

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА  
НА ВПУСКЕ ДИЗЕЛЯ ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ПРЕДПУСКОВОГО  
ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПУСКОВЫХ КАЧЕСТВ**

**CALCULATION AND THEORETICAL JUSTIFICATION OF AIR HEATING  
AT THE DIESEL INLET WITH EXHAUST GASES OF THE PRE-STARTING  
HEATER TO IMPROVE STARTING QUALITIES**

*А.Б. Яблочкин, М.Г. Гранкин, канд. техн. наук В.В. Малыш*

*A.B. Yablochkin, M.G. Grankin, Ph.D. V.V. Maliy*

*Омский автобронетанковый инженерный институт*

В статье представлено расчетно-теоретическое обоснование технического решения реализующего подогрев воздуха на впуске дизеля отработавшими газами при использовании подогревателя жидкостного дизельного для улучшения его пусковых качеств. Разработана методика и проведены расчеты основных конструктивных параметров комбинированной системы предпускового подогрева (СПП) и системы облегчения пуска (СОП) с использованием энергии и тепла отработавшими газами подогревателя жидкостного дизельного. Проведено обоснование эффективности и целесообразности предлагаемого технического решения, заключающегося в использовании тепла отработавших газов подогревателя жидкостного дизельного для подогрева воздуха на впуске двигателя.

**Ключевые слова:** средства предпусковой подготовки, система облегчения пуска, двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, подогреватель жидкостной дизельный, предпусковой подогрев, подогрев воздуха, теплообменник.

The article presents a theoretical and theoretical substantiation of a technical solution that implements heating of air at the inlet of a diesel engine with exhaust gases when using a liquid diesel heater to improve its starting qualities. A methodology has been developed and calculations of the main design parameters of a combined preheating system (PWS) and a start-up assistance system (SOP) using energy and heat from exhaust gases of a liquid diesel heater have been carried out. The substantiation of the efficiency and feasibility of the proposed technical solution, which consists in using the heat of the exhaust gases of a liquid diesel heater for heating the air at the engine inlet.

**Keywords:** prestarting preparation means, starting aid system, internal combustion engine, exhaust gases, liquid diesel heater, preheating, air heating, heat exchanger.

Большая часть территории России находится в суровых климатических условиях. Танковые образцы, в составе силовых установок которых используются поршневые четырехтактные дизели, как показывает практика, испытывают затруднения и проблемы с пуском при темпера-

туре окружающей среды минус 10 °С и ниже, при этом, в соответствии с ГОСТ РВ 51218-98, определяющим общие технические требования к военным гусеничным машинам, пуск дизеля при температуре не ниже минус 50 °С должен обеспечиваться применением штатных средств

предпусковой подготовки (СПП) и средств облегчения пуска (СОП), то есть обеспечивать выполнение стоящих перед боевыми танковыми подразделениями задач в возможных контрнатупательных операциях.

Проблема улучшения пусковых характеристик является актуальной и важной с позиции ее влияния на обеспечение боеготовности. Существенную роль, при этом, играет время, которое требуется на подготовку танковой силовой установки к работе под нагрузкой.

Решением задач, связанных с моделированием рабочих процессов дизелей занимались Вибе И.И. [1], Кулешов А.С. [2], Онищенко Д.О. [3], Heuwood J.B. [4], Woschni G. [5] и другие исследователи. Данные работы содержат фундаментальные основы теории рабочих процессов поршневых двигателей и не могут быть применены в чистом виде для решения задач настоящего исследования, так как разработанные в них методы математического моделирования не в полной мере учитывают особенности режимов предпусковой подготовки и пуска, такие как низкая либо равная нулю частота вращения коленчатого вала, нестабильные значения температур стенок камеры сгорания, температур и скорости движения газов, охлаждающей жидкости (ОЖ), масла и другие.

Как показывают исследования и практика, изучению метода повышения температуры газов в момент впрыска топлива уделяется значительное внимание, при этом исследованию улучшения пусковых характеристик дизелей подогревом воздуха на впуске отработавшими газами (ОГ) предпускового подогревателя жидкостного, работающего на дизельном топливе (ПЖД) уделено недостаточно внимания.

