

УДК 621.436

Улучшение пусковых качеств дизеля с пониженной степенью сжатия путем использования электрических подогревателей воздуха на впуске**Improvement of starting characteristics of a diesel engine with low compression ratio by using of inlet electric air heaters**

В. Н. БОНДАРЬ, канд. техн. наук
А. А. МАЛОЗЕМОВ, д-р техн. наук
В. С. КУКИС, д-р техн. наук

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия, idem37@mail.ru

V. N. BONDAR', PhD in Engineering
A. A. MALOZEMOV, DSc in Engineering
V. S. KUKIS, DSc in Engineering

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia,
idem37@mail.ru

Изложены результаты исследования по улучшению пусковых качеств дизеля с пониженной степенью сжатия. Предмет исследования — процессы во впускном коллекторе и цилиндре дизеля на режимах предпусковой подготовки и пуска. Цель — улучшение пусковых качеств дизеля с пониженной степенью сжатия путем использования электрических подогревателей воздуха на впуске вместо электрофакельного устройства. В качестве объекта исследования выбрана модификация тракторного двигателя типа 4ЧН 15/20,5 постоянной мощности с пониженной до 12,5 единиц степенью сжатия. Во впускном тракте дизеля при проведении эксперимента были последовательно установлены электрофакельное устройство и три трубчатых электрических нагревателя тепловой мощностью 0,8 кВт каждый. Предложена методика расчета теплоотдачи от поверхности впускного коллектора в окружающий воздух. Теоретически обоснованы условия самовоспламенения топлива в камере сгорания дизеля с электрофакельным устройством и его принципиальные недостатки: повышение температуры самовоспламенения топлива при обеднении воздушного заряда в цилиндрах кислородом, расходуемым в факеле; возможность работы только в период прокручивания двигателя электростартером, ограниченный временем 20 с. Доказано, что надежный способ облегчения зимнего пуска двигателя 4ЧН 15/20,5 со степенью сжатия 12,5 — предварительный прогрев воздуха во впускном коллекторе размещенными в нем по всей длине трубчатыми электрическими нагревателями с суммарной тепловой мощностью 1,6—2,4 кВт. Определены рациональные конструкционные параметры системы облегчения пуска с трубчатыми электрическими нагревателями и режимы ее функционирования. Результаты исследования использованы при модернизации серийных и разработке новых моделей тракторных дизелей ЧТЗ-Уралтрак и могут быть рекомендованы к внедрению на предприятиях дизелестроения.

Ключевые слова: дизель; пуск; испытания; средства облегчения пуска; подогрев воздуха на впуске.

The paper deals with the improvement of starting characteristics of diesel engine with low compression ratio. The processes in inlet manifold and cylinder of diesel engine during pre-start preparation and start-up are submitted as the subject of study. The purpose is to improve the starting characteristics of diesel engine with low compression ratio by using of inlet electrical air heaters instead of electric torch device. The object of study is a modification of tractor constant power engine of 4ChN 15/20.5 type with low compression ratio equal to 12.5. During the experiment one electric torch device and three tubular electric heaters with heat power of 0.8 kW each were sequentially installed in the inlet manifold of diesel engine. A calculation method for heat transfer from the surface of inlet manifold to the ambient air is proposed. Conditions of fuel self-ignition in the combustion chamber of diesel engine with electric torch device are theoretically substantiated, as well as its critical shortcomings, namely: raise of temperature of fuel self-ignition due to the decrease in oxygen concentration of air charge in cylinders, as a result of its consumption in the flame of electric torch device; ability to work only during engine cranking by electric starter with a limited timespan of 20 seconds. It is proved that a valid method providing the cold starting of 4ChN 15/20.5 diesel engine with low compression ratio equal to 12.5 is air preheating by tubular electric heaters placed throughout the length of inlet manifold, with total heat power of 1.6—2.4 kW. Rational design parameters of a cold start aid system with tubular electric heaters and its operation modes are determined. The results of the study were used for modernization of production models of ChTZ-Uraltrac tractor diesel engines and for development of new ones, so they can be recommended for introduction in engine building companies.

