

Л. Я. Волчок, Н. П. Цаюн

ПРОЦЕСС СЖАТИЯ ВОЗДУХА В ЦИЛИНДРЕ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПУСКЕ

Возможность возникновения первых вспышек топлива в цилиндре дизеля во время его пуска в холодном состоянии определяется температурой и давлением (а точнее, плотностью) воздуха в конце хода сжатия. Особенности условий протекания процесса сжатия при пуске, в результате которых эти параметры могут не достигнуть нужного уровня и двигатель не запустится, заключаются в следующем.

Во время пуска температура стенок цилиндра такая же, как у окружающего воздуха. Поэтому на протяжении всего процесса сжатия теплоотдача идет только в направлении от воздуха к стенкам. В то же время при работе двигателя температура воздуха в цилиндре на значительной части хода поршня в такте сжатия ниже температуры стенок, в связи с чем тепловой поток вначале направлен от стенок к воздуху и только на оставшейся части хода поршня меняет направление. В этом заключается одна из причин повышенной теплоотдачи в стенку при сжатии во время пуска.

Благоприятным фактором, снижающим теплоотдачу в стенку, является малая скорость вихревого движения воздуха в цилиндре во время пуска, чему соответствует и малый коэффициент теплоотдачи.

Угловая скорость вращения вала двигателя во время пуска мала и неравномерна, причем наиболее медленное вращение приходится на конец хода сжатия. Соответственно этому велика продолжительность такта сжатия, и как следствие — велики потери тепла в стенку.

По этой же причине возрастает и утечка воздуха из цилиндра через неплотности, что также понижает давление и температуру воздуха в конце сжатия. Анализ процесса сжатия с переменным количеством воздуха показывает [1], что давление p_c и температура T_c воздуха в конце сжатия следующим образом зависят от относительного количества воздуха в цилиндре и начальных значений

давления p_0 и температуры T_0 , которые для случая пуска холодного двигателя такие же, как у наружного воздуха:

$$p_c = p_0 \varepsilon^n m^n; \quad (1)$$

$$T_c = T_0 \varepsilon^{n-1} m^{n-1}. \quad (2)$$

Здесь $m = \frac{G_c}{G_a}$ — относительное количество воздуха в цилиндре в конце сжатия; Q_a и G_c — количество воздуха в цилиндре в начале и конце сжатия.

При медленном вращении вала двигателя сжатие воздуха начинается только после полного закрытия впускного клапана. До этого времени воздух вытесняется поршнем через открытый клапан обратно во впускную трубу. Поэтому в расчетах следует принимать не конструктивную ε , а действительную ε_d степень сжатия. Последняя, исходя из кинематических соотношений для кривошипно-шатунного механизма, может быть следующим образом выражена в зависимости от угла запаздывания закрытия впускного клапана $\varphi_{в.к}$:

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[1 + \cos \varphi_{в.к} + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi_{в.к}) \right] + 1. \quad (3)$$

Один из способов повышения действительной степени сжатия состоит в увеличении зазора в клапанном механизме [2]. При этом не только повышается степень сжатия, но и увеличивается количество воздуха, поступающего в цилиндр во время пуска двигателя. Установление повышенных зазоров в клапанном механизме с последующим сокращением их до нормальной величины возможно осуществить при помощи штанг из материала с большим коэффициентом теплового расширения или путем применения особого гидравлического толкателя.

Для уменьшения утечек воздуха из цилиндра через неплотности можно заливать в цилиндры уплотнительную смесь, состоящую из масла и дизельного топлива [3].

Чтобы повысить температуру воздуха в конце сжатия, применяют различного рода подогреватели (электрические, факельные). Подогреватели устанавливаются во впускной системе или непосредственно в цилиндре (электрические свечи накаливания).

Изучению влияния перечисленных здесь факторов и вспомогательных средств на температуру и давление воздуха в конце сжатия и посвящена настоящая работа.

