

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В-400 ПРИ ЕГО ФОРСИРОВАНИИ

А.М. Ларцев, к.т.н., доцент
Волгоградский государственный технический университет

Таблица 1

| Параметр | Численные значения параметров по уровням форсирования | | | | | | |
|---------------|---|------|------|------|------|------|------|
| | 400 | 450 | 450 | 470 | 470 | 500 | 500 |
| N_e , л. с. | 400 | 450 | 450 | 470 | 470 | 500 | 500 |
| n , об/мин | 1700 | 1700 | 1750 | 1750 | 1800 | 1750 | 1800 |

Приведены результаты экспериментальных исследований рабочих параметров при форсировании тяжелого тракторного двигателя воздушного охлаждения типа В-400. Выполнен анализ изменения эффективных показателей двигателя при форсировании по среднему эффективному давлению и частоте вращения коленчатого вала до мощности 500 л. с. Дана оценка надежности головки цилиндров по параметру теплонапряженности.

Область применения двигателей воздушного охлаждения большой мощности достаточно широка: бульдозер, трубоукладчик, дизель-генератор, насосная станция, силовая установка для большегрузного автомобиля и т. д. Особенно отметим их приспособленность для эксплуатации в экстремальных условиях. Для производителя важно при одной компоновочной схеме остова и едином типоразмере цилиндро-поршневой группы получить широкий диапазон рабочих номинальных мощностей в пределах допустимых ограничений для основных параметров двигателя. Надо отметить, что по сравнению с двигателем жидкостного охлаждения, форсирование двигателя воздушного охлаждения по среднему эффективному давлению задача более сложная, поскольку рост температур цилиндро-поршневой группы и особенно головки цилиндра может быть недопустимым. Возможны также проблемы с надежностью работы кривошипно-шатунного механизма, коренных опор коленчатого вала, связанные с недостаточной жесткостью остова двигателя воздушного охлаждения.

С целью расширения возможной области применения двигателя В-400 воздушного охлаждения были проведены его стендовые испытания при различных уровнях форсирования [4]. С определением индикаторных и эффективных показателей и оценкой уровня теплонапряженности головки цилиндра.

В табл. 1 приведены уровни форсирования двигателя, при которых проводились его стендовые испытания.

Проведение работ включало следующие этапы [3]:

- регулировку двигателя на выбранный уровень форсирования;
- определение оптимального угла подачи топлива $\theta_{впр\text{ опт}}$ по критерию минимального удельного эффективного расхода топлива $g_e \rightarrow \min$;
- определение рабочих параметров при работе по регуляторной характеристике двигателя при $\theta_{впр\text{ опт}}$;
- термометрирование головки цилиндра при работе по регуляторной характеристике (схема расположения термопар на днище головки цилиндра приведена на рис. 1);
- определение индикаторных и эффективных показателей двигателя.

Оптимальный угол опережения впрыска топлива определялся на номинальном режиме для каждого уровня форсирования по критерию $g_e \rightarrow \min$. Как показали результаты испытаний, оптимальный угол опережения впрыска топлива зависит исключительно от оборотов коленчатого

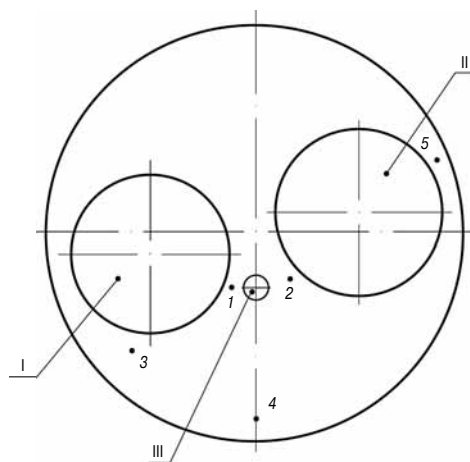


Рис. 1. Схема расположения термопар на днище головки цилиндра:

I — отверстие выпускного клапана; II — отверстие впускного клапана; III — отверстие под форсунку; 1–5 — номера термопар

