

Доцент С. В. ГОЛАШЕВСКИЙ, асс. А. М. БУЗЫННИК, асс. Д. М. ЛЕВИН
и асс. Ю. Н. СОКОЛОВ.

К вопросу о применении искусственных жидких топлив в двигателях внутреннего сгорания.

І. ПРИМЕНЕНИЕ МАЗУТА ИЗ СМОЛЫ ПОЛУКОКСОВАНИЯ САПРОПЕЛИТОВ ІІІ-го БАРЗАССКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЯХ ДИЗЕЛЯ.

Предисловие.

Получение жидкого топлива искусственным путем из углей, горючих сланцев и сапропелитов является проблемой общесоюзного значения в связи с растущей из года в год потребностью в жидких продуктах для автотракторного парка, моторного флота и стационарных установок с двигателями внутреннего сгорания.

В частности, отсутствие в настоящее время на территории Сибирского края, обладающего громадной протяженностью, разведанных естественных месторождений нефти, с одной стороны, и наличие колоссальных запасов углей, дающих большие выходы летучих и смол, с другой, выдвинули на разрешение задачу об изыскании наиболее целесообразных способов переработки битуминозных углей и сапропелитов на жидкое топливо (полукоксование, гидрогенизация и др.), увязанных с интересами и общим планом развития народного хозяйства края.

Создающейся на основе тесной увязки теории и практики молодой отрасли промышленности—промышленности искусственного жидкого топлива—принадлежит почетное место в социалистическом строительстве, но вместе с тем на ней же лежит ответственная задача в кратчайший срок освоить ряд сложнейших технологических процессов, обеспечивающих доброкачественность выпускаемого продукта.

Окончательному решению о пригодности для эксплуатации в двигателях внутреннего сгорания того или иного вида искусственного жидкого топлива должны, безусловно, предшествовать серьезное изучение и опытная проверка их непосредственно в работе на двигателях.

С этой точки зрения Лаборатория Двигателей Внутреннего Сгорания Сибирского Механико-Машиностроительного Инсти-

тута в Томске, достаточно оборудованная для постановки научно-исследовательских работ по изучению свойств новых видов горючих непосредственно в двигателях, тесно связана с углеперегонной промышленностью края.

Первыми шагами в этом направлении были опыты, проведенные быв. руководителем лаборатории профессором Квасниковым А. В. в 1930 г.¹⁾, когда в автомобильном и тракторном двигателях были испытаны первые порции искусственного бензина и керосина, полученные полукоксованием Барзасских сапропелитов в лаборатории проф. Геблера в Томске.

После пуска 1-го опытного завода по полукоксованию в г. Кемерово в 1931 году представилась возможность развернуть исследовательские работы в более широком масштабе.

В начале 1932 г. в лабораторию Д. В. С. СММИ поступил образец тяжелого жидкого топлива, являющегося остатком при перегонке смолы полукоксования сапропелитов III-го Барзасского месторождения, с целью выявления возможности применения его в двигателях Дизеля.

Исследование этого топлива проведено коллективом научных работников кафедры двигателей внутреннего сгорания под руководством доцента Голашевского С. В. с широким привлечением студентов специальности Д. В. С., при деятельном участии механика лаборатории тов. Ткаченко А. Я., выполнившего ряд точных измерительных приборов и приспособлений, необходимых для проведения испытаний, часть которых является его изобретениями.

Работа проводилась одновременно тремя бригадами:

1. Бригада по лабораторному исследованию топлива: ассистент Левин Д. М. и студенты: Панов В. Г. и Гаврилюк Я.

2. Бригада по испытанию компрессорного двигателя Ю. М. Т.: ассистент Бузынник А. М. и студенты Дзенскевич А. В., Мещеряков Т. и Соломянный А. З.

3. Бригада по испытанию бескомпрессорного двигателя Дейтц: ассистент Соколов Ю. Н. и студенты: Мухин В. И., Нусберг А. Я., Сулимов А. Н. и Фролов В. Ф.

Такая организация проведения работ дала возможность на основе социализации и ударничества провести исследования в кратчайший срок.

О полученных результатах было доложено на 1-м расширенном пленуме Краевого Комитета по Химизации Народного Хозяйства Зап. Сибири (15—20 марта 1932 г.), на 1-м Краевом Энергетическом Съезде Западной Сибири²⁾ (18—22 июня 1932 г.),

¹⁾ Квасников А. В. „Предварительные испытания в моторах пробных топлив из дегтя Барзасских сапропелитов“. Журн. „За уголь Востока“. Новосибирск, 1931 г., № 13, стр. 32.

²⁾ Голашевский С. В. „Применение жидких продуктов полукоксования Барзасских сапропелитов в дв-лях внутр. сгорания“. Труды Первого Краевого Энергетического Съезда Западной Сибири. Новосибирск, 1932 г., стр. 359—372.

а полный технический отчет был передан тресту „Углеперегонка“, на чьи средства проведены настоящие исследования.

В деле организации и подготовки к опытам принимало участие быв. Сибирское Отделение Всесоюзного Теплотехнического Ин-та (СОВТИ), обеспечившее финансовой помощью проведение подготовительных работ.

Публикуемая работа состоит из IV частей:

часть I-я—лабораторные исследования по определению физико-химических свойств сапропелитового мазута;

часть II-я—сравнительные испытания компрессорного дв-ля на нефтяном моторном топливе и сапропелитовом мазуте;

часть III-я—сравнительные испытания бескомпрессорного предкамерного дв-ля Дейтц типа „РМ“ на нефтяном моторном топливе и сапропелитовом мазуте;

часть IV-я—общие выводы и заключения.

Степень участия каждого научного работника в проведении и оформлении настоящей работы следующая:

1. Ассистент Левин Д. М.—руководство и наблюдение за проведением лабораторного исследования топлива.

2. Ассистент Бузынник А. М.—руководство бригадой по испытанию компрессорного двигателя Ю. М. Т. и обработка опытного материала.

3. Ассистент Соколов Ю. Н.—руководство бригадой по испытанию бескомпрессорного дв-ля Дейтц, обработка опытного материала и литературное оформление III-й части.

4. Доцент Голашевский С. В.—общее руководство методикой испытаний, литературное оформление I-й, II-й и IV-й частей и общая редакция всей работы.

Часть I.

ХАРАКТЕРИСТИКА МАЗУТА ИЗ САПРОПЕЛИТОВОЙ СМОЛЫ.

Тяжелое топливо, полученное Кемеровским Опытным Заводом по полукоксованию и присланное для исследования в Лабораторию двигателей Внутреннего Сгорания СММИ, представляет собою остаток после отгонки из сапропелитовой смолы III-го Барзасского месторождения бензиновых и керосиновых фракций. По принятой в нефтеперегонной промышленности терминологии ему дано название „сапропелитовый мазут“.

По внешнему виду сапропелитовый мазут представляет довольно вязкую жидкость, темно коричневого цвета со специфическим запахом, обнаруживающим в нем присутствие ароматиков и фенолов.

По своему элементарному составу, приводимому в табл. I, данное топливо отличается от нефтяного меньшим процентным содержанием углерода и водорода и большим количеством кисло-

рода, входящего в состав его кислородных соединений (фенол и его гомологи), что существенным образом отличает сапропелитовый мазут от аналогичных видов жидких горючих, получаемых из натуральной нефти, и приближает его к продуктам из каменноугольной смолы.

Лабораторное исследование сапропелитового мазута дало ряд констант, характеризующих его, как топливо для двигателей Дизеля. Результаты сведены в таблицу II. В последней даны аналогичные исследования применявшегося для сравнительных испытаний нефтяного моторного топлива и цифры, установленные в качестве норм на нефтетопливо, принятые IV Всесоюзным Теплотехническим Съездом.

Таблица I.

Элементарный состав сапропелитового мазута и нефтяного моторного топлива.

№№	Наименование элементов	Обозначение	Сапропелитовый мазут ¹⁾	Нефт. моторное топливо (средн. состав)
1	2	3	4	5
1	Углерод	C	84,30 %	86,0 %
2	Водород	H	9,73 %	12,7 %
3	Кислород	O	{ 5,48 %	{ 1,3 %
4	Азот	N		
5	Сера	S		

1. Удельный вес, применявшегося при испытаниях нефтяного моторного топлива и сапропелитового мазута выходит за пределы норм. Эта константа не является критерием для оценки пригодности горючего в качестве моторного топлива. Тем не менее, она дает возможность судить о качественном его составе, о преобладании в нем тех или иных углеводородных соединений и о количественном содержании в нем основных элементов—углерода и водорода.

Многократное сопоставление удельного веса жидких топлив с их теплотворной способностью позволяет некоторым авторам ²⁾ давать формулу (приближенную) для определения теплотворной способности жидкого горючего в зависимости от его удельного веса.

В тех же случаях, когда при испытаниях двигателей расход топлива определяется объемным способом, знание уд. веса его является совершенно необходимым.

В виду отсутствия литературных данных о температурных поправках для приведения значения уд. веса к нормальным техническим условиям, нами были проведены специальные опыты

¹⁾ Анализ производился в Лаборатории Анал. Химии СХТИ.

²⁾ Канцер К. М.—Судовые дв-ли внутр. сгорания 1931 г. Стр. 23.

для выявления зависимости удельного веса исследуемого сапропелитового мазута от температуры.

Таблица II.

Результаты исследования применявшихся при опытах топлив.

№№ по порядку	Наименование определения	Технические условия на нефтетопливо для тяжелых дв. вн. сг. ¹⁾	Нефтяное моторное топливо, применявшееся при опытах.	Сапропелитовый мазут из смолы III Барзасского месторождения.
1	2	3	4	5
1	Удельный вес при 15°C	0,855 - 0,900	0,911	0,982
2	Вязкость по Энглеру при 50°C	Не выше 5,0	2,22	5,03
3	Температура застывания	Не выше +5,0	Ниже -19,0	+13,0
4	Т-ра вспышки по Маркуссону в °C	45—120	78,7	134,7
5	Температура воспламенения на приборе Маркуссона °C	—	118,7	175,3
6	Начало кипения °C	—	—	+248 ²⁾
7	на приборе Люйн-Борда	—	118,0°	+261°
8	Остаток после 350°C	Не выше 45%	—	42,9% ²⁾
9	на приборе Люйн-Борда	—	62%	74,0%
10	Коксуемость по Конрадсону	Не более 3%	1,97%	7,5%
11	Содержание воды	Не более 1%	0,6%	Следы
12	механических примесей	Не более 0,3%	0,19%	0,03%
13	Содержание золы	„ „ 0,10%	0,08%	0,01%
14	„ серы	„ „ 0,50%	—	0,48% ³⁾
15	Кислотность минеральная	0,0	—	0,0 ²⁾
16	Теплотворная способность по бомбе высшая (кал./кгр.)	—	10640	10060
17	„ низшая „	—	9960	9520

Зависимость эта представлена графически на фиг. 1, а цифровые значения сведены в таблицу III.

Как видно на фиг. 1, изменение удельного веса сапропелитового мазута при повышении температуры в пределах от +15 до

¹⁾ Разработаны и приняты IV ВТС.

²⁾ По данным Лаборатории Кемеровского Опытного Завода.

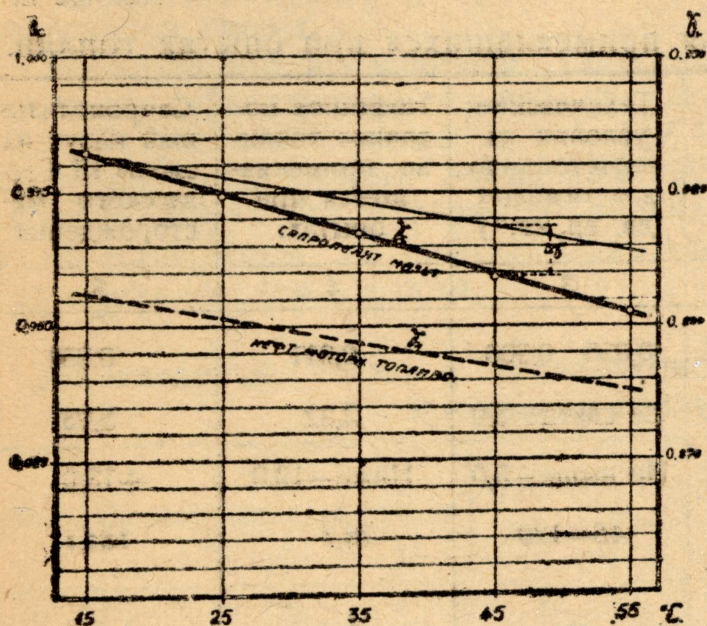
³⁾ По данным Лаборатории Аналитич. Химии СХТИ.

+55°С происходит по прямой с несколько большим наклоном к оси абсцисс, чем для нефтепродуктов. На приводимой диаграмме пунктиром показана кривая изменения удельного веса для нефтяного моторного топлива, построенная по уравнению:

$$\gamma_t = \gamma_{15} + \alpha (t - t_{15}) \quad (1)$$

где: α — величина поправки на каждый градус изменения температуры взята по Менделееву, равной для применявшегося нефтяного моторного топлива—0,00062¹⁾.

Непосредственное определение удельного веса ареометрическим способом для сапропелитового мазута при



Фиг. 1. Зависимость уд. веса от температуры.

различных температурах показывает, что поправки, существующие для нефтетоплив, к данному сорту жидких продуктов полукоксования—неприменимы.

Таблица III.

Зависимость уд. веса сапропелитового мазута от т-ры.

№№ опы-тов.	Температура. °C	Удельный вес гр/см³.
1	2	3
1	15	0,982
2	25	0,974
3	35	0,967
4	45	0,958
5	55	0,952

Получающаяся при этом разница, изображенная на фиг. 1, отрезком $\Delta\gamma$ довольно значительна и сказывается при 55°С уже во втором знаке, составляя разницу в 1,2%.

¹⁾ Бауман А. Г. — Смазочные масла СССР и техника их применения. 1925 г. Стр. 55—56.

Для исследуемого сорта сапропелитового мазута зависимость удельного веса от температуры может быть представлена уравнением:

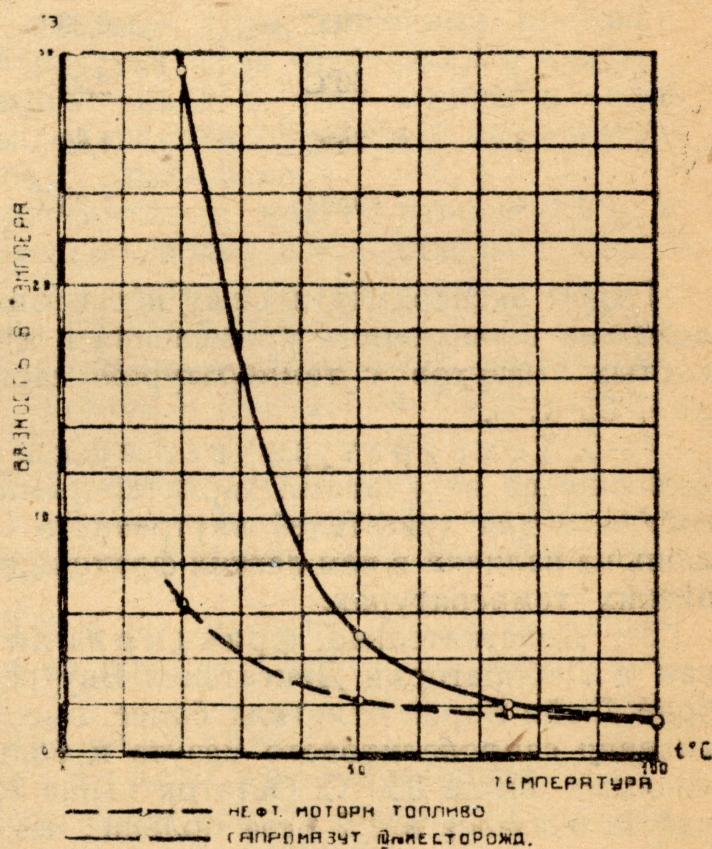
$$\gamma_t = \gamma_{15} + \beta (t - t_{15}) \dots \dots \dots (2)$$

где: β — температурная поправка должна быть взята равной 0,00075 на каждый градус разницы температур.

