

ВЛИЯНИЕ ПРИВОДА НА ИСКАЖЕНИЯ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ

Ю. Н. СОКОЛОВ

Съемка индикаторных диаграмм с помощью механического (с пружиной, поршеньком и пишущим механизмом) индикатора является до сих пор наиболее доступным, а при умеренных числах оборотов—и достаточно надежным методом исследования работы поршневых машин: двигателей внутреннего сгорания, компрессоров, поршневых паровых машин и т. п. При этом, как и при других способах индицирования, неизбежен однако ряд искажений, не всегда учитываемых при постановке исследования.

Если вопросу об искажениях индикаторной диаграммы, обусловливаемых механизмом самого индикатора, в литературе уделено достаточное внимание, то роль привода, обеспечивающего движение барабана индикатора, недостаточно изучена с этой точки зрения. При исследованиях, проведенных автором, было замечено, что в ряде случаев приходится иметь дело с искажениями индикаторной диаграммы, несмотря на безукоризненное состояние механизма самого индикатора и при достаточно малой для данного случая его инерционности. Среднее индикаторное давление, определяемое по площади диаграммы, получается при этом либо невероятно малым, либо наоборот—явно преувеличенным. Очевидно, что в этих случаях имеют место искажения индикаторной диаграммы не по ее ординатам, а по абсциссам, а так как эти искажения при переднем и заднем ходе поршня получаются обычно в разные стороны, площадь диаграммы резко изменяется.

Источники ошибок в приводе индикатора могут объясняться как неправильной передачей движения поршня механизмом ходоуменьшителя, так и деформациями индикаторного шнура, качеству которого обычно не уделяется должного внимания.

В современных поршневых машинах с закрытым картером роликовые или параллелограммные ходоуменьшители не применяются, а различные системы шарнирных механизмов, размещаемых внутри картера и служащих для привода индикатора, являются в большинстве случаев источниками существенных искажений как за счет самой их кинематической схемы, так и за счет быстро появляющихся зазоров в шарнирных соединениях. Характерным примером таких искажений индикаторной диаграммы и определяемого по ней среднего индикаторного давления могут служить результаты проведенных автором еще в 1937 году массовых опытов на компрессорном двигателе Дизеля при 235 оборотах в минуту, когда на каждом режиме его работы одним и тем же индикатором поочередно снимались диаграммы с помощью шарнирного ходоуменьшителя и ходоуменьшителя Ткаченко (см. ниже), являющегося безукоризненным с кинематической точки зрения. Средние значения определенной по целому ряду таких диаграмм величины среднего индикаторного давления приводятся ниже.

Опыт №		1	2	3	4	5
Приблизительная доля нагрузки в % . .		35	55	80	100	106
Среднее индикаторное давление	х/ум. Ткаченко . . $p_i \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	3.68	4.12	5.36	6.29	6.69
	Шарнирный х/ум. $p'_i \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	4.24	4.73	6.48	7.02	7.46
Отношение p'_i/p_i		1.15	1.15	1.21	1.11	1.12

Расхождения, как видим, весьма существенны и колеблются в пределах от 11 до 21%. Это показывает, как велико может быть искажение индикаторной диаграммы за счет самого ходоуменьшителя.

Ходоуменьшитель однако всегда может быть так или иначе проверен заранее: его кинематическая схема легко может быть соответствующим образом исследована, а механизм приведен в порядок. Значительно хуже обстоит дело с искажениями, являющимися следствием деформаций индикаторного шнура: они не поддаются предварительному учету и не могут быть с уверенностью устранены. Вопросу о влиянии шнура на искажение индикаторной диаграммы и уделено основное внимание в настоящей работе.

Методика исследований и аппаратура

Если соединить привод индикатора и, вращая вручную предназначенную для индицирования машину, делать отметки положения пишущего штифта индикатора на его барабане через каждые 10—15 градусов угла поворота кривошипа, мы получим диаграмму, подобную представленной на рис. 1. Как правило, отметки, соответствующие симметричным положениям шатунно-кривошипного механизма при переднем и заднем ходе поршня, не будут совпадать и, возвратив машину в исходное (ноль градусов кривошипной окружности) положение, мы не получим совмещения новой



Рис. 1

отметки с первоначальной, что и свидетельствует об искажениях в индикаторном приводе. Если при этом ходоуменьшитель был надлежащим образом выверен и практически не давал искажений, таковые возможны лишь за счет деформаций индикаторного шнура. При такой проверке инерционные усилия в подвижных деталях приводного механизма и в барабане индикатора практически не проявляются, а деформации шнура обуславливаются лишь натяже-

ниями его пружины внутри барабана индикатора, вследствие чего мы ее и будем называть „статической“.

