

На правах рукописи

**ЯРКИН Антон Викторович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МОБИЛЬНЫХ МАШИН ПУТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА  
ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ**

05.05.04. – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень 2005

Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете на кафедре «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» (г. Тюмень).

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор технических наук, профессор  
Карнаухов Николай Николаевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук, профессор  
Крамской Владимир Федорович

кандидат технических наук, доцент  
Скворцов Исаак Дмитриевич

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ОАО «Сибнефтепровод», г.Тюмень

Защита состоится 23 декабря 2005 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.273.04 при Тюменском государственном нефтегазовом университете по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Володарского 38, зал им. А.Н. Косухина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-информационном центре Тюменского государственного нефтегазового университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью организации, просим присылать в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан 22 ноября 2005 г.

Телефон для справок: (3452) 20-91-27

Ученый секретарь  
диссертационного совета



П.В. Евтин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** По мере выработки эксплуатируемых месторождений основные районы добычи нефти Западной Сибири перемещаются все дальше на Север и Восток. Соответственно ужесточаются условия эксплуатации строительной и специальной техники, что определяется низкими температурами зимнего периода, удаленностью объектов нефтедобычи друг от друга и от населенных пунктов, а также тяжелыми дорожными условиями. Проблема усугубляется тем, что лишь небольшое количество строительных машин (до 5 %) являются специальными машинами северного исполнения. Более того, это во многом не приспособленная к суровым климатическим и грунтовым условиям техника обеспечена специальными сортами топлива только на 50 %, трансмиссионного масла на 35...40 %.

Одним из способов повышения приспособленности строительных машин к условиям отрицательных температур является утилизация тепла отработавших газов (ОГ) ДВС, поэтому исследования, направленные на повышение приспособленности строительных и специальных машин к суровым условиям Севера являются актуальной научной задачей.

Усилиями ряда исследователей, среди которых одно из основных мест принадлежит коллективу сотрудников Тюменского государственного нефтегазового университета, выполнены обширные исследования и разработки систем утилизации тепла ОГ. Большой вклад в решение рассматриваемой задачи внесли С.Д.Гулин, С.В.Каверзин, Н.Н.Карнаухов, В.Ф.Крамской, А.И.Тархов, А.И.Хорош и многие другие. За рубежом исследования в этой области проводили В.Фишер (США), Х.Креде (Германия), П.Макконнел (Австралия), Т.Михельс (Голландия) и другие.

Вместе с тем на сегодняшний день отсутствуют данные о режимах работы отдельных видов строительных машин, что не позволяет определить количество тепла, подлежащее утилизации, недостаточно изучены конструкции и параметры теплообменников для утилизации тепла отработавших газов. В связи с вышеизложенным сформулирована **цель работы** – повышение эффективности эксплуатации строительных и специальных машин в суровых условиях Севера, путем использования тепловой энергии отработавших газов ДВС.

**Объектом исследования** являются режимы и условия работы строительных машин на севере Тюменской области, а также процесс теплопередачи в теплообменнике системы утилизации тепла ОГ, а **предметом исследования** – эти режимы и условия для паровой передвижной установки ППУА, используемой для обеспечения строительных работ на объектах нефтедобычи в зимнее время.

**Научную новизну** составляют:

- в предложенной общей классификации устройств для утилизации тепла отработавших газов ДВС;

- математическая модель процесса теплопереноса в компактном трубчато-ребристом теплообменнике для утилизации тепла отработавших газов ДВС;
- зависимость величины теплового потока отработавших газов от режимов работы паровой передвижной установки ППУА;
- зависимость толщины слоя отложений сажи и других продуктов сгорания топлива на поверхности теплопереноса от режимов работы ДВС и ее влияние на эффективность теплообмена.

**Практическая ценность состоит:**

- в разработке методики расчета конструктивных параметров компактного трубчато-ребристого теплообменника для утилизации тепла отработавших газов, с учетом условий эксплуатации и режимов работы строительной машины;
- в разработке системы утилизации тепла отработавших газов ДВС с компактным трубчато-ребристым теплообменником для паровой передвижной установки ППУА-1600/100, используемой для обеспечения строительных работ на объектах нефтедобычи в зимнее время.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы использовались при изготовлении опытного образца системы утилизации тепла ОГ ДВС для специальной машины ППУА-1600/100 на предприятии Урайское УТТ-1, ТПП «Урайнефтегаз», ОАО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь».