Целью статьи является обоснование эффективности предлагаемого технического решения реализующего подогрев воздуха на впуске дизеля ОГ ПЖД для улучшения его пусковых качеств методом проведения расчетного эксперимента.

Основными задачами при выполнении расчетного эксперимента на данном этапе проведения научного исследования являлись:

- расчетное обоснование основных конструктивных параметров комбинированной СПП и СОП с использованием тепла ОГ ПЖД;
- обоснование эффективности и целесообразности технического решения, заключающегося в использовании тепла ОГ ПЖД для подогрева воздуха на впуске двигателя.

Расчетный эксперимент выполнялся с применением разработанных математических моделей и программного обеспечения (ПО) [6].

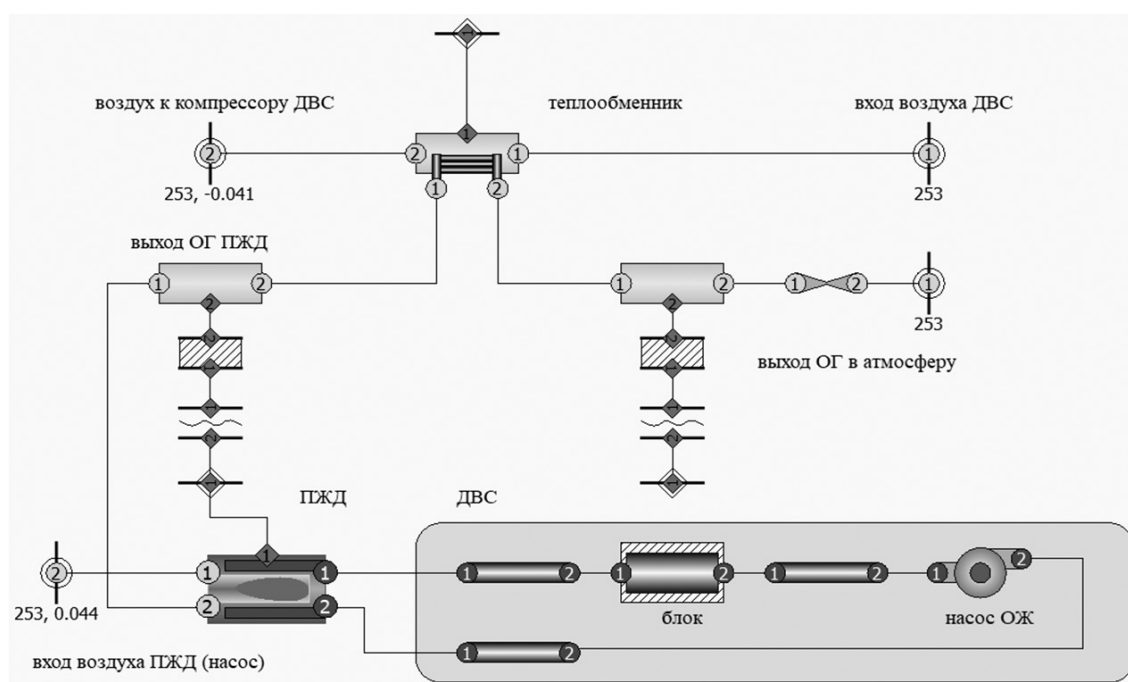


Рис. 1. Имитационная модель СПП для расчета предпускового разогрева ДВС

При расчетах учитывались требования научно-технической документации к пуску двигателя. Согласно инструкции по эксплуатации дизеля В-92С2 [7], при температуре окружающей среды:

– до 5 °С — пуск двигателя осуществляется без применения СПП и СОП;

– от 5 °С до минус 20 °С — нормальный (не экстренный) пуск двигателя производится с применением СПП, без СОП;

– от 5 °С до минус 20 °С — экстренный пуск двигателя осуществляется с применением СОП только комбинированным способом;

– от минус 40 °С до минус 20 °С — применение СПП и СОП документально не регламентировано, но, согласно рекомендациям завода-изготовителя, нормальный пуск должен производиться с применением СПП, экстренный — СПП и СОП.