Объектом испытания служил тракторный двигатель Д-50 с размерностью цилиндра 110×125 мм и мощностью 50 л. с. при 1700 об/мин. Опыты проводились на специальной экспериментальной установке [4], предназначенной для исследования пуска автотракторных дизелей при низких температурах. Установка включает холодильную камеру и пусковое устройство с электростарте-

ром, вынесенное за пределы камеры и позволяющее проворачивать двигатель с различными скоростями. Во время испытаний двигатель прокручивался электростартером без подачи топлива в цилиндры. При этом снимались осциллограммы, содержащие запись следующих величин: а) давления воздуха в цилиндре; б) температуру его; в) отметки углового перемещения коленчатого вала через каждые 5 или 10°; г) отметки начала открытия и конца закрытия впускного клапана; д) отметки в. м. т.; е) отметки времени.

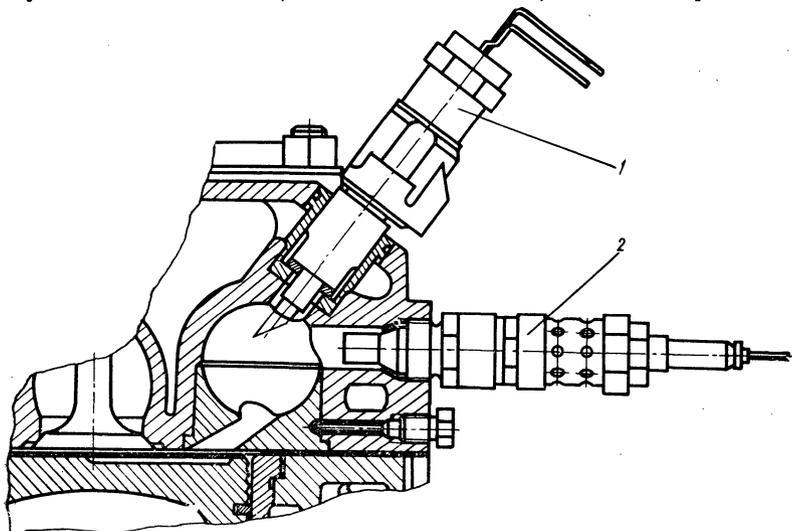


Рис. 1. Установка датчиков температуры (1) и давления (2) в вихревой камере

Давление измерялось при помощи пьезоэлектрического индикатора, а температура — термометром сопротивления из вольфрамовой проволоки диаметром 7 мм. Датчик температуры 1 (рис. 1) устанавливался на место форсунки, а датчик давления 2 — на место свечи накаливания. Конфигурация датчиков и штуцера для установки выбиралась с таким расчетом, чтобы не вызвать изменения степени сжатия в испытуемом цилиндре. Датчики устанавливались в первом и третьем цилиндрах.

Отметки углового перемещения коленчатого вала наносились на осциллограмму при помощи диска со щелями, насаженного на коленчатый вал, оптического устройства с источником света и фотоэлемента с усилителем фототокков. Запись фазы открытия впускного клапана производилась с помощью устройства, состоящего из упругой пластины, опирающейся на коромысло клапанного механизма. На пластину наклеивались два тензометрических датчика, которые позволили записывать деформацию пластины во время открытия клапана.

Запись производилась на осциллографе Н-117. Осциллограф включался до начала вращения вала, и запись продолжалась на

протяжении 5—7 циклов. Каждый опыт повторялся трижды с перерывами не менее 5 мин. Образец осциллограммы приведен на рис. 2. На осциллограмме выявляются характерные особенности протекания диаграмм давления и температуры воздуха в цилиндре.

