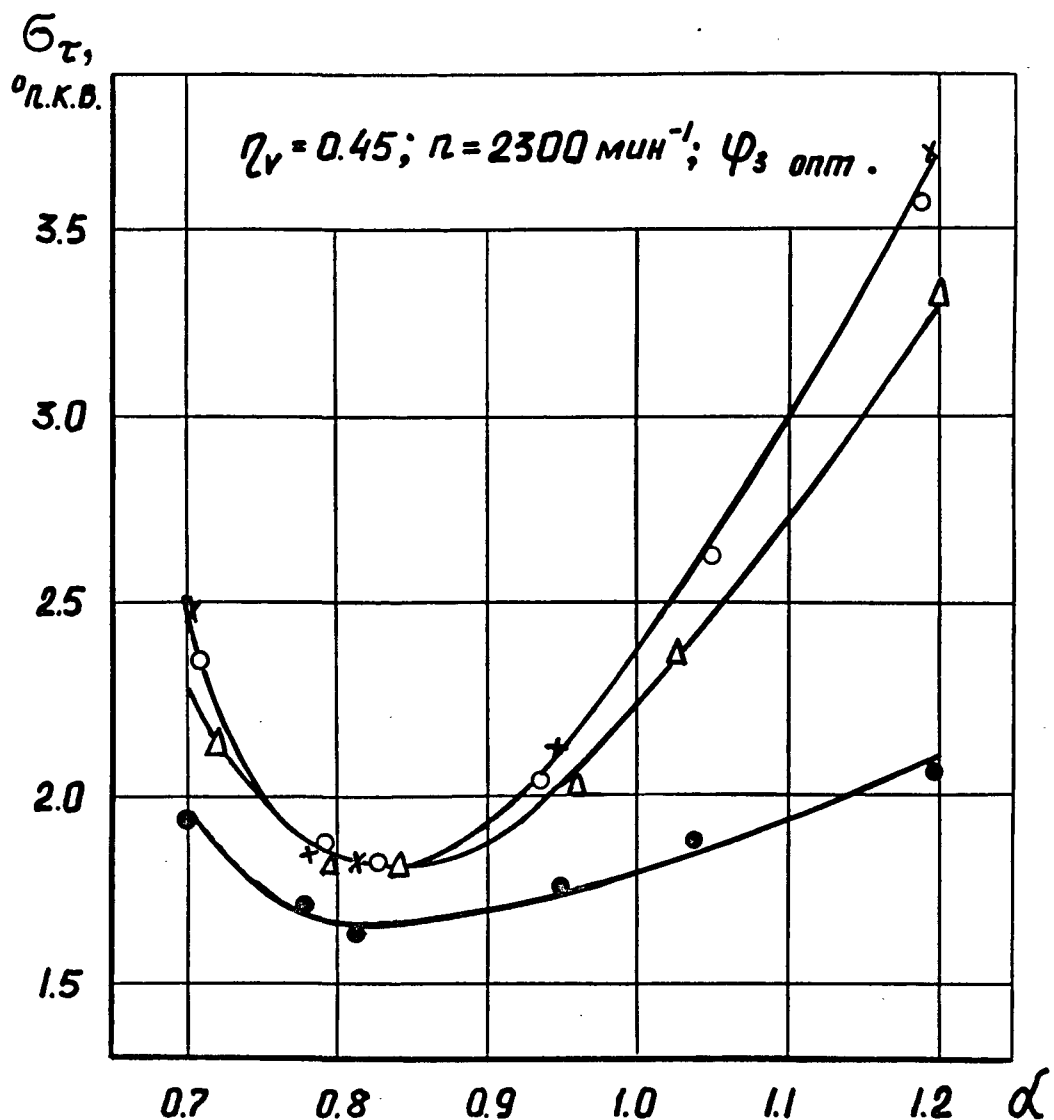


Рис.5.14. Влияние типа системы зажигания и электрической обработки смеси на цикловую неравномерность σ_{τ} процесса сгорания на начальной стадии его протекания (датчик 4):

- — контактно-транзисторная; —△— — СЗП;
- ×— — без обработки (классическая С.З.);
- — с обработкой

са сгорания, что связано с колебаниями в скоростях развития начального очага горения в последовательных циклах;

- снижение цикловой невоспроизводимости на начальной стадии процесса сгорания приводит к ее уменьшению на более поздних стадиях и, в конечном итоге, на общей неидентичности процесса сгорания, характеризуемой разбросом давления в цилиндре двигателя;

- одним из основных факторов, влияющих на невоспроизводимость процесса сгорания в последовательных циклах, является состав смеси;

- цикловая неравномерность процесса сгорания значительно снижается при электрической обработке топливовоздушной смеси вследствие увеличения скорости ее сгорания. Это обуславливает меньшую чувствительность процесса сгорания и, в первую очередь - образование и развитие начального очага, к колебаниям состава смеси и характеристикам искрового разряда.

5.2.3. Величина и разброс пробивных напряжений

Оценка величины и степени разброса пробивных напряжений проводилась по методике, изложенной в параг.4.1 Из кривых $U_{пр} = f(\alpha)$ (рис.5.15) следует, что наименьшие пробивные напряжения соответствуют α , равным 0,9 и в дальнейшем увеличиваются по мере обеднения и обогащения смеси от указанного состава. Такой характер изменения пробивных напряжений отчасти объясняется влиянием на условия пробоя и, следовательно, на величину $U_{пр}$ температуры смеси в камере сгорания и температуры центрального электрода свечи зажигания. Согласно /73/, с увеличением этих температур значения пробивных напряжений снижаются. При $\alpha = 0,8 \dots 0,9$, вследствие наименьшей длительности процесса тепловыделения из-за максимальной скорости пламени, указанные температуры будут наибольшими, а с дальнейшими обеднением и обогащением смеси будут снижаться в результате ее уменьшения.

Практическое отсутствие снижения пробивных напряжений при электрической обработке горючей смеси для значений $\alpha = 0,875 \dots 0,91$, отвечающих наибольшей скорости сгорания, объясняется тем, что в этих условиях температурный режим камеры сгорания, и, в частности, центрального электрода, обеспечивает значительную ионизацию, достаточную для насыщения искрового промежутка ионами. Поэтому, в этих условиях электрическая обработка горючей смеси не может привести к существенному увеличению степени ионизации искрового промежутка, а значит, и повлиять на условия его пробоя.

Так же, как и для скорости пламени, более сильное влияние электрической обработки горючей смеси на величину и разброс пробивных напряжений наблюдается в области бедных составов смеси. Так при $\alpha = 1,20$ величина и разброс $U_{пр}$ снизились, соответственно, на 12% и 44%, в то же время при $\alpha = 1,0$ - на 3,5% и 12%.

В основе снижения величины и разброса пробивных напряжений лежит то обстоятельство, что при электрической обработке топливовоздушной смеси в результате повышения ее однородности и образования в ней значительного количества активных частиц, способствующих предварительной ионизации искрового промежутка, улучшаются условия его пробоя, т.е. здесь уменьшается степень влияния возможных флуктуаций состава смеси на изменение термической нагрузки деталей камеры сгорания, а, следовательно, и на условия пробоя искрового промежутка свечи. Последнее хорошо согласуется с данными работы / 37 /, где в результате повышения однородности смеси было получено снижение разброса пробивных напряжений в 1,69... 1,75 раза.

Заметим, что полученные результаты по $U_{пр}$ практически одинаковы как для классической системы зажигания, так и для контактно-транзисторной. Было бы весьма интересным сопоставить их пробивные напряжения с системой зажигания, содержащей подпитываю-

щий источник, но, к сожалению, сделать это из-за различий оптимальных углов опережения зажигания для одних и тех же α не предоставлялось возможным по причине их значительного влияния на величину $U_{пр}$.

5.2.4. Внешние показатели двигателя и пределы обеднения топливовоздушной смеси

Внешние показатели двигателя N_e , q_e и токсичность отработавших газов по окиси углерода CO были получены по той же методике, что и ранее рассмотренные, т.е. путем снятия сравнительных регулировочных характеристик по составу смеси при электрической обработке горючей смеси и при ее отсутствии с классической системой зажигания. Исследования проводились на том же нагрузочном режиме, отвечающем $\eta_v = 0,45$, частоте вращения вала двигателя $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ и оптимальном угле опережения зажигания.

На рис. 5.15 и 5.16 представлены результаты указанных исследований, которые свидетельствуют о благоприятном влиянии электрической обработки горючей смеси на внешние показатели двигателя.

Как следует из кривых, характеризующих изменение удельного расхода топлива, рис. 5.16, заметное влияние электрической обработки на q_e проявляется только в области бедных составов смеси, становясь более ощутимым по мере ее обеднения. Так, при $\alpha = 1,10$ снижение удельного расхода топлива составляет 2,4%, а при $\alpha = 1,20$ - 6,5%.