Для снижения трудоемкости расчетов использовались две имитационные модели:

– модель комбинированной СПП и СОП для расчета предпускового подогрева двигателя внутреннего сгорания (ДВС), включающая упрощенную подмодель двигателя и реализованная в виде автономного ПО [8], показана на рис. 1;

– полная модель ДВС, СПП и СОП для расчета процесса пуска, позволяющая выполнять детальный расчет процессов, представлена на рис. 2.

В ходе моделирования предпускового подогрева ДВС определялись начальные условия для расчета процесса пуска. Температура стенок определялась как средняя по толщине.

Конструктивные параметры систем и механизмов силовой установки определялись из конструкторской документации. Допущения, принятые в ходе расчетного эксперимента, опре-

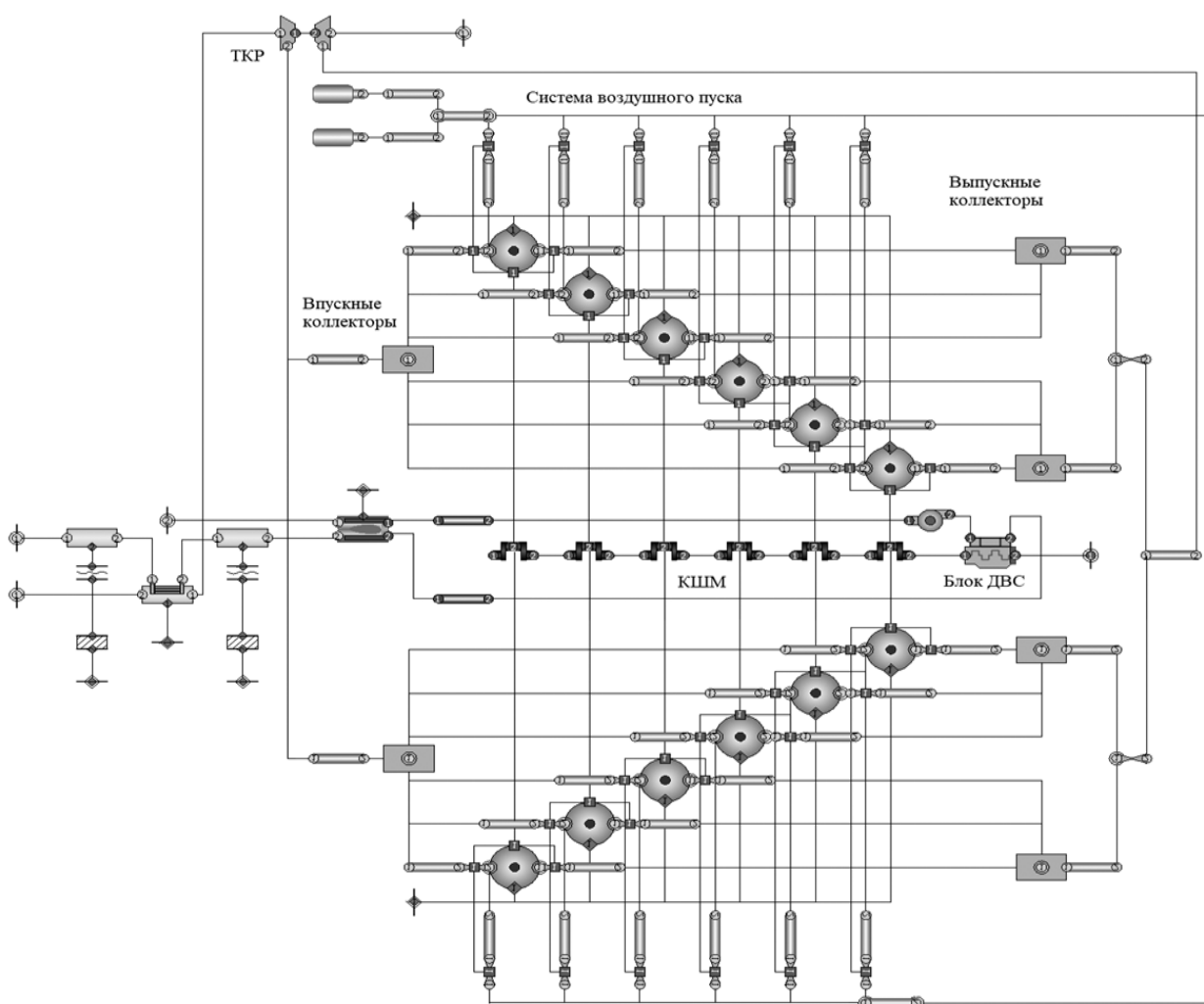


Рис. 2. Скриншот расчетной схемы двигателя В-92С2

деляются особенностями разработанной математической модели [6].