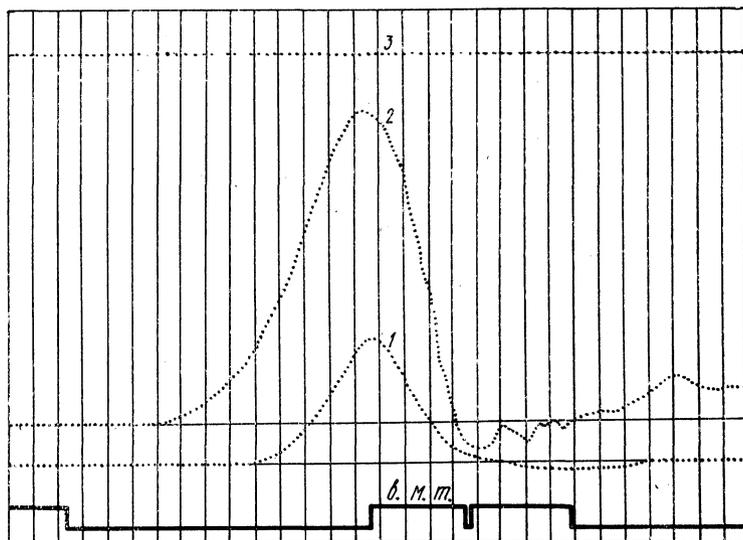


Рис. 2. Осциллограмма сжатия и расширения воздуха в цилиндре дизеля при малом числе оборотов:

1 — давление; 2 — температура; 3 — угловые отметки через 5° поворота коленчатого вала

Вследствие утечек воздуха из цилиндра и односторонней теплоотдачи (от воздуха к стенкам) давление и температура воздуха в конце расширения оказываются меньшими, чем были в начале сжатия; давление на 0,20—0,25 кг/см², а температура на 40—60°С ниже, чем у наружного воздуха.

Обработка результатов эксперимента сводилась к графическому представлению и определению показателя политропы сжатия и относительного количества воздуха. Определение показателя политропы и относительного количества воздуха производилось на основании решения уравнений (1) и (2) заменой в них конструктивной степени сжатия двигателя ϵ на действительную степень сжатия ϵ_d . У двигателя Д-50 $\epsilon = 16$, а ϵ_d соответственно углу запаздывания закрытия впускного клапана $\varphi_{в.к} = 46^\circ$ получается на основании выражения (3) равной 14,2.

Обозначим относительное давление конца сжатия через $\pi_{с.т. е.}$

$$\frac{p_c}{p_0} = \pi_{с.т. е.} \quad (4)$$

и соответственно относительную температуру конца сжатия через θ_c :

$$\frac{T_c}{T_0} = \theta_c. \quad (5)$$

Из уравнений (1) и (2) получаем:

$$\pi_c = \varepsilon_d^n m^n$$

и

$$\theta_c = \varepsilon_d^{n-1} m^{n-1},$$

откуда

$$m = \frac{\pi_c}{\theta_c \varepsilon_d}; \quad (6)$$

$$n = \frac{\lg \pi_c}{\lg \pi_c - \lg \theta_c}. \quad (7)$$

Для сопоставления относительного количества воздуха в конце сжатия m с относительной величиной утечки воздуха через неплотности цилиндра δ , определяемой опытным путем, отыщем связь между ними. В соответствии с принятой методикой определения утечек [3] величина δ выражает отношение количества воздуха ΔG , вытекшего из цилиндра за такты сжатия и расширения, к количеству воздуха G_3 , поступившего в цилиндр в такте впуска к моменту закрытия впускного клапана, т. е.

$$\delta = \frac{\Delta G}{G_3}. \quad (8)$$

Величина m выражает отношение всего количества воздуха в цилиндре в конце сжатия ко всему количеству его в начале сжатия, поэтому в ней учитывается утечка только за время сжатия. Если обозначить через ψ долю утечки воздуха, приходящуюся на такт сжатия, то величину m можно выразить так:

$$m = \frac{G_3 + G_{к.с} - \psi \Delta G}{G_3 + G_{к.с}}. \quad (9)$$

Здесь $G_{к.с}$ — вес воздуха, заключенного в объеме камеры сжатия V_c , по состоянию на конец впуска. В случае холодного пуска двигателя $G_{к.с} = V_c \gamma_0$, где γ_0 — удельный вес наружного

воздуха. Точно так же вес зашедшего в цилиндр воздуха к моменту закрытия впускного клапана G_3 можно выразить в виде $G_3 = V_h^1 \gamma_0$, где V_h^1 — рабочий объем цилиндра за вычетом части объема, потерянной в результате запаздывания закрытия впускного клапана.