Статическая проверка может служить лишь для предварительных исследований искажений в приводе, в качестве каковых мы ее и применяли; действительные же условия работы индикаторного привода на достаточно быстроходной машине будут иными за счет динамических явлений, вследствие чего помимо статической проверки работа привода должна быть исследована и в процессе нормальной съемки индикаторной диаграммы. С этой целью мы применили специальный индикатор с двойным пишущим меха-

низом (рис. 2), смонтированный и изготовленный из деталей индикаторов „Розенкранц“ модель II механиком А. Я. Ткаченко. Он позволял одновременно записывать индикаторную диаграмму на двух независимых барабанах и, будучи предварительно проверен на масляном прессе, давал практически одинаковые „масштабы пружины“ на каждом из этих барабанов. Один из барабанов этого индикатора соединялся с нормальным, подлежащим исследованию приводом, другой же был заменен специальным, приводимым в движение через две пары винтовых зубчатых колес от главного вала машины, и обеспечивал тем самым съемку развернутой по углу поворота кривошипа диаграммы (рис. 3). Трением на оси этого барабана выжимались зазоры в его приводе, и получаемая на нем диа-

грамма могла, таким образом, служить образцовой, освобожденной от искажений за счет привода. Для сопоставления с ней диаграммы, получаемой при исследуемом приводе, последняя графически развертывалась по углу поворота кривошипа, а снятая по углу поворота кривошипа диаграмма в свою очередь перестраивалась по ходу

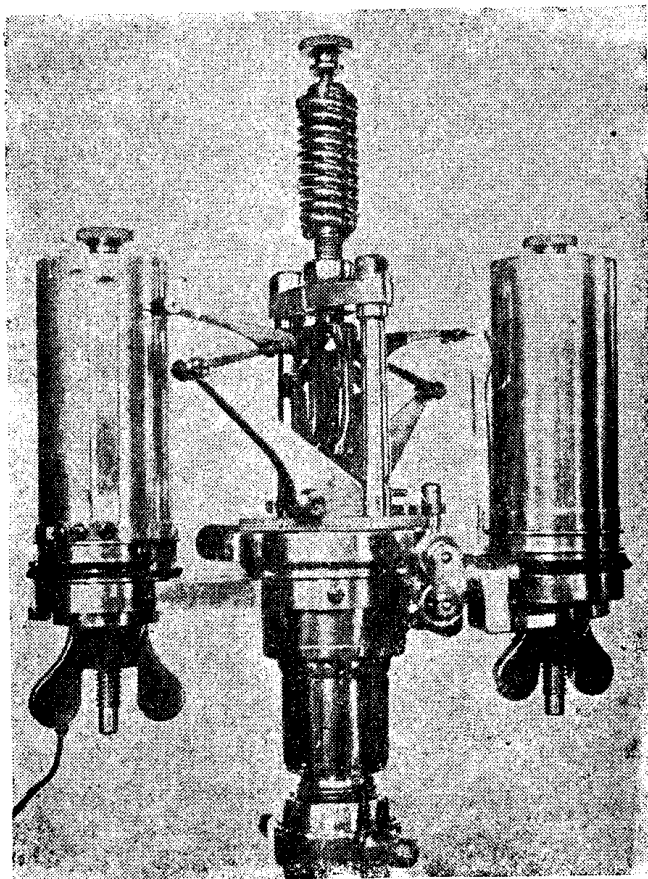


Рис. 2

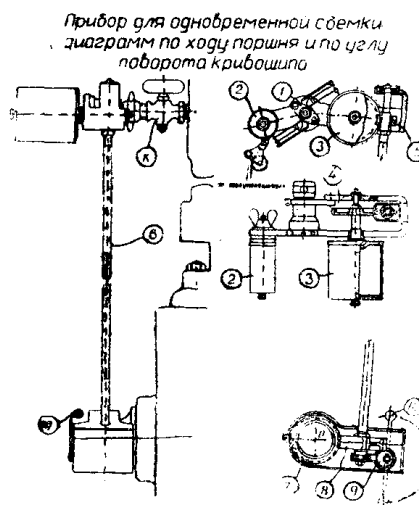


Рис. 3

поршня и совмещалась с исследуемой (см. ниже рис. 6, 7, 8 и 9). Сопоставление таких диаграмм и позволяло исследовать получаемые за счет привода искажения, определяя их знак и абсолютную величину на отдельных участках.

Не ставя своей задачей исследовать искажения индикаторных диаграмм при различных их формах, обусловливаемых рабочим процессом в индицируемой машине, базой для проведения опытов мы избрали одноступенчатый компрессор „КМ—2“. Легко устанавливающийся и при постоянном противодействии практически неизменный рабочий процесс в этом компрессоре обеспечивал значительные удобства. Умеренное число оборотов компрессора (270 — 275 в минуту) соответствовало применяемому индикатору средней быстроходности и обеспечивало отсутствие заметных искажений индикаторной диаграммы по ее ординатам.

Поскольку основной задачей стояло исследование влияния шнура, были приняты меры к устранению искажений за счет ходоуменьшителя. С этой целью был применен уже упомянутый выше ходоуменьшитель системы А. Я. Ткаченко (авторское свидетельство №31662), являющийся весьма совершенным механизмом, кинематически подобным шатунно-кривошипному механизму индицируемой машины. Исследованию этого прибора посвящена самостоятельная работа автора; здесь же мы ограничимся лишь указанием, что ходоуменьшитель Ткаченко (рис. 4) обеспечивает возможность установки его на любое отношение длины шатуна к радиусу кривошипа (каковое и было приведено в соответствие с индицируемой машиной) и снимать диаграммы, с любым их смещением по углу поворота кривошипной окружности без расцепления привода.