2. Вязкость, являющаяся мерой текучести и подвижности топлива, для сапропелитового мазута оказалась значительно большей, чем для нефтяного моторного топлива.

При 50°С — температуре, условно принимаемой нормальной для сравнения между собой тяжелых сортов топлив, вязкость сапропелитового мазута в два с четвертью раза больше, чем применявшегося нефтяного моторного топлива, совпадая практически с верхним пределом, допускаемым нормами.

Характеристика зависимости вязкости обоих топлив от температуры дана на фиг. 2. Цифровые значения вязкости их, определенные аппаратом Энглера, представлены в таблице IV.



Фиг. 2. Зависимость вязкости от температуры.

В непосредственной связи с вязкостью находится склонность топлива к загустеванию. Последняя характеризуется температурой застывания.

3. Температура застывания, определенная общепринятым способом, оказалась для сапропелитового мазута значительно выше нормы. Т. о., при сравнительно высокой температуре +13°С наблюдается выпадение в твердом виде его составных частей.

Это свойство является отрицательным показателем, говорящим за то, что при пользовании сапропелитовым мазутом при низких температурах (зимнее время, слабоотапливаемое помещение) для придания ему текучести необходим добавочный его подогрев.

Однако, в смысле возможности применения его в качестве моторного топлива, полученное значение для температуры застывания не должно вызывать опасений.

Таблица IV.

Вязкость нефтетоплива и сапропелитового мазута.

№№ опы- тов.	Температура.	Вязкость в градусах Энглера.	
		Нефтяного мотор- ного топлива.	Сапропелитового мазута.
1	2	3	4
1	20°C	6,36	29,10
2	50°C	2,22	5,03
3	75°C	1,62	2,09
4	100°C	1,26	1,45

Рядом экспериментальных исследований последнего времени, доказана возможность применения в двигателях Дизеля парафинистых мазутов с температурой застывания доходящей даже до $+35^{\circ}\text{C}$ ¹⁾.

4—5. Температура вспышки и воспламенения не являющиеся величинами характерными для оценки пригодности горючего для двигателей внутреннего сгорания, дают указание лишь на наличие в нем легких фракций, кипящих при сравнительно низких температурах.

6. Действительно, фракционная разгонка, произведенная в Лаборатории Двигателей Внутреннего Сгорания на приборе Люйн-Борда отметила более высокую температуру начала кипения сапропелитового мазута и большее количество фракций, кипящих выше 350°C . Остаток выше 350°C для сапропелитового мазута оказался в 1,2 раза больше, чем для нефтяного моторного топлива.

Остаток свыше 350°C , определенный Лабораторией Кемеровского завода составляет 42,9% от исходного продукта. Та же величина, полученная нами на приборе Люйн Борда равняется 72,0%.

Столь большую разницу, очевидно, приходится отнести за счет различия в методах определения и принятых условностей в способах применяемых в обоих случаях.

На приборе Люйн-Борда термометр, указывающий температуру, при которой происходит отгонка, погружен в нагреваемую жидкость, в то время, как в приборах Энглера—Убеллоде шарик термометра находится в парах кипящей жидкости.

Температуры начала кипения нефтяного моторного топлива $+118^{\circ}\text{C}$ и сапропелитового мазута $+261^{\circ}\text{C}$, определенные одним и тем же способом (Люйн-Борда), указывают на большую одно-

¹⁾ Новости советской и иностранной транспортной техники. Вып. I. 1931.
„Применение парафинистых мазутов в дв. вн. сгор.“

родность последнего. Это обстоятельство должно оказать влияние на скорость сгорания сапропелитового мазута в двигателях в благоприятном смысле.

10. Заслуживает внимания цифра, характеризующая способность топлива к нагарообразованию, т. н. коксуемость, определявшаяся на приборе Конрадсона.

Условия получения кокса этим способом отличаются от тех, в какие поставлено сгорающее в цилиндре топливо. Тем не менее в некоторых местах внутренней полости цилиндра мы можем обнаружить так называемые мертвые углы, лишенные постоянного доступа свежих порций воздуха из-за отсутствия в них завихрений. Условия образования кокса в этих местах камеры сгорания двигателя мало чем отличаются от условий имеющих налицо в лабораторном приборе Конрадсона.

Содержание кокса в сапропелитовом мазуте равное 7,5% в то время, как нормы не допускают более 3%, заставляет обратить особенное внимание на это обстоятельство и проследить в работе на машинах, насколько большая склонность к коксообразованию вызывает неполноту сгорания и загрязнение внутренней полости, распределительных органов и выхлопной системы двигателя.

11, 12, 13. Загрязненность сапропелитового мазута механическими примесями, золой и водой значительно меньше, чем нефтяного моторного топлива, что видно из таблицы II.

14. Содержание серы—0,48% не выходит из норм, даваемых техническими условиями на поставку нефтяного моторного топлива.

15. Кислотность минеральная—0,0.

16—17. Теплотворная способность (высшая), определенная непосредственным сжиганием в бомбе средней пробы дала значение (среднее из трех определений) равное

$$Q_s^p = 10060 \text{ кал/кг}.$$

Применяемая, обычно, при составлении тепловых балансов низшая теплотворная способность найдена нами подсчетом после того, как был произведен элементарный анализ сапропелитового мазута, по формуле ¹⁾:

$$Q_H^p = Q_s^p - \left(\frac{W}{100} + \frac{9H}{100} \right) \cdot 600 \text{ кал/кг} \dots \dots \dots (3)$$

де: W —содержание воды в топливе в %%;
 H — „ „ в топливе водорода в %%.

¹⁾ Засе Ф. Бескомпрессорные дв-ли Дизеля. 1931. Стр. 15.

Низшая теплотворная способность получилась равной:

$$Q_H^P = 9520 \text{ кал/кг}.$$

Для нефтяного моторного топлива найдены были тем же методом следующие значения:

$$Q_s^P = 10640 \text{ кал/кг};$$

$$Q_H^P = 9960 \text{ кал/кг}.$$

Небезынтересным оказывается сравнение величин теплотворной способности, определенной в бомбе, и вычисленных по наиболее распространенным формулам.

Нижеприводимая таблица V дает представление об этом.

Из приводимых формул формула О-ва Германских Инженеров дает менее всего отличающееся значение Q_H^P . Разница составляет $9520 - 9465 = 55$ кал/кг. или в % $\frac{55 \cdot 100}{9520} = 0,58\%$, что мо-

жет быть объяснено, с одной стороны, допустимой погрешностью определений, а с другой, наличием эндотермических реакций в процессе образования или получения топлива, давших, в результате, повышенный калориметрический эффект при непосредственном его сжигании.

Таблица V.

Значения теплотворной способности сапропелитового мазута, вычисленные по формулам.

№ №	Название формулы.	Вид формулы.	Низшая теплотворная способность.	Разница в % от определенной в бомбе.
1	2	3	4	5
1	Дюлонга	$81,4C + 342\left(H - \frac{0}{8}\right) + 25S - 6(W + 9H)$	9431	- 0,935
2	О-ва Герм. Инженеров	$81C + 290\left(H - \frac{0}{8}\right) + 25S$	9465	- 0,578
3	Менделеева	$81C + 300H - 26(0 - S) - 6,9H$	9352	- 1,76
4	По у . весу ¹⁾	$6600 + \frac{3000}{\gamma}$	9655	+ 1,42

Низшая теплотворная способность по бомбе

$$Q_H^P = 9520 \text{ кал/кг}.$$

¹⁾ Канцер К. М.—Судовые двигатели внутр. сгор. 1931. Стр. 23.

18. Для полной характеристики рассматриваемого топлива желательно знать также теоретическое количество воздуха, необходимое для полного его сгорания. Имея элементарный состав сапропелитового мазута, легко можно по формулам определить L_0 .

$$L_0 = \frac{8/3 \cdot C + 8 \cdot H + S - O}{23 \cdot \gamma_{\text{возд.}}} \dots \dots \dots (4)$$

Подставляя в формулу (4) значения C, H, O, S для сапропелитового мазута и γ для воздуха, найдем:

$$L_0 = \frac{8/3 \cdot 84,3 + 8 \cdot 9,7 + 0,48 - 5,48}{23 \cdot 1,293} = \underline{9,92 \text{ м}^3/\text{кг}} \text{ при } 0^\circ \text{ и}$$

760 мм рт. стб.

или $10,14 \text{ м}^3/\text{кг}$ —воздуха при нормальных технических условиях (15°C и 737,4 мм рт. стб.).

Аналогичные подсчеты для нефтяного моторного топлива среднего состава, приведенного в табл. I дают:

$$L_0^H = 11,12 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ при } 0^\circ\text{C и } 760 \text{ мм рт. стб.}$$

$$\text{и } L_0^H = 12,05 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ „ } 15^\circ\text{C и } 737,4 \text{ мм „ „}$$

Сравнение значений теоретических количеств воздуха для обоих видов топлив при одинаковых температурных и барометрических условиях указывает на то, что 1 кг. сапроп. мазута требует воздуха на $12,05 - 10,14 = 1,91 \text{ м}^3$ или ва% %—и

$$\frac{1,91}{12,05} \cdot 100 = 15,9 \sim 16\%$$

меньше, чем нефтяное моторное топливо.

Это обстоятельство для дв-ля внутр. сгорания имеет существенное значение и не может не повлиять на его экономичность и максимальную мощность, развиваемую двигателем, как в цилиндре (индикаторную), так и на валу (эффективную).

Т. о., лабораторное исследование сапропелитового мазута III-го Барзасского месторождения дает возможность сделать вывод, что, хотя по сравнению с употребляемым нормальным нефтяным моторным топливом в некоторых случаях он значительно отклоняется от установленных норм, тем не менее, как топливо для тяжелых дв-лей внутр. сгорания может быть применен.

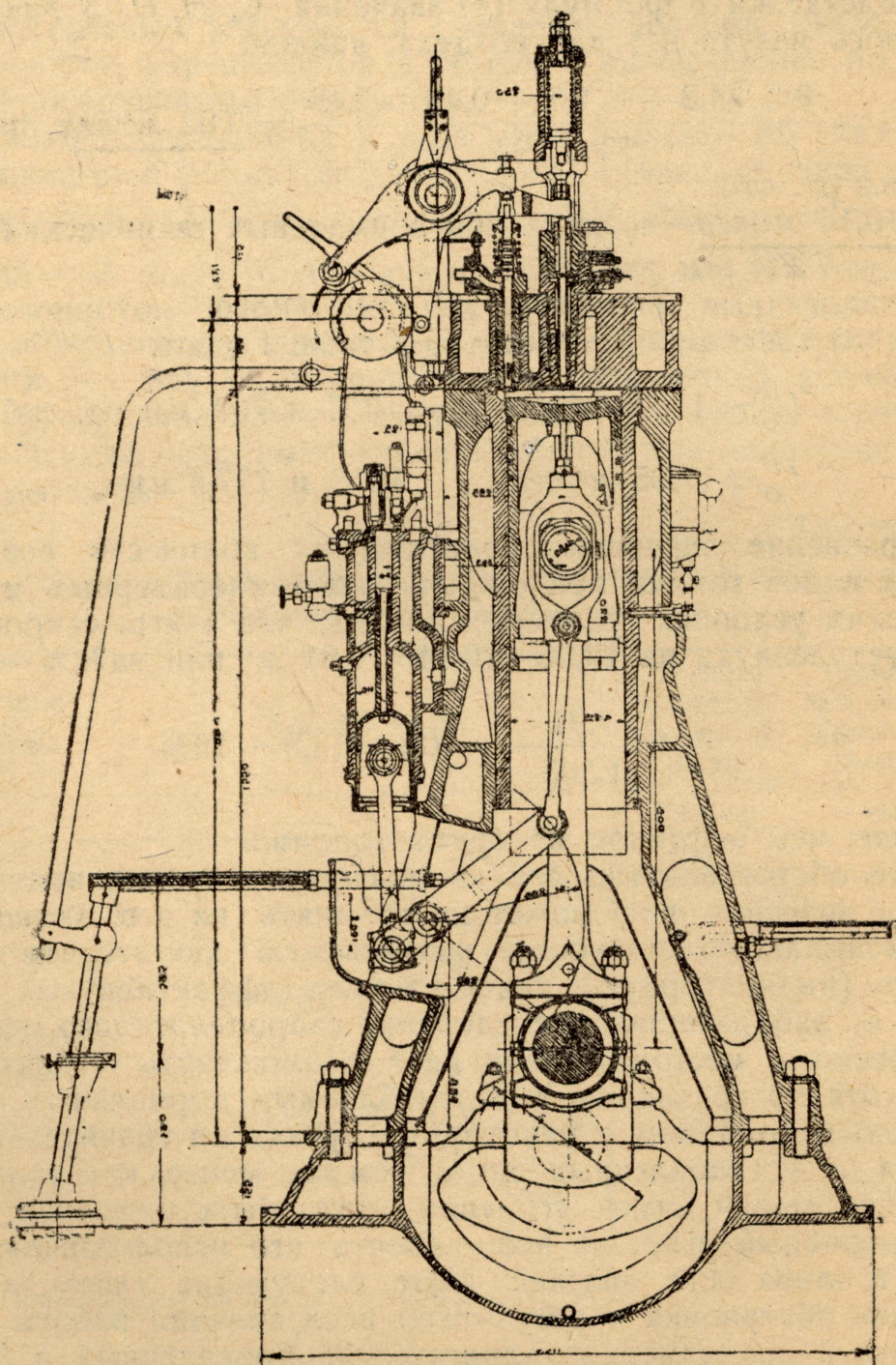
Подробный ответ на возможность его использования в качестве топлива для дизелей дают следующие главы, в которых описана обстановка и результаты исследования работы компрессорного и предкамерного двигателей, проведенных в Лаборатории Двигателей Внутреннего Сгорания СММИ.

Часть II.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ САПРОПЕЛИТОВОГО МАЗУТА В КОМПРЕССОРНОМ ДВ-ЛЕ ДИЗЕЛЯ.

1. Краткое описание двигателя и его основные данные.