Keywords: diesel engine; start-up; testing; starting aid; inlet air heating.

Введение

Один из способов снижения тепловой и механической нагрузки на детали дизеля — снижение степени сжатия. Однако это техническое решение влечет за собой уменьшение температуры сжатия в цилиндре и, как следствие, ухудшение пусковых качеств двигателя [1, 2]. Для обеспечения требований нормативных документов применяют различные средства облегчения пуска, наиболее часто — подогреватели воздуха на впуске, напри-

мер электрофакельное устройство (ЭФУ). Обычно в качестве источника тепла они используют энергию, выделяемую при сгорании топлива.

Однако этот тип подогревателей имеет ряд недостатков, один из которых — снижение концентрации кислорода в воздухе, подаваемом в камеру сгорания, что отрицательно влияет на скорость предпламенных реакций и температуру самовоспламенения топлива [3]. Чтобы избежать этого негативного эффекта, предлагается использовать электрические подогреватели, которые не

снижают концентрацию кислорода в воздухе на впуске и имеют более высокую тепловую эффективность, чем электрические свечи накалывания.

Цель исследования

Предмет исследования — процессы во впускном коллекторе и цилиндрах дизеля на режимах предпусковой подготовки и пуска.

Цель исследования — улучшение пусковых качеств дизеля с пониженной степенью сжатия путем использования электрических подогревателей воздуха на впуске вместо ЭФУ.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана модификация тракторного двигателя типа 4ЧН 15/20,5 постоянной мощности с пониженной до 12,5 единиц степенью сжатия (с целью снижения тепловых и механических нагрузок в режиме максимального крутящего момента). Во впускном тракте дизеля последовательно установлены:

- ЭФУ с максимальным расходом бензина 1 кг/ч;
- три трубчатых электронагревателя (ТЭН) длиной 785 мм и диаметром 13 мм с рабочим напряжением 55 В и тепловой мощностью 0,8 кВт каждый.

Экспериментальная оценка пусковых свойств двигателя выполнялась в два этапа. На первом этапе, проводившемся на стенде при положительных температурах окружающего воздуха, определяли зависимости температур воздуха и стенки впускного коллектора от времени прогрева при работе одного, двух и трех ТЭН перед пуском двигателя. После прогрева коллектора в течение 30 мин двигатель переводили в режим прокрутки без подачи топлива при частотах вращения 160, 200, 300, 400, 500, 600 и 700 мин⁻¹ последовательно до прекращения снижения температуры воздуха в коллекторе. Определяли зависимости температуры стенки впускного коллектора от времени остывания на остановленном двигателе, необходимые для последующего расчета теплоотдачи от поверхности коллектора в окружающий воздух.

На втором этапе испытаний двигатель устанавливали в климатической камере ОАО "НИИ автотракторной техники" (г. Челябинск) и путем последовательного приближения в возможно большем диапазоне температур окружающего воздуха $t_{окр}$ определяли необходимую для пуска двигателя в течение 1,5–2 с температуру предварительного подогрева воздуха в коллекторе. Затем путем пересчета полученных на первом этапе величин перепадов между температурой воздуха в коллекторе и $t_{окр}$ определяли зависимость между этими величинами и необходимым временем предварительного подогрева воздуха во впускном коллекторе.

Использование измеренных при положительных температурах воздуха перепадов температур допустимо, так как изменение плотности воздуха при увеличении его температуры с 15 до 115 °С отличается от соответствующего изменения плотности при нагреве от –27 до 73 °С всего на 4 %, а теплоемкость воздуха — менее чем на 1 %. Поэтому такой пересчет может быть принят для фактических расчетов времени предварительного подогрева воздуха. Критерием практической допустимости этих расчетов служило совпадение расчетных величин времени предварительного подогрева воздуха с экспери-

ментальным при практически одинаковой продолжительности пуска двигателя.