Из этих же кривых и рис. 5.17 следует, что при электрической обработке топливовоздушной смеси происходит расширение как предела эффективного обеднения смеси $\alpha_{эф}$ с 1,075 до 1,17, так и предельного значения $\alpha_{пред}$, соответствующего устойчивой работе двигателя с 1,20 до 1,29, что является следствием улучшения процесса сгорания. Это позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя на более бедных α , а, следовательно, улучшить экономиче-

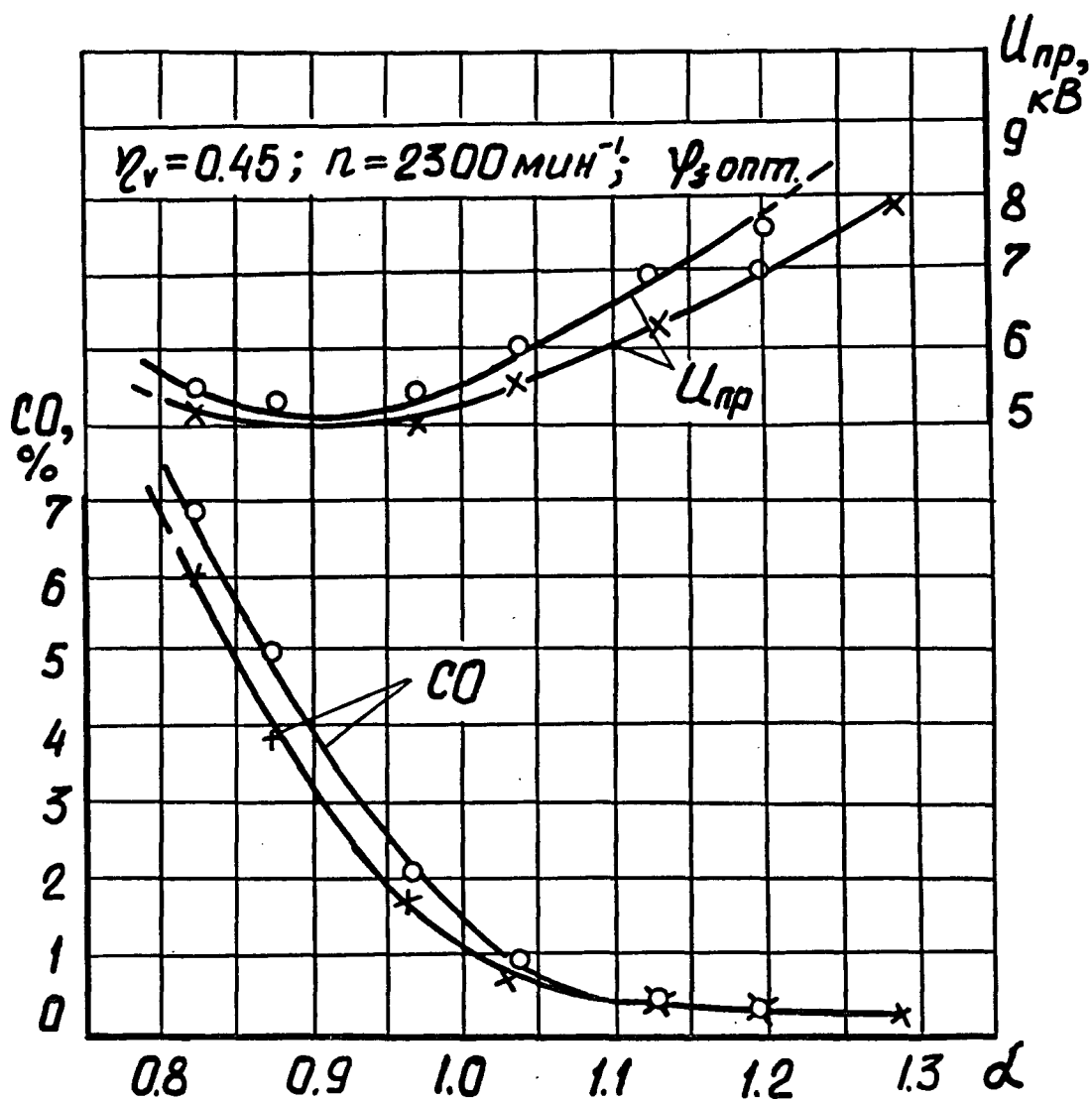


Рис. 5.15. Изменение пробивных напряжений $U_{\text{пр}}$ и концентрации CO в ОГ от α и электрической обработки:
 -○- - без обработки; -ж- - с обработкой

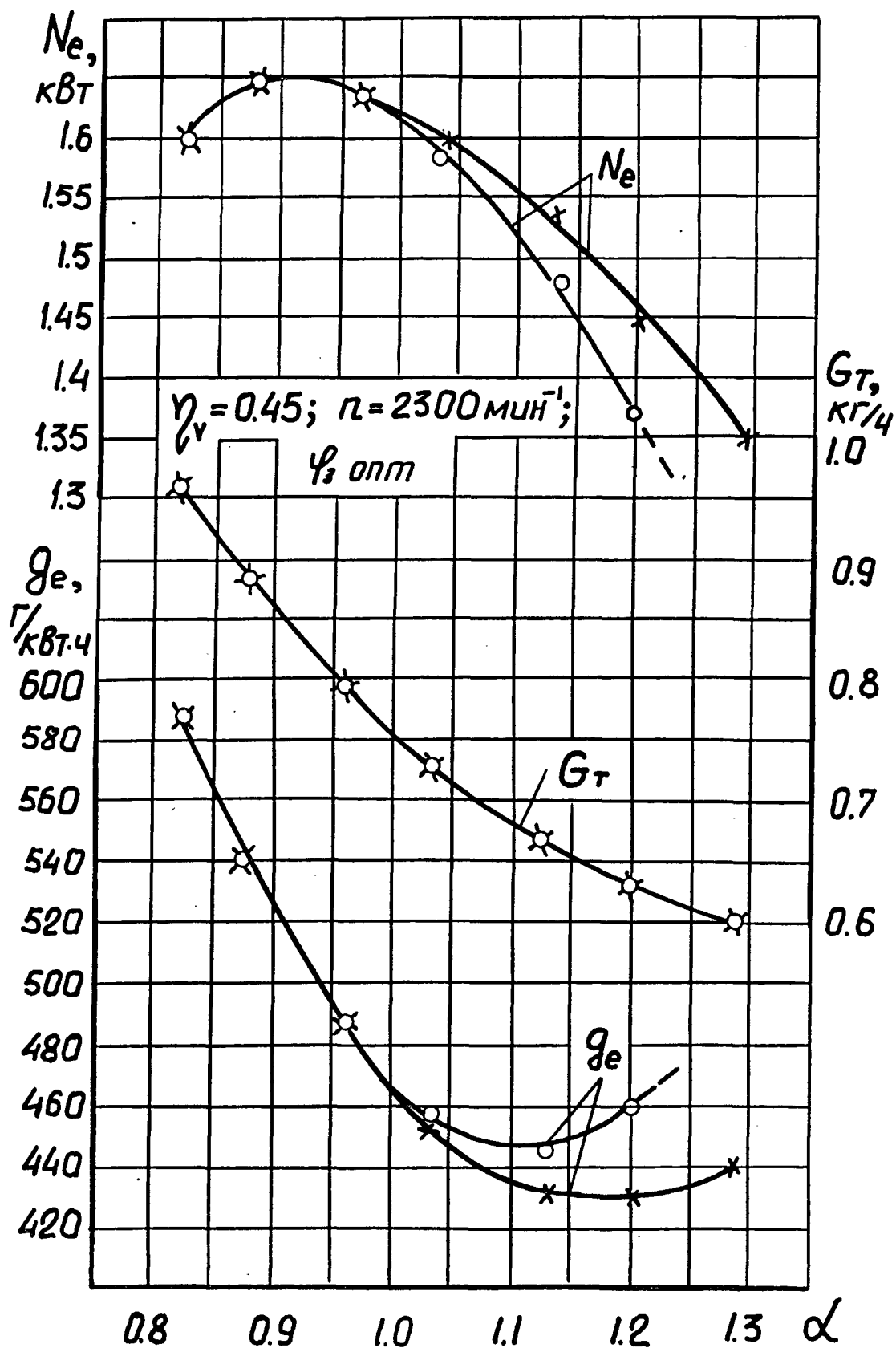


Рис. 5.16. Изменение внешних показателей двигателя (N_e , g_e и G_t) от α и электрической обработки:
 —○— без обработки; —×— с обработкой

ские и токсические показатели двигателя.

Что касается токсичности ОГ, то электрическая обработка горючей смеси уменьшает концентрацию CO, наоборот, в области богатых смесей. В среднем снижение CO в наших опытах составило 12%. Уменьшение CO можно объяснить лучшим использованием кислорода при сгорании вследствие лучшей подготовки топливовоздушной смеси, за счет улучшения ее однородности.

Следует заметить, что с увеличением нагрузки двигателя эффект от действия электрического поля на рассмотренные показатели снижается и при нагрузке, соответствующей в нашем случае $\eta_v = 0,63$, практически отсутствует. Это можно объяснить следующим образом. Во-первых, с увеличением нагрузки возрастают силы аэродинамического воздействия воздушного потока на топливо, что приводит к более тонкому его распыливанию, во-вторых, увеличивается температурный уровень камеры сгорания, а также снижается относительная степень разбавления горючей смеси остаточными газами. Все это в совокупности создает более лучшие условия для образования начального очага горения и последующего его развития вследствие более высоких скоростей распространения пламени. Поэтому на фоне все возрастающих скоростей сгорания с увеличением нагрузки влияние электрической обработки проявляется все менее значительно.