Исследование возможности применения сапропелитового мазута в качестве топлива для компрессорных дв-лей Дизеля производилось на одноцилиндровой 4-хтактной, вертикальной машине



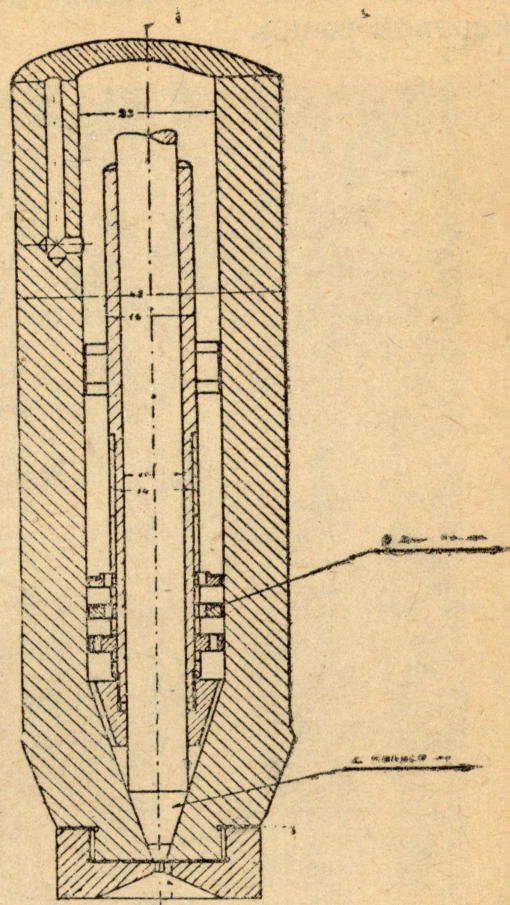
Фиг. 3. Продольный разрез компрессорного дв-ля Ю. М. Т.

мощностью 15 л. с. при 235 оборотах в минуту, выполненной дизельным цехом Николаевских Государственных Судостроительных заводов им. А. Марти, Южмаштреста (ЮМТ), выпуска 1926 г.

Как видно из чертежа, представленного на фиг. 3, подвергавшийся испытаниям дв-ль является типичным представителем стационарных машин с А-образной станиной.

Рабочий процесс осуществляется в четыре такта. Топливо подается в цилиндр форсункой, нижняя часть которой дана в разрезе на фиг. 4. Необходимый для распыливания горючего сжатый воздух готовится двухступенчатым компрессором, смонтированным в средней части станины дв-ля и имеющим привод через коромысло от главного шатуна.

Основные данные, характеризующие описываемый двигатель, следующие:



Фиг. 4. Нижняя часть форсунки дв-ля ЮМТ.

1. Диаметр цилиндра $D = 215 \text{ мм.}$
2. Ход поршня $S = 340 \text{ мм.}$
3. Рабочий объем цилиндра $V_h = 12,337 \text{ л.}$
4. Объем камеры сгорания¹⁾ $V_c = 0,975 \text{ л.}$
5. Степень сжатия (в холодном состоянии) $\epsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c} = \frac{12,337 + 0,975}{0,975} = 13,65.$

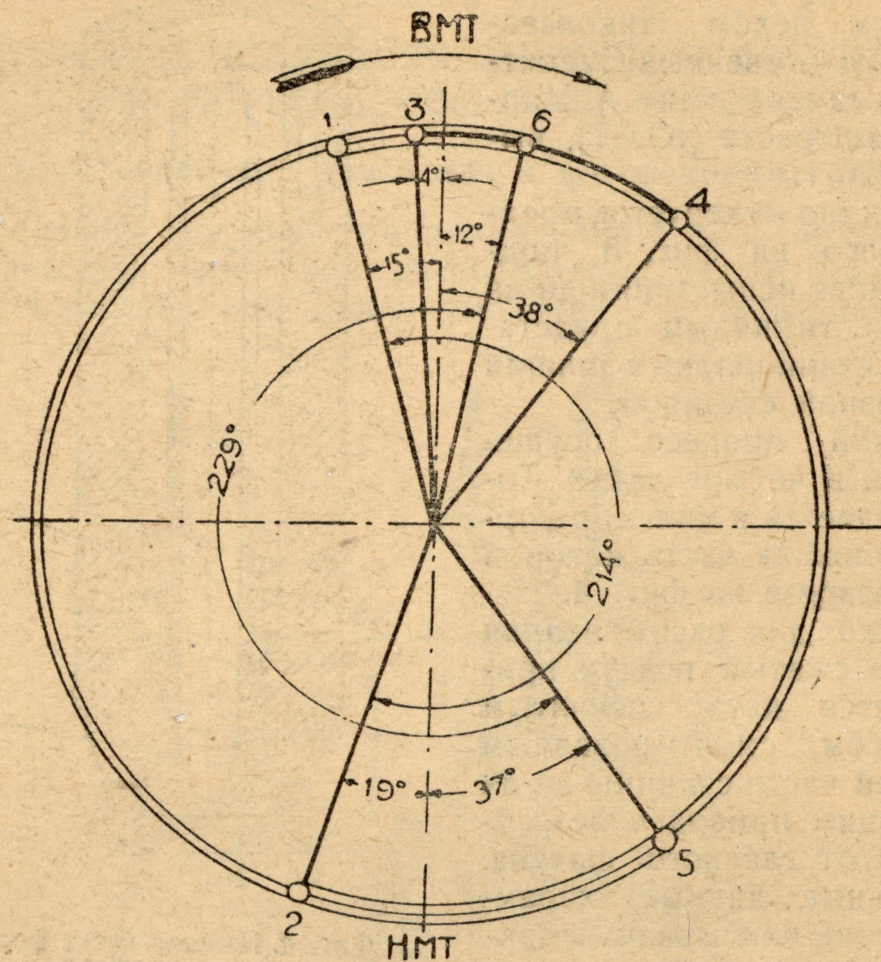
На диаграмме фиг. 5 нанесены основные моменты распределения дв-ля, отнесенные к углам поворота главного вала, снятые непосредственно с дв-ля в холодном состоянии.

Точки 1 и 2 обозначают начало и конец открытия всасывающего клапана, 5 и 6 начало и конец открытия выхлопного, а 3 и 4 начало и конец под'ема иглы форсунки.

Численные значения основных моментов распределения представлены в таблице VI, где знак „минус“ перед цифрой обо-

¹⁾ Определялся заливкой водой.

значает число градусов до, а „плюс“ после соответственной мертвой точки.



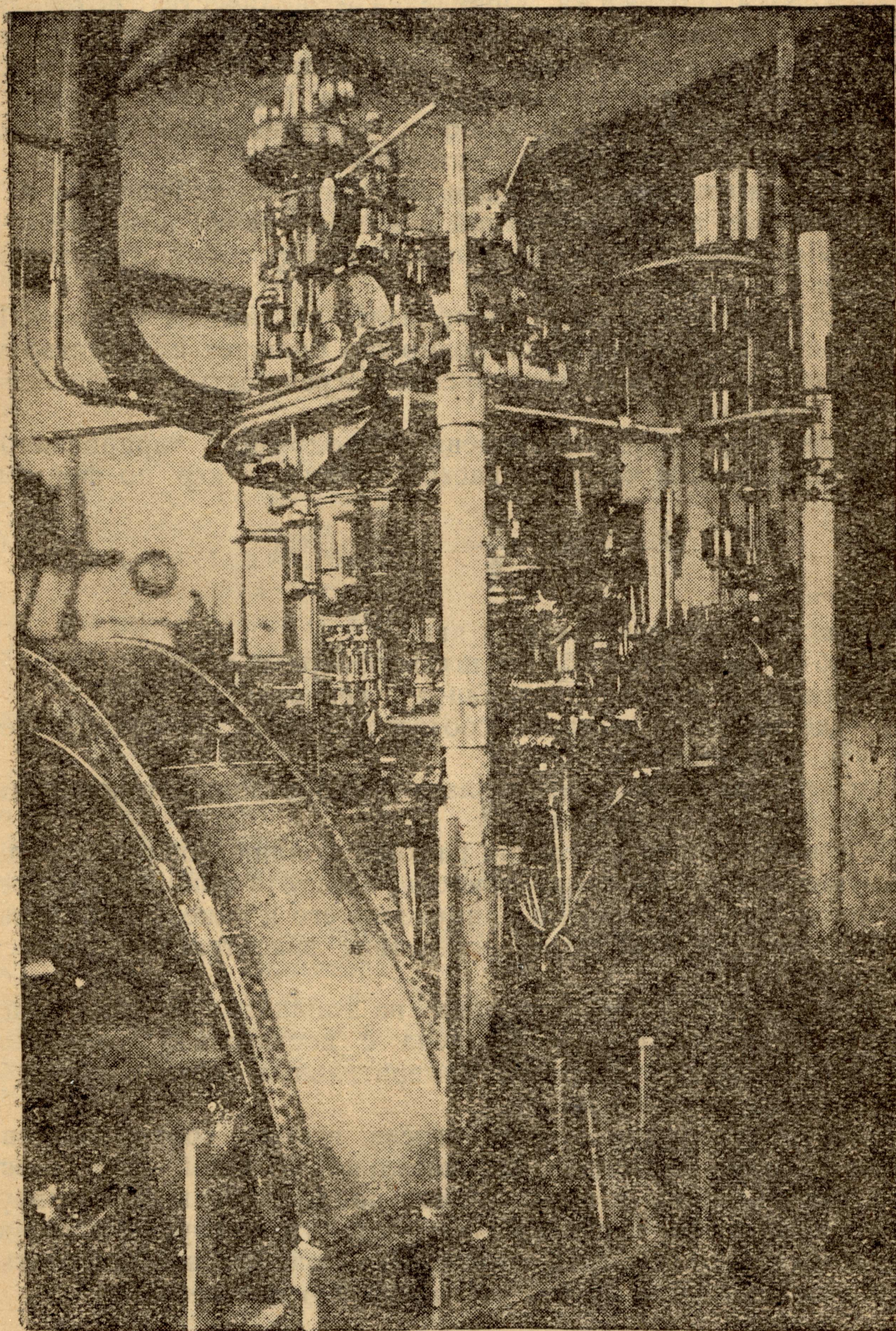
Фиг. 5. Диаграмма моментов распределения дв-ля ЮМТ.

Моменты распределения дв-ля ЮМТ.

Таблица VI.

№№	Наименование органов распределения.	Моменты в градусах поворота кривошипа.		Продолжительность периода от-крытия в градусах.
		Откр.	Закр.	
1	2	3	4	5
1	Всасывающий клапан	— 15°	+ 19°	214°
2	Выхлопной клапан	— 37°	+ 12°	229°
3	Топливный клапан (игла форсунки) . . .	— 4°	+ 38°	42°
4	Пусковой клапан	— 11°	+ 65°	76°

Фиг. 6 представляет общий вид дв-ля, оборудованного всеми необходимыми для испытания приборами.



Фиг. 6. Общий вид дв-ля ЮМТ.

II. Методы замеров и наблюдений.

1. Расход топлива. Определение количества потребляемого дв-лем топлива производилось об'емным способом. В непосредственной близости к топливному насосу на трубопроводе, подводящем горючее из напорного бака (см. схему на фиг. 7), установлен измерительный прибор, напоминающий по своему устройству т. н. штихпробер Зеппелера ¹⁾

Прибор изготовлен механиком Лаборатории т. Ткаченко А. Я. Измерительные, а также верхний и нижний бачки выполнены из латуни. Латунные сосуды соединяются между собой стеклянными трубками диаметром 10 мм.

Перед опытами прибор тарировался на каждом топливе. Во время опытов производилось возможно большее количество замеров с целью получить наименьшую погрешность в определении расхода топлива.

По среднему значению времени расходования тарированного сосуда определялся часовой расход топлива в кгр. по формуле:

$$G = 3600 \cdot \frac{V}{t} \cdot \gamma_t \text{ кгр. /час} \dots \dots \dots (5)$$

где:

G —расход топлива в кгр. в час;

V —об'ем расходного бачка штихпробера в лтр.;

t —время расходования топлива в секундах;

γ_t —удельный вес топлива, соответствующий его средней температуре за время t ²⁾.

Температура топлива измерялась термометром, установленным непосредственно за прибором.

Об'емный способ измерения расхода топлива, обладая рядом преимуществ (компактность прибора, простота манипуляций, герметичность прибора и др.) в применении его к тяжелым топливам, теряет свои ценные качества вследствие значительной вязкости последних.

Работа с указанным прибором на топливах, не требующих подогрева, может быть проведена с достаточной точностью. Обязательна лишь тарировка измерительных сосудов его рабочим топливом, а не водой.

В случае необходимости подогрева густых сортов топлив в напорном баке, благодаря сравнительно большой поверхности охлаждения прибора и значительной продолжительности измерения, топливо в нем настолько остывает, что требуется либо дополнительный его подогрев в измерительном приборе, либо отказ от пользования им и замена об'емного способа весовым.

¹⁾ Dechamps H. und Kutzbach K. Prüfung, Wertung und Weiterentwicklung von Flugmotoren. Berlin, 1921, s. 29.

²⁾ Уд. вес определялся по кривым $\gamma = f(t)$, представленным на фиг. 1. Стр. 38.

Схема топливопровода с расположением установленных на нем приборов представлена на фиг. 7. Выполнение ее предусматривает возможность перевода дв-ля на тяжелые сорта моторного топлива.

В случае надобности подогрев топлива может быть осуществлен переключением дв-ля на питание из второго напорного бака, снабженного змеевиком, присоединенным к трубопроводу парового отопления.

2. Мощность на валу двигателя (эффективная) определялась тормозным приспособлением, установленным на маховике. Тонкая латунная лента обхватывающая обод маховика (см. фиг. 8), нагружалась на одном конце грузами G . Натяжение сбегавшего конца ее, определяемое динамометром, регулировалось во время работы дв-ля рукояткой „М“ так, чтобы указатель на траверзе „Т“ находился в одинаковом положении при различных нагрузках.

Вес всего тормозного устройства „g“, приведенный к точке приложения груза „G“, определен был непосредственным взвешиванием на специально приготовленном шаблоне.

Эффективная мощность подсчитывалась по общеизвестной формуле:

$$Ne = \frac{P \cdot R \cdot n}{716,2} \text{ л. с. (6)}$$

где: $P = (G + g - s)$ — окружное усилие на ободу маховика в кгр.;

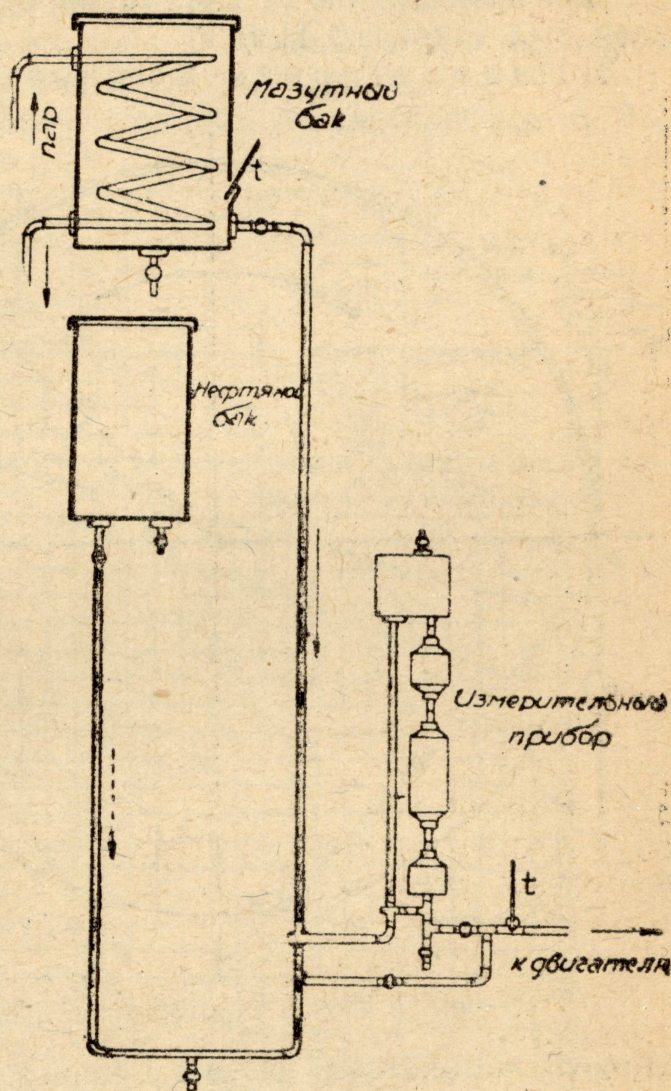
R — радиус маховика в м.;

n — число оборотов в минуту;

g — приведенный вес тормоза в кгр.;

s — показание динамометра в кгр.