До проведения опытов ходоуменьшитель был весьма тщательно установлен, причем особое внимание было уделено совпадению угла заклинивания его кривошипа с механизмом индицируемой машины. Специальной проверкой было установлено, что отклонения от пропорциональности движения ползунка ходоуменьшителя действительному ходу поршня машины не превосходят 0.2% последнего, т. е. создаваемые самим ходоуменьшителем искажения практически неощутимы.

Исследуемый шнур имел во всех случаях рабочую длину около 115 см и два перегиба на роликах диаметром 28 мм под углом около 90°—в самом ходоуменьшителе и при выводе из него. Перегиб шнура при подводе его к барабану индикатора был сведен до минимума. В особых случаях (см. ниже) шнур на отдельных его участках заменялся стальной проволокой или специальным весьма гибким тросиком.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 5, где *a*—ходоуменьшитель Ткаченко, *b*—двойной пишущий механизм индикатора, *c*—барабан его, приводимый от ходоуменьшителя и шнура, *d*—барабан, вращаемый по углу поворота кривошипа, *e*—валик его привода и *f*—эксцентриковый ходоуменьшитель, не применяемый при описываемых опытах.

Порядок проведения каждого опыта сводился к следующему. После установки и соединения приводов от ходоуменьшителя и по углу поворота кривошипа вся система (компрессор—привод—индикатор) прокручивалась в течение нескольких минут и вновь останавливалась. Устранив таким образом случайные зазоры и деформации в приводах, на бумаге, надетой на барабан *d*, пишущим штифтом индикатора наносились отметки, соответствующие мертвым точкам машины. При последующем запуске компрессора (без каких-либо расцеплений или изменений в приводах) и достижении желаемого режима его работы наносились атмосферные линии и быстро и одновременно снимались диаграммы на обоих барабанах индикатора. При этом мы старались занести на диаграммы по возможности лишь один рабочий цикл. После этого машина останавливалась, и вновь проверялось соответствие нанесенных на барабане отметок мертвым точкам механизма компрессора. Последующая обработка полученных диаграмм проводилась как указано выше, причем для перенесения диаграмм по углу поворота в нормальные (по ходу поршня) координаты и обратно использовались специально составленные таблицы. Для установления изменений в среднем индикаторном давлении искаженная за счет привода и перенесенная из записанной по углу поворота кривошипа диаграммы планиметрировались.