Основные эффективные показатели двигателя В-400 при его форсировании

| Модель ДВС | N_e , кВт/л.с. | n , об/мин | g_e , г/кВт·ч | p_e , МПа | p_z , МПа | $(dp/d\phi)_{\max}$, МПа/град | $\theta_{\text{впр орт}}$, град | $N_{\text{мп}}$, кВт | T_{T_r} , К | $T_{T_{\text{ц}}}$, К | $T_{T_{\text{ц}}}$, К | α |
|------------|------------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------|------------------------|------------------------|----------|
| В-400 | 315/428 | 1700 | 209 | 0,84 | 10,5 | 0,50 | 27 | 65 | 791 | 384 | 372 | 1,92 |
| В-450 | 332/452 | 1700 | 210 | 0,91 | 10,4 | 0,41 | 27 | 65 | 805 | 388 | 376 | 1,88 |
| В-450 | 334/454 | 1750 | 221 | 0,89 | 10,6 | 0,40 | 28 | 79 | 817 | 389 | 383 | 1,91 |
| В-470 | 343/467 | 1750 | 220 | 0,91 | 11,2 | 0,40 | 28 | 76 | 836 | 391 | 380 | 1,89 |
| В-470 | 344/468 | 1800 | 221 | 0,88 | 11,0 | 0,42 | 30 | 111 | 853 | 397 | 385 | 1,88 |
| В-500 | 370/503 | 1750 | 221 | 1,00 | 12,0 | 0,44 | 28 | 81 | 860 | 397 | 388 | 1,81 |
| В-500 | 376/511 | 1800 | 221 | 0,97 | 11,5 | 0,44 | 30 | 113 | 853 | 401 | 388 | 1,81 |

Примечание: g_e — удельный эффективный расход топлива; p_e — среднее эффективное давление; p_z — максимальное давление сгорания; $(dp/d\phi)_{\max}$ — максимальная скорость нарастания давления; $N_{\text{мп}}$ — мощность механических потерь; T_{T_r} — температура отработавших газов; $T_{T_{\text{ц}}}$ — температура головки цилиндра в месте установки регулятора температуры двигателя (РТД) при температуре окружающей среды $T_{\text{окр}}$ в момент испытания двигателя; $T_{T_{\text{ц}}}$ — условная температура головки цилиндра, определенная по следующей зависимости: $T_{T_{\text{ц}}} = T_{T_{\text{ц}}} - T_{\text{окр}} + 20$ К, где $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды в момент испытаний двигателя; α — коэффициент избытка воздуха

вала, а номинальная мощность двигателя заметного влияния на $\theta_{\text{впр орт}}$ не оказывает. Было отмечено, что с ростом оборотов коленчатого вала и соответственно механических потерь двигателя чувствительность удельного расхода топлива g_e к изменению $\theta_{\text{впр}}$ возрастает.

В табл. 2 приведены основные показатели двигателя при различных уровнях форсирования.

Характер изменения удельного эффективного расхода топлива в основном зависит от качества рабочего процесса и мощности механических потерь двигателя при его форсировании. Так, при увеличении мощности двигателя с 400 до 450 л. с. при постоянной частоте вращения 1700 об/мин, g_e увеличивается лишь на 0,8г/кВт·ч, что находится в пределах погрешности измерений, то есть можно считать, что расход топлива практически остается постоянным. Иная картина наблюдается при увеличении мощности за счет увеличения оборотов коленчатого вала до 1750 об/мин. Расход топлива возрастает примерно на 10 г/кВт·ч, хотя заметного увеличения мощности механических потерь не наблюдается (рост всего на 10–15 кВт). Видимо, в этом случае увеличение расхода топлива связано с изменением характера смесеобразования и горения топлива вызванным увеличением частоты вращения коленчатого вала. Двигатель оснащен камерой сгорания ЦНИДИ с объемно-пленочным способом смесеобразования [2]. Возможно, с ростом частоты вращения произошло увеличение пленочной доли смесеобразования, что и приводит к увеличению расхода топлива. Наблюдаемый рост температур днища головки цилиндра, по которому косвенно можно оценивать динамику изменения температуры стенок камеры сгорания, по-видимому, не достаточен для интенсификации процесса испарения и сгорания топлива.

При дальнейшем форсировании двигателя по мощности до 510 л. с., с увеличением частоты вращения коленчатого вала до 1800 об/мин, удельный эффективный расход топлива остается неизменным и находится в пределах точности измерений. То есть наблюдается явная неоднозначность влияния роста частоты вращения коленчатого вала и среднего эффективного давления на расход топлива. Поэтому различные этапы форсирования оказывают разное влияние на качество рабочего процесса и каждый этап форсирования требует экспериментальной оценки и при необходимости доводки рабочего процесса двигателя.

