

Особенности холодного пуска двигателя 6ЧН 13/11 и послепускового прогрева моторно-трансмиссионной установки трактора Т-150К

Д-р техн. наук Г. М. КРОХТА (Новосибирский ГАУ, mshipo@mail.ru)

Аннотация. Проанализированы особенности холодного пуска дизельного двигателя в условиях низких температур. Разработана методика оценки неполноты сгорания израсходованного двигателем топлива в период послепускового прогрева. Предложена частная методика оценки эффективности полезного использования теплоты израсходованного двигателем топлива. Достоверность предложенных методик подтверждена экспериментально. Намечены пути повышения эффективности и надежности работы машин за счет сокращения времени прогрева моторно-трансмиссионной установки (МТУ) в послепусковой период.

Ключевые слова: дизельный двигатель, коробка передач (КП), масло, вязкость, температура окружающей среды (ОС), отработавшие газы (ОГ), эксергия, эксергетический коэффициент полезного использования теплоты, неполнота сгорания, потери на трение, цилиндро-поршневая группа (ЦПГ), тепловой режим, холодный пуск, предпусковая тепловая подготовка, послепусковой прогрев.

Features of cold start of 6ЧН 13/11 engine and after start warming-up of engine and transmission unit of T-150K tractor

G. M. KROKHTA (Novosibirsk State Agrarian University, mshipo@mail.ru)

Summary. The article analyzes the features of diesel engine cold start in conditions of low ambient temperature. A method for estimation of fuel combustion incompleteness in period of after start warming-up has been developed. Particular method estimating the efficiency of burned fuel heat utilization is proposed. Reliability of the proposed methods has been confirmed experimentally. The article outlines the ways of improving the efficiency and reliability of machines' performance by means of reducing the warming-up time of engine and transmission unit in after start period.

Keywords: diesel engine, gearbox, oil, viscosity, ambient temperature, exhaust gases, exergy, exergy coefficient of heat utilization efficiency, combustion incompleteness, friction losses, cylinder and piston group, heat regime, cold start, prestart heat preparation, after start warming-up.

Известно, что при работе тракторов и другой мобильной техники в климатических зонах с отрицательными температурами имеют место значительные по величине дополнительные затраты энергии на их подготовку к пуску, послепусковой прогрев и последующее поддержание оптимального теплового режима в основных системах и агрегатах. Кроме того, в период пуска и послепускового прогрева работа двигателя сопровождается интенсивным изнашиванием поверхностей трения деталей ЦПГ. Причина — высокая кинематическая вязкость моторного масла и, как следствие, отсутствие мел-

кодисперсных частиц масла, которые, витая в объеме картера двигателя, образуют на поверхностях трения ЦПГ масляную пленку.

Очевидно, что чем меньше время послепускового прогрева основных агрегатов машин до оптимального теплового режима, тем меньше их износ и расход топлива. Сократить время послепускового прогрева можно с помощью предпускового подогрева, применения различных утеплительных средств, терморегулирующей аппаратуры, а также вторичного использования теплоты ОГ [1, 2].

Цель исследования — повышение эффективности и надежности работы машин за счет сокращения времени прогрева МТУ в послепусковой период.

Для достижения указанной цели составим уравнение эксергетического баланса при взаимодействии МТУ с ОС в режиме послепускового прогрева:

$$E_T^I + E_B = \sum_{i=1}^n E_p^{MTU} + \sum_{i=1}^n E_{пов}^{MTU} + E_{ОГ} + \sum_{i=1}^n D_{MTU}, \quad (1)$$

где E_T^I — эксергия теплоты, выделившейся в результате сгорания топлива, Дж/ч; E_B — эксергия воздуха на впуск в двигатель, Дж/ч; $\sum_{i=1}^n E_p^{MTU}$ — суммарная эксергия теплоты, рассеиваемой в ОС радиаторами МТУ, Дж/ч; $\sum_{i=1}^n E_{пов}^{MTU}$ — суммарная эксергия теплоты, рассеиваемой в ОС поверхностью МТУ, Дж/ч; $E_{ОГ}$ — эксергия теплоты, отводимой в ОС с ОГ, Дж/ч; $\sum_{i=1}^n D_{MTU}$ — суммарная эксергия, затрачиваемая на разогрев охлаждающей жидкости, масла и деталей МТУ (внутренние потери), Дж/ч.