Учитывая, что

$$\frac{G_{к.с}}{G_3} = \frac{V_c \gamma_0}{V_h^1 \gamma_0} = \frac{1}{\epsilon_d - 1},$$

и принимая во внимание равенство (8), нетрудно получить искомое соотношение в следующем виде:

$$\delta = \frac{1 - m}{\psi \left(1 - \frac{1}{\epsilon_d} \right)}. \quad (10)$$

Долю утечки воздуха из цилиндра ψ , приходящуюся на такт сжатия, можно вычислить из осциллограммы давления и температуры, если допустить, что суммарное проходное сечение всех неплотностей цилиндра остается неизменным. Тогда приняв его за

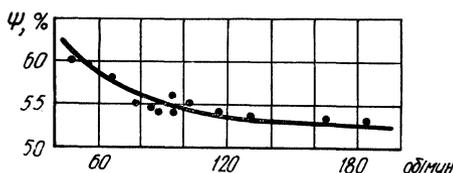


Рис. 3. Доля утечки воздуха из цилиндра, приходящаяся на такт сжатия

единицу и разбив осциллограмму на интервалы, соответствующие одинаковым изменениям объема, можно по формулам истечения вычислить для каждого интервала утечку воздуха. Просуммировав найденные для каждого интервала утечки за такт сжатия и за оба такта (т. е. за сжатие и расширение), можно найти долю утечки ψ , приходящуюся на такт сжатия. Результаты этих расчетов представлены на рис. 3, из которого видно, что по мере повышения числа оборотов значение коэффициента ψ уменьшается, приближаясь к 0,5 при числе оборотов свыше 220 в минуту.

Выражение (10) позволяет вычислять величину утечек δ по относительному количеству воздуха в цилиндре в конце сжатия m , определяемому из осциллограмм давления и температуры.

Проведенные расчеты показали, что определяемая таким путем величина утечки воздуха несколько превышает величину ее, определяемую опытным путем.

Так как принятая методика и примененные измерительные устройства для определения утечек воздуха [2] исключают возможность заметных погрешностей в вычислении величины δ , то эти расхождения могут быть вызваны только погрешностями в определении величин ψ и m в сторону их уменьшения.

Чтобы определить влияние на параметры состояния воздуха в конце сжатия продолжительности прокручивания, сняты непрерывные осциллограммы на протяжении 15 сек при разных скоростях вращения, чему соответствуют от 30 до 40 циклов. Результаты этих опытов представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Давление и температура воздуха в конце сжатия при длительной прокрутке двигателя

Число оборотов	P_c			T_c		
	1-й цикл	2—5-й циклы	Последующие циклы	1-й цикл	2—5-й циклы	Последующие циклы
<i>об/мин</i>	$\kappa\Gamma/\text{см}^2$	$\kappa\Gamma/\text{см}^2$	$\kappa\Gamma/\text{см}^2$	°К	°К	°К
144	32,0	34,0—33,5	33,0	560	600—580	585
178	33,0	36,0	35,5	575	625	630
234	33,5	36,5	36,0	580	640	644
276	35,0	38,0	37,0	—	—	—

Таким образом, лишь для первого цикла давление и температура заметно ниже значений, соответствующих данному скоростному режиму. Это объясняется более низкой средней угловой скоростью вращения коленчатого вала в начале прокрутки. В дальнейшем давление достигает своего наибольшего значения на протяжении примерно четырех последующих циклов, а затем слегка снижается. То же наблюдается и с температурой, но без снижения при дальнейшей прокрутке. Однако разница в величинах давления и температуры от цикла к циклу очень мала, и поэтому можно считать, что при длительной прокрутке условия в конце сжатия практически остаются неизменными.

Влияние скорости вращения вала и состояния смазки цилиндра на давление и температуру конца сжатия показано на рис. 4.

Наибольший рост давления и температуры сжатия с увеличением скорости вращения наблюдается в области малых чисел оборотов. Начиная со 175—200 *об/мин* и выше, они очень слабо изменяются.

Для оценки уплотняющего действия в цилиндре смазочного масла проведены три серии опытов: после длительной (до 30 дней) стоянки двигателя (рис. 4, кривые 3 и 3'), спустя одни сутки после остановки двигателя (кривые 2 и 2') и с заливкой в цилиндры по 20 см^3 смеси смазочного масла с дизельным топливом в пропорции 2:1 непосредственно перед прокруткой (кривые 1 и 1').