В заключение отметим, что в процессе опытов с системой зажигания, содержащей подпитывающий источник, и электрической обработкой топливовоздушной смеси в поле коронного разряда, которые не были предусмотрены программой испытаний, было замечено, что устойчивая работа двигателя достигалась при более бедных составах смеси по сравнению с α , соответствующего только электрической обработке горючей смеси (рис. 5.17). Опыты были неоднократно повторены и каждый раз с одним и тем же результатом — расширением области устойчивой работы двигателя с $\alpha = 1,29$, соответ-

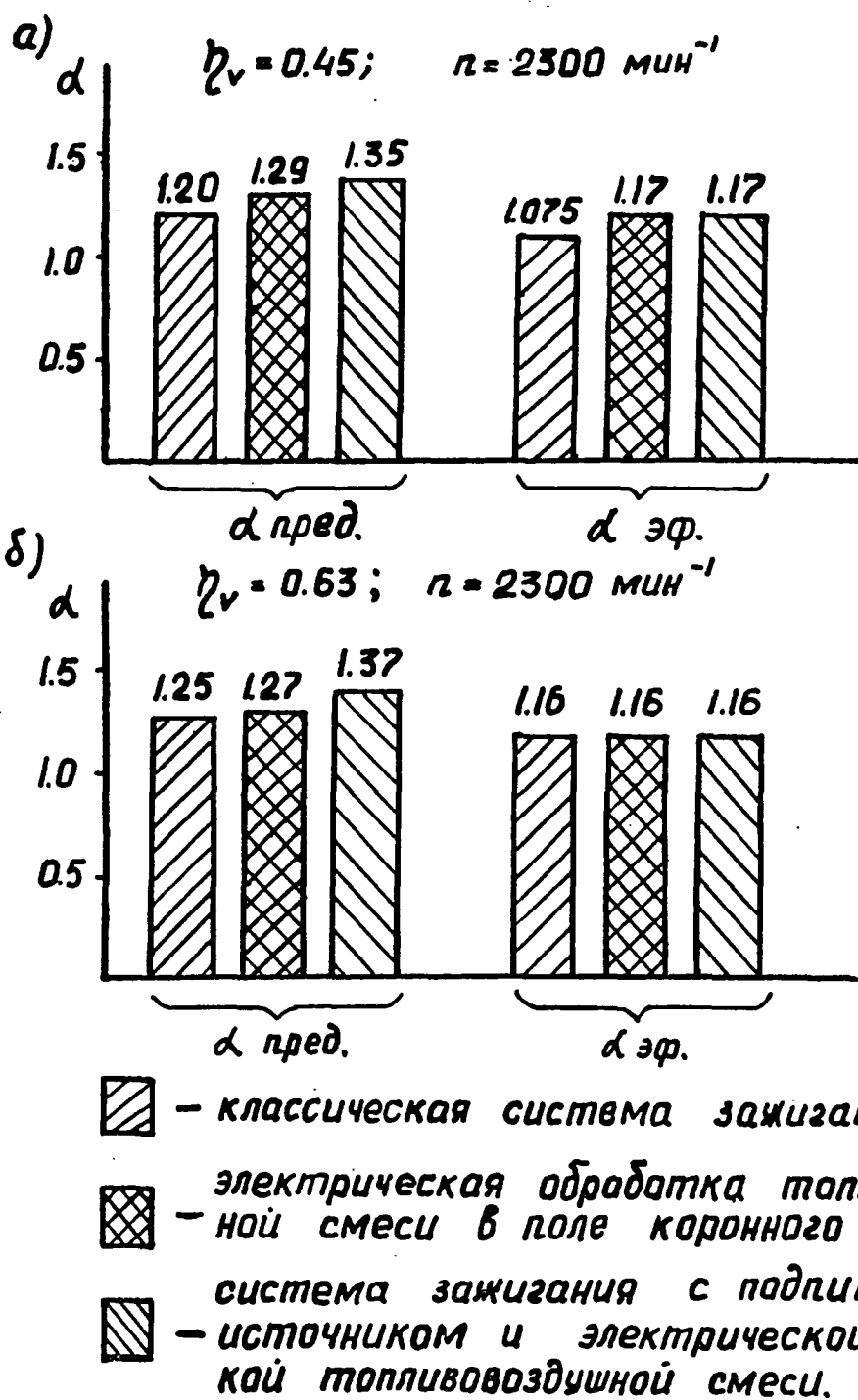


Рис. 5.17. Влияние различных видов электрической обработки топливовоздушной смеси на пределы ее обеднения при разных нагрузках

ствующего только электрической обработке горючей смеси до $\alpha_{\text{пред}} = 1,35$.

Полученное расширение предела устойчивой работы двигателя, вероятно, связано с образованием обогащенной смеси в районе искрового промежутка, по сравнению с более бедной в остальной части камеры сгорания, что создает более лучшие условия для пробы искрового промежутка и последующего развития начального очага горения, возникшего от искры.

Образование обогащенной смеси в районе искрового промежутка происходит в результате притяжения ионизированных частиц топлива, образующихся при электрической обработке топливовоздушной смеси в зоне коронного разряда, электростатическим полем, создаваемым за счет постоянно приложенного высокого напряжения около 4,5 кВ к центральному электроду от подпитывающего источника I системы зажигания (см.рис.4.12).

Приведенное объяснение было проверено путем изменения полярности напряжения, подаваемого на коронирующий электрод II ионизатора В (см.рис.4.10,а), и его отключением. При этом сразу же работа двигателя становилась неустойчивой вплоть до пропусков зажигания при том же α , что являлось причиной разброса скоростей пламени в последовательных циклах. Этот факт подтверждает правильность высказанного предположения о том, что причиной расширения предела обеднения смеси является образование обогащенной зоны смеси в районе искрового промежутка.

Полученные результаты экспериментальных исследований указывают на благоприятное влияние электрической обработки топливовоздушной смеси на рассматриваемые показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя, и, в частности, на его топливную экономичность, что является следствием улучшения процессов смесеобразования и зажигания, и в достаточной степени согласуются с теоретическими представлениями, изложенными в главе 3.

6. ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как уже было показано выше, из всех видов электрической обработки свежего заряда наиболее эффективной является обработка топливовоздушной смеси в поле коронного разряда, которая обеспечивает значительное повышение топливной экономичности и расширение пределов обеднения смеси, что позволяет её рассматривать как один из возможных способов улучшения экономических и токсических показателей многоцилиндровых карбюраторных двигателей за счет улучшения их устойчивости работы на обедненных смесях.

Однако более целесообразным является использование электрической обработки топливовоздушной смеси в сочетании с подачей на центральные электроды свечей зажигания напряжения противоположной полярности, т.к. в этом случае дополнительно расширяется предел возможного обеднения смеси /28/.

Ниже приводится описание предлагаемого устройства для улучшения устойчивой работы карбюраторного двигателя на обедненной смеси, по которому имеется решение о выдаче авторского свидетельства на заявку № 3610024/25-06, и расчет экономической эффективности от его применения. В данном варианте устройство предназначено для установки его на четырехтактные четырехцилиндровые двигатели.

6.1. Описание предлагаемого устройства для улучшения устойчивой работы карбюраторного двигателя на обедненной смеси

Принципиальная схема устройства, включающего в себя использование электрической обработки топливовоздушной смеси на впуске в двигатель и подачу на центральные электроды свечей зажига-

ния относительно невысокого напряжения (4...6 кВ) противоположной полярности, показана на рис. 6.1.

Основными элементами этого устройства, кроме элементов 1...7, относящихся к штатной системе зажигания, являются: коронирующие электроды 9, коаксиально размещенные по всей длине каждого патрубка цилиндров впускного трубопровода и предназначенные для образования коронного разряда; два высоковольтных источника постоянного тока I2 и I3 с выходами противоположной полярности напряжения, которые предназначены для подачи высокого напряжения отрицательной полярности порядка 12...15 кВ на коронирующие электроды 9 (источник I3) и напряжения положительной полярности — на центральные электроды свечей зажигания 7 для создания электростатического поля между боковым и центральным электродом свечи зажигания; высоковольтные диоды I5 и I4, соответственно, предназначенные для развязки электрических цепей центральных электродов свечей зажигания и обеспечения от системы зажигания полярности напряжения на центральных электродах свечей одинаковой с полярностью выходного напряжения высоковольтного источника I2.

Коронирующие электроды 9 изготовлены в виде тонких металлических стержней и электрически изолированы от впускных патрубков, которые соединены с массой и являются вторыми электродами.

Размещение электродов 9 по всей длине каждой ветви цилиндров впускного трубопровода увеличивает активную зону ионизации, что, в отличие от локального источника ионизации, обеспечивает значительно большую степень ионизации топливовоздушной смеси.

Работает устройство следующим образом. При включенном выключателе 2 напряжение от аккумулятора 1 подводится к первичной катушке 3 зажигания и высоковольтным источникам I2 и I3 постоянного тока. С выхода источника I2 высокое напряжение положитель-