На рис. 3 показано изменение температуры воздуха на выходе из впускной трубы без теплоизоляции и с полной теплоизоляцией. Теплоизоляция позволяет повысить температуру воздуха в момент времени 30 мин с 333 К до 462 К на режиме прогрева и с 319 К до 422 К на режиме прокрутки, т.е. на 129 К и 103 К, соответственно. Поэтому теплоизоляция трубы, подводящей ОГ от ПЖД к теплообменнику является целесообразной.

Как известно, противоточные теплообменники обладают большей эффективностью, чем прямоточные [9]. В целях проверки выполнено расчетное обоснование для предлагаемого технического решения. Изменение направления движения ОГ в теплообменнике с прямоточного на противоточное позволяет поднять температуру воздуха на выходе из впускной трубы на 40 К (с 422 К до 462 К), рис. 4, тем самым поднимая тепловую мощность теплообменника на 9,5 %. Длина труб, подводящих/отводящих ОГ к теплообменнику увеличится на 600 мм. Необходимо отметить, что реальный двигатель не работает на

режиме прокрутки 30 мин, поэтому соответствующие графики на рис. 3 и далее имеют теоретический (условный) характер.

Материал трубок практически не влияет на динамику прогрева воздуха во впускном канале (стальная трубка прогревается примерно на 3 с позже, чем медная). Однако из соображений долговечности лучше использовать медные трубки.

Уменьшение толщины стенок трубок теплообменника во впускном канале ожидаемо влечет увеличение скорости теплообмена (рис. 5). Номинальная толщина стенки холоднодеформированных медных труб общего назначения диаметром от 4 мм до 90 мм по ГОСТ 617-2006 [10] — от 0,8 мм до 4,5 мм. Исходя из компромисса между теплопроводностью и прочностью (имеют место существенные вибрационные нагрузки) целесообразно выбрать толщину трубки — 2 мм.

Увеличение диаметра трубок слабо влияет на динамику нагрева воздуха во впускной трубе (рис. 6) в первые 5 мин прогрева, однако существенно влияет на максимальную температуру нагрева.

При увеличении количества трубок теплообменника с сохранением их диаметра, увеличива-

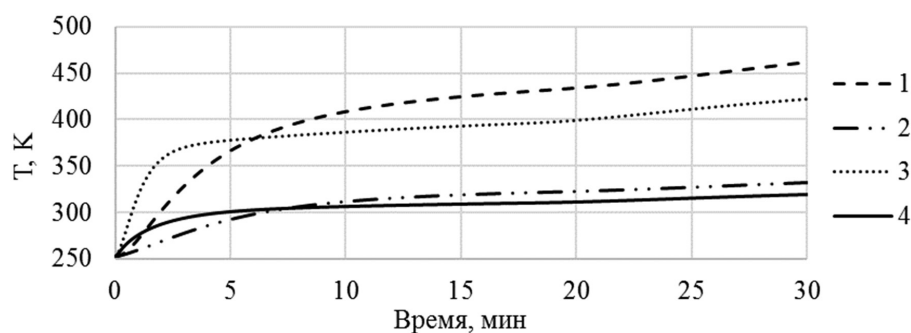


Рис. 3. Температура воздуха на выходе из впускной трубы: 1 — теплоизоляция, прогрев; 2 — без теплоизоляции, прогрев; 3 — теплоизоляция, прокрутка ( $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ ); 4 — без теплоизоляции, прокрутка