Для контроля числа оборотов дв-ля пользовались тахометром стационарного типа. Точное значение числа оборотов определя-

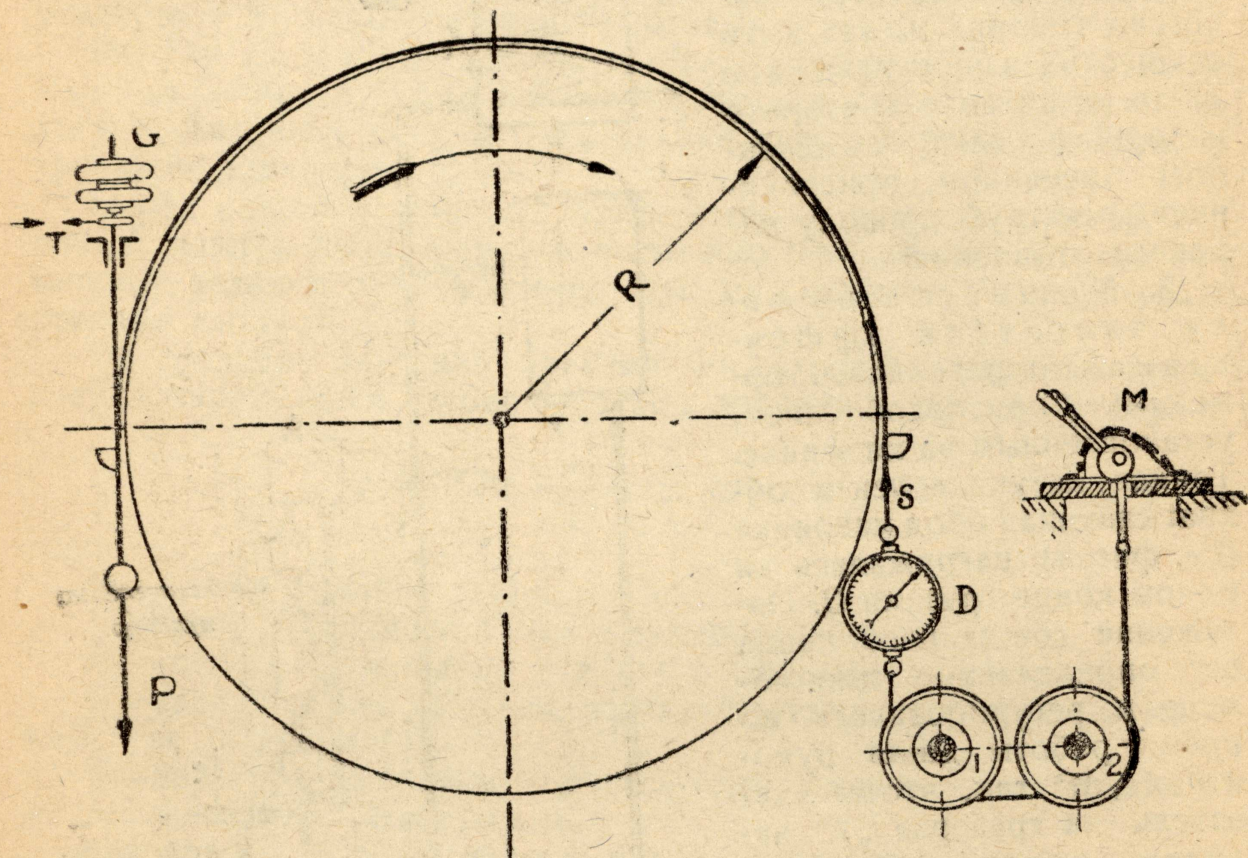


Фиг. 7. Схема топливных трубопроводов дв-ля ЮМТ.

лось помощью тахоскопа (ручной суммирующий счетчик оборотов с секундомером).

Для наблюдений за равномерностью хода двигателя установлен был тахограф Horn'a.

3. Индикаторная мощность дв-ля определялась по-



Фиг. 8. Схема тормозного устройства для дв-ля ЮМТ.

мощью индикатора фирмы Lehman & Michels (Grösse 2) с диаметром поршня 14,35 мм.

Исправность механизма индикатора, величина собственного трения и истинный масштаб пружин, применявшихся во время испытаний, определялись перед опытами.

Индицирование компрессора не производилось. Диаграммы главного цилиндра снимались, как нормальные, по ходу поршня, так и смещенные.

Привод к индикатору для получения обыкновенных диаграмм был оставлен заводский (рычажный). Смещенные диаграммы получались с помощью торцового ходоуменьшителя, соответствующим образом смещенного по ходу поршня на 90°.

Среднее индикаторное давление определялось планиметрами Амслера.

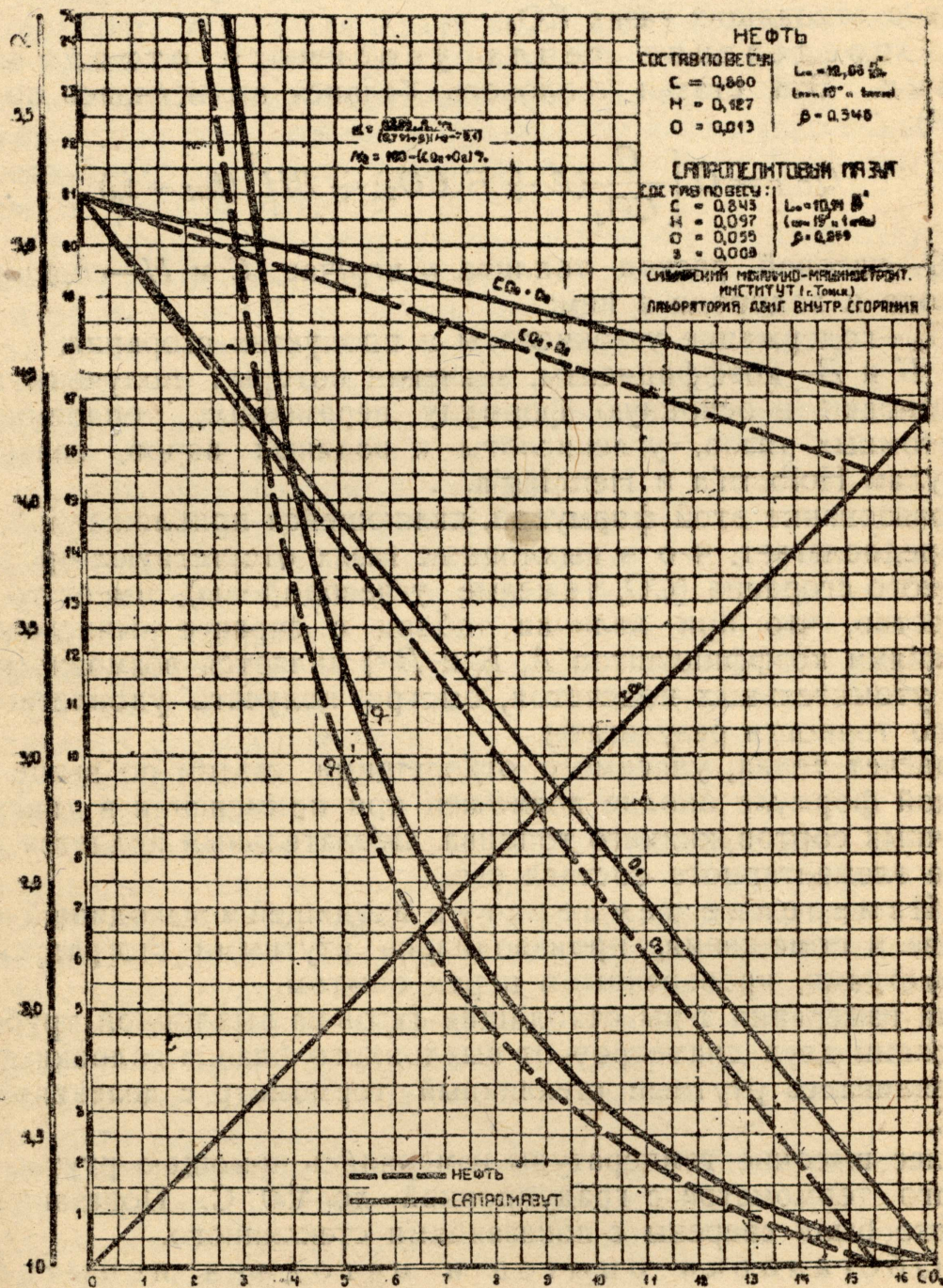
Для подсчета индикаторной мощности служила формула:

$$N_u = \frac{P_u \cdot \pi \cdot D^2 \cdot S \cdot n}{4 \cdot 60 \cdot 75 \cdot 2} \text{ л. с. } \dots \dots \dots (7)$$

4. Расход воды, охлаждающей машину, замерялся взвешиванием. Вода из головки и рубашки собиралась отдельно в железные баки, установленные на весах.

5. Анализ отходящих газов производился помощью прибора Орса. Определению подлежали CO_2 и O_2 .

Газы для анализа забирались в прибор из выхлопного трубо-



Фиг. 9. График для проверки анализа отходящих газов и определения „ α “.

провода через кран, расположенный в непосредственной близости к месту измерения их температуры.

Для проверки правильности результатов анализа пользовались графиком, представленным на фиг. 9, выстроенным для обоих сортов применявшихся топлив.

6. Коэффициент избытка воздуха определялся по анализу отходящих газов с помощью кривых изменения „ α “, нанесенных на графике фиг. 9 для нефтяного моторного топлива и сапропелитового мазута, в зависимости от процентного содержания в отходящих газах CO_2 .

7. Определение тепла уносимого отходящими газами. Эта статья теплового баланса вычислялась по формуле ¹⁾:

$$Q_{0.g} = G \left[\frac{C}{\text{CO}_2} (A + B \cdot \text{CO}_2) + BH \right] (t_{0g} - t_n) \dots (8)$$

где: G —часовой расход топлива в кг/час; C и H —содержание углерода и водорода в нем;

CO_2 —содержание углекислоты в продуктах сгорания;

A , B и BH —коэффициенты, значения которых получены после подстановки в основную формулу переменных теплоемкостей двухатомных газов, углекислоты и водяных паров, взятых по формулам Holborn'a и Henning'a.

Пользование этой формулой, являющейся приближенной, т. к. она предполагает, что в выхлопных газах отсутствуют продукты неполного сгорания (CO , тяжелые углеводороды), имеет то преимущество, что при наличии таблиц с заранее вычисленными значениями коэффициентов A , B и BH ²⁾ является возможным, избегая утомительных подсчетов, быстро получать удовлетворяющие по точности результаты.

Подсчет тепла, уносимого отходящими газами по выше приводимой формуле вполне возможен при применении в двигателе различных сортов жидкого топлива. Обязательным является лишь знание элементарного состава его.

8. Измерение температур входящей и выходящей воды, топлива и помещения, производилось ртутными столбическими термометрами, проверенными перед опытом.

Для измерения т-ры отходящих газов на выхлопной трубе, на расстоянии двух диаметров от выхлопного фланца головки дв-ля, устанавливался ртутный стеклянный термометр с делениями до 360°C .

Более высокие температуры измерялись помощью ртутно-пружинного термометра с градуировкой до 450°C . Показания последнего были сверены с показаниями стеклянного.

9. Обстановка опытов и методика испытаний. Первоначальная программа испытаний для на обоих топливах

¹⁾ Ястржембский А. С. „К вопросу испытания двигат. вн. сг.“. Труды МИИТ'а 1928 г. вып. 7.

Ястржембский. „Двигатели внутр. сгор.“ 1929 г. стр. 157.

²⁾ Ястржембский А. С. „Двиг. Вн. сгор.“ стр. 157.

предусматривала довольно значительной объем исследований не только по сравнению работы дв-ля на обоих топливах в одинаковых условиях, но и по выявлению оптимальных условий для этого нового вида горючего с целью детального изучения его свойств, как моторного топлива.

Однако, наличное количество топлива, доставленное для испытаний и ряд других обстоятельств вынудили ограничиться снятием характеристики дв-ля в зависимости от мощности и обратить особое внимание на факторы, имеющие эксплуатационный характер: пуск в ход, нагарообразование и др., поскольку это было возможным при невозможности проведения длительных испытаний.

Предварительные испытания дв-ля на нефтяном моторном топливе позволили выявить:

- 1) величину давления форсуночного воздуха, соответствующую наибольшей экономичности работы дв-ля при каждой нагрузке;
- 2) наивыгоднейший с точки зрения минимального расхода топлива на полной нагрузке диаметр сопла форсунки;
- 3) наилучшее качество смазки.

Соответственно этим условиям опыты проводились двумя сериями:

- 1) на нефтяном моторном топливе,
- 2) „ сапропелитовом мазуте из смолы III-го Барзасского месторождения, при различных нагрузках, начиная от холостого хода до максимально возможной длительной перегрузки.

Давление форсуночного воздуха для каждой нагрузки выбиралось на основании предварительных опытов в пределах от 50 до 68 ати, и в обеих сериях при одинаковых нагрузках поддерживалось по возможности одинаковым.

Форсуночное сопло было диаметром 1,98 мм.; число распыливающих колец 3 шт.

Наблюдения производились лишь после того, как наступало установившееся тепловое состояние дв-ля, о чем судили по температуре охлаждающей воды, отходящих газов, содержанию CO_2 в продуктах сгорания, виду индикаторной диаграммы и постоянству числа оборотов.

С целью исключить влияние переменного фактора: работы компрессора на величину индикаторной мощности дв-ля, давление в холодильнике компрессора поддерживалось во всех опытах по возможности одинаковым.

Продолжительность каждого опыта при установившемся состоянии выбрана была равной одному часу. Отдельные замеры производились через десятиминутные интервалы одновременно по условному сигналу.

III. Результаты испытаний и анализ полученных данных.

1. Пуск двигателя на сапропелитовом мазуте.

Повышенная вязкость мазута по сравнению с нормальным нефтяным топливом, а также наличие в нем ароматических соеди-

нений и фенолов первоначально вызывали опасения в возможности легкого пуска машины.

Первые опыты пуска дв-ля в ход произведены были на мазуте, подогретом до $50-60^{\circ}\text{C}$.

Результаты получились удовлетворительными.

Постепенное понижение т-ры топлива до 20°C не вызвало перебоев в последующей работе дв-ля. При этом первом опыте перевода компрессорной машины на сапропелитовый мазут двигатель хорошо работал на различных нагрузках, допуская значительную перегрузку до 20% сверх его нормальной мощности.

Последующие неоднократные пуски холодной машины непосредственно на сапропелитовом мазуте с т-рой $17-20^{\circ}\text{C}$ дали вполне благоприятные результаты. После разгона двигателя пусковым воздухом давления $50-58$ ати до 100 об/мин. при перестановке рукоятки управления с пускового на рабочее положение, дв-ль давал вспышки и постепенно набирал ход с первого раза.

Индикаторные диаграммы, снятые в период пуска на нефтяном моторном топливе и сапропелитовом мазуте указывают все-таки на то, что первые вспышки последнего являются замедленными, вызывая более вялое набирание хода и несколько удлиняя пусковой период.

2. Работа двигателя на различных нагрузках.