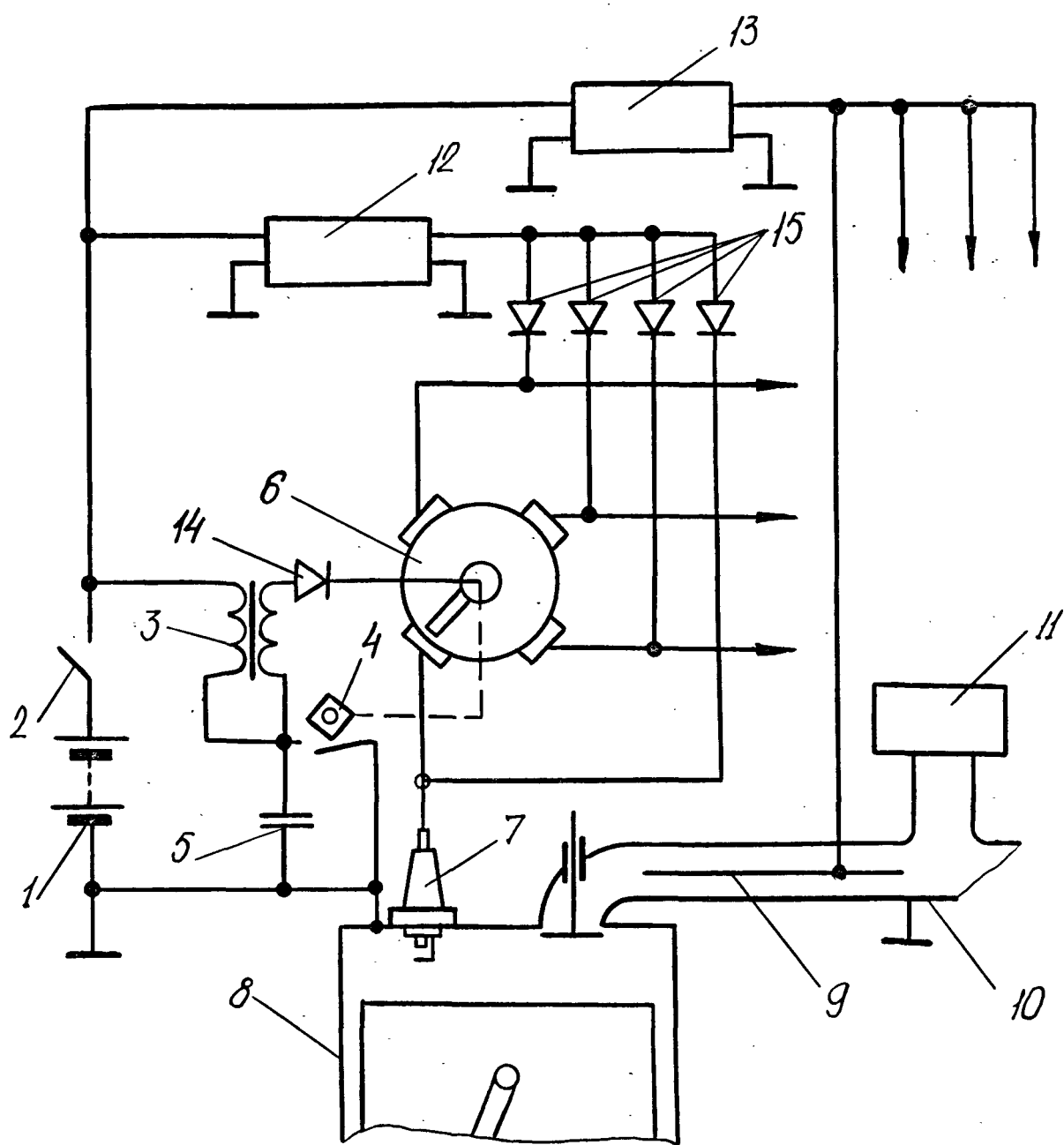


Рис. 6.1. Устройство для улучшения устойчивой работы карбюраторного двигателя на обедненной смеси

ной полярности через развязывающие диоды I5 подается на центральные электроды свечей 7 зажигания, а с выхода источника I3 - высокое напряжение отрицательной полярности на коронирующие электроды 9. В результате этого в зоне центрального и бокового электродов свечи зажигания образуется электростатическое поле, а между внутренними стенками впускных патрубков I0 и электродами 9 - коронный разряд.

При работе двигателя движущаяся от карбюратора II обедненная топливовоздушная смесь, что обеспечивается первоначальной регулировкой карбюратора, попадает в зону действия коронного разряда, где происходит как электризация капель топлива, так и ионизация воздуха с образованием озона, что приводит к образованию значительного количества активных радикалов. Электризация капель способствует их вторичному дроблению вследствие уменьшения сил поверхностного натяжения топлива /29 /, а зарядка отрицательным знаком предотвращает их укрупнение. Все это повышает однородность топливовоздушной смеси и ее реакционную способность.

При поступлении в цилиндры двигателя предварительно ионизированной смеси отрицательно заряженные частицы топлива на протяжении тактов впуска и сжатия перемещаются под действием электростатического поля к центральному электроду свечи зажигания, образуя зону обогащенной легковоспламеняемой смеси в районе искрового промежутка.

В конце такта сжатия после размыкания контакта низковольтного прерывателя 4 во вторичной обмотке катушки зажигания 3 создается высокое напряжение, которое с помощью распределителя 6 импульсов высокого напряжения прикладывается к свече 7 зажигания, в результате чего происходит пробой ее искрового промежутка. При этом находящаяся в межэлектродном пространстве ионизированная обогащенная смесь надежно воспламеняется с устойчивым развитием

дальнейшего горения.

Образование в районе электродов свечи зажигания зоны обогащенной легковоспламеняемой смеси повышает надежность зажигания вследствие лучших условий для образования и развития начального очага горения, а наличие в остальной части цилиндра ионизированной обедненной смеси увеличивает скорость ее химической реакции, что особенно положительно отражается на заключительной стадии процесса сгорания и, в частности, на сокращении длительности завершающей фазы догорания, увеличивая тем самым полноту тепловыделения.

Все это в наших опытах обеспечило более устойчивую работу двигателя на обедненной смеси и, улучшение его экономических и токсических показателей /28/. Кроме того, в результате предварительной ионизации искрового промежутка существенно уменьшается величина и разброс пробивных напряжений на свече зажигания, что снижает требования к системе зажигания по вторичному напряжению.

6.2. Расчет экономического эффекта от применения предлагаемого устройства

Для выяснения вопроса о наилучшей эффективности использования предлагаемого устройства на карбюраторных двигателях расчет экономического эффекта от его применения целесообразно провести для нескольких автомобилей, отличающихся друг от друга среднегодовыми пробегами и рабочими объемами двигателей.

В А Р И А Н Т I. Расчет ведем в предположении, что устройство будет установлено на серийно выпускаемый четырехтактный карбюраторный двигатель МеМЗ-968 автомобиля "Запорожец", у которого эксплуатационный (линейный) расход топлива ($H_{\text{км}}$) на 100 км пробега равен 9л, а среднегодовой пробег (L_r) - 10000 км.

В результате рассмотренных выше экспериментальных исследова-

ний (параг.5.2.4), проведенных на одноцилиндровом двигателе с аналогичным устройством /30/, установлено расширение пределов обеднения смеси и снижение удельного эффективного расхода топлива на 2...6,5% (рис.5.16).

Если исходить из того, что такой же эффект будет и на многоцилиндровом двигателе МеМЗ-968, то экономия эксплуатационного расхода топлива в литрах и годовой экономический эффект от применения предлагаемого устройства на одном автомобиле могут быть рассчитаны следующим образом.

Экономия топлива при эксплуатации одного автомобиля за год $\Delta G_{т.г}$ определяется как разность эксплуатационных расходов топлива до и после внедрения устройства. При этом будем исходить из среднегодового пробега автомобиля, его эксплуатационного расхода топлива на 100 км и 5% экономии топлива от его расхода ($K_э = 0,95$).

Определим эксплуатационные расходы топлива на один автомобиль в год до и после внедрения устройства:

$$G_{т.б} = L \cdot H_{км} = 10 \cdot 10^3 \cdot 9 \cdot 10^{-2} = 900 \text{ л.}$$

$$G_{т.н} = L \cdot H_{км} \cdot K_э = 10 \cdot 10^3 \cdot 9 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 855 \text{ л.}$$

Тогда годовая экономия топлива при эксплуатации одного автомобиля составит:

$$\Delta G_{т.г} = G_{т.б} - G_{т.н} = 900 - 855 = 45 \text{ л.}$$

При эксплуатации 200 тыс. автомобилей "Запорожец" с двигателем МеМЗ-968, снабжённых предлагаемым устройством, экономия топлива за год $\Delta G'_{т.г}$ составит:

$$\Delta G'_{т.г} = \Delta G_{т.г} \cdot N = 45 \cdot 200 \cdot 10^3 = 9 \cdot 10^6 \text{ л,}$$

где $N = 200$ тыс. автомобилей – годовая программа выпуска автомобилей.

Индекс "Б" – соответствует базовому варианту двигателя, а "Н" – двигателю с предлагаемым устройством.

Годовой экономический эффект в руб. от применения устройства на одном автомобиле может быть рассчитан по формуле

$$\mathcal{E} = \Delta P_{\text{экс}} - \Delta K \cdot E_n$$

где $\Delta P_{\text{экс}}$ — годовая экономия от затрат на топливо после применения предлагаемого устройства;

ΔK — дополнительные затраты на изготовление и установку устройства на двигателе, предварительным расчетом определены — 30 руб.;

E_n — нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений (для новой техники равен 0,15).

Определим $\Delta P_{\text{экс}}$:

$$\Delta P_{\text{экс}} = \Delta G_{\text{т.г}} \cdot \zeta_{\text{т}} = 45 \cdot 30 \cdot 10^{-2} = 13,5 \text{ руб.},$$

где $\zeta_{\text{т}} = 30 \text{ коп/л}$ — стоимость одного литра бензина марки А-76 для индивидуальных владельцев.

Тогда, годовой экономический эффект от эксплуатации одного автомобиля с предлагаемым устройством составит:

$$\mathcal{E} = \Delta P_{\text{экс}} - \Delta K \cdot E_n = 13,5 - 30 \cdot 0,15 = 9 \text{ руб.},$$

а на 200 тыс. автомобилей "Запорожец" :

$$\mathcal{E}' = \mathcal{E} \cdot N = 9 \cdot 200 \cdot 10^3 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ руб.}$$

В А Р И А Н Т П. Расчет ведем в предположении, что устройство будет установлено на серийно выпускаемый четырехтактный карбюраторный двигатель ГАЗ-24 легкового автомобиля — такси ГАЗ-24, у которого эксплуатационный расход топлива $H_{\text{км}}$ на 100 км пробега равен 13,5 л, а среднегодовой пробег $L_{\text{г}}$ — 70335 км. Этот вариант отличается от первого большим рабочим объемом двигателя и значительно большим $L_{\text{г}}$, который определен следующим образом:

$$L_{\text{г}} = 365 \cdot \alpha_{\text{вып}} \cdot L_{\text{с}} = 365 \cdot 0,82 \cdot 235 = 70335 \text{ км.},$$

где 365 - количество дней в году;

$\alpha_{\text{вып}} = 0,82$, а $L_c = 235$ км - соответственно, коэффициент выпуска на линию и среднесуточный пробег автомобиля -такси ГАЗ-24 (среднестатистические данные по АТП Донецкой области).