Преобразуем уравнение (1), учитывая, что:

$$E_T^I = E_T - D_{нс}, \quad (2)$$

где E_T — химическая эксергия топлива, израсходованного двигателем, Дж/ч; $D_{нс}$ — химическая эксергия несгоревшего топлива, Дж/ч.

Учитывая изложенное выше и проведя соответствующие преобразования, запишем уравнение для определения эксергетического коэффициента η_3^{MTU} полезного использования теплоты израсходованного двигателем топлива в послепусковой период прогрева МТУ:

$$\eta_3^{MTU} = 1 - \delta_{пов}^{MTU} - \delta_{ОГ} - \delta_{нс}, \quad (3)$$

где $\delta_{пов}^{MTU}$ — доля потерь теплоты относительно израсходованного двигателем топлива, рассеиваемая в ОС поверхностью МТУ; $\delta_{ОГ}$ — доля потерь теплоты относительно израсходованного двигателем топлива, отводимая в ОС с ОГ; $\delta_{нс}$ — доля потерь теплоты от неполноты сгорания израсходованного двигателем топлива.

Доля потерь теплоты, которая рассеивается в ОС поверхностью МТУ трактора, определялась по известным уравнениям с помощью осредненного по поверхности коэффициента $\bar{\alpha}_k$ конвективной теплоотдачи. Осредненные величины α_k осуществлялось по формуле:

$$\bar{\alpha}_k = \frac{1}{F_{MTU}} \sum_{i=1}^n \alpha_k F_i, \quad (4)$$

где F_{MTU} — полная площадь поверхности МТУ трактора, м²; F_i — часть площади поверхности МТУ, характеризующая одной величиной α_k .

В свою очередь, коэффициент α_k вычислялся с использованием критериальных уравнений Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа.

Неполнота сгорания топлива в период послепускового прогрева определялась по частной методике, раз-

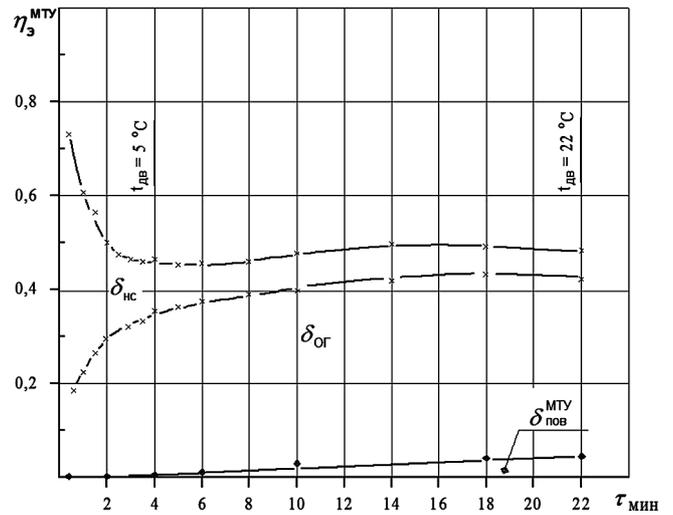


Рис. 1. Зависимость эксергетического коэффициента полезного использования теплоты израсходованного двигателем топлива от времени прогрева МТУ трактора Т-150К в послепусковой период при $n_{дв} = 2100 \text{ мин}^{-1}$, $t_{ОС} = -16 \text{ }^\circ\text{C}$

работанной автором данной статьи. Суть предложенной методики состоит в том, что полный расход топлива двигателем G_T представляется в виде суммы двух составляющих:

$$G_T = G_T^П + G_T^{НС}, \quad (5)$$

где $G_T^П$ — количество топлива, сгоревшего в двигателе в режиме прогрева без внешней нагрузки, кг/ч; $G_T^{НС}$ — количество топлива, которое по разным причинам не сгорает, кг/ч.