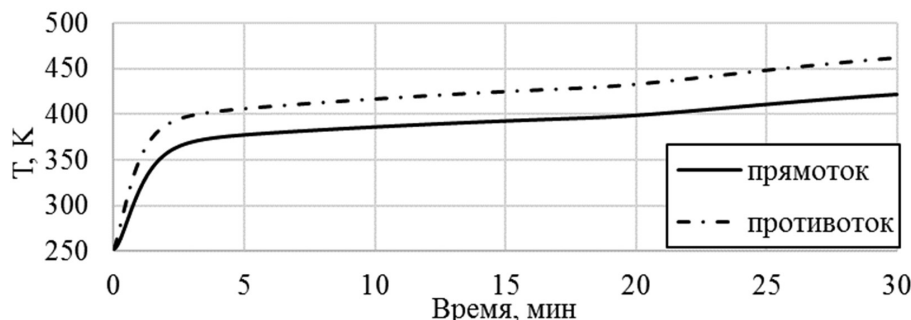


Рис. 4. Температура воздуха на выходе из впускного канала при различных направлениях потока при прокрутке ( $t_0 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ )

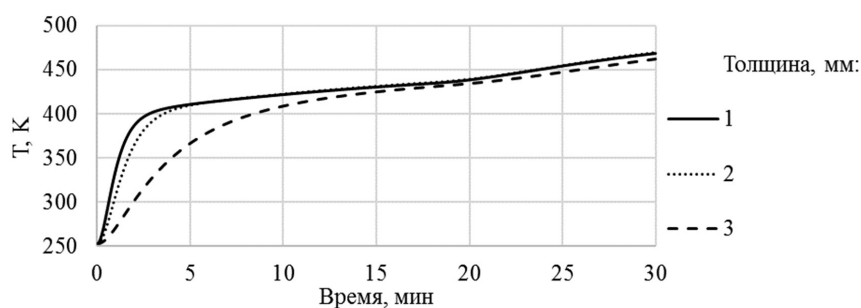


Рис. 5. Зависимость температуры воздуха во впускном канале от толщины стенок трубок при прогреве ( $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ )

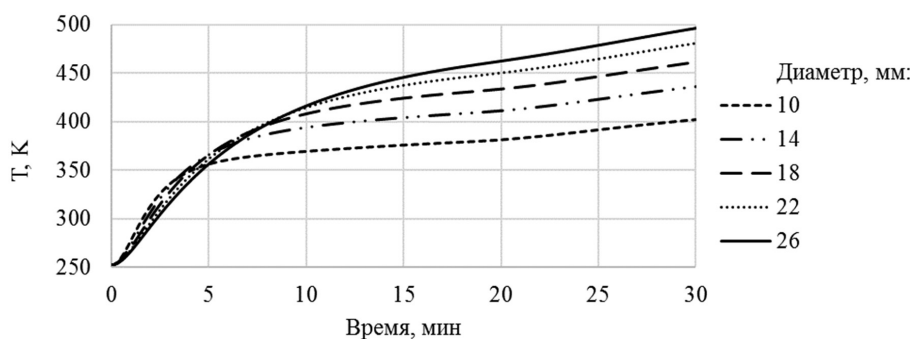


Рис. 6. Зависимость температуры воздуха во впускном канале от внешнего диаметра трубок при прогреве ( $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ )

ется площадь теплообмена и повышается температура воздуха во впускном канале, рис. 7. Если при этом уменьшать диаметр трубок для сохранения суммарной площади их поперечного сечения, то интенсивность роста температуры несколько снижается.

Необходимо учитывать влияние сердцевины теплообменника, которая создает дополнительное сопротивление на впуске воздуха, на наполнение цилиндров в процессе работы двигателя. Расчеты показали, что уменьшение проходного сечения на 5...10% от номинального (примерно соответствует сердцевине теплообменника) влечёт уменьшение мощности двигателя на 0,05...0,1% (0,3...0,7 кВт)

вследствие роста насосных потерь и снижения коэффициента наполнения цилиндра (рис. 8).

На основе анализа результатов расчета (рис. 6 и 7) предложено для двигателя В-92С2 использовать сердечник теплообменника, состоящий из 9-ти трубок внешним диаметром 18 мм.

С целью моделирования работы комбинированной системы предпусковой подготовки и облегчения пуска в различных условиях проведены соответствующие расчеты.