С целью охарактеризовать поведение дв-ля в условиях режима его работы при различных нагрузках, (нормальные условия его работы в эксплуатации) были проведены две серии сравнительных опытов:

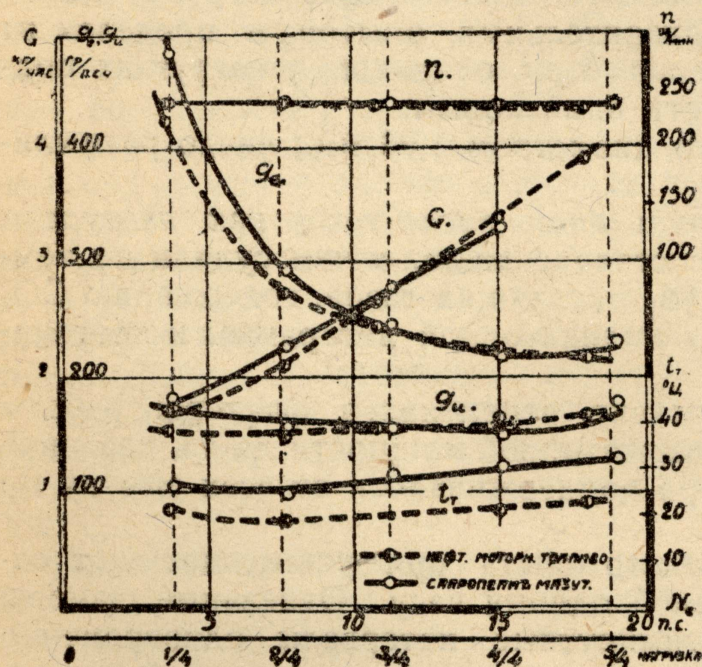
1) Серия „H—Ne“ — на нефтяном моторном топливе,

2) Серия „C—Ne“ — на сапропелитовом мазуте.

Результаты сравнительных испытаний дв-ля на обоих сортах топлива представлены в виде кривых и диаграмм на фиг. с 10 по 14.

На чертеже фиг. 10 нанесены кривые изменения часовых (G) и удельных расходов топлива: на эффективную (g_e) и индикаторную (g_u) силу в час, числа оборотов (кривая „ n “ и температуры топлива t_T в зависимости от нагрузки двигателя.

Особенного внимания заслуживают кривые „ g_e “, дающие представление об экономичности дв-ля на различных нагрузках.



Фиг. 10. Кривые расхода топлива, числа оборотов и температуры топлива дв-ля ЮМТ.

В области нагрузок от 1/4 до 3/4 кривая „ η_e “ для сапропелитового мазута лежит над аналогичной кривой для нефтяного моторного топлива. Это указывает на меньшую экономичность дв-ля на малых нагрузках при работе на сапропелитовом мазуте.

Численные значения удельных расходов топлива даны в графе „17“ сводной таблицы результатов испытаний.

При нагрузке в 1/4 от полной получился перерасход сапропелитового мазута в

$$\frac{583,5 - 423}{423} \cdot 100 = 14,3\%$$

$$\text{При нагрузке в } 1/2 \text{ в } \frac{292 - 273}{273} \cdot 100 = 7,0\%$$

Расход при 3/4 нагрузке практически делается одинаковым, а при полной дв-ль потребляет сапропелитового мазута на 7,7 гр/э. л. с. ч. меньше, чем нефтяного моторного топлива.

Служащий для оценки теплоиспользования т. н. экономический коэффициент полезного действия, представляющий собой отношение тепла, превращенного в полезную работу на валу к теплу топлива и подсчитанный по формуле:

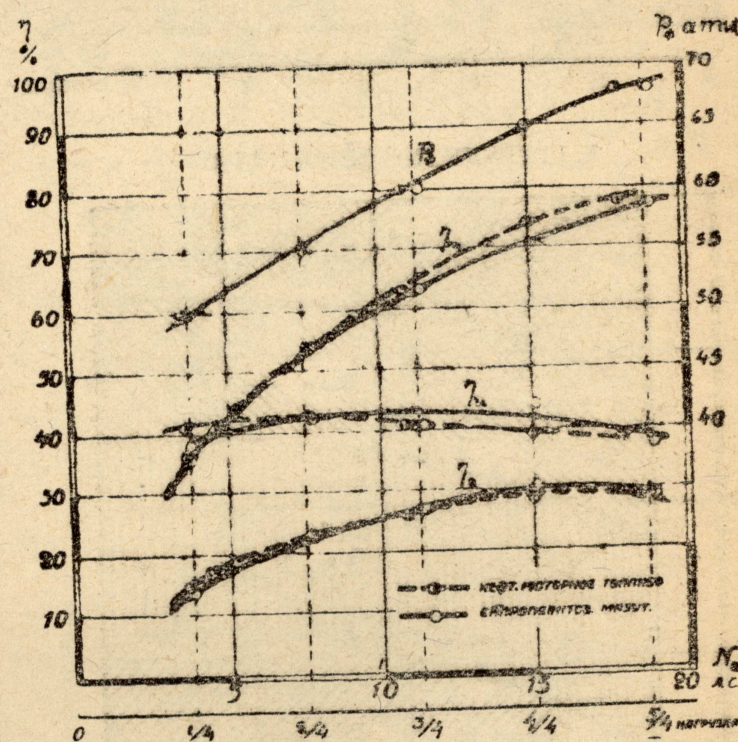
$$\eta_e = \frac{632,3 \cdot N_e}{G \cdot Q_H^P} \cdot (9)$$

для различных нагрузок, нанесен в виде кривой на фиг. 11. Из сопоставления кривых η_e для обоих топлив видно, что теплоиспользование в случае сапропелитового мазута при нормальных условиях работы дв-ля на полной нагрузке лучше на

$$\frac{30,6 - 28,2}{28,2} \cdot 100 = 8,5\%,$$

составляя 30,6% от тепла топлива.

Повышенный расход сапропелитового мазута по сравнению с нефтяным моторным топливом при малых нагрузках и практически одинаковый, или даже несколько более низкий, при больших, приходится объяснять целиком характером его сгорания.



Фиг. 11. Кривые коэффициентов полезного действия дв-ля ЮМТ.

(Вопрос этот подробнее освещен ниже в главе „Характеристика процесса сгорания“).

Расхождение кривых η_m —механического коэффициента полез-

ного действия—может быть объяснено различными условиями смазки поршня в обеих сериях опытов.

В серии „Н-Не“ несгорающие частицы нефти, обладающей меньшей вязкостью, чем смазочное масло, осаждающаяся на стенках цилиндра, разжижают смазку, уменьшая тем самым работу трения поршня.

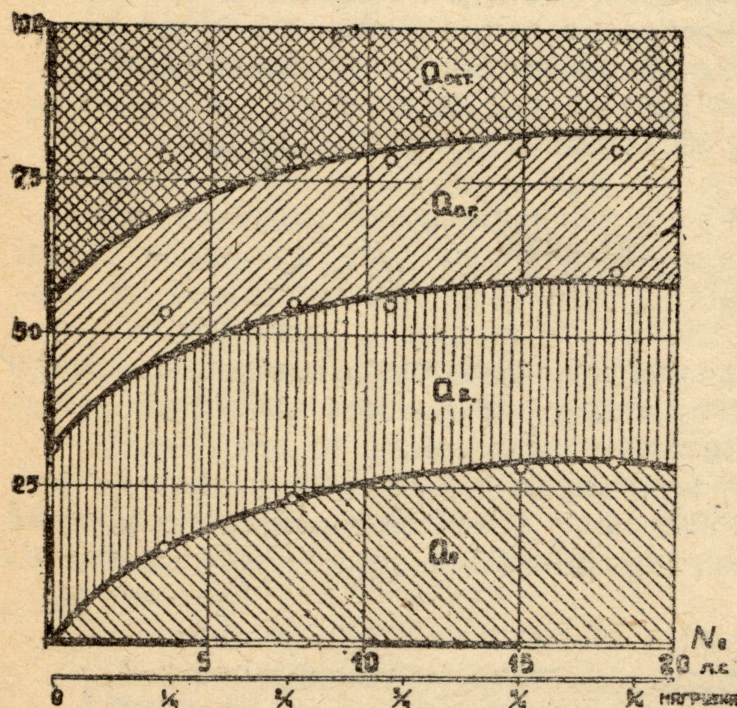
Неполнота сгорания сапропелитового мазута, особенно на малых нагрузках, вызывает меньшее разжижение смазки в силу большей вязкости мазута.

Различная вязкость смазки поршня вызвала т. о. большие механические потери и в связи с этим большие значения среднего индикаторного давления в серии „С-Не“ при одинаковых значениях p_e и N_e в обоих случаях.

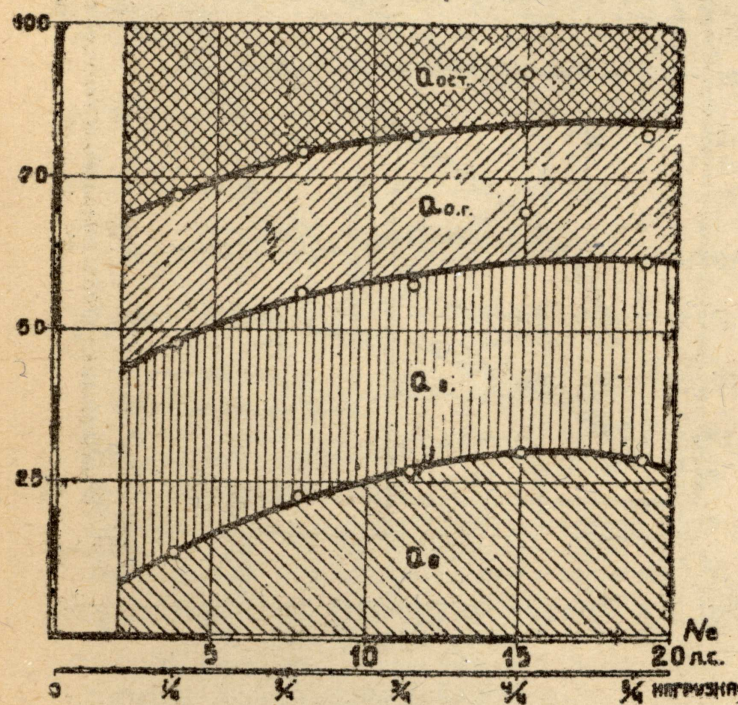
Распределение тепла в дв-ле представлено в виде тепловых балансов его часовой работы.

Фиг. 12-А дает понятие о характере изменения различных тепловых потерь и тепла, превращенного в полезную работу при работе

А. НЕФТ. МОТОРН. ТОПЛИВО



Б. САПРОПЕЛИТОВЫЙ МАЗУТ



Фиг. 12. Тепловые балансы в % % дв-ля ЮМТ. работе дв-ля на нефтяном моторном топливе для различных нагрузок.

Здесь: Q_e —означает тепло, перешедшее в эффективную работу;
 Q_v —тепло, унесенное охлаждающей водой;
 $Q_{ог}$ —тепло, унесенное отходящими газами;
 $Q_{ост}$ —тепло неучтенное (неполнота горения, механические потери и лучеиспускание).

Фиг. 12-Б представляет аналогичный баланс для работы дв-ля на сапропелитовом мазуте.

Сопоставление тепловых балансов работы дв-ля на обоих топливах позволяет легко сделать количественное и качественное сравнение их.

На фиг. 13-А и Б вычерчены тепловые балансы в калориях на 1 эффективную силу в час.

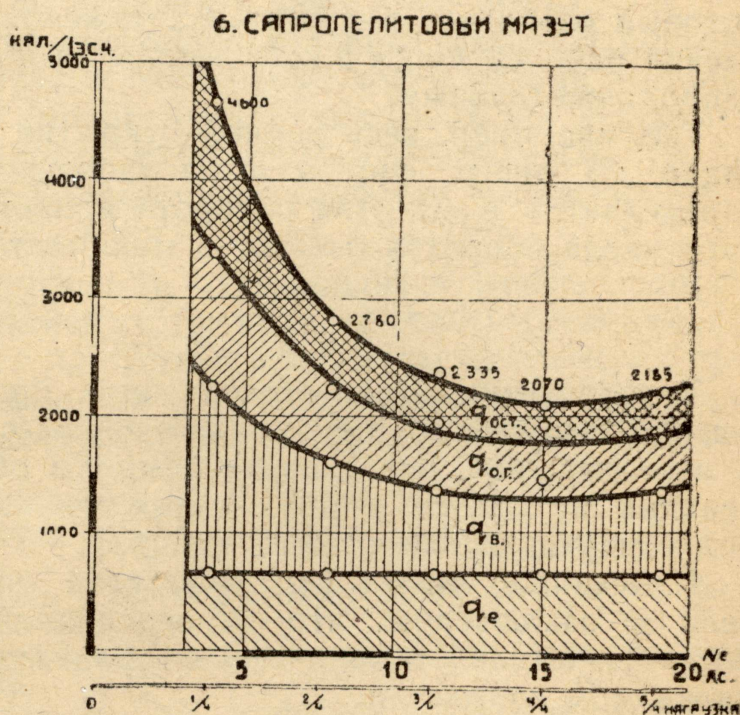
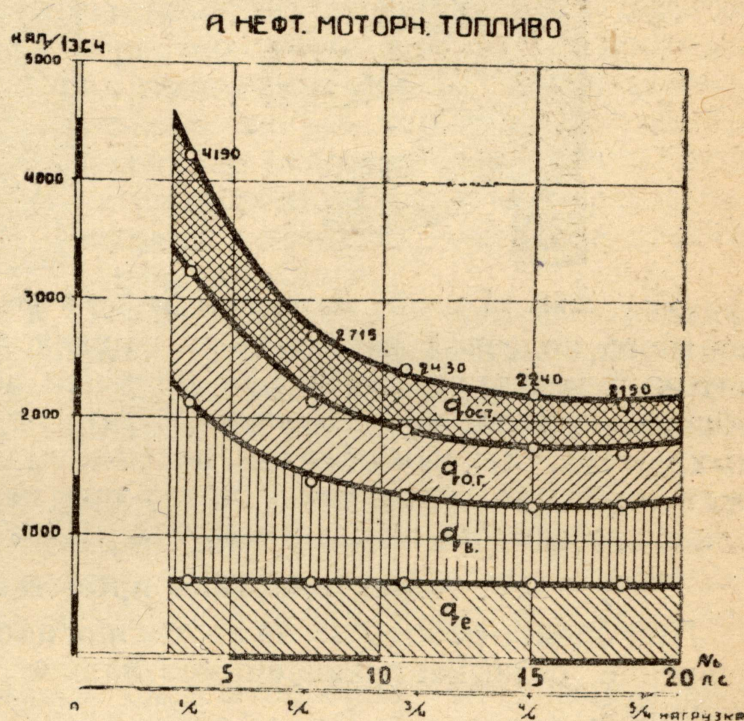
Удельные расходы тепла обозначены буквой „ q “ с индексами, имеющими то же значение, как и в балансах фиг. 12.

Цифры у точек верхней кривой представляют собой величину часового расхода тепла на 1 эффективную лощ. силу в час.

Для сопоставления расхода тепловой энергии и ее распределения при работе дв-ля на обоих топливах при полной нагрузке на фиг. 14-а и б даны диаграммы Sankey'a, полученные из предыдущих диаграмм.