В опытах по прокрутке двигателя после длительной стоянки давление конца сжатия на 6—7 $\kappa\Gamma/\text{см}^2$, а температура на 45—50° С получились ниже, чем при прокрутке двигателя, простоявшего лишь одни сутки. Это снижение давления и температуры, по-видимому, обусловлено стеканием и частичным испарением слоя смазки на стенках цилиндра и поршня, что ухудшало уплотнение поршня

в цилиндре и приводило к повышенным утечкам воздуха из него. Для проверки этого предположения были проведены дополнительные опыты по измерению утечки воздуха. Результаты этих опытов показали, что после длительной стоянки двигателя утечки воздуха из цилиндра в диапазоне скоростей вращения 50—250 об/мин изменялись в пределах $\delta=45-15\%$ против 27—7% на двигателе после суточной стоянки.

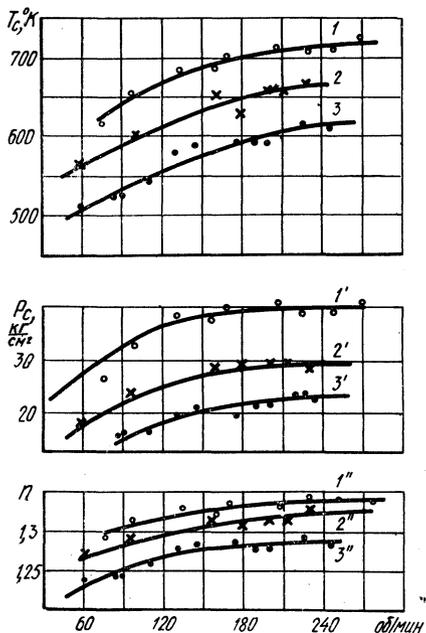


Рис. 4. Зависимость давления и температуры конца сжатия от числа оборотов и от состояния смазки цилиндра:

1 — опыты с заливкой 20 см³ топливомасляной смеси; 2 — опыты спустя одни сутки после запуска двигателя; 3 — опыты после длительной стоянки двигателя (30 дней)

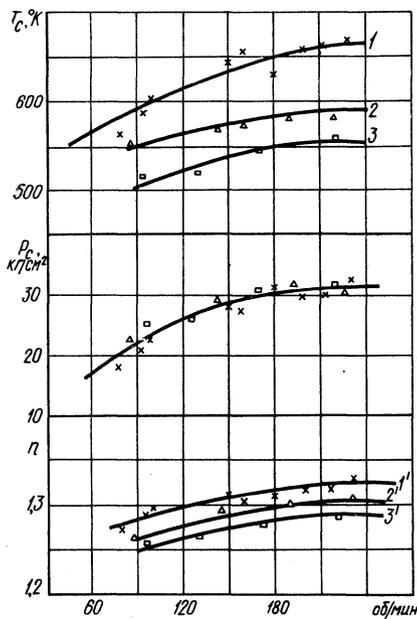


Рис. 5. Влияние температуры окружающего воздуха и двигателя на состояние его в конце сжатия:

1 — $t=+10^\circ\text{C}$; 2 — $t=-5^\circ\text{C}$; 3 — $t=-15^\circ\text{C}$

Опыты с заливкой в цилиндры смеси масла с топливом через свечное отверстие показали, что уплотнение поршня в цилиндре значительно улучшается, в результате чего давление (кривая 1') и температура (кривая 1) конца сжатия возрастают. Поэтому заливка уплотнительной жидкости может существенно улучшить пусковые качества двигателя. Однако при этом заметно возрастает момент сопротивления прокручиванию, из-за чего применение этого средства возможно только при исправном состоянии пусковой системы и полностью заряженной батарее.

Влияние температуры воздуха и двигателя на параметры конца сжатия показано на рис. 5.

Изменение начальной температуры в пределах от $+10^{\circ}\text{C}$ до -15°C приводит к снижению температуры конца сжатия примерно на $50-60^{\circ}$. Давление при этом остается без изменения и лишь при больших оборотах слегка снижается при повышении температуры.