Годовые эксплуатационные расходы на один автомобиль до и после внедрения устройства:

$$G_{\text{т.б}} = L_{\text{г}} \cdot H_{\text{км}} = 70335 \cdot 13,5 \cdot 10^{-2} = 9495 \text{ л} ,$$

$$G_{\text{т.м}} = L_{\text{г}} \cdot H_{\text{км}} \cdot K_{\text{э}} = 70335 \cdot 13,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 9020 \text{ л} .$$

Годовая экономия топлива при эксплуатации одного автомобиля:

$$\Delta G_{\text{т.г}} = G_{\text{т.б}} - G_{\text{т.м}} = 9495 - 9020 = 475 \text{ л} .$$

Годовая экономия топлива при эксплуатации 500 автомобилей (численность одного таксомоторного парка):

$$\Delta G'_{\text{т.г}} = \Delta G_{\text{т.г}} \cdot N = 475 \cdot 500 = 237500 \text{ л} .$$

Экономия эксплуатационных расходов по топливу на одном автомобиле за год:

$$\Delta P_{\text{экс}} = \Delta G_{\text{т.г}} \cdot C_{\text{т}} = 475 \cdot 20 \cdot 10^{-2} = 95 \text{ руб} ,$$

где $C_{\text{т}} = 20$ коп/л - стоимость одного литра бензина марки АИ-93 для автомобиля общественного пользования.

Годовой экономический эффект от применения устройства на одном автомобиле:

$$\mathcal{E} = \Delta P_{\text{экс}} - \Delta K \cdot E_{\text{н}} = 95 - 30 \cdot 0,15 = 90,5 \text{ руб} ,$$

на 500 автомобилях

$$\mathcal{E}' = \mathcal{E} \cdot N = 90,5 \cdot 500 = 45250 \text{ руб} .$$

В А Р И А Н Т Ш. Расчет проводится применительно к серийно выпускаемому карбюраторному двигателю ГАЗ-24, устанавливаемому на

автомобилях "Волга-24", но предназначенному для эксплуатации индивидуальными владельцами, у которого главной отличительной особенностью от второго варианта (автомобиля-такси ГАЗ-24), является значительно меньший среднегодовой пробег, равный 10000 км.

Годовые эксплуатационные расходы топлива на один автомобиль до и после внедрения предлагаемого устройства:

$$G_{т.б} = L_r \cdot H_{км} = 10000 \cdot 13,5 \cdot 10^{-2} = 1350 \text{ л.}$$

$$G_{т.н} = L_r \cdot H_{км} \cdot K_3 = 10000 \cdot 13,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 1283 \text{ л.}$$

Экономия топлива при эксплуатации одного автомобиля за год:

$$\Delta G_{т.г} = G_{т.б} - G_{т.н} = 1350 - 1283 = 67 \text{ л.}$$

Годовая экономия топлива при эксплуатации 500 автомобилей (для сравнения со вторым вариантом принято то же количество автомобилей):

$$\Delta G'_{т.г} = \Delta G_{т.г} \cdot N = 67 \cdot 500 = 33500 \text{ л.}$$

Уменьшение расходов от затрат на топливо на одном автомобиле:

$$\Delta P_{зкс} = \Delta G_{т.г} \cdot \Pi_t = 67 \cdot 40 \cdot 10^{-2} = 26,8 \text{ руб.},$$

где $\Pi_t = 40 \text{ коп/л}$ — стоимость одного литра бензина марки АИ-93 для индивидуальных владельцев.

Годовой экономический эффект в руб. от применения устройства: на одном автомобиле

$$\mathcal{E} = \Delta P_{зкс} - \Delta K \cdot E_n = 26,8 - 30 \cdot 0,15 = 22,3 \text{ руб.}$$

на 500 автомобилях

$$\mathcal{E}' = \mathcal{E} \cdot N = 22,3 \cdot 500 = 11150 \text{ руб.}$$

Таким образом, из этих трех вариантов расчета следует, что наибольший эффект по экономии топлива от применения предлагаемого устройства достигается на автомобиле с большим среднегодовым пробегом и имеющим двигатель большего рабочего объема.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

I. В результате безмоторных опытов по исследованию режима истечения бензинов в условиях приложенного электрического поля установлено, что степень снижения поверхностного натяжения топлива зависит от:

- способа электризации топлива, достигая наибольшего снижения при контактной электризации по сравнению с индуктивной электризацией;
- напряженности поля E , уменьшаясь с ее увеличением до некоторого критического значения $E_{кр}$, при котором происходит переход от капельного режима истечения к струйному. С дальнейшим увеличением E выше $E_{кр}$ наблюдается постоянный рост ζ , сопровождаемый обратным переходом режима истечения от струйного к капельному с постоянно снижающейся частотой отрыва капель и их укрупнением;
- характера прикладываемого напряжения, достигая максимального снижения от действия постоянного напряжения по сравнению с другими видами (переменного, импульсного, постоянного с пульсирующей составляющей);
- свойств топлива, что связано с различной величиной диэлектрической проницаемости, которая в значительной мере определяет степень его электризации.

2. Установлено, что поверхностное натяжение топлива практически не зависит от знака (+ или -) подводимого напряжения.

3. При теоретическом рассмотрении особенностей смесеобразования в условиях электрического поля показано, что при взаимодействии электрозаряженных капель с воздушным потоком увеличивается эффективность его воздействия, что приводит к более тонкому и однородному распыливанию топлива.

Получена зависимость, описывающая силовое взаимодействие за-

ряженных капель с воздушным потоком и характеризующая тонкость распыливания топлива от степени его электризации.

Показано также, что униполярная зарядка капель топлива при электрической обработке горючей смеси в поле коронного разряда и электризации топлива в процессе его распыливания уменьшает коагуляцию капель и их выпадание в топливную пленку.

4. Теоретически показано, что при электрической обработке топливовоздушной смеси в поле коронного разряда, вследствие повышения ее реакционной способности из-за повышенного образования в смеси возбужденных и ионизированных атомов, молекул и радикалов, обеспечиваются более лучшие условия зажигания, т.е. более быстрое и стабильное образование начального очага горения и превращения его в развитый фронт пламени.

5. Из результатов исследований отдельных видов электрической обработки свежего заряда (ионизации воздуха, поступающего в двигатель, электризации топлива в процессе его распыливания и электрической обработки топливовоздушной смеси в поле коронного разряда) установлено, что наибольшее влияние на рабочий процесс двигателя оказывает электрическая обработка горючей смеси в поле коронного разряда. При этом:

- увеличивается скорость распространения пламени $U_{пл}$ на всех стадиях процесса сгорания. Однако наибольший прирост $U_{пл}$ имеет место в начальной стадии процесса горения для бедных смесей и при $\alpha = 1,2$ он составляет 33%;
- улучшается цикловая неравномерность процесса сгорания на 2...40% при всех значениях α , но в большей степени по мере обеднения смеси;
- снижается величина и степень разброса пробивных напряжений (более значительно с ростом α). При $\alpha = 1,2$ снижение $U_{пр}$ составляет 12%, а разброс их уменьшается на 44%;

- улучшается топливная экономичность, причем с обеднением смеси этот эффект увеличивается, и при $\alpha = 1,2$ снижение η_e составляет 6,5%;
- расширяется предел эффективного обеднения смеси $\alpha_{эф}$ с 1,075 до 1,17 и предел устойчивой работы двигателя $\alpha_{пред}$ с 1,20 до 1,29;
- снижается концентрация CO в ОГ в области богатых смесей в среднем на 12%.

6. Выявлено, что с увеличением нагрузки эффект от действия электрической обработки на рассматриваемые показатели снижается и при нагрузке, соответствующей $\eta_v = 0,63$, практически отсутствует,

7. Установлено, что электрическая обработка горючей смеси в сочетании с системой зажигания, содержащей подпитывающий источник высокого напряжения ($U \approx 4,5$ кВ), которое приложено к центральному электроду свечи зажигания, обеспечивает расширение предела устойчивой работы двигателя с $\alpha_{пред} = 1,20$ до $\alpha_{пред} = 1,35$.

8. Экспериментально подтверждено, что разработанная методика оценки степени влияния электрической обработки свежего заряда на основные параметры рабочего процесса карбюраторного двигателя, которая включает в себя регистрацию скорости пламени статистическим методом, фоторегистрацию наложенных индикаторных диаграмм ряда последовательных рабочих циклов, измерение пробивных напряжений свечи зажигания и ведение непрерывного анализа ОГ на содержание в них CO и CO₂, позволяет достаточно объективно оценить ее влияние на показатели рабочего процесса двигателя.

Использование методики статистической регистрации скорости распространения пламени при различном удалении ионизационных датчиков от свечи зажигания позволяет выявить отличия и особенности в протекании процесса сгорания на отдельных его стадиях, включая и начальный период развития очажка горения в развитый

фронт турбулентного пламени.

9. Анализ результатов экспериментальных исследований различных способов электрической обработки свежего заряда позволяет сделать следующие выводы:

- ионизация воздуха и электризация топлива не оказывают значительного влияния на параметры рабочего процесса и сами по себе не могут являться эффективным средством улучшения экономических и токсических показателей двигателя;
- электризацию топлива можно использовать для регулирования состава смеси, так как в результате ее действия происходит изменение истечения топлива из распылителя на 9...26%, а также улучшение стабильности топливоподачи при малых открытиях дросселя;
- электрическую обработку горючей смеси прежде всего следует рассматривать как дополнительный фактор улучшения экономических и токсических показателей на частичных нагрузках и повышения устойчивой работы двигателя на бедных составах смеси, при этом также снижаются требования к системе зажигания вследствие уменьшения величины и разброса пробивных напряжений.

Кроме того, электрическая обработка топливовоздушной смеси в сочетании с системой зажигания, содержащей подпитывающий источник, напряжение которого постоянно приложено к центральному электроду свечи зажигания, может обеспечить послойное смесеобразование с расширением области устойчивой работы двигателя,

10. По результатам исследований на одноцилиндровой установке разработано устройство для улучшения устойчивой работы многоцилиндрового карбюраторного двигателя на обедненных смесях, которое включает в себя электрическую обработку топливовоздушной смеси на впуске в двигатель и подачу на центральные электроды свечей зажигания напряжения противоположной полярности.

Проведенный расчет экономического эффекта от применения предлагаемого устройства показал целесообразность его использования на карбюраторных двигателях легковых автомобилей.

Результаты проведенной работы переданы на Мелитопольский моторный завод для использования их при разработках перспективных моделей высокоэкономичных и малотоксичных карбюраторных двигателей и в Псковское автотранспортное управление для проверки их в условиях эксплуатации.