Величина полного расхода топлива двигателем G_T определялась по его текущему значению с помощью специального датчика конструкции СибИМЭ. Мощность внутренних потерь на трение в МТУ определялась по температуре ОГ. Далее по нагрузочным характеристикам (для данного скоростного режима при прочих равных условиях) находилось количество сгоревшего в двигателе топлива $G_T^П$, обусловленное отличием текущего теплового режима от оптимального. Разность $G_T - G_T^П$ составила искомую часть расхода топлива, которая отражает неполноту сгорания в заданной точке временного интервала.

Особый научный и практический интерес представляют тепловые процессы, протекающие в двигателе в первые минуты прогрева после холодного пуска. Под холодным пуском понимается пуск двигателя без предпусковой тепловой подготовки в диапазоне отрицательных температур, когда температуры охлаждающей жидкости и масла равны температуре ОС.

На рис. 1 представлена зависимость составляющих эксергетического коэффициента полезного использования теплоты израсходованного двигателем топлива от времени прогрева МТУ трактора Т-150К в послепусковой период.

Испытания показали, что сразу после пуска двигатель работает с полной подачей топлива (в ряде случаев в работу включается корректор). Этот период характеризуется тем, что часть топлива сгорает, а часть не сго-

рает. При этом часть теплоты сгоревшего топлива расходуется на преодоление потерь на трение в узлах и агрегатах МТУ, вновь преобразуется в теплоту и идет на разогрев охлаждающей жидкости, масла и деталей сборочных единиц. Величина этих потерь при температуре ОС $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение первых 30 с работы достигает 104 кВт, что составляет 86 % от номинальной мощности двигателя. В конце 22-минутного прогрева потери снижаются до 34 кВт, или до 28 %. Другая часть эксергии теплоты сгоревшего топлива идет непосредственно на разогрев МТУ.

Внешней поверхностью в период прогрева МТУ в ОС отводится незначительное количество теплоты. Например, только по истечении 22-минутного прогрева в ОС поверхностью МТУ рассеивается 4,1 % теплоты.

Сразу после пуска эксергетический коэффициент $\eta_3^{\text{МТУ}}$ полезного использования теплоты израсходованного двигателем топлива находится на уровне 0,27. В процессе прогрева в течение 4–6 мин до достижения температуры охлаждающей жидкости в двигателе $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\eta_3^{\text{МТУ}}$ возрастает до 0,48.

В начальный период прогрева большую часть от общего расхода составляет доля несгоревшего топлива. Ее величина достигает значений 0,54–0,56. После холодного пуска двигатель работает с характерным дымным выхлопом (выхлопные газы имеют бело-сероватый цвет). При этом часть несгоревшего топлива конденсируется в выхлопной трубе, образуя мокрые потеки. Другая часть, как отмечают многие исследователи, конденсируется на стенках цилиндров, разжижая и смывая масляную пленку с поверхностей трения, и стекает в поддон двигателя, ухудшая физико-химические свойства масла. Далее по мере прогрева двигателя до $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ доля неполноты сгорания топлива $\delta_{\text{нс}}$ снижается и достигает значений 0,06–0,07. При оптимальном тепловом режиме неполноты сгорания снижается до стандартного уровня для данной марки двигателя.

Эксперименты показали, что сразу после холодного пуска нагрузка двигателя (по количеству сгоревшего топлива) может достигать максимального значения. В этот период большая часть развиваемой двигателем индикаторной мощности тратится на привод вспомогательных механизмов, преодоление потерь на трение в сопряжениях деталей МТУ и т. п.

Известно, что суммарные потери на трение делятся на механические (нагрузочные) и гидравлические. Первый вид потерь определяется трением в подшипниках, зубчатых зацеплениях, количеством пар трения, а также передаваемой нагрузкой. По данным ряда исследователей, механические потери составляют 2–3 % от общих потерь и не зависят от температуры масла в МТУ.