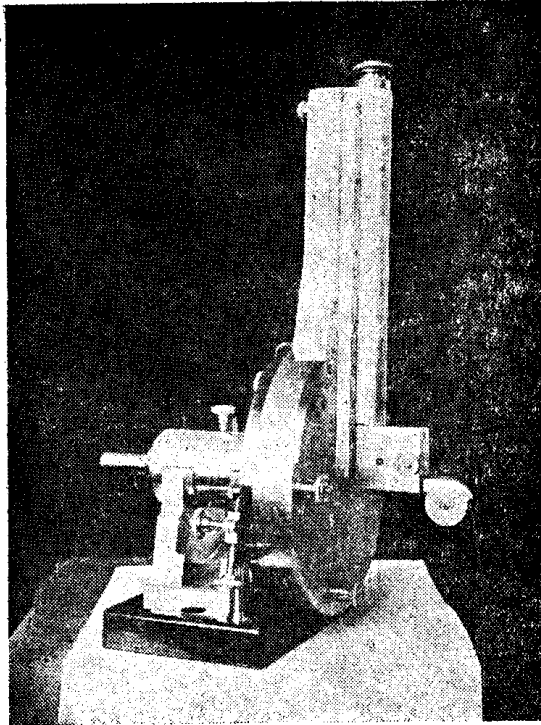


Рис. 4

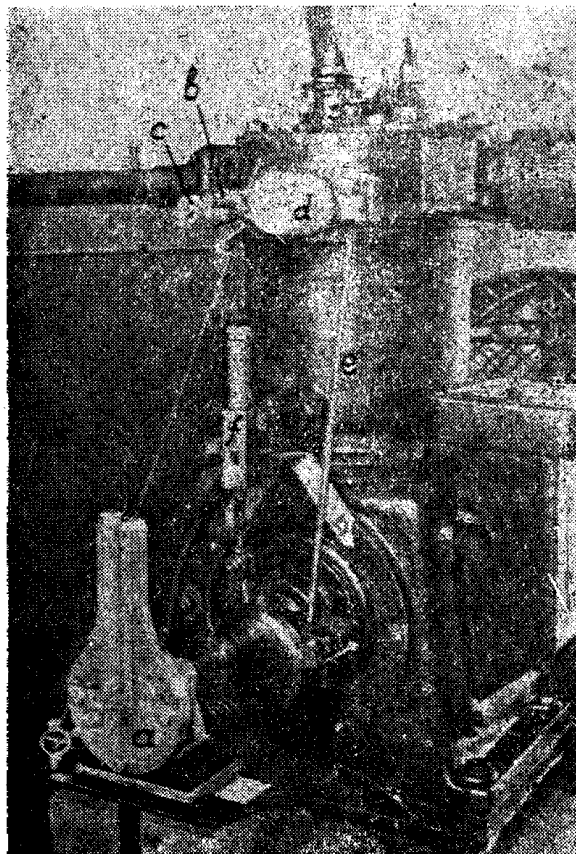


Рис. 5

Результаты опытов

Из всего числа опытов, проведенных с различными типами соединения индикатора с ходоуменьшителем и при различных режимах работы компрессора, служащего экспериментальной базой, остановимся на результатах лишь наиболее характерных. В их числе следует считать исследование индикаторного привода при следующих типах гибких соединений: хлопчатобумажный крученый шнур, обычно применяемый за последнее время при индицировании, с одним соединением петель и нормальным индикаторным крючком; специальный („индикаторный“) пеньковый плетеный шнур, провощенный и предварительно выдержанный под нагрузкой при том же типе соединения; весьма гибкий тросик из 104 жил белого металла диаметром 0.07 мм каждая, целый на всем протяжении от ползунка ходоуменьшителя до барабана индикатора; специальный индикаторный шнур с медной жилой и пеньковой оплеткой, замененный тонкой стальной проволокой на прямолинейных участках соединения. Общая длина соединений, как уже указывалось, во всех случаях была около 115 см.

Уже статическая (см. выше) проверка движения барабана индикатора показала наличие значительных искажений. Ее результаты при натяжении шнура, создаваемом пружиной барабана индикатора, в 2—3 кг представлены в таблице 1, где для каждого типа исследуемого соединения приведен ход барабана индикатора x (в процентах от полной длины диаграммы), соответствующий данному углу поворота кривошипа, и вычислена ошибка Δ , получаемая в результате сопоставления его с действительным ходом поршня индицируемой машины. Эта ошибка считается положительной, если ход барабана индикатора (от верхней мертвой точки) больше действительного хода поршня и отрицательной в обратном случае. Величина ее доходит до $3.4 \div 3.6$ процента от полного хода поршня при применении хлопчатобумажного крученого шнура, до 1.7—2.0 процента при пеньковом плетеном шнуре, до 0.9—1.0 процента при шнуре с медной жилой и проволоке и минимальна (0.4—0.5 процента) при применении тросика. На первой половине переднего хода поршня ошибка, как правило, отрицательна, что соответствует отставанию в движении барабана при отпуске шнура ходоуменьшителем. При обратном ходе поршня ошибка меняет знак, что опять-таки легко объяснимо в соответствии с натяжением шнура в этом случае и отставанием в движении барабана при его возвращении. Некоторая неопределенность в знаке и величине ошибки на второй половине переднего хода объясняется, очевидно, случайными обстоятельствами, а при применении тросика—его упругостью, сказывающейся при перегибах.

Результаты одновременной съемки диаграмм по ходу поршня и по углу поворота кривошипной окружности представлены на рис. 6, 7, 8 и 9. Непосредственно полученная при данном приводе по ходу поршня диаграмма нанесена во всех случаях сплошной линией, а перенесенная в эти координаты из снятой по углу поворота—пунктирной. Сплошные линии нижних диаграмм, развернутых по углу поворота кривошипа, соответствуют опять-таки непосредственно снятым, а пунктирные—перенесенным.

Характер искажений диаграммы, вызываемых деформациями шнура, одинаков во всех случаях: отставание в движении барабана при переднем ходе поршня, соответствующем отпуску шнура, влечет за собой более крутое падение линии расширения, чем оно должно быть в действительности, а при обратном ходе, соответствующем натяжению шнура, линия сжатия смещается влево. Площадь диаграммы вследствие этого получается больше действительной за счет искажений как при переднем, так и при заднем ходе поршня, и это обуславливает весьма значительную ошибку в определении среднего индикаторного давления. Характер искажений сме-