Пуск производился электростартером, но так как на двигателе 4ЧН 15/20,5 также предусматривается установка пускового двигателя П-23У с большей по сравнению с электростартером мощностью, подготовку и пуск двигателя производили в следующей последовательности:

- по температуре окружающего воздуха назначали продолжительность предварительного прогрева воздуха в минутах;
- выключали декомпрессор двигателя;
- включали электростартер, измеряли частоту вращения коленчатого вала двигателя;
- после 5–6 с работы электростартера подавали топливо;
- через 2–3 с после подачи топлива закрывали декомпрессор и измеряли продолжительность запуска двигателя.

Для исключения влияния подогрева картерного масла и охлаждающей жидкости масло разбавляли 20 % бензина. Для предотвращения низкотемпературного осмоления в картерное масло добавляли 0,05 % активного ингибитора свободнорадикальной полимеризации мономеров низкотемпературных смол гидрохинона.

Методика расчета теплоотдачи от поверхности впускного коллектора в окружающий воздух [4] заключалась в использовании кривых остывания для определения коэффициента теплопередачи при известной внешней площади S и массе m впускного коллектора. Принимая во внимание, что коллектор изолирован от головок двигателя паронитовыми прокладками и теплообменом между ними можно пренебречь, находили количество тепла, отдаваемого при остывании от температуры t до $t_{окр}$:

$$Q_{ос} = mc(t - t_{окр});$$

$$Q_{ос} = Sk(t_1 - t_2)\tau,$$

где c — теплоемкость серого чугуна; k — коэффициент теплопередачи; τ — время остывания поверхности коллектора от t_1 до t_2 .

Результаты и их обсуждение

В соответствии с уравнением Аррениуса скорость двухкомпонентной реакции равна:

$$w = C_1 C_2 A e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1)$$

где C_1 , C_2 — концентрации дизельного топлива и кислорода; A — коэффициент скорости реакции; E — энергия активации; R — газовая постоянная; T — температура реакции.

Уравнение (1) описывает самое начало химического процесса, когда концентрации реагентов еще не претерпели существенных изменений, что отвечает задаче определения температуры самовоспламенения дизельного топлива в зависимости от концентрации кислорода. Тогда, согласно результатам работ Н. С. Мороцкого и И. А. Захарова [5]:

$$C_1 C_2 A e^{-\frac{E}{RT}} = C_1' C_2' A e^{-\frac{E}{RT'}}, \quad (2)$$

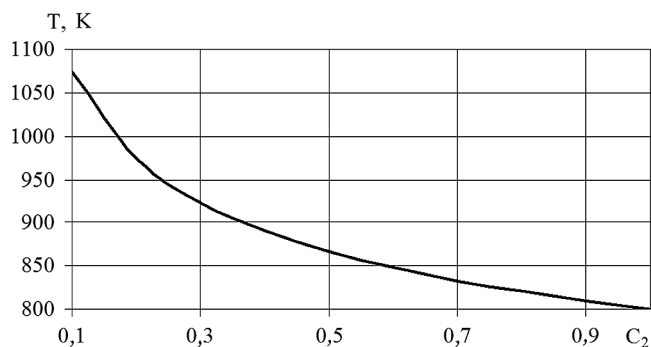


Рис. 1. Зависимость температуры самовоспламенения дизельного топлива от концентрации кислорода

где все величины в левой части уравнения постоянны, а в правой переменны температура реакции и концентрация кислорода (со знаком «'»), изменяющаяся в пределах от 0,1 до 1.

Температура реакции в левой части уравнения постоянна и соответствует концентрации кислорода, равной 1, т.е. полному содержанию кислорода в воздушном заряде. Сократив и преобразовав уравнение (2) и подставив в него постоянные величины $E = 60\,000$ кДж/моль, $R = 8,3$ кДж/(моль · К), $T = 800$ К, $C_2 = 1$, получим:

$$T = \frac{7229}{9,036 + \ln(C_2)}. \quad (3)$$

Величины температур самовоспламенения дизельного топлива, рассчитанные по уравнению (3), приведены на рис. 1, из которого следует, что наряду с увеличением температуры поступающего в цилиндры воздуха ЭФУ существенно затрудняет процесс самовоспламенения топлива в цилиндрах двигателя.