Следовательно, большая величина потерь мощности при работе МТУ трактора, особенно в первые минуты, имеет гидравлический характер и объясняется высокой вязкостью масла, которая снижается по мере его прогрева. В результате этого происходит интенсивный разогрев охлаждающей жидкости, масла и сборочных единиц МТУ. Стабилизация процессов теплообмена и неполноты сгорания начинается по истечении 6–8 мин прогрева. Очевидно, что с понижением температуры ОС, при которой осуществляется пуск и последующий про-

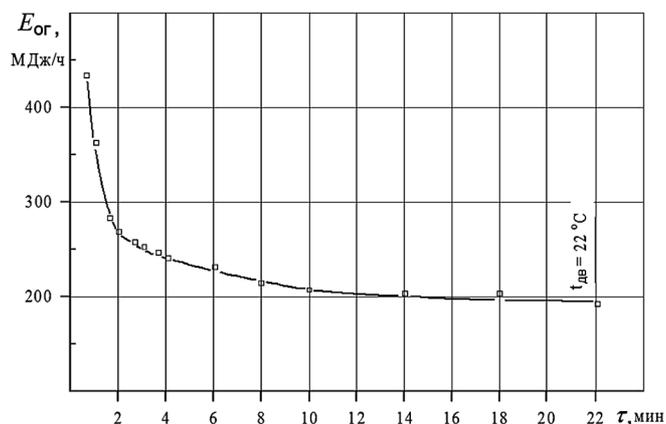


Рис. 2. Зависимость эксергии ОГ от времени послепускового прогрева МТУ трактора Т-150К при $n_{\text{дв}} = 2100\text{ мин}^{-1}$, $t_{\text{ОС}} = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$

грев, стабилизация процессов теплообмена будет проходить по истечении более длительного периода.

Таким образом, сокращение времени послепускового прогрева, как видно из уравнения (3) и приведенных результатов экспериментальных исследований, может быть достигнуто путем снижения доли неполноты сгорания и вторичного использования теплоты ОГ. Возможность снижения неполноты сгорания топлива описана в способе работы двигателя в пусковой и послепусковой периоды [пат. РФ № 2538365] и далее в статье не рассматривается.

Особый научный и практический интерес представляют величина эксергии ОГ и закономерности ее изменения от частоты вращения коленчатого вала и времени послепускового прогрева. Экспериментальные исследования показали, что эксергия теплового потока ОГ в начале прогрева достигает значения 440 МДж/ч, а затем уменьшается до 190 МДж/ч (рис. 2). Соответственно, мощность теплового потока составляет 122,2 кВт, а затем снижается до 52,8 кВт.

Следует отметить, что при полностью прогревом двигателя и прочих равных условиях эксергия теплового потока ОГ находится в пределах 150–155 МДж/ч, а его мощность составляет 41,7–43,1 кВт. В то же время доля эксергии, которая рассеивается в ОС с ОГ, по мере прогрева повышается от 0,18 до 0,38.

Величина мощности теплового потока сразу после пуска и характер ее зависимости от времени послепускового прогрева двигателя создают благоприятные условия для вторичного использования теплоты ОГ с целью сокращения времени прогрева основных узлов МТУ до оптимальных температур. В начальный период прогрева тепловой поток достигает максимального значения. Абсолютная величина потока зависит от температуры холодного пуска: чем ниже температура пуска, тем выше температура потока.

Следует обратить внимание на то, что в первые секунды после холодного пуска двигатель работает только на преодоление внутренних потерь в МТУ. При этом нагрузка двигателя (по температуре ОГ и величине сгоревшего топлива), например, при температуре ОС $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигает 34 %, а при температуре ОС $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ возрастает до 86 %. Очевидно, что с понижением температуры ОС нагрузка двигателя увеличивается.