Таблица 1

Статическая поверка движения барабана индикатора

а градусы криво- шипн. окружно- сти	Х _г действитель- ный ход поршня 0°	Хлопчатобумажный крученный шнур				Пеньковый плетеный шнур				Шнур с медной прокладкой—прово- лока—шнур с медной прокладкой				Тросик			
		передний ход		задний ход		передний ход		задний ход		передний ход		задний ход		передний ход		задний ход	
		х°/о	Δ°/о	х°/о	Δ°/о	х°/о	Δ°/о	х°/о	Δ°/о	х°/о	Δ°/о	х°/о	Δ°/о	х°/о	Δ°/о	х°/о	Δ°/о
0	0.0	0.0	—	3.6	+3.6	0.0	—	0.5	+0.5	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.2	+0.2
10	0.9	—	—	4.3	+3.4	—	—	1.3	+0.4	—	—	0.9	0.0	0.6	-0.3	1.0	+0.1
20	3.7	0.6	-3.1	6.6	+2.9	1.7	-2.0	3.2	-0.5	2.7	-1.0	3.8	+0.1	3.5	-0.2	3.8	+0.1
30	8.1	4.7	-3.4	10.2	+2.1	6.4	-1.7	8.5	+0.4	7.2	-0.9	8.2	+0.1	8.1	0.0	8.3	+0.2
40	14.1	10.8	-3.3	16.7	+2.6	12.6	-1.5	14.9	+0.8	13.2	-0.9	14.4	+0.3	14.5	+0.4	14.2	+0.1
50	21.2	19.2	-2.0	23.7	+2.5	19.7	-1.5	21.7	+0.5	20.5	-0.7	21.7	+0.5	21.1	-0.1	21.6	+0.4
60	29.3	27.1	-2.2	32.1	+2.8	28.3	-1.0	29.8	+0.5	28.9	-0.4	29.8	+0.5	29.3	0.0	29.8	+0.5
70	38.0	37.1	-0.9	41.2	+3.2	37.2	-0.8	39.1	+1.1	37.6	-0.4	38.5	+0.5	37.8	-0.2	38.2	+0.2
80	46.9	46.4	-0.5	50.1	+3.2	46.7	-0.2	47.7	+0.8	46.8	-0.1	47.7	+0.8	46.8	-0.1	47.4	+0.5
90	55.7	55.6	-0.1	58.7	+3.0	55.8	+0.1	57.1	+1.4	55.8	+0.1	56.3	+0.6	55.9	+0.2	56.1	+0.4
100	64.3	64.3	-0.0	66.7	+2.4	64.5	+0.2	65.5	+1.2	64.3	0.0	65.0	+0.7	64.2	-0.1	64.6	+0.3
110	72.2	72.9	+0.7	75.3	+3.1	71.9	-0.3	73.7	+1.5	72.2	0.0	73.0	+0.8	72.1	-0.1	72.7	+0.5
120	79.3	80.2	+0.9	82.3	+3.0	79.5	+0.2	81.0	+1.7	79.5	+0.2	80.2	+0.9	79.6	+0.3	79.8	+0.5
130	85.5	86.4	+0.9	88.3	+2.8	85.7	+0.2	86.8	+1.3	85.6	+0.1	86.3	+0.8	85.6	+0.1	86.0	+0.5
140	90.7	91.1	+0.4	93.7	+3.0	90.6	-0.1	92.1	+1.4	90.7	0.0	91.3	+0.6	90.8	+0.1	91.2	+0.5
150	94.7	95.4	+0.7	97.7	+3.0	94.8	+0.1	94.9	+0.2	94.8	+0.1	95.6	+0.9	94.8	+0.1	95.1	+0.4
160	97.7	97.9	+0.2	—	—	98.0	+0.3	99.0	+1.3	97.6	-0.1	98.4	+0.7	97.7	0.0	97.9	+0.2
170	99.4	99.4	0.0	98.2(?)	-1.2(?)	99.4	0.0	—	—	99.5	+0.1	99.8	+0.4	99.5	+0.1	99.7	+0.3
180	100.0	100.0	—	100.0	—	100.0	—	100.0	—	100.0	—	100.0	—	100.1	—	100.1	—

щенной на -90° диаграммы (такое смещение часто практикуется при исследовании процесса горения в двигателях внутреннего сгорания) представлен на рис. 8—с. Здесь как при сжатии, так и при расширении имел

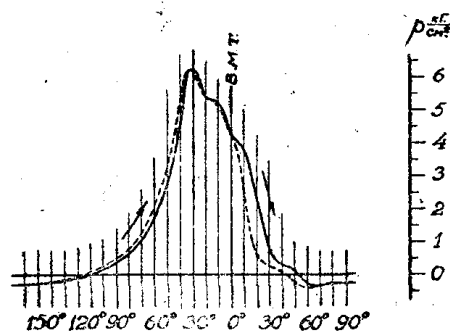
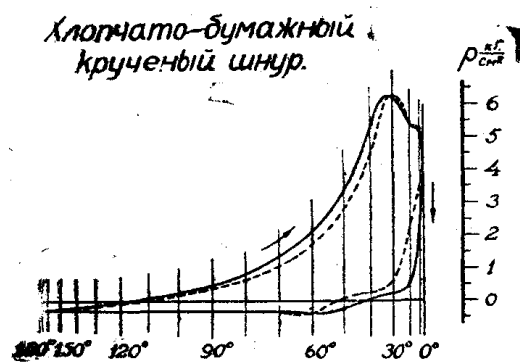


Рис. 6

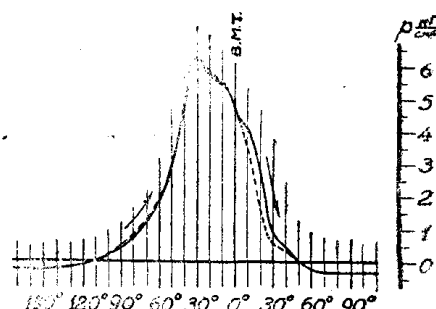


Рис. 7

место отпуск шнура, вследствие чего соответствующие кривые все время уклонялись от их нормального (пунктирного) положения вправо.