Для вариантов регулирования $N_e = 400$ –450 л. с. значения p_z можно считать постоянными при различной номинальной частоте вращения. Только при дальнейшем росте мощности двигателя максимальное давление сгорания p_z имеет общую тенденцию к росту при оборотах коленчатого вала 1750 и 1800 об/мин. При варианте регулирования 500 л. с./1750 об/мин p_z достигает максимума в 12 МПа. Динамика изменения скорости нарастания давления идентична изменению p_z . Практика эксплуатации и результаты исследовательских работ по форсированию двигателя 8ЧВН15/16 показали, что стабильная, надежная и безотказная работа двигателя обеспечивается при значении p_z не более 11 МПа. Как видно, данное условие выполняется при увеличении мощности до $N_e = 470$ л. с. Дальнейшее форсирование двигателя, требует тщательной оценки работоспособности его основных сопряжений (цилиндро-поршневой группы, кривошипно-шатунного механизма, головки цилиндра) с помощью испытаний на надежность.

В двигателях воздушного охлаждения одним из элементов, определяющим его технический уровень, является головка цилиндра. Не достаточно

жесткая и чувствительная к изменению температур конструкция требует особого внимания при форсировании двигателя. Оценка теплового состояния головки цилиндра при форсировании двигателя 8ЧВН15/16 осуществлялась двумя путями:

➤ измерением температуры в месте установки РТД $T_{гн}$ (табл. 2);

➤ измерением температур на днище головки цилиндра в точках 1–5 (рис. 2).

В точках 3 и 4 значения температур близки, поэтому на рис. 2 приведены значения температур только в точке 3, так как она расположена ближе к выпускному каналу и температуры здесь несколько выше.

Температура головки цилиндра в месте установки РТД при форсировании двигателя растет незначительно (максимальный прирост составляет 17°C при форсировке до $N_e = 500$ л. с. и $n = 1750$ об/мин). При этом температура головки (см. табл. 2) для всех вариантов форсирования не выходит за допустимый предел, определяемый техническими условиями на двигатель В-400, и равным 413°C . Более корректной является оцен-

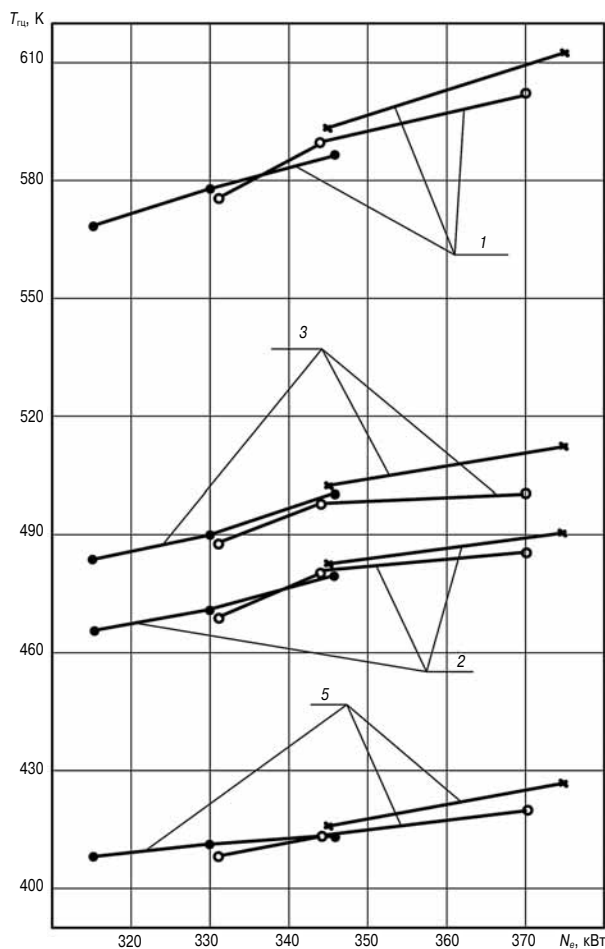


Рис. 2. Изменение температур на днище головки цилиндра при форсировании двигателя:

1–3, 5 – номера термопар; ● – $n = 1700$ об/мин; ○ – $n = 1750$ об/мин; × – $n = 1800$ об/мин

ка температурного поля головки цилиндра со стороны камеры сгорания в характерных точках. На рис. 2 приведены измеренные значения температур днища головки цилиндра. Как видим, наблюдается монотонный рост температур во всех характерных точках при форсировании двигателя. Наиболее опасными с точки зрения появления термоусталостных трещин являются точки 1 и 2. Максимальные значения температур в этих точках составляют 613 и 491 К соответственно и достигаются в варианте форсирования 500 л. с./1800 об/мин, что не превышает максимально допустимой температуры головки цилиндра по материалу АЛ-25 равной 623°C . Вызывает только некоторую озабоченность рост градиента температур между точками 1–2, который на указанном режиме достигает 122°C и может привести к термоусталостному разрушению межклапанных перемычек при длительной работе. Можно отметить достаточно хорошую конструктивную проработку головки цилиндра двигателя, что позволяет проводить работы по его форсированию. Однако окончательное заключение по работоспособности головки цилиндров может быть получено только после ресурсных стендовых испытаний двигателя или на ускоренных циклах нагружения.