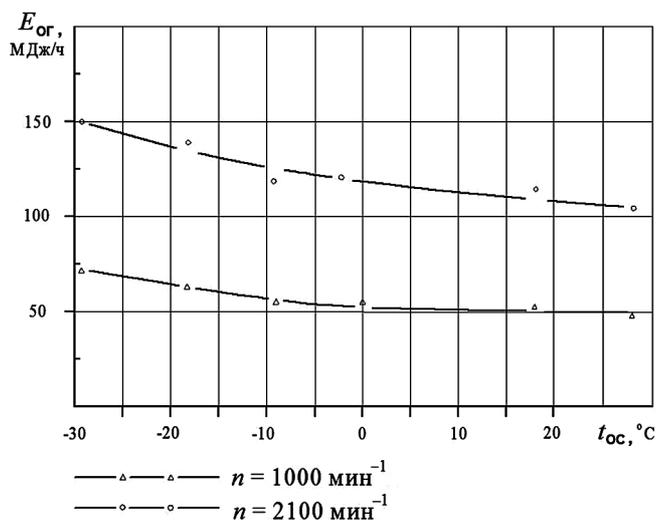


Рис. 3. Зависимость эксергии теплового потока ОГ прогретого двигателя 6ЧН 13/11 от температуры ОС без нагрузки

Кроме того, проведены экспериментальные исследования зависимости эксергии теплового потока ОГ прогретого двигателя 6ЧН 13/11 от температуры ОС. Исследования проведены на двух скоростных режимах: холостом ходу ($n = 1000 \text{ мин}^{-1}$) и номинальной частоте вращения коленчатого вала ($n = 2100 \text{ мин}^{-1}$) без внешней нагрузки (рис. 3). Заданная частота вращения коленчатого вала поддерживалась вручную.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ и температуре ОС $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ мощность теплового потока ОГ сразу после пуска двигателя достигает 18–20 кВт, а при $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ она равна 44–46 кВт. Таким образом, при переходе с холостого хода на частоту, соответствующую номинальной частоте вращения коленчатого вала без внешней нагрузки, мощность теплового потока ОГ возросла примерно в 2,5 раза. Следует отметить, что мощность теплового потока ОГ с повышением температуры ОС в обоих случаях снижается почти в 1,5 раза.

Увеличение мощности теплового потока ОГ, выбрасываемого в ОС, с понижением ее температуры снижает количество теплоты, которая идет на прогрев двигателя. Значительное увеличение мощности теплового потока ОГ с понижением температуры ОС объясняется повышением массового расхода воздуха двигателем и повышением разности между температурой ОГ и температурой ОС.

Уменьшение доли теплоты, которая идет на прогрев двигателя, с понижением температуры ОС в наиболее явном виде проявляется в дизельных двигателях с газотурбинным наддувом. В результате при работе на холостом ходу в диапазоне отрицательных температур достижение и поддержание оптимального теплового режима становится не всегда возможным.

Таким образом, работа двигателя сразу после холодного пуска в зимний период эксплуатации сопровождается практически полной его загрузкой внутренними потерями. В этот период почти вся индикаторная мощность тратится на преодоление потерь в МТУ, а эффективная мощность, которую можно полезно использовать, близка к нулю. Большая доля топлива не сгорает.

Масло на детали ЦПГ поступает с задержкой (5–10 мин), величина которой возрастает с понижением температуры холодного пуска [1].

Этот период характеризуется интенсивным износом деталей ЦПГ, разжижением моторного масла несгоревшим топливом, большим часовым расходом топлива и значительным количеством вредных выбросов в ОС. В то же время следует обратить внимание на то, что детали ЦПГ при холодном пуске и в послепусковой период работают в тяжелых условиях, которые характеризуются отсутствием (выгоранием) масляной пленки на верхней части поверхности цилиндров, но все-таки катастрофического изнашивания сопряжений не происходит. Дело, видимо, в том, что в этот период большая доля несгоревшего топлива конденсируется на холодных стенках цилиндров, образуя на поверхности антифрикционную пленку. Поскольку в дизельном топливе присутствует сера, то на трущихся поверхностях могут создаваться два вида антифрикционных пленок: хемосорбированная и адсорбированная, которые выполняют свои функции и исключают катастрофический износ деталей ЦПГ в первые минуты работы после пуска.