По данным замеров, при частотах вращения коленчатого вала 84 и 102 мин⁻¹ часовые расходы воздуха составляли 42,1 и 51,1 кг/ч. При стехиометрическом числе, равном для бензина 14,2 кг/кг, и коэффициенте избытка воздуха, равном 1, в воздушном заряде в цилиндре останется соответственно 54,9 и 61,7 % содержавшегося в

нем ранее кислорода. Для этих остаточных концентраций кислорода температуры самовоспламенения увеличиваются с 800 до 870 и 850 К соответственно, а с учетом снижения расхода воздуха при уменьшении его плотности в период работы ЭФУ — еще на 10 %. Результаты расчета изменения температур самовоспламенения дизельного топлива из-за обеднения кислородом всасываемого воздуха объясняют тот факт, что в ходе эксперимента пуск двигателя осуществлялся только после прекращения работы ЭФУ.

На рис. 2 показано изменение температур воздуха и стенок впускного коллектора на режимах предварительного прогрева и последующей прокрутки двигателя без подачи топлива при включении одного, двух и трех ТЭН. Из рис. 2 следует, что через 10 мин после начала прогрева перепад температур между воздухом в коллекторе и окружающим воздухом составлял 52 °С при работе одного ТЭН, 63 °С при работе двух ТЭН и 98 °С при работе трех ТЭН, а количество внесенного во впускной коллектор тепла — соответственно 470, 975 и 1480 кДж. Сравнение кривых прогрева показывает, что на начальной стадии прогрева существенную роль играет способ размещения ТЭН в коллекторе. Целесообразно размещать два ТЭН как можно ближе к верхней части коллектора, к патрубкам, отводящим воздух к цилиндрам двигателя.

Величины перепадов температур в конце каждого 5-минутного периода прокрутки двигателя на очередном скоростном режиме близки к установившимся и при пуске дизеля пусковым двигателем П-23У в диапазоне 160—220 мин⁻¹ находятся в пределах от 41 до 46 °С при работе одного ТЭН, 69—75 °С при работе двух ТЭН и 96—109 °С при работе трех ТЭН.

При часовом расходе бензина 1 кг и коэффициенте выделения теплоты 0,95 тепловая мощность ЭФУ составляет 11,3 кВт, что значительно выше мощности примененных ТЭН. Однако время работы ЭФУ ограничено продолжительностью работы электростартера, равной 20 с (по ГОСТ 18509). За это время ЭФУ вносит в коллектор всего 236 кДж тепла, что соответствует температурному перепаду 39 °С. При исходной температуре воздуха -25 °С температура воздуха в коллекторе дости-

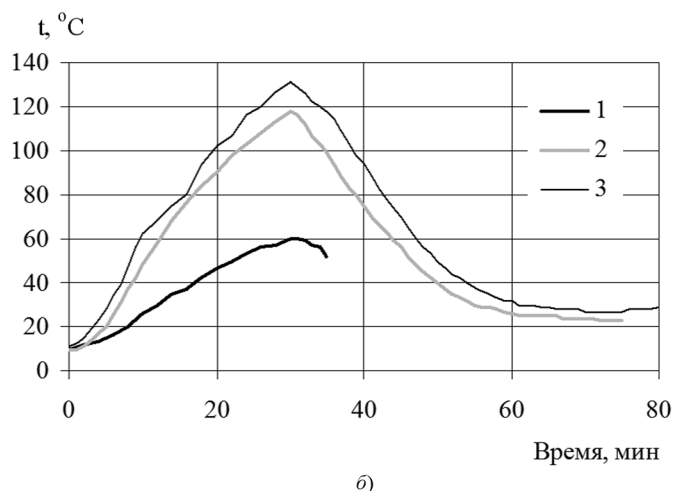
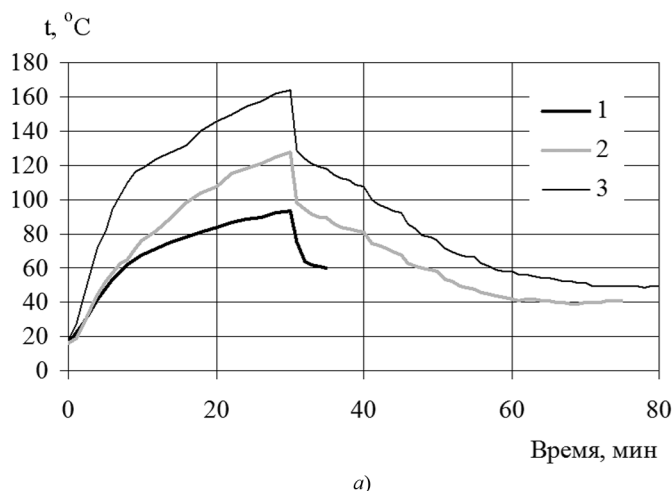