На рис. 9 показана температура воздуха во впускном канале в момент времени 30 мин при различных температурах окружающей среды при предпусковом подогреве. Как видно из ри-

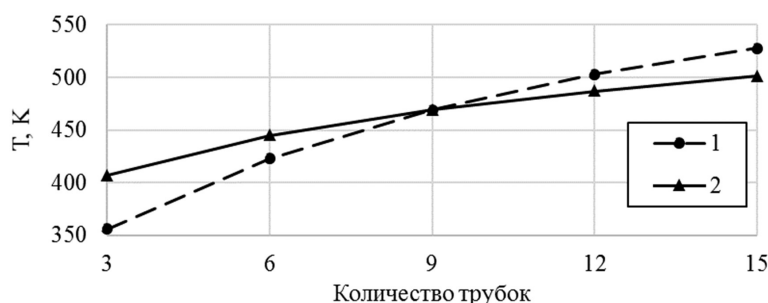


Рис. 7. Зависимость температуры воздуха во впускном канале в момент времени 30 мин от количества трубок теплообменника при прогреве ( $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ): 1 —  $D_{air} = const$ ; 2 —  $F_{air} = const$

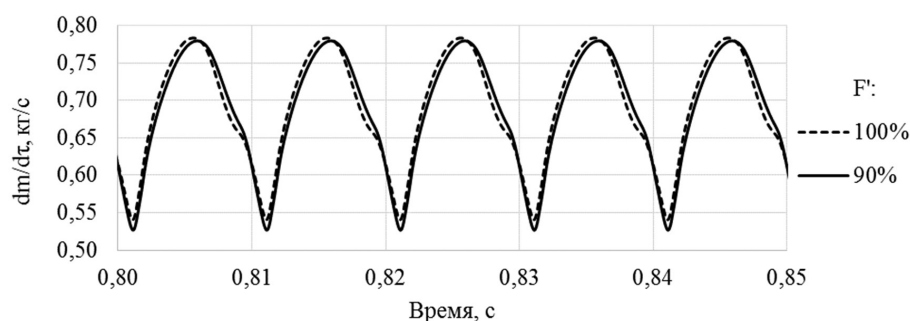


Рис. 8. Фрагмент расчетной осциллограммы расхода воздуха через один коллектор при различных величинах относительной площади поперечного сечения впускного канала  $F'$

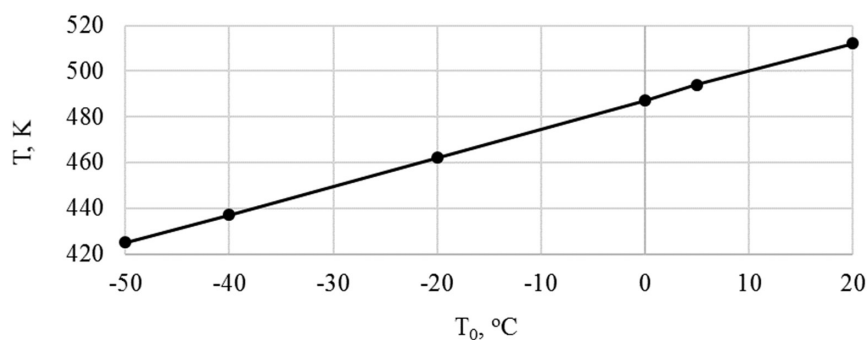


Рис. 9. Температура воздуха во впускном канале в момент времени 30 мин при различных температурах окружающей среды при прогреве

сунка зависимость имеет линейный характер, однако в динамике изменение температуры при прогреве несколько отличается (рис. 10). Температура блока в момент времени 30 мин практически не изменяется и составляет 362...363 К. Динамика прогрева блока изменяется более заметно (рис. 10).

На рис. 11 показана зависимость эффективной (т.е. с учетом теплотерь) тепловой мощности теплообменника во впускном канале при прокрутке от установившейся частоты вращения коленчатого вала в диапазоне рабочих температур ПЖД от минус 20 до 5 °С (тепловая мощность определялась как разница энтальпий потока воздуха на входе и выходе теплообменника).