Анализ литературных данных и результаты экспериментальных исследований показали, что время, в течение которого в картере двигателя образуется масляный туман, а на трущихся поверхностях деталей ЦПГ появляются мелкие капли масла, и время начала стабилизации внутренних потерь на трение и неполноту сгорания топлива сопоставимы по величине. Очевидно, что в этот период работа двигателя с полезной нагрузкой нежелательна, а в ряде случаев невозможна.

Для повышения надежности работы двигателя в условиях отрицательных температур этот период лучше всего сократить или исключить. Сократить его можно за счет дополнительного подвода теплоты в послепусковой период, например от ОГ. Исключить — путем применения автономных подогревателей для предпускового прогрева двигателя до температуры $5\text{--}10 \text{ }^\circ\text{C}$. Как показали результаты проведенных исследований, это минимальная температура, при которой начинается процесс стабилизации внутренних потерь на трение, неполноту сгорания топлива и регистрируется появление масляного тумана в картере двигателя. Оптимальный вариант — применение в предпусковой период автономных подогревателей для подогрева жидкости в системе охлаждения и масла в системе смазки двигателя в сочетании с использованием теплоты ОГ в послепусковой период прогрева.

С учетом приведенной выше аргументации алгоритм предпусковой и послепусковой тепловой подготовки МТУ может быть следующим: минимальная предпусковая тепловая подготовка до температуры охлаждающей жидкости и масла в двигателе $5\text{--}10 \text{ }^\circ\text{C}$; отключение системы предпускового подогрева двигателя; пуск двигателя; послепусковой прогрев МТУ с использованием теплоты ОГ (прогрев рабочего места оператора, проверка работоспособности всех систем машины); полезная нагрузка (работа).

На рис. 4 приведена зависимость расчетного количества теплоты для прогрева двигателя от температуры ОС до его конечной температуры $70 \text{ }^\circ\text{C}$ без учета потерь в ОС. Расчеты выполнены с учетом того, что начальная тем-

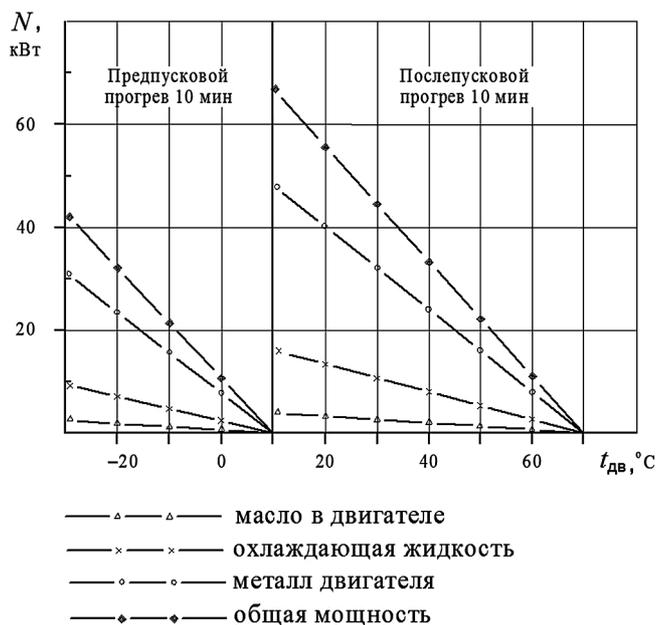


Рис. 4. Расчетная величина мощности, необходимой для 10 мин предпускового и последующих 10 мин послепускового прогрева двигателя 6ЧН 13/11 в зависимости от его теплового состояния

пература $t_{н}$ двигателя (охлаждающая жидкость, масло, металл) соответствует температуре ОС. Текущая температура $t_{дв}$, которая использовалась в расчетах, предполагает равенство температур охлаждающей жидкости, масла и конструкционных материалов, из которых изготовлен двигатель. Согласно выполненным исследованиям и разработанному алгоритму, тепловая подготовка двигателя делится на две части: предпусковой и послепусковой прогрева.