Рис. 2. Изменение температуры воздуха во впускном коллекторе (а) и температуры стенки впускного коллектора (б) дизеля 4ЧН 15/20,5 на режимах прогрева (0—30 мин) и прокрутки в зависимости от количества включенных ТЭН

гает только 14 °С, а температура самовоспламенения дизельного топлива возрастает на 50–70 °С, что объясняет неудачные пуски дизеля с ЭФУ.

Требуемая ГОСТ 18509 продолжительность периода между повторными попытками пуска исключает возможность повышения температур воздуха при последующих попытках пуска, так как для повышения температуры стенки коллектора на 1 °С в начале прогрева требуется 700 кДж теплоты. Столь малый тепловой эффект применения ЭФУ делает его непригодным для использования в качестве средства облегчения пуска тракторного дизеля типа 4ЧН 15/20,5 с пониженной степенью сжатия.

На рис. 3 показаны пусковые характеристики двигателя с предпусковым подогревом воздуха во впускном коллекторе тремя ТЭН с суммарной тепловой мощностью 2,4 кВт, полученные путем последовательного снижения продолжительности подогрева воздуха до увеличения продолжительности пуска с 0,4–0,6 до 1,5–2 с. Соответствующая этой продолжительности пуска температура воздуха во впускном коллекторе линейно увеличивается с 64 °С при $t_{окр} = 4$ °С до 67 °С при $t_{окр} = -10$ °С. Линейная экстраполяция этой зависимости при $t_{окр} = -20$ °С дает температуру воздуха в коллекторе 69 °С. Двигатель запускался без признаков выброса белых паров несгоревшего топлива, с клубом черного дыма вследствие малых величин коэффициента избытка воздуха.

Продолжительность предпускового подогрева воздуха во впускном коллекторе составила 4,6 мин при $t_{окр} = 4$ °С; 5 мин при $t_{окр} = -3$ °С; 7,5 мин при $t_{окр} = -10$ °С, но в последнем случае произошло сокращение продолжительности пуска до 1 с, в связи с чем продолжительность предпускового подогрева воздуха составила не более 6,5 мин. Продолжительность пуска двигателя без предпускового подогрева воздуха при температуре окружающего воздуха 4 °С составила 17 с, что совпадает с ранее полученными данными.

Расчет показал, что ток, потребляемый ТЭН, при снижении напряжения с 55 до 24 В составит 6,5 А · ч при $t_{окр} = 4$ °С; 15 А · ч при $t_{окр} = -20$ °С. В связи с тем, что по мере увеличения разрядного тока аккумулятора снижается его емкость, оценена возможность применения стартерных аккумуляторов 6СТ-128 для питания ТЭН при пуске дизеля пусковым двигателем П-23У. По трем