УТВЕРЖДАЮ:



Главный инженер Мелитопольского
моторного завода

Глушаков С.М.
1983 г.

А К Т

на внедрение научно-исследовательской работы

Комиссия представителей Мелитопольского моторного завода в составе заместителя главного конструктора Беседина А.И., начальника бюро Реппиха А.Ф., начальника бюро Рывина В.З. и представителей Ворошиловградского машиностроительного института в составе руководителя работ проректора по научной работе ВМИ и.о. профессора Звонова В.А. и исполнителя работ Ефимова Н.А. составили настоящий акт в том, что Ворошиловградским машиностроительным институтом передана Мелитопольскому моторному заводу документация на устройство, обеспечивающее улучшение топливной экономичности карбюраторного двигателя на 2-6,5% и повышение устойчивости его работы на обедненной смеси, вследствие расширения предела устойчивой работы с $\alpha = 1,20$ до $\alpha = 1,35$ за счет использования в нем электрической обработки топливовоздушной смеси на впуске в двигатель и подачи на центральный электрод свечи зажигания напряжения противоположной полярности.

Указанное устройство, разработанное на кафедре "ДВС и теплотехника" ВМИ при выполнении научно-исследовательской работы "Исследование электрической обработки свежего заряда как средства улучшения топливной экономичности карбюраторного двигателя", будет использовано Мелитопольским моторным заводом при разработке перспективных моделей высокоэкономичных и малотоксичных двигателей

Ожидаемый годовой народнохозяйственный экономический эффект от внедрения указанного устройства на один двигатель составит 9,0 руб., а на 200 тыс. - 1,8 млн.руб.

Председатель комиссии

Члены комиссии

Беседин А.И.

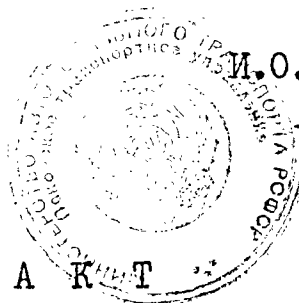
Реппих А.Ф.

Рывин В.З.

Звонов В.А.

Ефимов Н.А.

"У Т В Е Р Ж Д А Ю"



И.О. Главного инженера Псковского
транспортного управления

 Г.П.Петров

"15" августа 1983 года

на внедрение научно-исследовательской работы

Комиссия представителей Псковского пассажирского автотранспортного предприятия в составе главного инженера Ловцова В.М., начальника эксплуатации Поликашкиной В.Г., нач. технического отдела Кашицына В.Г. и представителей Ворошиловоградского машиностроительного института в составе руководителя работ проректора по научной работе ВМИ и.о. профессора Звонова В.А. и исполнителя работ Ефимова Н.А. составили настоящий акт в том, что Ворошиловоградским машиностроительным институтом передана Псковскому ПАТП документация на устройство, обеспечивающее улучшение топливной экономичности карбюраторного двигателя на 2-6,5%, повышение устойчивости его работы на обедненной смеси, вследствие расширения предела возможного обеднения топливовоздушной смеси с





$\alpha = 1,20$ до $\alpha = 1,35$ и снижение величины и разброса пробивных напряжений на зажигательных свечах соответственно на 14 и 44%, за счет использования в нем электрической обработки топливовоздушной смеси на выпуске в двигатель и подачи на центральные электроды свечей зажигания напряжения противоположной полярности.

Указанное устройство, разработанное на кафедре "ДВС и теплотехника" ВМИ при выполнении научно-исследовательской работы "Исследование электрической обработки свежего заряда как средства улучшения топливной экономичности карбюраторного двигателя", будет испытано Псковским ПАТП в эксплуатационных условиях на легковых автомобилях - такси ГАЗ-24.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения указанного устройства на один автомобиль ГАЗ-24 составит 90,5 руб., а на 500 - 45250 руб.

Председатель комиссии

Члены комиссии:

	В.М.Ловцов
	В.Г.Поликашкина
	В.Г.Кашицын
	В.А.Звонов
	Н.А.Ефимов

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981-1985 годы и на период до 1990 года.- В кн.: Материалы XXVI съезда КПСС. М., 1981, с.131-205.
2. Абугов Д., Соколик А. Электропроводность пламени в двигателе внутреннего сгорания.- Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1933, т.3, вып.5, с.438-446.
3. Автомобильные и тракторные двигатели (теория, системы питания, конструкции и расчет) /Под общ.ред.И.М.Ленина.- М.: Высш. школа, 1969. - 656с.
4. Акбаров М.М. Исследование процессов испарения и высокотемпературного воспламенения автомобильных топлив при искусственной электризации.- Дис.... канд.техн.наук.- Ташкент, 1972.- 146с.
5. Асакава Г. Физические методы интенсификации процессов горения.- В сб.: Вопросы горения. М., 1963, с.419 - 426.
6. Бабой Н.Ф., Болога М.К., Семенов К.Н. Воздействие электрических полей на теплообмен в жидкостях и газах.- Электронная обработка материалов, 1965, № I, с.57-71.
7. Бак М.А., Зингерман А.С., Николаевская Н.Н. Влияние облучения разрядного промежутка электронами и γ - лучами на величину пробивного напряжения и характер разряда. - Журнал технической физики, 1947, т.17, вып.5, с.589-598.
8. Балобанов Е.М. Дисперсные системы в электрическом поле коронного разряда.- Дис....докт.техн.наук. - М., 1953 - 462 с. (2 тома).
9. Багдасаров А.М. Некоторые вопросы теории электростатического распыливания и интенсификации процессов сгорания автомобильных топлив с помощью их искусственной электризации: Автореф. Дис....канд.техн.наук.- Ташкент, 1967, - 27 с.

10. Болога М.К., Руденко В.М. Об интенсификации испарения жидкости под воздействием электрического поля. - Электронная обработка материалов, 1975, № 3, с.37-40.

11. Брозе Д.Д. Сгорание в поршневых двигателях. Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1968.- 248 с.

12. Будыко Ю.И., Сайдиганов М.М. Об оценке неравномерности распределения топлива по цилиндрам двигателя. - Тр./ ЦНИТА, 1965, вып.26, с.57-67.

13. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1969.- 576 с.

14. Верещагин Л.П. и др. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. - М.: Энергия, 1974.- 480с.

15. Викторов В.Н., Нефедова М.Г., Попов В.А. Влияние предварительной обработки топлив электрическим полем на скорость горения. Тр./ Н.-И. энерг. ин-т им.Г.М.Кржижановского, 1975, вып.36, с.142-157.

16. Виснапуу Л.Ю. и др. Электроаэрозольное устройство для групповой вакцинации против гриппа.- Учеб.зап. /Тарт. гос.ун-т, 1977, вып.409, с.147-151.

17. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю. Экспериментальная установка для электроокраски мелких изделий.- Учеб.зап. /Тарт.гос.ун-т; 1963, вып.140, с.120-129.

18. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях.- М.: Машиностроение, 1977. - 277 с.

19. Гаврилов Б.Г. Химизм предпламенных процессов в двигателях. - Л.:Ленинград, университет, 1970.- 182 с.

20. Гегузин Я.Е. Капля.- М.: Наука, 1973.- 160с.

21. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура.-Пер. с англ.- М.: Metallurgizdat, 1959. - 166с.

22. Глезер Г.Н., Опарин И.М., Хейман Э.Л. Электронные системы зажигания автомобилей.- М.: Машиностроение, 1967.- 159с.

23. Голанд Ш.М. Ионизация топлива для двигателей внутреннего сгорания (патентная и зарубежная информация). - Производственно-технический сборник технического управления Министерства речного флота РСФСР, 1971, вып. 93, с.89-101.

24. Даггер, Симон, Герстеин. Распространение ламинарного пламени.- В кн.: Основы горения углеводородных топлив. М., 1960, с.321-409.

25. Дьяченко В.Г., Коржов М.А. О перспективах развития энергетических установок легковых автомобилей.- В сб.: Двигатели внутреннего сгорания. Вып.31.- Харьков: Изд-во ХГУ, 1980, с.3-8.

26. Дьячков Б.Г., Нефедова М.Г. К вопросу воздействия электрического поля на процесс сгорания. - В кн.: Вопросы теории горения: Тр. Общесмоковского семинара по теории горения. М., 1970, с.76-86.

27. Ефимов Н.А., Звонов В.А., Ефимова Л.Я. Исследование влияния характера прикладываемого напряжения на истечение бензина.- Электронная обработка материалов, 1979, № 1, с.45-47.

28. Ефимов Н.А., Звонов В.А. Результаты исследования влияния электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя. - В кн.: Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всес.научн.конф. М., 1982, с.40-41.

29. Ефимов Н.А., Звонов В.А., Красносельский А.М. Исследование влияния электрического поля на поверхностное натяжение бензинов при их истечении.- В сб.: Двигатели внутреннего сгорания. Вып.27.- Харьков. Изд-во ХГУ, 1978, с.40-46.

30. Ефимов Н.А., Звонов В.А., Мищенко Н.И. Одноцилиндровая установка и аппаратура для исследования влияния электрической обработки свежего заряда на процессы смесеобразования, сгорания и токсичность отработавших газов карбюраторного двигателя. — В сб.: Двигатели внутреннего сгорания. Вып.32.— Харьков, Изд-во ХГУ, 1980, с. 106—112.

31. Загрязькин Н.Н., Мещеряков Г.М. Многоэлектродная свеча зажигания с предварительной ионизацией искрового промежутка.— Тр./ Ин-т двигателей АН СССР, 1962, вып.6, с.102—109.

32. Загрязькин Н.Н., Мещеряков Г.М. Предварительно ионизированный искровой разряд для поджигания горючих смесей.— Автомобильная промышленность, 1963, № 7, с.19—21.