На рис. 6 показано влияние на параметры конца сжатия фаз открытия впускного клапана или, что то же, действительной степени сжатия. Кривые 1 и 3 показывают изменение давления и температуры конца сжатия при нормальных фазах открытия впускно-

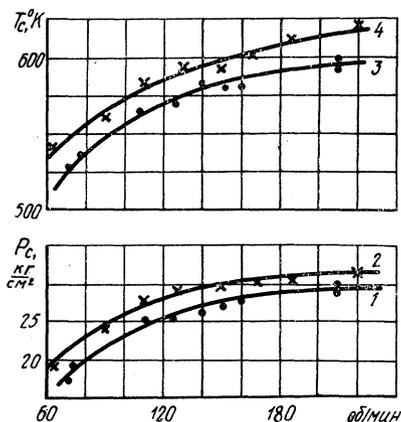


Рис. 6. Влияние фаз (действительной степени сжатия) на параметры конца сжатия:

1, 3 — с нормальными фазами; 2, 4 — с уменьшенными фазами

го клапана (10° до в. м. т. и 46° после н. м. т.), чему соответствует действительная степень сжатия 14,2; кривые 2 и 4 — то же, но при сокращенных фазах (5° после в. м. т. и 25° после н. м. т.) и действительной степени сжатия, равной 15,48.

Происшедшее при этом повышение давления и температуры конца сжатия почти полностью соответствует увеличению действительной степени сжатия.

Опыты по изучению влияния подогрева воздуха на его температуру в конце сжатия проводились с четырьмя видами нагревательных устройств:

а) четыре свечи накаливания типа СНД-100Б3 суммарной мощностью 280 вт, установленных в вихревых камерах цилиндров;

б) две свечи накаливания типа СН-150 суммарной мощностью 240 вт, установленные во впускной трубе против подводящих патрубков;

в) один фланцевый подогреватель мощностью 400 вт, установленный у входного фланца впускной трубы;

г) электрофакельный подогреватель, установленный у входного фланца впускной трубы.

Опыты показали, что эффективность свечей накаливания сравнительно невысокая (рис. 7): при $t = -15^{\circ}\text{C}$ свечи, установленные в вихревых камерах, повышают температуру конца сжатия на $30-35^{\circ}$, а установленные во впускном трубопроводе — на $10-20^{\circ}$. Последние цифры достаточно хорошо согласуются с результатами

измерения температуры воздуха на входе в цилиндр [2]. При включении свечей накаливания, установленных во впускном трубопроводе, температура воздуха на входе в цилиндр повышается на 5—8°. Такому повышению температуры воздуха на входе в цилиндр при степени сжатия 14,2 и среднем показателе политропы 1,3 соответствует увеличение температуры конца сжатия на 11—18°.

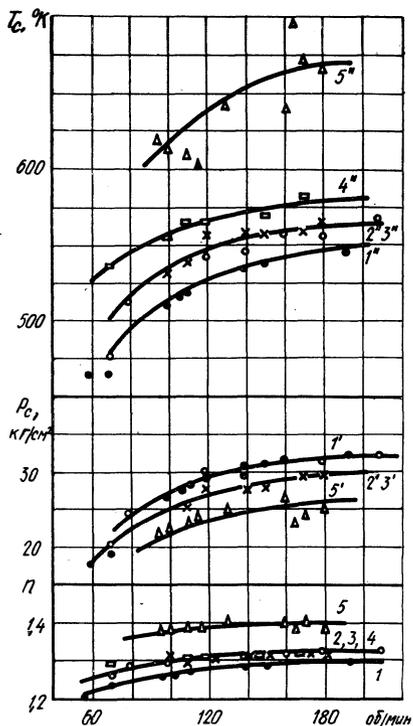


Рис. 7. Влияние различных средств подогрева впускного воздуха на параметры конца сжатия дизеля при пуске:

1 — опыты без средств подогрева; 2 — опыты с применением двух свечей СН-150; 3 — опыты с применением фланцевого подогревателя; 4 — опыты с применением четырех свечей СНД-10Б3; 5 — опыты с применением электрофакельного подогревателя

Нетрудно подсчитать, каково должно быть повышение температуры воздуха на входе в цилиндр при полном использовании тепла, выделенного свечами накаливания. Свечи накаливания мощностью 240 *вт* выделяют в час 175 *ккал*. Часовой расход воздуха у двигателя Д-50 при 200 *об/мин* и коэффициенте наполнения 0,88 [2] составляет около 32,5 *кг*. При полном использовании тепла должно происходить повышение температуры этого количества воздуха на 22°, вместо 5—8° в действительности.