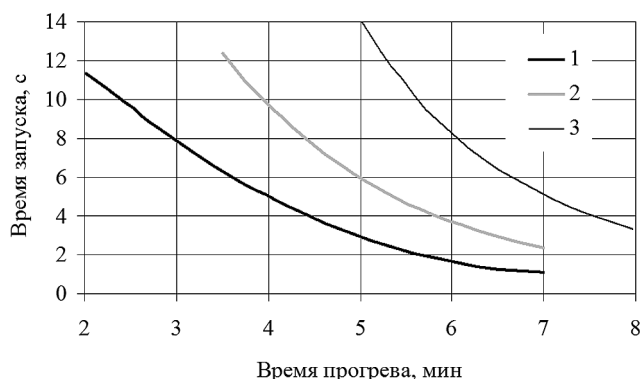


Рис. 3. Максимальные величины времени пуска в зависимости от времени предварительного прогрева тремя ТЭН при различных температурах окружающего воздуха $t_{окр}$:

1 — $t_{окр} = -10$ °С; 2 — $t_{окр} = -15$ °С; 3 — $t_{окр} = -20$ °С

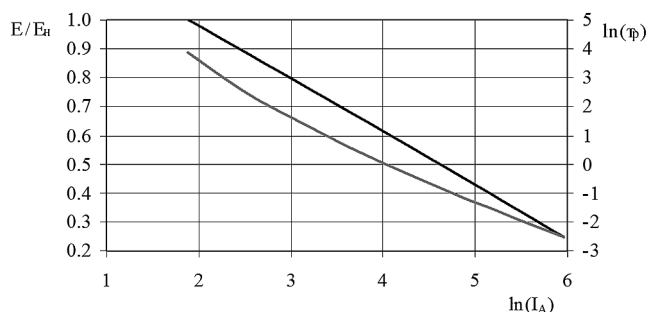


Рис. 4. Зависимости относительного изменения емкости и времени разряда аккумулятора 6СТ-128 от силы разрядного тока:

— — E/E_H ; — — $\ln(\tau_p)$

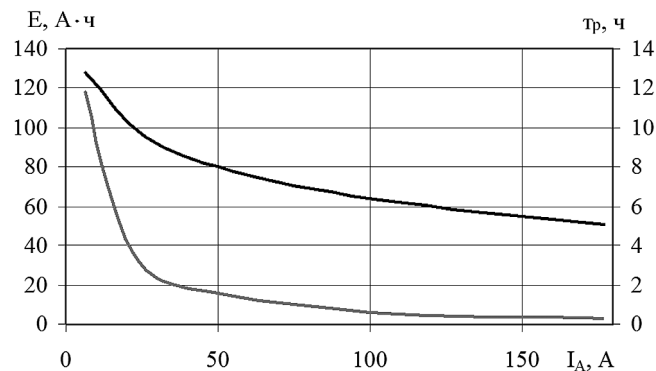


Рис. 5. Зависимости емкости и времени разряда аккумулятора 6СТ-128 от силы разрядного тока:

— — E ; — — τ_p

точкам, приведенным в паспорте аккумулятора, построены зависимости относительной емкости от силы тока и времени разряда (рис. 4, 5). Время разряда при трех ТЭН и разрядном токе 100 А составит 30 мин, минимальная емкость аккумуляторов — 64 А · ч; при двух ТЭН с разрядным током 67 А — 45 мин и 75 А · ч соответственно.

Для оценки целесообразности применения тепловой изоляции впускного коллектора произведен расчет теплоотдачи от его поверхности в окружающий воздух по методике В. И. Сороко-Новицкого [4] с использованием полученных экспериментальных данных. Определено, что в течение 9 мин, необходимых для прогрева, при температуре окружающего воздуха -20 °С температура стенки коллектора повысится до 17 °С, в результате чего теплосодержание массы серого чугуна весом 26 кг составит 527 кДж, а теплоотдача от поверхности коллектора в окружающий воздух — 150 кДж/ч. За 30 мин в коллектор будет введено 4150 кДж выработанного тремя ТЭН тепла, относительная потеря которого составит 1,76 %, в связи с чем впускной коллектор не нуждается в тепловой изоляции.