33. Зафрин Э.Я., Дорендовский А.Ф. О возможности управления процессами горения в двигателях воздействием электрических полей.— Изв. АН МССР, 1964, № 5, с.42—51.

34. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания.— М.: Машиностроение, 1973.— 200с.

35. Згут В.М. Исследование пленкообразования и неравномерности работы цилиндров карбюраторного двигателя: Автореф. Дис.... канд.техн.наук.— Волгоград, 1973.— 25с.

36. Злотин Г.Н., Козлов О.И., Трелин Ю.А. Изучение особенностей работы ДВС с искровым зажиганием при добавках водорода в бензовоздушную смесь.— В кн.: Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания: Тез.докл.Всес.научн.конф., М., 1982, с.20—21.

37. Злотин Г.Н., Кума Ф.Н. Некоторые вопросы гомогенизации смеси в карбюраторных двигателях.— Тр./Волгогр. политехн.ин-т, Рабочие процессы в поршневых ДВС. 1977, с.62—70.

38. Злотин Г.Н., Малов В.В., Староверов В.В. Влияние типа и регулировок системы зажигания на продолжительность и цикловую нестабильность первой фазы процесса сгорания в карбюраторном двигателе.- Тр./Волгогр.политехн.ин-т. Рабочие процессы в поршневых ДВС. 1979, с.3-12.

39. Изральянц В.М. Самоходная электроокрасочная установка для наружных работ.- Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1977.- 88с.

40. Илюкович А.М. Техника электрометрии.- М.: Энергия, 1976. - 400с.

41. Ирисов А.С. Испаряемость топлива для поршневых двигателей и методы ее исследования.- М.: Гостоптехиздат, 1955.- 307с.

42. Казанцев Л.И., Калашников С.А., Сидоров А.А. Некоторые результаты работы дизелей на озонированном топливе.- Тр./Новосиб. ин-т инж.водного трансп. 1971, вып.63, с.69-73.

43. Казанцев Л.И., Сидоров А.А., Калашников С.А. Влияние озона на воспламенение дизельного топлива.- В кн.: Материалы XII научно-технической конференции НИИВТА. Новосибирск, 1969, с.239-241.

44. Каменецкая С.А., Славинская Н.А., Пшежицкий С.Я. Влияние озона на воспламенение углеводородов.- В кн.: Кинетика и распространение пламени. М., АН СССР, 1959, с.33-42.

45. Клейманов Н.А. и др. Окисление метана атомами кислорода, образующимися при термическом распаде озона.- Журнал физической химии, 1956, т.30, вып.4, с.794-797.

46. Копейкина Э.К. Влияние электрического поля на поверхностное натяжение неполярных жидкостей.- Электронная обработка материалов, 1970, № 4, с.57-59.

47. Кузьмин М.А. Расчет и конструирование безинерционных печей. - М.-Л.: Машгиз, Ленингр. отд-ние, 1961.- 223с.

48. Лёб Л.Б. Статическая электризация.- Пер.с англ.- М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963,- 408с.

49. Ленин И.М. Автомобильные карбюраторные двигатели (тепловые процессы и питание).- М.: Машгиз, 1950. - 206с.

50. Ленин И.М., Сидорин К.И. Влияние состава горючей смеси на износ карбюраторного двигателя.- Автомобильный транспорт, 1953, № 3, с.4-6.

51. Лившиц М.Н. Автоматизация, эмалирование и окраска санитарно-технических изделий с применением коронного разряда.- М.: Стройиздат, 1964.- 48с.

52. Лившиц М.Н., Моисеев В.Н. Электрические явления в аэрозолях и их применение.- М.-Л.: Энергия, 1956.- 224с.

53. Лившиц М.Н. Электрические методы окраски, эмалирования и глазуирования изделий.- М.: Промстройиздат, 1956.- 112с.

54. Лившиц М.Н. Электроэмалирование санитарно-технических изделий.- М.: Стройиздат, 1975.- 97с.

55. Липатников В.Е., Казаков К.М. Физическая и коллоидная химия.- М.: Высшая школа, 1975.- 200с.

56. Лобынцев Ю.И., Колляков И.А. Особенности влияния пульсации разряда на изменение пропускной способности дозирующих элементов систем карбюрации.- Тр./ ЦНИТА, 1973, вып.57, с.26-32.

57. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах.- Пер.с англ. 2-е изд.- М.: Мир, 1968.- 589с.

58. Мазинг М.В. Особенности истечения топлива, находящегося в смеси с воздухом.- Тр./ НАМИ, 1969, вып.Ш, с.27-41.

59. Майоров Н.И. Предварительная обработка топливовоздушной смеси электрическим полем. Тр./ Н.-И. энерг.ин-т им.Г.М.Кржижановского, 1975, вып.36, с.158-167.

60. Малиновский А.Э., Лавров Ф.А. О влиянии электрического поля на процессы горения в газах.— Журнал физической химии, 1931, т.2, вып.3-4, с.530-534,

61. Малиновский А.Э., Мальяр Д.В. Исследование зажигания накаливаемой проволокой смеси метана с воздухом. Влияние электрического поля на период индукции.— Журнал технической физики, 1935, т.5, вып.7, с.1260-1270.

62. Малиновский А.С., Россыхин В.С., Наугольников Б.И. Исследование горения смеси ацетилена с воздухом в магнитном поле.— Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1934, т.4, вып.2, с.189-192.

63. Малиновский А.С., Россыхин В.С., Тимковский В.П. Влияние переменного электрического поля высокой частоты на скорость горения газа.— Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1934, т.4, вып.2, с.183-188.

64. Мандельштам А.А. Методика статистического исследования процесса сгорания в ДВС.— В кн.: Автомобильный транспорт: Сб. науч.тр. аспирантов и соискателей.— М.: МАДИ, 1970, с.129-133.

65. Маршак И.С. Электрический пробой газа при давлениях близких к атмосферному.— Успехи физических наук, 1960, т.71, вып.4, с.631-675.

66. Миненко В.И. Магнитная обработка водно-дисперсных систем.— Киев: Техника, 1970.— 167с.

67. Миненко В.И., Петров С.М., Миц М.Н. Магнитная обработка воды.— Харьков: Кн.изд., 1962.— 40с.

68. Миненко В.И. Электромагнитная обработка воды в теплоэнергетике: Вопросы теории и практики.— Харьков: Вища школа, 1981.— 96с.

69. Мищенко Н.И. Исследование влияния параметров искрового разряда на условия воспламенения и развитие процесса сгорания

в двигателе легкого топлива.- Дис....канд.техн.наук.- М.,1973.-
- 158с.

70. Моисеев А.Ф. Предупреждение образования накипи в автомобильном двигателе.- М.: Транспорт, 1971.- 128с.

71. Морев В. Поршень или газовая турбина.- За рулем. 1963,
№ 10, с.4.

72. Морозов К.А., Черняк Б.Я., Синельников Н.И. Особенности рабочих процессов высокооборотных карбюраторных двигателей.- М.: Машиностроение, 1971.- 100с.

73. Набоких В.А. Исследование влияния электрических параметров систем зажигания на работу карбюраторного двигателя в условиях установившихся и неуставившихся режимов.- Дис....канд. техн.наук,- М.,1969,- 147с.

74. Нечаев С.Г., Кургузов А.Н. Исследование протекания процесса сгорания при работе двигателя на малых нагрузках и способы его улучшения.- Тр./ МАДИ, 1979, вып.178, с.113-117.

75. Окраска изделий в электрическом поле. / Под ред. Е.Н.Владычиной и М.М.Гольдберга.- М.: Химия, 1966.- 224с.

76. Окраска в электрическом поле высокого напряжения /З.Б.Ветухновский, Е.М.Владычина, В.А.Губенский и др.- М.: ЦБТИ, 1958.-
- 63с.

77. Орлов В.А., Лосев В.Е. Автомобильные карбюраторы.- Л.: Машиностроение, Ленингр.отд-ние, 1977.- 248с.

78. Распыливание жидкого топлива в электрическом поле. /ИТО К. и др.: ВЦП.- № Ц-42679. - 31с.

79. Пешкин М.А. Исследование влияния некоторых факторов на границы обеднения смеси в цилиндре бензинового двигателя. — В кн.: Поршневые двигатели внутреннего сгорания. — М.: Изд-во АН СССР, 1956, с.192-206.

80. Пюллер П.К. и др. Генерирование, физиологическое действие и терапевтическое применение электроаэрозолей. — Учеб. зап./ Тарт. гос. ун-т, 1963, вып.140, с.16-35.

81. Ноль Р.В. Учение об электричестве. — Пер. с нем. — М.: Физматгиз, 1962. — 516с.

82. Попов В.А., Шеклеин А.В. Спектроскопическое исследование плоского метано-воздушного пламени в электрическом поле. — В сб.: Научно-технические проблемы горения и взрыва. Новосибирск, 1965, № I, с.76-79.

83. Поройков И.В. Рентгенометрия. — М.-Л.: Гостехиздат, 1950. — 383с.

84. Райков И.Я. Влияние распыливания топлив на износ цилиндров карбюраторных двигателей. — Тр./ НИАТ, 1961, вып.2, с. 41-51.

85. Райков И.Я., Ершов В.В. К вопросам пленкообразования в карбюраторных двигателях. — Автомобильная промышленность, 1964, № II, с.6-10.

86. Распределение смеси в карбюраторном двигателе /В.И.Андреев, С.Н.Волин, Я.В.Горячий и др. — М.: Машиностроение, 1966. — 128с.

87. Ревзин И.С. Безмоторное исследование влияния переменного электрического поля на смесеобразование во впускной системе двигателя. — Автомобильная промышленность, 1980, № I, с.5-7.

88. Ревзин И.С. О влиянии электрического поля на испарение бензина. — Тр./ ЦНИТА, 1974, вып.61, с.65-67.

89. Ревзин И.С. Основные предпосылки использования электростатических полей в двигателях внутреннего сгорания. - Электронная обработка материалов. 1978, № 6, с.51-53.