Температура отработавших газов перед газовой турбиной $T_{гт}$ (табл. 2) с ростом форсирования увеличивается от 791 К (при варианте форсирования 400 л. с./1700 об/мин) до 860 К при варианте 500 л. с./1750 об/мин. При всех вариантах форсирования температура отработавших газов не выходит за предельное значение 943 К, равное и установленное технической документацией на двигатель В-400. На режиме 500 л. с./1800 об/мин достигаются максимальные значения температур в точках 1, 2, в то время как максимальная температура отработавших газов наблюдается на режиме 500 л. с./1750 об/мин, при этом температура головки в точке 1 ниже на $8–10^\circ\text{C}$.

На практике при испытаниях двигателя воздушного охлаждения одним из определяющих факторов, позволяющих оценить его предельное тепловое состояние, является температура отработавших газов, предельное значение которой регламентируется в технической документации двигателя. Как показывают полученные данные, при форсировании двигателя температура отработавших газов не всегда корректно отражает тепловое состояние головки цилиндра в наиболее нагретых точках. Значение температуры головки цилиндра в штатной точке (место установки РТД) также не дает полного представления о фактических значениях температур в наиболее нагретых зонах днища. Оценка теплового состоя-

ния двигателя воздушного охлаждения большой мощности должна производиться комплексно с учетом ряда факторов, определяющим из которых является значение эффективной мощности двигателя. Предельное значение мощности может быть определено только путем проведения термометрирования днища головки цилиндра в зоне межклапанных перемычек с последующими испытаниями на надежность.

Выполненный цикл экспериментальных исследований подтверждает возможность форсирования двигателя воздушного охлаждения до мощности 500 л. с. при частоте вращения 1800 об/мин по условию прочности и теплонапряженности деталей камеры сгорания базовой конструкции.

Следующий цикл исследований предусматривает нормализацию выбросов вредных веществ с отработавшими газами.

Выпускавшийся серийно двигатель В-400 по своим экологическим показателям полностью соответствовал требованиям действовавшего на тот период ГОСТ 17.2.2.05–97. В настоящее время экологические показатели для рассматриваемых двигателей регламентируются ГОСТ Р 41.96–2011 [1], действующим с 1 марта 2013 г. В соответствии с требованиями этого стандарта значения выбросов вредных веществ не должны превышать следующих значений: оксид углерода $CO \leq 3,5$ г/кВт·ч; углеводороды $CH \leq 1,0$ г/кВт·ч; оксиды азота $NO_x \leq 6,0$ г/кВт·ч. Для форсированного двигателя при его комплектации узлами высокого технического уровня выбросы вредных веществ составляли по $CO = 2,5–3,0$ г/кВт·ч; по

углеводородам $CH = 0,9–1,1$ г/кВт·ч и только по оксидам азота NO_x было зафиксировано превышение нормы. Это превышение связано не только с использованием на двигателе разделенной системы питания, но и с характерным для двигателей воздушного охлаждения повышенным температурным уровнем рабочего процесса.

Приведенные результаты экспериментальных исследований дают возможность определить перспективные направления работ по совершенствованию конструкции и улучшению показателей двигателя воздушного охлаждения большой мощности.

Литература

1. ГОСТ Р 41.96–2011. Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями — взамен ГОСТ Р 41.96–2005; введ. 01.03 2013. — М. : Стандартинформ 2013. — 61 с.
2. Дизель 8ДВТ-330. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: монография / Л.С. Ализар [и др.]; под ред. Г.Г. Меньшенина. — М. : Машиностроение, 1986. — 143 с.
3. Испытания двигателей внутреннего сгорания: монография / Б.С. Стефановский [и др.]. — М. : Машиностроение, 1972. — 368 с.
4. Результаты исследовательских испытаний дизеля В-400 по определению пределов его форсирования: технический отчет / Волгоградский моторный завод. — Волгоград, 1989. — 33 с.