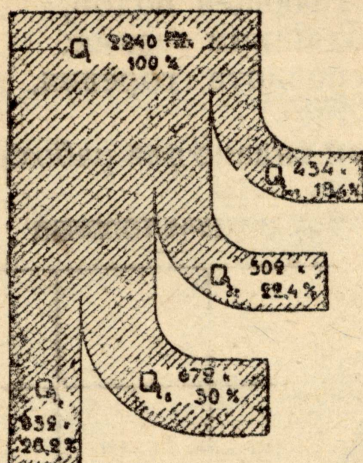
Потери в воду и с отходящими газами в обоих случаях оказываются, примерно, одинаковыми.

Увеличение теплового потока, эквива-

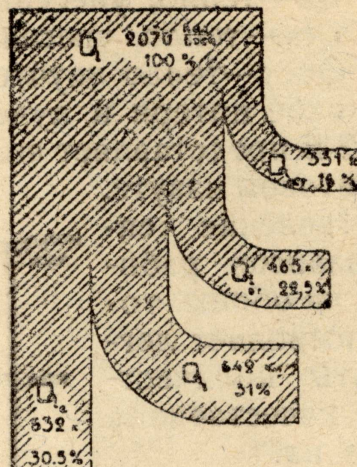


Фиг. 13 А и Б. Тепловые балансы в калориях на 1 э. с. ч. дв. ЮМТ.

а. НЕФТ. МОТОРНОЕ ТОПЛИВО.



б. САПРОПЕЛИТОВЫЙ МАЗУТ.



Фиг. 14 а и б. Диаграммы Sankey'а для полной нагрузки.

лентного полезной работе дв-ля на валу, для случая „б“ (сапропелитовый мазут) на 8,16%, при меньшем абсолютном значении сообщаемого тепла на 7,6%, происходит за счет уменьшения неучтенных потерь, главным образом, неполноты сгорания. На это указывает снижение остаточного члена при переходе с нефтяного топлива на сапропелитовый мазут с 19,4% до 16%, т. е. на 17,5%.

IV. Характеристика процесса сгорания.

При оценке работы дв-ля на том или ином топливе существенное значение оказывает экспериментальное исследование процесса сгорания.

Это последнее затрудняется тем, что промежуток времени, который отводится в двигателях тяжелого топлива на приготовление рабочей смеси и собственное сгорание, является слишком непродолжительным.

Так, например, весь период открытия форсуночной иглы, как видно по диагр. фиг. 5 и из таблицы VI, для нашего случая определяется в 40° угла поворота кривошипа, что для нормального числа оборотов $n = 235$ в мин. составляет в среднем:

$$\tau = \frac{40}{6 \cdot n} = \frac{40}{6 \cdot 235} = 0,028 \text{ сек.}$$

Точное изучение и исследование происходящих в цилиндре физико-химических процессов, начиная с момента впрыскивания в него топлива, осложняется тем, что оба компонента к началу реакции находятся в двух фазах: топливо—в жидкой, а кислород воздуха, заполняющего цилиндр,—в газообразной¹⁾.

Изыскания многих исследователей последнего времени привели к заключению, что самовоспламенение наступает тогда, когда значительное количество топлива находится еще в капельно-жидком состоянии.

¹⁾ Hartner-Seberich. Der Zündverzug bei flüssigen Brennstoffen. Forschungsheft. 299. 1928.

Весь процесс сгорания может быть разделен на несколько последовательных фаз, существенным образом отличающихся друг от друга, находящихся, безусловно, во взаимной связи и влияющих одна на другую.

Применительно к дв-лям тяжелого топлива, весь период, обычно называемый процессом сгорания, можно разбить на три фазы¹⁾.

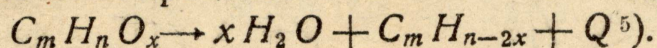
Первая фаза, определяемая, с одной стороны, началом впрыскивания топлива в пространство сгорания, а, с другой, началом под'ема давления, характеризуется тем, что на протяжении ее происходит целый ряд сложных явлений физико-химического характера, как-то: нагревание капель впрыснутого топлива вследствие теплопередачи, частичное испарение, адсорбция, диффузия, окисление и распад углеводородных молекул, образование перекисей (пероксиды, моноксиды), возможно, частичное пирогенетическое разложение и явление крэкинга.

Как указывает проф. К. Нейманн²⁾, в процессе нагревания капли жидкого топлива, впрыснутого в цилиндр дв-ля до температуры самовоспламенения, главная роль принадлежит не теплопередаче, а химическим реакциям, происходящим в пограничном слое фазового раздела.

Опыты, проведенные ВНИДИ³⁾, достаточно убедительно доказывают, что нагрев углеводородных топлив в присутствии кислорода воздуха сопровождается появлением „холодного пламени“, переходящего при дальнейшем сообщении тепла в самовоспламенение.

Поэтому эта фаза может быть в основном охарактеризована, как период „невидимого сгорания“, подготовляющий почву для создания местных очагов пламени к началу 2-й фазы.

Принято полагать, что причиной начального самовоспламенения отдельных капель являются отмеченные выше весьма нестойкие соединения пероксиды (моноксиды)⁴⁾ типа $C_m H_n O_x$, устойчивые лишь в очень узких пределах температуры и давлений и быстро распадающиеся вне этих пределов с значительным выделением тепла



При распадении пероксида отделяющиеся атомы водорода, являющиеся очень активными (*in statu nascendi*), соединяются с кислородом воздуха в H_2O . Оставшаяся же часть молекулы представляет собой неопределенный углеводород, который, благодаря повышению его температуры теплотой Q , активизируется, реаги-

¹⁾ Ricardo H. R.—Combustion in Diesel Engines. March. 1930.

²⁾ Neumann K. Reaktionskynetische Betrachtungen zum Zündvorgang. V. D. I. 1932, № 32, s. 766.

Neumann K.—К вопросу о кинетике химич. реакций процесса воспламенения. „Дизелестроение“ № 6, 1932 г., стр. 30.

³⁾ Гиттис В. Ю.—Исследование процессов сгорания в двиг. вн. сгоран. Труды ВНИДИ, 1933, стр. 20.

⁴⁾ Tausz J. und Schulte F.—Über Zündpunkte und Verbrennungsvorgänge im Dieselmotor. Halle 1926, s. 6.

⁵⁾ Neumann K.—V. D. I. 1932, s. 767.

фрует с кислородом, создавая очаг пламени, являющийся началом самовоспламенения.

Благодаря одновременному возникновению подобных очагов пламени в различных точках камеры сгорания, создаются предпосылки для перехода процесса во вторую фазу бурной реакции, сопровождающейся выделением тепла в количествах, достаточных для сильного повышения температуры во всем пространстве сгорания.

Третья фаза является последней, заключающей весь процесс „видимого“ сгорания. Протекание ее, в основном, зависит от

температурных условий в пространстве сгорания, характера ввода топлива, качества распыливания и перемешивания и скорости химических реакций.

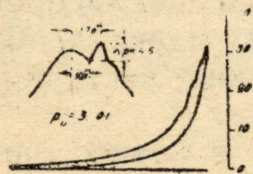
Полученные во время испытаний индикаторные диаграммы нормальные, а особенно смещенные или снятые по времени, позволяют судить о том или ином характере протекания отдельных фаз процесса сгорания.

Диаграммы фиг. 15, полученные при индицировании испытывавшейся машины, указывают на

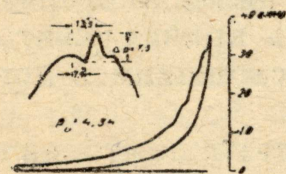
ИНДИКАТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ НЕФТ. МАШИНЫ. ТОПЛИВО

8% %

25



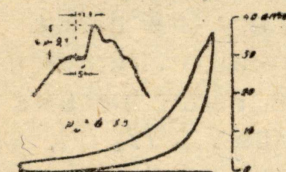
50



75



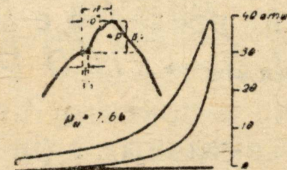
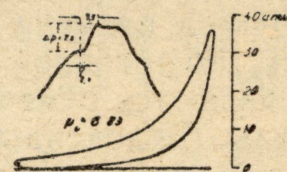
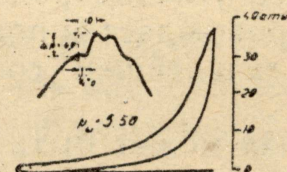
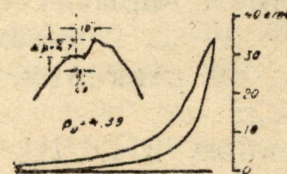
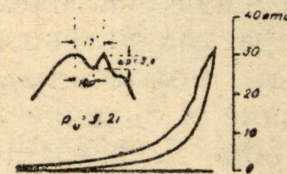
100



МАКС



САПРОПЕЛИТ. МАЗУТ.



Фиг. 15. Индикаторные диаграммы дв-ля ЮМТ.

резкое повышение давления в период второй фазы сгорания, что обнаруживается крутым подъемом кривой у вершины смещенных диаграмм.

Знание момента подачи топлива (открытие форсуночной иглы), отчетливо выраженный момент начала воспламенения топлива и характер под'ема кривой во время второй фазы сгорания, позволяют сделать сравнение протекания процесса сгорания по отдельным фазам его для обоих сортов топлива.

Отсчитывая промежуток времени в градусах угла поворота кривошипа, или секундах, от момента открытия форсуночной

иглы до момента начала воспламенения, получим возможность определить продолжительность первой фазы сгорания или периода „запаздывания“ воспламенения (немецкое Zündverzug, английское „delay“ или „time lag“).

На фиг. 15 у вершин смещенных индикаторных диаграмм нанесены градусы угла поворота кривошипа от верхней мертвой точки до начала второй фазы (угол α) и до конца ее (угол β).

Тут же даны численные значения скачка давления Δp в атм.

Зная момент открытия форсуночной иглы, который в нашем случае наступал за 4° до ВМТ, можно вычислить продолжительность первой фазы.

Величина „скачка давления“ и продолжительность второй фазы в градусах, определяемого разностью углов ($\beta - \alpha$), позволяет охарактеризовать эту фазу степенью повышения давления на 1° поворота кривошипа.

В приводимой ниже таблице VII собраны эти величины, а протекание углов „ α “, „ β “, ($\beta - \alpha$) скачка давления и нарастания давления на 1° поворота кривошипа в течение 2-й фазы $\frac{\Delta p}{\beta - \alpha}$

в зависимости от нагрузки дв-ля при работе на обоих сортах топлива представлено на диаграммах фиг. 16, 17 и 18.

Таблица VII.

№№ п/п.	Нагрузка в долях от нормальной.	α°		β°		$(\beta - \alpha)^\circ$		$\Delta p \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$		$\frac{\Delta p}{(\beta - \alpha)} \frac{\text{кг}}{\text{см}^2 \cdot \text{градус}}$	
		Неф. мот. топ.	Сапр. мазут	Неф. мот. топ.	Сапр. мазут	Неф. мот. топ.	Сапр. мазут	Неф. мот. топ.	Сапр. мазут	Неф. мот. топ.	Сапр. мазут
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,25 <i>Неф</i>	10,0	10,5	17,0	17,0	7,0	6,5	4,5	3,5	0,64	0,54
2	0,50 <i>Неф</i>	7,5	4,0	13,5	10,0	6,0	6,0	7,5	4,7	1,25	0,78
3	0,75 <i>Неф</i>	6,0	4,0	14,5	10,0	8,5	6,0	8,5	6,0	1,00	1,00
4	1,00 <i>Неф</i>	5,0	2,5	11,5	9,5	6,5	7,0	9,1	7,2	1,40	1,03
5	Максим. перегрузка . (1,20 в серии <i>H—Ne</i> 1,27 в сер. <i>C—Ne</i>)	4,5	3,5	10,0	13,5	5,5	10,0	8,1	8,2	1,47	0,82

Желание сравнить нефтяное моторное топливо и сапропелитовый мазут по времени запаздывания воспламенения привело к необходимости определения периода от начала подема форсуночной иглы, а, следовательно, начала впрыскивания топлива в цилиндр до начала подема линии давления.

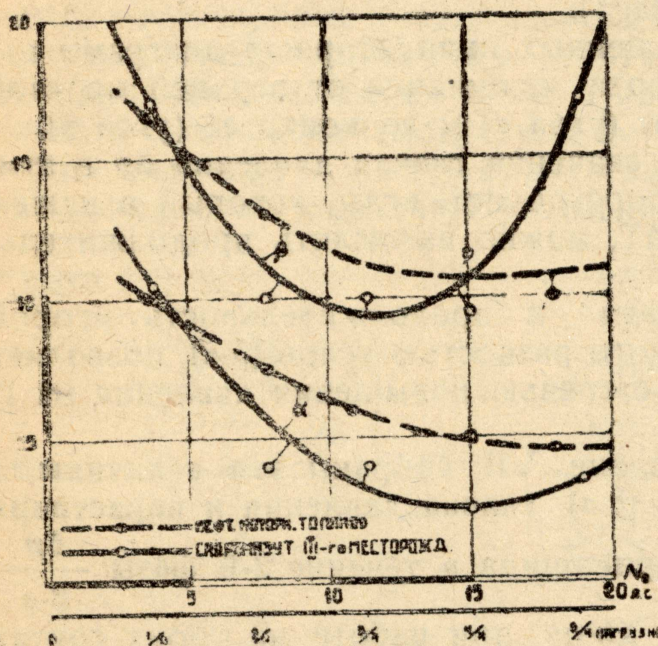
Так как начало под'ема иглы форсунки во всех опытах соответствовало положению кривошипа за 4° до В. М. Т., то угол от начала впрыскивания до начала самовоспламенения φ_s получится, как сумма

$$\varphi_s = 4^\circ + \alpha.$$

Значения угла φ_s приведены с таблице VIII.

Тут же вычислены значения „запаздывания самовоспламенения“ — Z_s .

Значения угла φ_s для нефтяного моторного топлива (см. 6-ю вертикальную графу табл. VIII), в зависимости от нагрузки, изменялись от 14° — $8,5^\circ$ угла поворота кривошипа, что соответствует крайним значениям Z_s от 0,0097 до 0,0061 секунды.



Фиг. 16. Изменение углов α и β в зависимости от N_e .

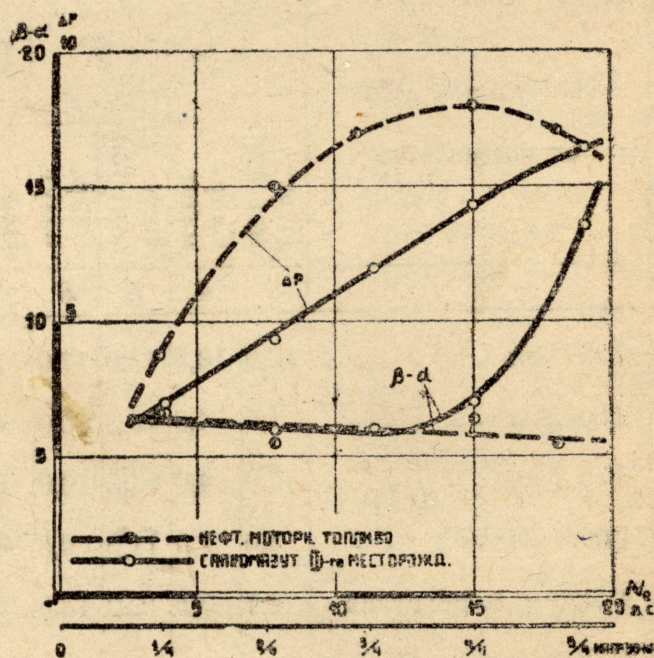
Соответственно, для сапропелитового мазута величина угла φ_s менялась от $14,5^\circ$ до $7,5^\circ$ и Z_s от 0,0101 до 0,0053 сек.