Шнур с медн прокл.—проволока—шнур с медн. прокл.

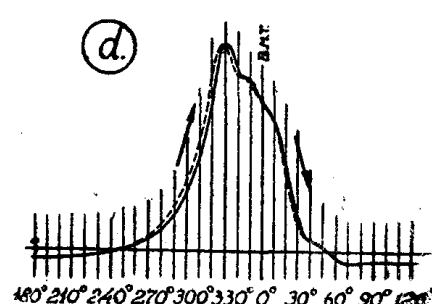
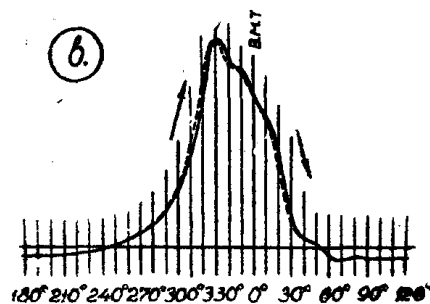
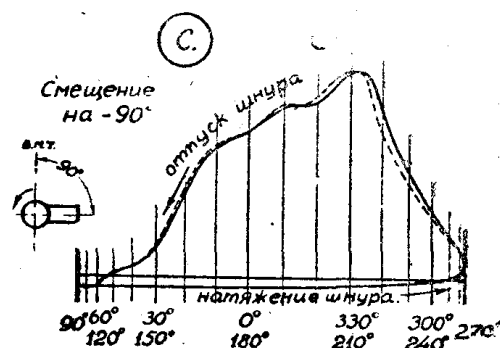
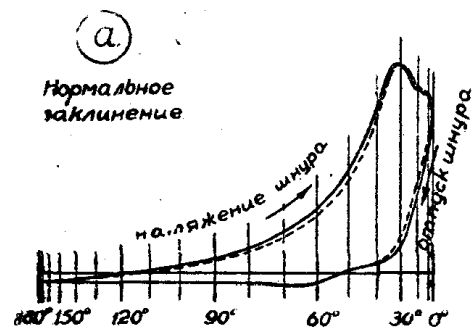


Рис. 8

Величина искажения диаграммы всецело зависит от типа применяемого соединения ходоуменьшителя с барабаном индикатора. При применении крученого хлопчатобумажного шнура эти искажения настолько значительны, что совершенно изменяется форма диаграммы, а ошибка в определении среднего индикаторного давления (площадь диаграммы) доходит до 25%. Плетеный пеньковый шнур дает несколько меньшие искажения, но и в этом случае они все же весьма заметны, а ошибка в определении среднего индикаторного давления достигает 10%. Несколько лучшие результаты дает применение шнура с медной прокладкой в соединении с проволокой на прямолинейном участке привода. Ошибка по площади диаграммы здесь составляет около 8%.

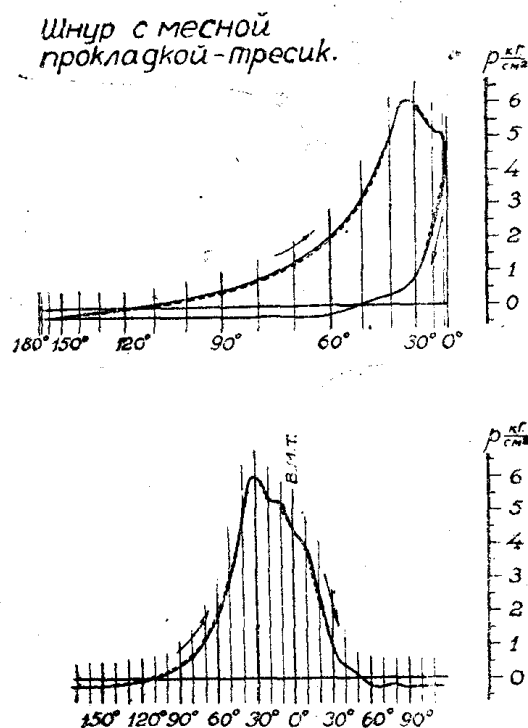


Рис. 9

Влияние угла заклинения
ходоуменьшителя.
(шнур с м. прокл. - проволока-шнур с м. прокл.)