Как видно из рис. 11, повышение частоты вращения влечет рост тепловой мощности. Мощность СОП, требуемая для обеспечения экстренного пуска дизеля при температуре среды минус 20 °С должна быть не менее 5,5 кВт, при температуре среды 5 °С — не менее 2,8 кВт [11]. Пусковая частота двигателя В-92С2 — 150...250 мин<sup>-1</sup> при пуске электро-стартером и 350...400 мин<sup>-1</sup> при пуске комби-

нированным способом. В этом случае тепловой мощности теплообменника достаточно для обеспечения экстренного пуска двигателя как при минус 20 °С, так и при 5 °С комбинированным способом (согласно инструкции по эксплуатации допустим только комбинированный способ). Нормальный (не экстренный) пуск двигателя, согласно нормативной технической документации (НТД), производится с применением СПП и без СОП. Поэтому с СОП он заведомо будет обеспечен, при этом можно сократить время на тепловую подготовку двигателя.

Таким образом, в ходе исследования обоснованы основные рациональные конструктивные параметры комбинированной СПП и СОП двигателя В-92С2 с использованием тепла ОГ ПЖД:

- внешний диаметр трубок теплообменника во впускном канале — 18 мм;
- толщина стенок трубок — 2 мм;
- количество трубок — 9 шт.;
- материал трубок — медь.

Обоснована необходимость теплоизоляции, подводящей ОГ от ПЖД трубы и организации противоточного движения сред.

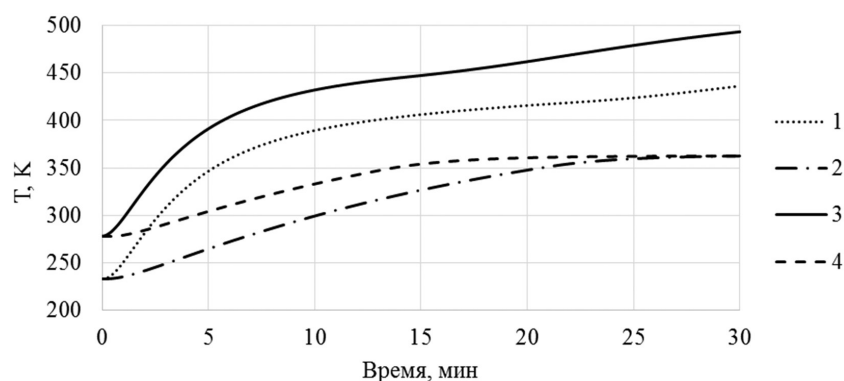


Рис. 10. Температура при прогреве: 1 — воздуха во впускном канале ( $t_0 = -40\text{ }^\circ\text{C}$ ); 2 — блока ( $t_0 = -40\text{ }^\circ\text{C}$ ); 3 — воздуха во впускном канале ( $t_0 = 5\text{ }^\circ\text{C}$ ); 4 — блока ( $t_0 = 5\text{ }^\circ\text{C}$ )

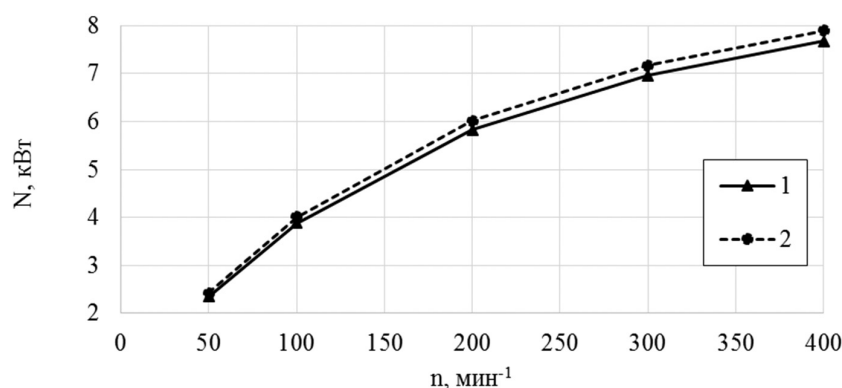


Рис. 11. Эффективная тепловая мощность теплообменника во впускном канале при прокрутке в зависимости от установившейся частоты вращения коленчатого вала: 1 —  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 —  $t_0 = 5\text{ }^\circ\text{C}$

Обоснована эффективность и целесообразность предлагаемого технического решения:

– выявлено влияние условий функционирования (температуры среды, расхода воздуха через теплообменник во впускном канале и связанной с ним частотой вращения коленчатого вала) на показатели СПП (температура воздуха во впускном канале при предпусковом подогреве и при прокрутке, тепловая мощность теплообменника);

– доказано, что тепловой мощности теплообменника во впускной трубе достаточно для обеспечения как экстренного, так и нормального пуска двигателя в диапазоне температур до минус  $20\text{ }^\circ\text{C}$  комбинированным способом.