Выводы

1. Принципиальные недостатки, определяющие малую эффективность применения ЭФУ при низкотемпературных пусках дизеля с пониженной степенью сжатия:
 - повышение температуры самовоспламенения дизельного топлива при обеднении воздушного заряда в

цилиндрах кислородом, расходуемым в факеле ЭФУ, особенно в области малых частот вращения коленчатого вала двигателя электростартером;

— возможность работы ЭФУ только в период прокручивания двигателя электростартером, ограниченный по ГОСТ 18509 временем 20 с, и соответственно, малое количество вносимого в двигатель тепла при большой тепловой мощности ЭФУ.

2. Расчетные и экспериментальные исследования показали, что:

— установка ТЭН имеет несомненное преимущество перед любыми типами ЭФУ вне зависимости от того, потребляют ли они кислород или работают по двухконтурной схеме;

— двухконтурное ЭФУ, установленное в коллектор со стороны четвертого цилиндра двигателя, не сможет обогреть воздух, поступающий в первый цилиндр, в результате чего возможно его осмоление;

— надежное средство облегчения зимнего запуска двигателя 4ЧН 15/20,5 со степенью сжатия 12,5 — предварительный прогрев воздуха во впускном коллекторе размещенными в нем по всей длине ТЭН с суммарной тепловой мощностью 1,6—2,4 кВт;

— целесообразна установка ТЭН непосредственно под патрубками коллектора, подводящими воздух к головкам цилиндров двигателя;

— для питания ТЭН мощностью до 2,4 кВт при запуске дизеля пусковым двигателем П-23У возможно применение стартерных аккумуляторов 6СТ-128;

— впускной коллектор с установленными в нем ТЭН не нуждается в тепловой изоляции.

3. Результаты проведенного исследования использованы при модернизации серийных и разработке новых моделей тракторных дизелей ООО "ЧТЗ-Уралтрак" и могут быть рекомендованы к внедрению на предприятиях дизелестроения.

Литература и источники

1. Купершмидт В. Л., Эфрос В. В. Влияние степени сжатия на пусковые характеристики дизеля с неразделенной камерой сгорания // Тракторы и сельхозмашины. 1968, № 1. С. 26—28.

2. Горюнов В. Г., Демидов Г. Ф., Хрестин Н. А. и др. Влияние степени сжатия на пусковые качества двигателя ЯМЗ-741 // Автомобильная промышленность. 1980, № 8. С. 7—9.

3. Попов А. Е., Шароглазов Б. А., Шишков В. В. Теплоиспользование в дизеле в условиях низкотемпературного пуска // Транспорт Урала. 2009, № 3 (22). С. 115—118.

4. Сороко-Новицкий В. И. Динамика процесса сгорания и влияние его на мощность и экономичность двигателя. М.: Машгиз, 1946. 176 с.

5. Николаев Л. А., Сташкевич А. П., Захаров И. А. Системы подогрева тракторных дизелей при пуске. М.: Машиностроение, 1977. 191 с.

References

1. Kupershmidt V. L., Efros V. V. Influence of compression ratio on the starting characteristics of diesel engine with single combustion chamber. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 1968, no. 1, pp. 26—28 (in Russ.).

2. Goryunov V. G., Demidov G. F., Khrestin N. A., Nezamaev Yu. N. Influence of compression ratio on the starting characteristics of YaMZ-741 engine. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 1980, no. 8, pp. 7—9 (in Russ.).

3. Popov A. E., Sharoglazov B. A., Shishkov V. V. Heat utilization in a diesel engine in conditions of low-temperature starting. *Transport Urala*, 2009, no. 3 (22), pp. 115—118 (in Russ.).

4. Soroko-Novitskiy V. I. *Dinamika protsessy sgoraniya i vliyaniye ego na moshchnost' i ekonomichnost' dvigatelya* [Dynamics of the combustion process and its effect on engine power and efficiency]. Moscow, Mashgiz Publ., 1946, 176 p.

5. Nikolaev L. A., Stashkevich A. P., Zakharov I. A. *Sistemy podogreva traktornykh dizeley pri puske* [Heating systems of tractor diesel engines at start-up]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 191 p.