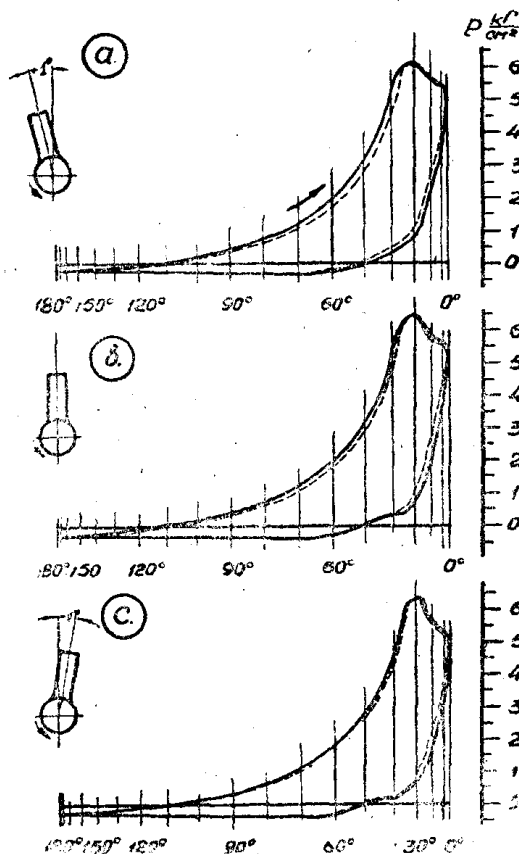


Рис. 10

Применить для съемки диаграмм сплошной (от ползунка ходоуменьшителя до барабана индикатора) тросик не удалось, так как при наличии двух перегибов в разных плоскостях в самом ходоуменьшителе Ткаченко тросик весьма быстро раскручивался и рвался. Попытки применения сплошной тонкой (0.2—0.3 мм) проволоки или скрипичной струны не увенчались успехом по тем же причинам. Чтобы получить все же диаграмму с наименьшими искажениями, пришлось применить шнур с медной жилой (в пределах самого ходоуменьшителя) в соединении с тросиком на прямолинейном участке привода и на барабане индикатора. В этом случае (рис. 9) искажения диаграммы действительно мало заметны. Тросик однако и в этом случае довольно быстро выходил из строя и рекомендовать его применение при съемке индикаторных диаграмм в обычных условиях не приходится.

Чтобы установить абсолютную величину возможных искажений по абсциссам индикаторной диаграммы, смещения кривых расширения и сжатия при различных углах поворота кривошипа на приведенных характерных

Смещения по абсциссам индикаторных диаграмм

а градусы криво- шип. окруж- ности	Хт действи- тельный ход поршня %	Хлопчато-бумажный кручевый шнур				Пеньковый плетеный шнур				Шнур с медной прокладкой—прово- лока—шнур с медной прокладкой				Шнур с медной проклад- кой—тросик			
		передний ход		задний ход		передний ход		задний ход		передний ход		задний ход		передний ход		задний ход	
		мм	‰	мм	‰	мм	‰	мм	‰	мм	‰	мм	‰	мм	‰	мм	‰
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.9	-0.6	-0.9	+0.5	+0.7	-0.3	-0.4	+0.5	+0.7	-0.4	-0.6	+0.7	+1.0	-0.2	-0.3	+0.3	+0.4
20	3.7	-1.8	-2.6	+0.6	+0.9	-0.8	-1.1	+0.4	+0.6	-0.7	-1.0	+0.7	+1.0	-0.3	-0.4	+0.4	+0.5
30	8.1	-3.2	-4.6	+1.6	+2.3	-1.7	-2.4	0.0	0.0	-0.7	-1.0	+0.8	+1.1	-0.2	-0.3	+0.3	+0.4
40	14.1	-4.3	-6.2	+1.7	+2.5	-1.9	-2.7	-0.3	-0.4	-0.6	-0.8	+1.0	+1.4	—	—	0.0	0.0
50	21.2	-5.7	-8.2	+2.3	+3.3	-1.2	-1.7	0.0	0.0	—	—	+1.4	+2.0	—	—	+0.7	+0.9
60	29.3	-5.7	-8.2	+2.4	+3.4	—	—	+1.2	+1.7	—	—	+1.4	+2.0	—	—	+0.9	+1.2
70	38.0	—	—	+2.4	+3.4	—	—	+1.3	+1.9	—	—	+1.4	+2.0	—	—	+1.1	+1.5
80	46.9	—	—	+2.7	+3.9	—	—	+1.3	+1.9	—	—	+2.1	+2.9	—	—	+1.3	+1.8
90	55.7	—	—	+2.8	+4.0	—	—	+1.3	+1.9	—	—	+2.2	+3.1	—	—	—	—
100	64.3	—	—	+3.1	+4.5	—	—	+2.4	+3.4	—	—	+2.4	+3.4	—	—	—	—
110	72.2	—	—	—	—	—	—	+2.8	+4.0	—	—	+2.4	+3.4	—	—	—	—
120	79.3	—	—	—	—	—	—	+4.0	+5.7	—	—	+2.4	+3.4	—	—	—	—
130	85.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+2.6	+3.6	—	—	—	—

диаграммах были замерены. Результаты этих замеров представлены в таблице 2, причем так как сделать их можно было лишь на участках диаграмм, соответствующих резкому изменению давления, данные не могли быть приведены для всех положений кривошипа. Величина линейных смещений по ходу поршня на первой его половине, как правило, нарастает по мере удаления от верхней мертвой точки и уменьшается при возвращении к ней. Это объясняется, очевидно, соответствующими изменениями в скорости перемещения привода. Смещения отрицательны (то-есть в сторону, обратную переднему ходу поршня) при отпуске шнура (передний ход) и положительны при его натяжении (задний ход), а их наибольшие абсолютные значения доходят до 4.5—8.2% хода поршня (до 15° угла поворота кривошипа) при применении хлопчатобумажного крученого шнура; 2.7—5.7%—при плетеном пеньковом шнуре; 1.0—3.6%—при шнуре с медной прокладкой и проволоке, и лишь при шнуре с медной прокладкой и тросике они составляют 0.4—1.8%.