Столь низкий коэффициент полезного действия (около 25%) свечей накаливания обусловлен целым рядом причин: велико излучение тепла раскаленной спиралью свечи, которое не воспринимается воздухом, а попадает на стенки трубы; велика доля тепла, передающегося через арматуру свечи к стенкам трубы, и, наконец, отдача тепла подогретым воздухом стенкам трубы.

В электрофакельном подогревателе воздух нагревается факелом горящего дизельного топлива, которое распыливается жиклером и поджигается свечой накаливания. Расход топлива составляет около 5 *г* в минуту. Допуская полное сгорание его, нетрудно

показать, что тепловая мощность подогревателя эквивалентна примерно 4 000 *вт*, т. е. в десять с лишним раз больше мощности электрических подогревателей. В соответствии с этим повышение температуры конца сжатия при включении электрофакельного подогревателя достигает 100—140°.

При подогреве воздуха на впуске давление конца сжатия слег-

ка понижается (на $1-2 \text{ кг/см}^2$), что может быть объяснено большей теплоотдачей в стенки подогретым воздухом.

Показатель политропы сжатия при прокручивании двигателя со скоростью 200 об/мин лежит в пределах $1,28-1,32$ и несколько снижается при меньших скоростях.

Выводы

1. С увеличением числа оборотов прокручивания двигателя температура и давление конца сжатия возрастают, однако темпы роста постепенно замедляются, и при скоростях свыше 200 об/мин они практически остаются неизменными.

2. На величину давления и температуры конца сжатия сильное влияние оказывает состояние слоя смазки цилиндра-поршневой группы, от которого зависит уплотнение цилиндра и соответственно величина утечки воздуха. После длительной стоянки двигателя (свыше месяца) слой смазки сильно истощается (стекает, высыхает), в результате чего давление и температура конца сжатия получаются очень низкими.

3. Уменьшение угла запаздывания закрытия впускного клапана приводит к увеличению действительной степени сжатия и может существенно повысить давление и температуру воздуха в конце сжатия.

4. Повышение или понижение температуры окружающего воздуха на определенную величину вызывает соответствующее изменение температуры конца сжатия на величину, в $2,2-2,4$ раза большую. Давление конца сжатия при этом остается практически неизменным.

5. Применение подогревающих устройств по-разному изменяет температуру конца сжатия.

Свечи накалывания, установленные в вихревой камере, повышают ее на $30-35^\circ$, установленные во впускной трубе — на $10-20^\circ$, электрофакельный подогреватель — на $100-140^\circ$. Подсчеты показывают, что эффективность использования тепла подогревателей не превышает 25% .

6. Показатель политропы сжатия при прокручивании двигателя лежит в пределах $1,26-1,32$, причем большие значения соответствуют большим скоростям прокручивания.

Л и т е р а т у р а

[1] Волчок Л. Я., Цаюн Н. П., Прокашко П. В. К вопросу о термодинамических процессах при переменном количестве газа. — «Изв. вузов. Энергетика», 1972, № 2. [2] Волчок Л. Я., Цаюн Н. П., Прокашко П. В. Исследование наполнения и утечек заряда через неплотности цилиндров при пуске тракторного дизеля. — Труды Белорус. ин-та механизации сельск. хоз-ва. Вып. 24. Горки, 1972. [3] Буртакова В. Я. Влияние жидкостного уплотнения деталей цилиндропоршневой группы на пусковые свойства двигателя Д-21М. — «Тракторы и сельскохозяйственные машины», 1969, № 5. [4] Волчок Л. Я., Прокашко П. В. Экспериментальная установка и методика исследования пуска тракторных двигателей при низких температурах. — В сб.: Автомобиле- и тракторостроение. Исследование автотракторных двигателей. Минск, 1971.