### Литература

1. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. — Свердловск: Машгиз. 1962. 272 с.

2. Кулешов А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Кулешов Александр Сергеевич. — М. 2012. 157 с.

3. Ошищенко Д.О. Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля и снижение тепловых нагрузок на его основные детали: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Ошищенко Дмитрий Олегович. — М. 2013. 234 с.

4. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals / J.B. Heywood. McGraw-Hill Company. 1988. 980 p.

5. Woschni G. A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine / G. Woschni // SAE Technical Paper 670931. 1967. P. 174–180.

6. Яблочкин А.Б. Математическая модель рабочих процессов дизеля с нагревом воздуха на впуске отработавшими газами предпускового подогревателя: статья / А.Б. Яблочкин, М.Г. Гранкин / Стратегическая стабильность. № 3 (95), 2021. С. 26–30.

7. Двигатель В-92С2: инструкция по эксплуатации / МО РФ. ГАБТУ. — М.: Воениздат. 1998. 83 с.

8. Программа для моделирования комбинированной системы предпусковой подготовки и облегчения пуска двигателя типа В-2 / А.Б. Яблочкин и др. — М.: Реестр программ для ЭВМ, свидетельство о государственной регистрации от 18.03.2021 г. № 2021614022.

9. Керн Д. Развитые поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус. — М.: Энергия. 1977. 464 с.

10. ГОСТ 617-2006 Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия. Введ. 2008-01-01. — М.: Госстандарт России: Издательство стандартов. 2008. 29 с.

11. Козлов А.А. Электронная система вихревого индукционного подогрева впускного воздуха дизелей типа В-2 в условиях низких температур: монография / А.А. Козлов [и др.]. — Омск: 2019. 104 с.

### References

1. Vibe I.I. New about the working cycle of engines / I.I. Vibe. — Sverdlovsk: Mashgiz. 1962. 272 p.

2. Kuleshov A.S. Development of calculation methods and optimization of ICE working processes: dis. ... doct. tech. Sciences: 05.04.02 / Kuleshov Aleksandr Sergeevich. — M. 2012. 157 p.

3. Oshishchenko D.O. Improving the efficient and environmental performance of a diesel engine

and reducing thermal loads on its main parts: dis. ... doct. tech. Sciences: 05.04.02 / Onishenko Dmitry Olegovich. — M. 2013. 234 p.

4. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals / J.B. Heywood. McGraw-Hill Company. 1988. 980 p.

5. Woschni G. A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine / G. Woschni // SAE Technical Paper 670931. 1967. P. 174–180.

6. Yablochkin A.B. Mathematical model of the working processes of a diesel engine with air heating at the inlet by the exhaust gases of the preheater: article / A.B. Yablochkin, M.G. Grankin / Strategic Stability. № 3 (95). 2021. P. 26–30.

7. Engine V-92S2: instruction manual / Ministry of Defense of the Russian Federation. GABTU. — Moscow: Military Publishing. 1998. 83 p.

8. A program for simulating a combined prestarting system and facilitating engine start-up, type V-2 / A.B. Yablochkin et al. — M.: Register of computer programs, certificate of state registration dated 18.03.2021. № 2021614022.

9. Kern D. Developed heat transfer surfaces / D. Kern, A. Kraus. — M.: Energy. 1977. 464 p.

10. GOST 617-2006 Round copper and brass pipes for general use. Specifications. Introduce. 2008-01-01. — M.: Gosstandart of Russia: Publishing house of standards. 2008. 29 p.

11. Kozlov A.A. Electronic system of vortex induction heating of inlet air of B-2 diesels at low temperatures: monograph / A.A. Kozlov [and others]. — Омск: 2019. 104 p.