Приведенный материал характеризует искажения индикаторных диаграмм, обуславливаемые деформациями в гибком соединении ходоуменьшителя с барабаном индикатора. Сам ходоуменьшитель здесь, будучи правильно установлен и выверен, не являлся источником заметных ошибок. Мы указывали, однако, что неправильная установка ходоуменьшителя также может послужить причиной весьма существенных искажений индикаторной диаграммы. В целях подтверждения этого обстоятельства приведем результаты одного из опытов с изменением угла заклинения ходоуменьшителя по отношению к кривошипу индицируемой машины. Представленные на рис. 10 три диаграммы сняты при одном и том же режиме работы компрессора и с применением одинаковых гибких соединений (шнур с медной прокладкой—проволока—шнур с медной прокладкой). Верхняя из них *a* снята при смещении ходоуменьшителя на 1 градус кривошипной окружности по направлению вращения машины, средняя *b*—при нормальном заклинении, и нижняя *c*—при смещении на 1 градус против направления вращения. Пунктирные кривые во всех случаях соответствуют правильной форме диаграммы, полученной перенесением одновременно снятой диаграммы по углу поворота кривошипа. Искажения обуславливаются в основном деформациями в гибком соединении, однако в случае *a* они еще более увеличены за счет смещения в установке ходоуменьшителя, а в случае *c* с этим смещением они в значительной мере скомпенсированы. Сопоставление этих диаграмм показывает, что даже такое незначительное изменение угла заклинения ходоуменьшителя резко изменяет форму и площадь диаграммы.

Заключение

Приведенные исследования не могут претендовать на их абсолютное значение; они не могут служить и основанием для установления общих поправок к искажениям индикаторных диаграмм за счет влияния привода. Последние вообще не могут быть установлены в общем случае, так как они определяются всякий раз конкретными особенностями ходоуменьшителя, формой, длиной и качеством гибких соединений. Если же говорить о площади индикаторной диаграммы, то и при данных линейных искажениях ошибка в ее величине будет зависеть от самой формы диаграммы, то-есть от особенностей той машины, индицирование которой проводится в данном конкретном случае.

Приведенные и описанные выше опыты, однако, со всей очевидностью показывают, как велики могут быть искажения индикаторной диаграммы за счет привода, и дают основание указать основные пути к их уменьшению. С этой точки зрения необходимо отметить следующее.

1. Получение правильной индикаторной диаграммы обуславливается не только исправным состоянием и достаточной быстроходностью самого индикатора, но в значительной мере зависит и от его привода. Искажения диаграммы за счет привода могут достигать весьма существенной величины, причем особенно сильно они сказываются на площади диаграммы, а следовательно—и на величине среднего индикаторного давления.

2. Для получения правильной индикаторной диаграммы необходимо иметь вполне исправный ходоуменьшитель, кинематически правильно передающий движение поршня индицируемой машины барабану индикатора. Это обстоятельство всякий раз должно быть специально проверено, причем внимание должно быть обращено не только на принципиальную правильность кинематической схемы ходоуменьшителя, но и на исправное состояние его механизма (зазоры в шарнирных соединениях и т. п.) и на правильную его установку (угол заклинения).

2. Наличие гибкой связи (шнура) между ходоуменьшителем и барабаном индикатора может служить источником совершенно недопустимых искажений индикаторной диаграммы, причем смещения отдельных ее точек по абсциссам, даже при сравнительно коротком, но не доброкачественном шнуре легко могут достигать несколько процентов от общей длины диаграммы. Изменения в площади диаграммы вследствие смещения линий сжатия и расширения в разные стороны измеряются при этом десятками процентов. В целях сокращения искажений индикаторной диаграммы вследствие этого обстоятельства следует применять по возможности короткий, с наименьшим числом наиболее плавных перегибов индикаторный шнур. Совершенно недопустимо применение крученого, легко вытягивающегося шнура. Наилучший результат дает пеньковый плетеный шнур с внутренней медной жилой; однако и он может являться причиной заметных искажений. Вследствие этого на прямолинейных участках привода шнур следует заменять тонкой (и легкой) стальной проволокой, оставляя гибкую связь лишь в тех местах, где она безусловно необходима (на роликах, на барабане индикатора и т. п.).

Учет возможности искажений индикаторной диаграммы вследствие несовершенства привода и принятие указанных выше мер к уменьшению этих искажений безусловно необходимы при любом исследовании работы поршневой машины с помощью механического индикатора.