90. Ревзин И.С. Экспериментальное исследование влияния переменного электрического поля на поверхностное натяжение жидкостей. - Электронная обработка материалов, 1975, № 3, с.28-30.

91. Ревзин И.С. Экспериментальное исследование распада вертикальной струи жидкости в переменном электрическом поле. - Известия вузов. Энергетика, 1974, № 5, с.104-107.

92. Рубец Д.А. Смесеобразование в автомобильных двигателях при переменных режимах.- М.: Машгиз, 1948. - 150с.

93. Саламандра Г.Д., Шлякман Б.М. Предварительная обработка гомогенной топливовоздушной смеси электрическим полем.- Инженерно-физический журнал, 1973, т. 25, № 2, с.204-207.

94. Салимов А.У. и др. Влияние электризации на процесс самовоспламенения одиночных свободно падающих капель авиационных топлив. - Тр./ Ташк.полит.ин-т, 1971, вып.82, с.153-166.

95. Салимов А.У., Балабеков М.Г., Багдасаров А.М., Вопросы теории электростатического распыливания. - Ташкент: Фан, 1968.- 109с.

96. Салимов А.У. Вопросы теории электростатического распыливания жидкостей и интенсификации процессов сгорания жидких топлив в тепловых двигателях.- Дис....докт.техн.наук.- Ташкент, 1978.- 365с.

97. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности (свободные радикалы и цепные реакции). - 2-е изд. перер. и доп. - М.: Изд-во АН СССР, 1958. - 686с.

98. Скобликов А.С. Исследование возможности улучшения экономичности карбюраторного двигателя за счет рационального выбора параметров искрового разряда от системы зажигания. - Дис.... канд. техн. наук. - М., 1967. - 138с.

99. Смесеобразование в карбюраторных двигателях (В.И. Андреев, Я.В. Горячий, К.А. Морозов, Б.Я. Черняк, - М.: Машиностроение, 1975. - 176с.

100. Соколик А., Скалов Б. Роль электрически заряженных частиц в распространении пламени. - Журнал физической химии, 1934, т.5, с.617-624.

101. Спурный К. и др. Аэрозоли. Пер. с чешского. - М.: Атомиздат, 1964. - 360с.

102. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. - М.: Metallurgy, 1968. - 312с.

103. Трелин Ю.А. Исследование особенностей работы ДВС с искровым зажиганием при добавках водорода в бензовоздушную смесь: Автореф. Дис.... канд. техн. наук. - Волгоград, 1981, - 27с.

104. Чхеидзе В.Д. Интенсификация процесса горения электромагнитными методами в тракторных и автомобильных карбюраторных двигателях. - Дис.... канд. техн. наук. - Тбилиси, 1968. - 145с.

105. Borrmeister J., Drechsler F., Vo Nghia. Aktuelle Fragen der Gemischverteilung an Viertakt-Benzinmotoren. - Kraftfahrzeugtechnik, 1974, Nr 12, S. 364 - 369.
106. Fitzgerald Dennis J. Pulsed Plasma ignitor for internal combustion engines. - SAE Prepr., 1976, No 760764, 6 p.
107. Gaiginschi Emil, Sazarescu Emil, Simionescu Aurelian, Homutescu Condrat-Adrian, Barjioanu Aleccandru. Cercetari privind influenta electrizarii exterioare a injectorului asuprafinetei pulverizarii combustibilului lichid. - "Constr. mas.", 1973, 25 N 8, S. 475 - 479.
108. Geraghty John. Ionization on independent auto expert reports, the findings of his tests of a new accessory. - Motor Trend, 1962, 14, No 9, p. 46 - 47.
109. Gumbleton J.J. Engine Voltage Requirements Using Spark Plugs Pre-Ionisation Radioactive Gold. - SAE Annual Meeting Preprints, 1959, No 81, p. 1 - 21.
110. Kazuma M., Tanaka T. Measurement of local mixture strength at spark gap of S.J. Engines. - SAE Paper, 1979, No 790483, p. 21 - 47.
111. Lewis B., Kreutz C.D. The effect of an electric field on the flame temperature of combustible gas mixtures. - Journal American Chemical Society, 1933, vol. 55, No 3, p.934-938.
112. Löhner Kurt, Elsayed-Ahmed M. Verdunstung, Tropfen - und Filmbildung in Vergaseranlagen.- MTZ, 1974, Vol. 35, No 6, S. 186 - 192.
113. Mayo P.J., Watermeier L.A., Weinberg F.J. Electrical con-

trol of solid propellant burning. - Proceedings of the Royal Society. Ser. A, Mathematical and Physical Sciences, 1965, vol. 284, No 1398, p. 488 - 498.

114. Nalbandjan A. The Combustion of $H_2 + O_2$ at Room Temperature in the Presence of Oxygen Atoms.- Academy of Sciences of the USSR, 1935, vol. 1, No 3, p. 305 - 311.
115. Патент 814269 (Англия). Liquid fuels. Saranga C. - Patents for inventions. Group III 800 000, 1960.
116. Патент 965451 (Англия). National research development corporation. Bending Wood.- Patents for inventions. Division B4-B5. 960 001 - 1 000 000, 1964.
117. Патент 1332808 (Англия). Treating charges. Saiensu Kogyo. - Abridgments of patent specifications. Division F 1. 1325001 - 1350000, 1972.
118. Патент 1285743. (Англия). Treating hydrocarbon oils with electric and magnetic fields. S.Miyata.- Abridgments of patent specifications. Division C4 - C5. 1275001 - 1300000 , 1971.
119. Патент 763831 (Бельгия). Dispositif electronique pour l'amelioration de la combustion et/ou la reduction de la teneur en composes nocifs des gazs d'echappement des moteurs a combustion interne. Rostislaff Poroff.- Revue gevers des brevets, 1976, No 6.
120. Патент 2926276 (США). Apparatus for the ionization of electrons of flowable materials. Saburo M. Moriya and Yukichi Asakawa.- Official Gazette, 23 February, 1960, No 4.
121. Патент 3893437 (США). Carburetor system. Gordon E.Ries, Harley D.Johnson.- Official Gazette, 8 July, 1975, No 2.

122. Патент 3060339 (США). Means for ionizing fluids. Saburo Mjyata Moriya.- Official Gazette, 23 October, 1964, No 4.
123. Патент 3678908 (США). Method and apparatus for increasing output for car engine and purifying exhaust gas. Ito Akio.- Official Gazette, 25 July, 1972, No 4.
124. Патент 3177633 (США). Oxygen enricher for combustion engines. Lee L. Medonald.- Official Gazette, 13 April, 1965, No 2.
125. Патент 3124525 (США). Ozone generator. - John Remonte. - Official Gazette, 10 March, 1964, No 2.
126. Патент 3961609 (США). Pure oxygen supply to an internal combustion engine. Gerry Martin E. - Official Gazette, 8 June, 1976, No 2.
127. Патент 228397 (Франция). Combustions avec chambre photochimique. Fonteneau Christian. - Bulletin officiel de la propriete industrielle, 30 Avril, 1976, No 18.
128. Патент 1270521 (Франция). Dispositif permettant de modifier les conditions de combustion d'un melange d'hydrocarbures. Blahchon (E., M., J.) et Langlais (L., R., E.), rep. par Armengand Aine.- Bulletin officiel de la propriete industrielle, 1er Septembre, 1961, No 35.
129. Заявка 2284046 (Франция). Dispositif pour ameliorer la combustion d'un carburant dans l'air. Pry Gabriel, De-caudin Pierre. - Bulletin officiel de la propriete industrielle, 7 Mai, 1976, No 19.
130. Заявка 2298702 (Франция). Equipment pour moteur a combustion interne avec generaterur d'ozone. Societe dite: GIERAP, rep. par Beau de Lomenie. - Bulletin officiel de

la propriete industrielle, 24 Septembre, 1976, No 39.

131. Патент 2079091 (Франция). Perfectionnement aux dispositifs pour augmenter le rendement des moteurs a explosion. Euges Francois, Thiry Andre, Poignant Pierre. - Bulletin officiel de la propriete industrielle, 10 Decembre, 1971, No 49.
132. Патент 590405 (Швейцария). Equipment pour moteur a combustion interne. Michel Berger. - Schweizerischer Patent-Muster. - ... disegni e marchi, 15 Juni 1977, No 11.
133. Патент 569867 (Швейцария). Procédé et dispositif pour reduire la teneur des produits pollnants contenus dans les gaz d'echappement d'unmoteur a combustion interne. Michel Berger. - Schweizerischer Patent, - Muster -... disegni e marchi, 14 November, 1975, No 20.
134. Патент 514783 (Швейцария). Verfahren und Einrichtung zur besseren Verbrennung des kraftstoffes in Verbrennungs motoren und gleichzeitiger Unterbindung der Bildung von giftigen Abgasen. Eduard Haas. - Schweizerischer Patent,- Muster-... disegni e marchi, 30 November, 1971, No 21.
135. Peters B.D. Mass burning rates in a spark ignition engine operating in the partial-burn regime. - Fuel Econ. and Emiss. Lean Burn Engines. Conf., London, 1979, p. 63 - 70.
136. Schubert C.C., Pease R.N. The Oxidation of Lower Paraffin Hydrocarbons. J.Room Temperature Reaction of Methane, Propane, n-Butane and Isobutane with Ozonized Oxygen. - Journal of the American Chemical Society, 1956, vol. 78, No 10, p. 2044 - 2048.
137. Semenoff N., Nalbandjan A., Eubowizky. The Mechanism of

the Upper Limit of Inflammation of Electrolytic Gas Mixture. - Transactions of the Faraday Society, 1933, vol. 29, part 5, p. 606 - 611.

138. Senftleben H., Gladisch H. Zur Frage der Einwirkung elektrischer Felder auf den Wärmeübergang in Gasen. - DIE Naturwissenschaften. Begründet von A. Berliner und C. Thesing, 1947, Jg. 34, H. 6, S. 187 - 188.