Кривые Z_s , нанесенные на фиг. 18 в зависимости от N_e дают характер изменения этой величины на различных режимах дв-ля.

Как видно из фиг. 18, Z_s , как для одного, так и для другого топлива с увеличением нагрузки уменьшается.

При этом значении времени запаздывания воспламенения для серии опытов с сапропелитовым мазутом получилось меньше, давая сокращение этого периода на полной нагрузке, т. е. при нормальных условиях работы дв-ля, примерно, на 27%.

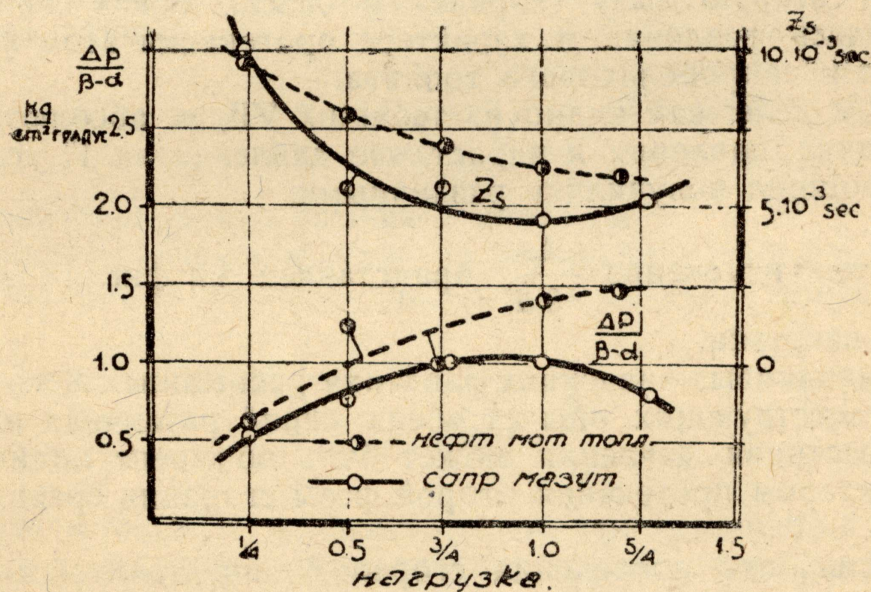
К сожалению, отсутствие каких-либо сведений о степени химического сродства с кислородом, скоростях реакций, данных о



Фиг. 17. Изменение Δp и $(\beta - \alpha)$ в зависимости от N_e .

Таблица VIII.

№ п.п.	Мощность дв-ля N_e		Число оборотов n		$\varphi, ^\circ$		$Z, \text{сек.}$	
	Нефт. мот. топ.	Сапр. мазут	Нефт. мот. топ.	Сапр. мазут	Нефт. мот. топ.	Сапр. мазут	Нефт. мот. топ.	Сапр. мазут
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3,60	3,78	240	240	14,0	14,5	0,0097	0,0101
2	7,66	7,76	238	239	11,5	8,0	0,0080	0,0056
3	10,85	11,38	237	238	10,0	8,0	0,0070	0,0056
4	15,00	15,14	236	236	9,0	6,5	0,0063	0,0046
5	18,00	19,06	233	236	8,5	7,5	0,0061	0,0053



Фиг. 18. Изменение времени запаздывания воспламенения Z_s на 1° в зависимости от нагрузки

процессе предварительного распада под влиянием температуры и давления компонентов, входящих в состав сапропелитового мазута, о моменте появления и характере протекания явления „холодного пламени“ и невозможность определить опытным путем температуру самовоспламенения, за отсутствием соответствующей аппаратуры, не дают возможности точно установить причины, вызывающие значительное сокращение периода запаздывания воспламенения при работе на сапропелитовом мазуте.

Возможно, что причиной уменьшения для сапропелитового мазута Z_s является большая однородность фракционного состава и его физико-химические свойства, дающие право ожидать более низкой температуры появления холодного пламени и, как следствие этого, более низкой температуры самовоспламенения.

Весьма вероятным является и то, что значительное содержание в сапропелитовом мазуте кислородных соединений (см. элементарный состав) является одним из факторов, сокращающих время запаздывания воспламенения.

Как показывают опыты Р. С. Яковлева по изучению перехода холодного пламени в полное горение¹⁾, ввод в зону реакций, предшествующих воспламенению, чистого кислорода, является „фактором в высшей степени сильно способствующим переходу холодного пламени в полное горение“.

Распад молекул, содержащих кислород, в период первой фазы, когда наступает появление холодного пламени и освобождение в этот момент атомов кислорода, может оказаться сильно действующим средством, значительно ускоряющим дальнейшее протекание реакций окисления и распада и способствующим более быстрому переходу в воспламенение, сокращая величину Z_s для сапропелитового мазута.

Изучая вторую фазу сгорания в опытах обеих серий, замечаем и здесь различия в характере протекания этой фазы для нефтяного и сапропелитового топлива.

В самом деле, как видно из таблицы VII, и абсолютные значения скачка давления и нарастание давления на 1° угла поворота кривошипа получились различными.

Характер изменения $\frac{\Delta p}{\beta - \alpha}$ представлен на фиг. 18 в зависимости от нагрузки.

При одинаковых значениях давления распыливающего воздуха p_ϕ в соответствующих опытах обеих серий различная интенсивность нарастания давления может быть объяснена индивидуальным характером протекания второй фазы сгорания сравниваемых топлив.

Интенсивность протекания сгорания сапропелитового мазута в течение этой фазы уступает таковой для нефтяного моторного топлива, давая максимум при нормальной нагрузке.

Более плавный характер сгорания во второй фазе может быть объяснен более крупным распылом сапропелитового мазута, скоростями ступенчато протекающих реакций разложения тяжелых углеводородных молекул, характером углеводородных соединений, входящих в состав мазута, меньшей продолжительностью первой фазы сгорания и большим коэффициентом избытка воздуха.

Действительно, при одинаковом распыливающем устройстве и одинаковом давлении форсуночного воздуха диаметр капель топлива зависит от величины коэффициента поверхностного натяжения.

¹⁾ Яковлев Р. С. Распад топлива, как предварительная стадия процесса воспламенения. Труды ВНИДИ, 1933 г., стр. 41.

По Triebnigg'у¹⁾, радиус капле может быть подсчитан по следующей формуле:

$$r_1 = \frac{2\alpha \cdot g}{\psi \cdot \gamma_{\phi} \cdot w_r^2} \dots \dots \dots (10)$$

где: α —коэффициент поверхностного натяжения топлива,
 g —ускорение силы тяжести в м/сек^2 ,
 ψ —коэффициент трения распыленной частицы топлива о воздух,
 γ_{ϕ} —уд. вес воздуха в момент распыливания, считая температуру воздуха, поступающего в рабочий цилиндр в 50°C , в кгр/м^3 ,
 w_r —относительная скорость в м/сек между распыливающим воздухом и частицами топлива.

В формуле (10) w_r —без большой погрешности можно принять равной теоретической скорости истечения воздуха из форсунки при разности давлений p_{ϕ} и p_c ²⁾.

В таком случае:

$$w_r = w_1 = \sqrt{2gL_{из.}} = \sqrt{2g \cdot \frac{p_{\phi}}{\gamma_{\phi}} \cdot \ln \frac{p_{\phi}}{p_c}} \dots \dots \dots (11)$$

где: p_c —давление конца сжатия в цилиндре.

Подставляя значение $w_r = w_1$ из выражения (11) в формулу (10) и вводя численные значения постоянных величин, получим:

$$r_1 = 25,0 \cdot \frac{\alpha}{p_{\phi} \cdot \ln \frac{p_{\phi}}{p_c}} \dots \dots \dots (12)$$

Последняя формула показывает, что при сохранении постоянными p_{ϕ} и p_c , мелко́сть распыливания топлива зависит исключительно от величины коэффициента поверхностного натяжения топлива.

Что касается последнего, то для нефтей величина его колеблется, сравнительно в узких пределах, составляя в среднем $\alpha = 0,003 \text{ кгр/м}^3$.

Для других топлив, как указывает проф. Гурвич⁴⁾, „при переходе от метановых углеводородов к нафтенам (конечно, с одинаковым числом углеродных атомов), от этих к ароматикам и затем к ненасыщенным, поверхностное натяжение в воздухе увеличивается“.

¹⁾ Triebnigg H. Der Einblase-und Einspritzvorgang bei Dieselmасhinen. Wien, 1925.

²⁾ Брилинг Н. Р. Исследование рабочего процесса и теплопередачи в дв-ле Дизеля. М. 1931.

³⁾ Triebnigg H. s. 17.

⁴⁾ Гурвич Л. Г. Научные основы переработки нефти. 1925, ст. 192.

Кроме того, повышение поверхностного натяжения с повышением пределов кипения нефтяных фракций наблюдали Гурвич, Rittman, Egloff, Francis и Bennett.

Основываясь на этих указаниях, можно полагать, что сапропелитовый мазут, содержащий большее количество высококипящих фракций, чем нефтяное моторное топливо, имеющий в своем составе ароматики и непредельные соединения, должен обладать большим поверхностным натяжением.

Это дает право заключить, что при всех прочих одинаковых условиях распыливание сапропелитового мазута происходило до капель большего диаметра, чем нефтяного моторного топлива.

Из выражения (12) видно, какое влияние на качество распыливания оказывает давление форсуночного воздуха.

При работе с обоими сортами топлив давление форсуночного воздуха устанавливалось по наивыгоднейшему в смысле расхода топлива на нефти, на основании серии предварительных опытов и при переходе на сапропелитовый мазут не менялось.

Это обстоятельство, имевшее целью сравнить работу дв-ля на обоих топливах в одинаковых условиях, повлекло за собой более крупное распыливание сапропелитового мазута и явилось одной из причин более вялого протекания сгорания во второй и третьей фазах сгорания.

По существующему воззрению на процесс сгорания, тяжелые углеводородные молекулы, прежде чем дать конечные продукты окисления: H_2O и CO_2 , проходят целый ряд промежуточных реакций¹⁾, распадаясь постепенно на более простые, при чем длина ступенчатой цепи будет тем большей, чем тяжелее молекула.

Замечено, что сгорание ароматических углеводородов происходит также по аналогичной схеме, но другого строения.

Большее количество тяжелых фракций и наличие ароматических соединений в сапропелитовом мазуте являются, т. о., причинами, вызывающими более затяжной характер сгорания.

Влияние продолжительности первой фазы на характер протекания второй сказывается в том, что интенсивность повышения давления получается тем большей, чем продолжительнее будет период замедления воспламенения, т. к. к моменту воспламенения в цилиндр окажется впрыснутой большая порция топлива.

В случае сапропелитового мазута к началу воспламенения, которое наступало ранее, чем при нефтяном моторном топливе, в цилиндре в этот момент оказывалось меньшее количество топлива, которое при самовоспламенении не могло вызывать такого резкого повышения давления, как нефтяное.

Наконец, больший или меньший коэффициент избытка воздуха не может не оказать своего влияния на такой процесс, как сгорание.

¹⁾ Засс Ф. Бескомпрессорные дв-ли Дизеля М. 1931, стр. 35 и 38.

Как показывает диаграмма фиг. 19, значения коэффиц. избытка воздуха во всех опытах сапропелитовой серии было выше, чем в нефтяной.

Благодаря этому налицо имеются условия для обеспечения более полного и более быстрого протекания процесса сгорания.

Факт большего избытка воздуха в одинаковых опытах являлся ускоряющим фактором в процессе сгорания, однако, приведенные выше факторы, действовавшие в обратном направлении, являлись в течение 2-й фазы преобладающими.

Как видно из сравнения фиг. 19 и кривой протекания линии сгорания на диаграмме работы при максимальной перегрузке в серии С—Ne с минимальным значением α , процесс сгорания значительно замедляется, переходя большей своей долей в третью фазу.

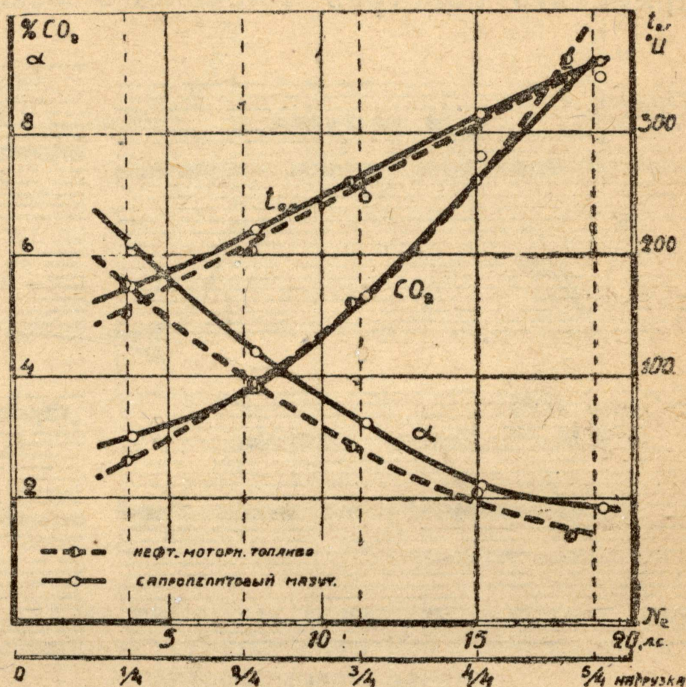
Третья фаза сгорания во всех случаях сапропелитовой серии получилась более продолжительной по времени, что не могло не сказаться на повышении $t_{\text{от.г.}}$ отходящих газов (см. фиг. 19), которая в этом случае, как показывает расположение кривой $t_{\text{от.г.}}$, лежит выше аналогичной кривой для серии нефтяной.

Повышенная $t_{\text{от.г.}}$ отходящих газов повлекла за собой увеличение потерь с выхлопными газами и охлаждающей водой (см. фиг. 14-б). Тем не менее некоторое возрастание двух последних потерь не уменьшает экономичности машины, которая получилась при нормальной нагрузке больше, чем на нефтяном моторном топливе, главным образом, за счет уменьшения неучитываемых непосредственно измерением потерь, вследствие большей полноты сгорания сапропелитового мазута, чему способствовало большее значение коэффициента избытка воздуха.