Предпусковой прогрев двигателя может осуществляться автономными электрическими подогревателями или подогревателями, которые работают на газообразном или жидком топливе.

Конечная температура предпускового прогрева двигателя (минимальная температура предпусковой подготовки) определена и находится в пределах 5–10 °C. Для расчетов конечная температура предпускового прогрева принимается на уровне 10 °C. Из графика на рис. 4 видно, что необходимая для предпускового прогрева двигателя мощность подогревателя имеет прямую зависимость от теплового состояния двигателя и принятого времени прогрева. Например, при начальной температуре двигателя –30 °C и предпусковом прогреве в течение 10 мин до конечной температуры мощность подогревателя должна быть в пределах 42 кВт.

При достижении заданной температуры предпускового прогрева двигатель может запускаться автоматически или в ручном режиме и принимать нагрузку. Температурный диапазон послепускового прогрева определен на основании анализа литературных источников, подтвержден результатами проведенных исследований и находится в пределах от 10 до 70 °C.

Известно, что при температуре охлаждающей жидкости 70 °C и выше потери на трение в ЦПГ снижаются до минимального значения и стабилизируются. Аналогично стабилизируются потери мощности в КП в диапазоне

температур масла от 60 до 80 °C [3]. Примерно в этом же интервале температур минимального значения достигают потери теплоты от неполноты сгорания топлива. Таким образом, температуру охлаждающей жидкости в двигателе и масла в КП на уровне 70 °C можно принять за максимальную (конечную температуру $t_{к}$), при которой дополнительный подвод теплоты к МТУ от утилизационного контура прекращается. Далее системы охлаждения, смазки двигателя и КП переключаются на работу в штатном режиме, а избыточную теплоту ОГ можно использовать для прогрева других систем и агрегатов.

Выполненные расчеты показывают, что большая часть теплоты затрачивается на прогрев металла, из которого изготовлены детали двигателя и КП. Например, на прогрев деталей двигателя и КП затрачивается теплоты почти в 3 раза больше, чем на прогрев охлаждающей жидкости, масла в двигателе и масла в КП. Очевидно, что для сокращения времени прогрева деталей двигателя, КП и других агрегатов до оптимальных температур желательно снизить их теплоемкость или теплопроводность. Частично положительного результата можно достичь путем применения теплоизолирующих покрытий внутренних поверхностей корпусных деталей или применения для их изготовления других материалов — прочных, с малым удельным весом, низкой теплопроводностью и теплоемкостью (например углепластика и т. п.).

Выводы

1. Предложена и апробирована методика оценки неполноты сгорания топлива в период послепускового прогрева двигателя. Результаты проведенных исследований показали, что после холодного пуска неполнота сгорания в первые секунды работы двигателя может достигать 54–56 % от количества израсходованного топлива.
2. Установлена целесообразность минимальной тепловой подготовки двигателя перед пуском в условиях отрицательных температур. Минимальная температура тепловой подготовки, при которой возможен пуск двигателя без последствий, находится на уровне 5–10 °C.
3. Величина мощности теплового потока, закономерность ее изменения в период послепускового прогрева и характер зависимости от времени прогрева двигателя создают благоприятные условия для вторичного использования теплоты ОГ с целью сокращения времени прогрева основных узлов МТУ до оптимальных температур.
4. Реализация полученных результатов на практике позволит существенно уменьшить время подготовки машин к работе, снизить потери мощности в МТУ, а также повысить их надежность и экономичность.

Литература и источники

1. Крохта Г. М. и др. Вторичное использование бросовой теплоты двигателя для оптимизации тепловых режимов в агрегатах самоходных машин // Тракторы и сельхозмашины. — 2015, № 4.
2. Крохта Г. М. и др. Вторичное использование теплоты отработанных газов в стационарных дизель-электрических установках и самоходных машинах // Вестник НГАУ. — 2012, № 2 (23), ч. 2.
3. Селиванов Н. И. и др. Потери мощности в коробке передач трактора К-701 // Сб. науч. тр. КрасГАУ. — 2000, ч. 1.