V. Эксплуатационные показатели для сапропелитового мазута.

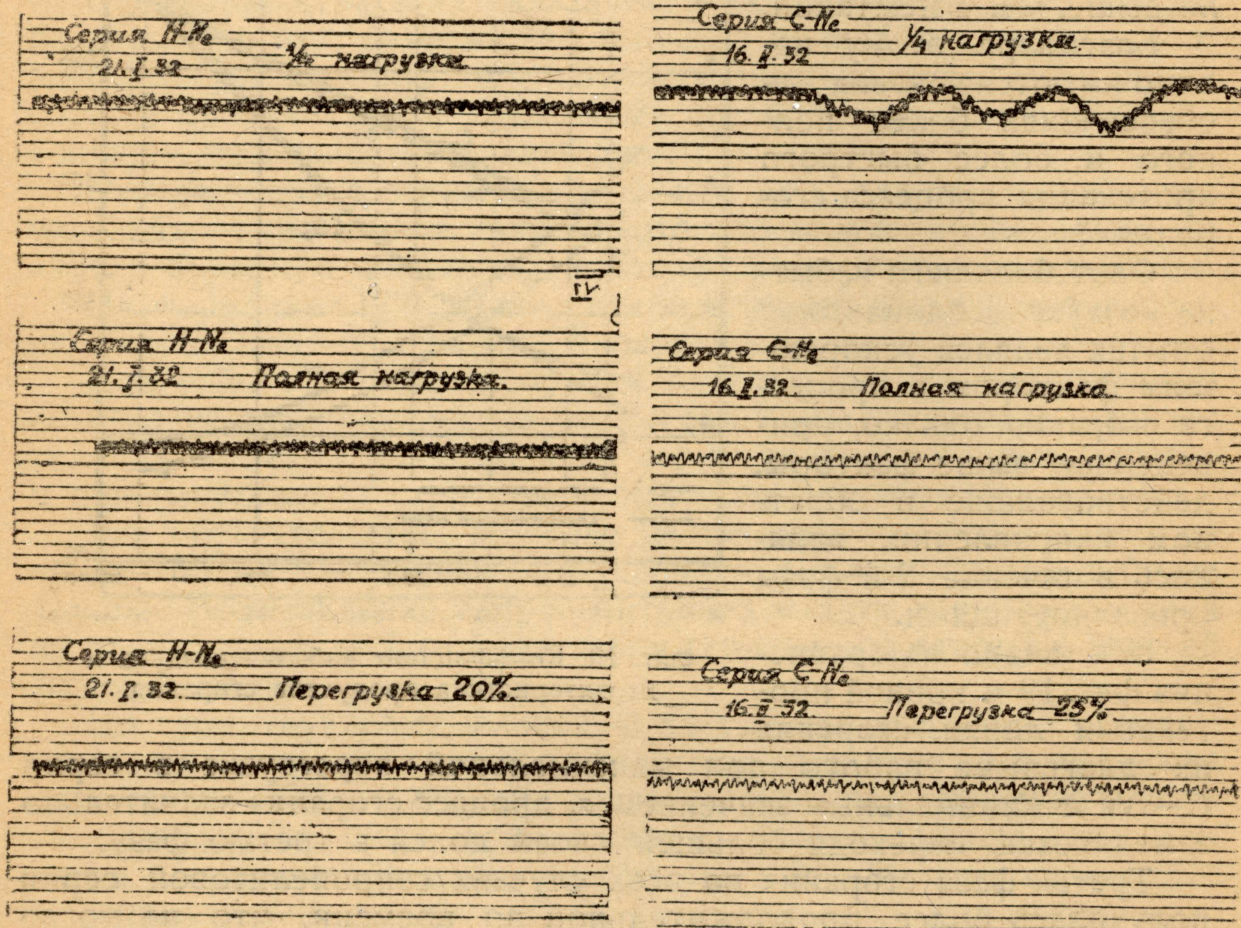
Для полноты характеристики работы компрессорного двигателя на новом топливе необходимо остановиться на нескольких вопросах, имеющих значение для эксплуатации.

Пуск в ход дв-ля при температуре помещения и топлива, близких к 18—20° С производится без затруднений.



Фиг. 19. Коэффициент избытка воздуха и характеристика продуктов сгорания.

В случае работы при более низких температурах необходимо применять подогрев топливного бака с осуществлением пуска



Фиг. 20 и 21. Тахограммы двигателя ЮМТ при работе на обоих топливах.

дв-ля на более жидком топливе и переключением на него перед остановкой.

Работа при больших нагрузках характеризуется повышенным расходом топлива, достигающим увеличения его на четвертной нагрузке до 14%, по сравнению с таковым для нефтяного.

Холостой ход и четвертная нагрузка, как это видно из тахограмм, представленных на фиг. 20 и 21, отличаются большой неустойчивостью.

Вызывается это, как показывают диаграммы фиг. 22, ухудшением условий для нормального протекания процесса сгорания, а иногда и пропуском вспышек.

При работе на сапропелитовом мазуте перегрузочная способность двигателя возрастает, вследствие меньшего значения теоретически потребного для сгорания количества воздуха.

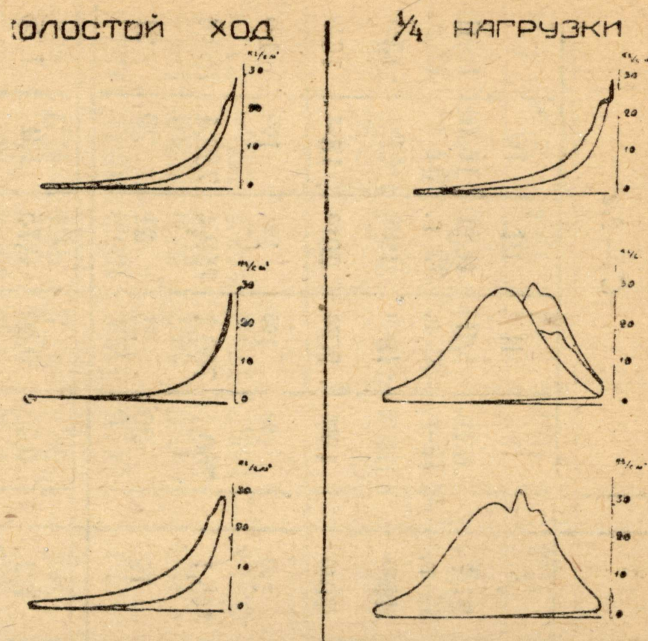
Во время опытов двигатель допускал длительную устойчивую (см. тахограмму на фиг. 21) работу без снижения числа оборотов, при перегрузках в 25%, чего нельзя было достигнуть на нефтяном моторном топливе.

Осмотр цилиндра, поршня, клапанов и форсунки после 14 часов непрерывной работы при различных нагрузках на сапропелитовом мазуте показал значительно большее загрязнение этих органов дв-ля отложениями кокса.

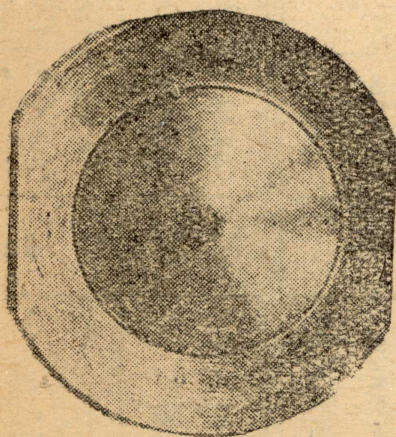
Особенно сильное скопление последнего заметно на форсуночном сопле.

Ряд осмотров, производившихся после работы на малых нагрузках дает право сделать заключение, что отложение кокса происходит, главным образом, во время работы двигателя с недогрузкой, характеризующейся повышенным расходом топлива.

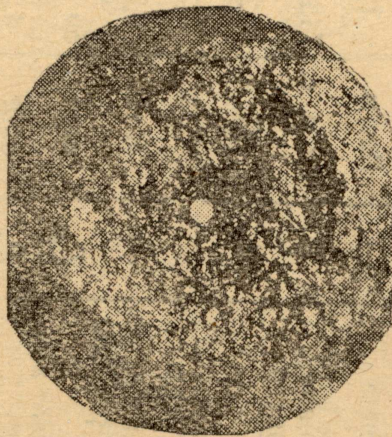
Характер нагарообразования на форсуночном сопле после работы на нефтяном и сапропелитовом топливах показан на фиг. 23, 24 и 25.



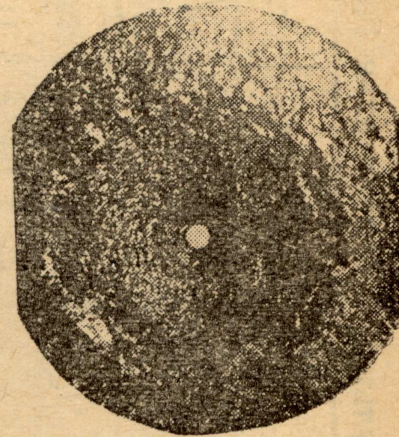
Фиг. 22. Индикаторные диаграммы холостого хода и четвертной нагрузки дв-ля ЮМТ при работе на сапропелитовом мазуте.



Фиг. 23. Чистое сопло дв-ля ЮМТ.



Фиг. 24. Сопло форсунки дв-ля ЮМТ после 40 ч. работы на нефтян. мотор. топливе.



Фиг. 25. Сопло форсунки дв-ля ЮМТ после 14 ч. работы на сапропелитовом мазуте.

Кокс, получающийся от сапропелитового мазута, более рыхлый, чем от нефтяного моторного топлива и очищается легче.

(Продолжение следует).

Сводная таблица результатов сравнительного испытания компрессорного двигателя Дизеля Ю.М.Т.

1	С е р и я	—	—	H — Ne					C — Ne				
				I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
2	Номер опыта	—	—	21/1 32 г.	21/1 32 г.	21/1 32 г.	21/1 32 г.	21/1 32 г.	6/II 32 г.	6/II 32 г.	16/II 32 г.	16/II 32 г.	16/II 32 г.
3	Дата опыта	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	Начало опыта	—	Час/м.	10 ³⁰	12 ¹⁵	14 ²⁰	18 ¹⁵	19 ⁴⁰	18 ⁰⁵	19 ⁵⁰	19 ¹⁰	17 ⁴⁵	15 ⁴⁵
5	Конец опыта	—	Час/м.	11 ³⁰	13 ¹⁵	15 ²⁰	19 ¹⁵	20 ⁴⁰	19 ⁰⁵	20 ⁵⁰	20 ¹⁰	18 ⁴⁵	16 ⁴⁵
6	Продолжительность опыта . .	—	Час/м.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
7	Барометрическое давление . .	B	мм р. с.	745,1	745,1	745,1	745,1	745,1	760,1	760,1	759,4	759,4	759,4
8	Температура окружающего воздуха	t	°C	20	22	20	21	19	20	21	21	20	21
9	Приблизительная доля нагрузки	—	%	0,25	0,50	0,75	1,0	1,2	0,25	0,50	0,75	1,0	1,25
10	Форсуночное давление распыл. воздуха	P _ф	ати	50	55	60	65	68	50	55	60	60	68
11	Давление в холодильнике ком- прессора	P _х	ати	4,5	5,25	5,30	6,46	6,5	4,75	5,3	5,55	5,45	6,18
12	Число оборотов по счетчику .	n	об/мин.	240	238	237	236	233	240	239	238	236	236
13	Сорт топлива	—	—	Нефтяное моторное топливо					Сапропелитовый мазут				
14	Теплотв.	Q _г ^P	кал/кг	10640	10640	10640	10640	10640	10060	10060	10060	10060	10060
15	способн.	Q _н ^P	кал/кг	9960	9960	9960	9960	9960	9520	9520	9520	9520	9520
16	Расход	G _r	кг/час.	1,516	2,09	2,652	3,372	3,891	1,826	2,268	2,786	3,290	4,380
17	топлива	g _e	гp/э. с. ч.	423,0	273,0	244,5	225,0	216,3	483,5	292,2	244,8	217,3	229,8
18	по весу	g _и	гp/и. с. ч.	153,8	147,6	154,8	164,6	166,6	172,7	157,1	155,1	148,8	177,0

19	Эффективная мощность	N_e	л. с.	3,6	7,66	10,85	15,00	18,00	3,78	7,76	11,38	15,14	19,06
20	Индикаторная мощность	N_u	л. с.	9,36	14,15	17,14	20,46	23,38	10,57	14,43	17,95	22,1	24,76
21	Средне-эффективное давление	P_e	кг/см ²	1,10	2,35	3,45	4,59	5,68	1,15	2,36	3,49	4,68	5,9
22	Средне-индикаторное давление	P_u	кг/см ²	3,01	4,34	5,30	6,33	7,32	3,21	4,39	5,5	6,83	7,66
Охлаждающая вода													
23	Температ. охлад. воды при входе . . .	t_1	°C	4,5	5,0	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	3,0	2,8	4,0
24	Температ. охлад. воды при выходе из рубашки . . .	t_2^p	"	37,0	44,2	57,0	53,7	52,3	42,4	46,0	53,3	43,5	55,2
25	Температ. охлад. воды при выходе из головок . . .	t_2^r	"	36,0	46,8	54,3	55,0	58,7	44	52,0	52,4	44,0	52,0
26	Нагрев воды в рубашке . . .	Δt_p	"	32,5	39,2	53,0	49,7	48,3	37,9	39,0	50,3	40,7	51,2
27	" " " головке . . .	Δt_r	"	31,5	41,8	50,3	51,0	54,7	39,5	47,5	49,4	41,2	48,0
28	Часовой расход на рубашку	W_p	кг/час.	126,5	114,4	94,3	123,5	157,1	114,6	119,6	100,8	190,1	153,2
29	Часовой расход на головку	W_r	"	52,25	49,8	56,5	70,3	81,8	41,6	54,7	62,9	109,3	119,5
30	Общий часовой расход на цилиндр	W	"	178,75	164,2	150,8	193,8	238,4	156,2	174,3	163,7	299,4	272,7
Отходящие газы													
31	Температура средняя за опыт	$t_{0.r.}$	°C	151,1	204,9	257	321	344	173,4	219	255,1	332,5	358
32	Анализ RO_2	—	%	2,6	3,8	5,2	7,2	9,2	3,0	4,4	5,3	7,6	9,0
33	газов $RO_2 + O_2$	—	%	19,9	19,2	19,0	18,6	17,8	19,2	19,1	19,4	18,3	18,4
34	Коэффициент избытка воздуха	α	—	5,54	3,88	2,86	2,08	1,65	6,2	4,52	3,22	2,2	1,82

С е р и я		—	—	—	H — Ne				C — Ne				
35	Эффективный	η_e	%	15,1	23,3	26,0	28,2	29,3	13,7	22,8	27,1	30,6	28,9
36	Индикаторный	$\eta_{и}$	%	41,2	42,9	40,9	39	38	38,3	42,3	40,9	44,5	37,5
37	Механический хозяй- ственный	$\eta_{м}$	%	36,5	54,2	63,3	74,1	77,7	35,75	53,80	63,4	68,5	77,0
Кoeffициенты полезного действия													
Часовой тепловой баланс двигателя													
38	Тепло сообщенное в час	Q	кал./час. % %	15100 100	20800 100	26410 100	33600 100	38800 100	17400 100	21610 100	26580 100	31380 100	41700 100
39													
40	Тепло перешедшее в эффективную работу	Q_e	кал./час. % %	2278 15,1	4850 23,3	6860 26,0	9480 28,2	11400 29,3	2394 13,7	4910 22,8	7200 27,1	9570 30,6	12060 28,9
41													
42	Тепло унесенное охлаж- дающей водой	Q_v	кал./час. % %	5750 38,1	6560 31,6	7840 29,7	9730 28,9	12060 31,1	5985 34,4	7260 33,6	8170 30,8	12250 39,1	13590 32,6
43													
44	Тепло унесенное отхо- дящими газами	$Q_{ог}$	кал./час. % %	3760 25,0	5120 24,6	6250 23,7	7535 22,4	7700 19,8	4250 24,4	4950 22,9	6400 24,0	7010 22,3	8700 20,8
45													
46	Тепло излучения и ос- таток	$Q_{ост.}$	кал./час. % %	3312 21,8	4270 20,5	5460 20,6	6855 20,5	7640 19,8	4770 27,50	4490 20,7	4810 18,1	2550 8,0	7350 17,7
47													
Расход													
48	На эффективн. силу в час	q_e	кал./э.с.ч.	4190	2715	2430	2240	2150	4600	2780	2335	2070	2185
49	На индикаторн. силу в час	$q_{и}$	кал./исч	1614	1470	1528	1642	1660	1645	1498	1480	1418	1684