Представленная методика расчета компактного трубчато-ребристого теплообменника может быть применена при разработке новых и модернизации существующих строительных машин, приспособленных для эксплуатации в условиях Севера.

Полученные результаты используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 190502 – «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» Тюменского государственного нефтегазового университета.

**На защиту выносятся:**

- математическая модель процесса теплопереноса в компактном трубчато-ребристом теплообменнике для утилизации тепла отработавших газов ДВС;
- зависимость величины теплового потока отработавших газов от режимов работы и условий эксплуатации паровой передвижной установки ППУА;
- зависимость толщины слоя отложений сажи и других продуктов сгорания топлива на поверхности теплопереноса от режимов работы ДВС и ее влияние на эффективность теплообмена;
- методика расчета компактного трубчато-ребристого теплообменника, с учетом условий эксплуатации и режимов работы ДВС;
- конструкция компактного глушителя-утилизатора для отработавших газов ДВС.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на региональных научно-технических конференциях

(г. Тюмень 2002 г., 2003 г.); международных конференциях (г. Тюмень 2003 г., 2005 г., г. Воронеж 2004 г.); на научном коллоквиуме в Институте термодинамики Фрайбергского технического университета (г. Фрайберг, Германия 2004 г.); на научно-технических семинарах (г. Тюмень 2002-2005 гг.). В полном объеме диссертация докладывалась на заседаниях каф. ПТСДМ ТюмГНГУ (г. Тюмень 2005 г).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано автором в 9 печатных научных работах. По теме исследований получены 1 патент Российской Федерации и 1 авторское свидетельство на полезную модель. Подана одна заявка на патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов по работе, списка использованной литературы из 116 наименований и 4 приложений. Общий объем работы 157 стр., в том числе основной текст – 130 стр., приведены 56 рисунков, 29 таблиц и 122 формулы.

Автор выражает благодарность Самойловой М.И. за помощь, оказанную в работе над диссертацией.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отмечены актуальность и цель работы, научная новизна, практическая ценность полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

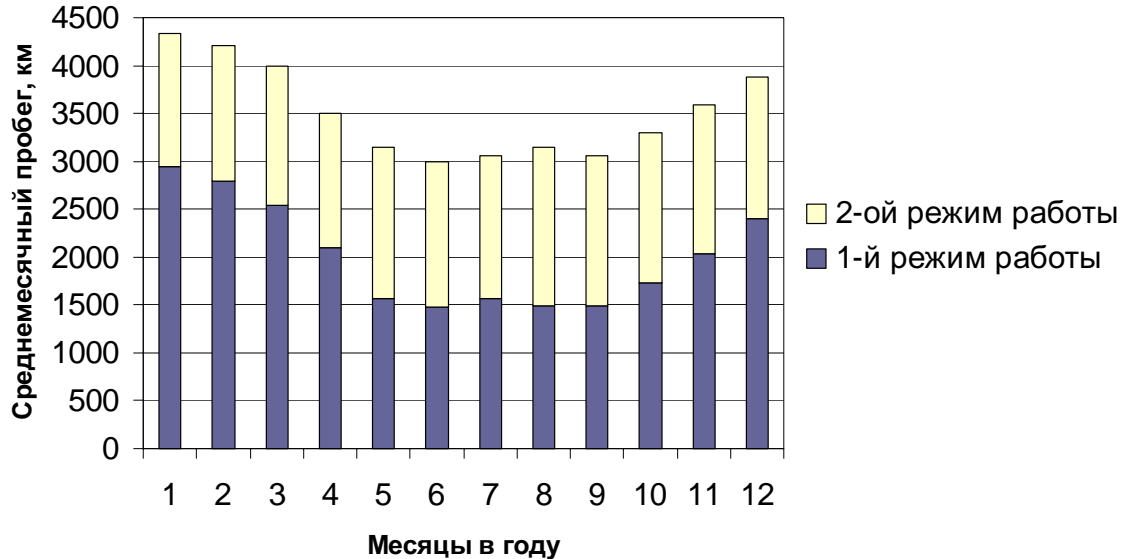
**В 1-й главе** обоснована необходимость и возможность утилизации тепловой энергии отработавших газов ДВС. Это позволяет повысить эффективность работы машины, увеличивает КПД двигателя, снижает уровень шума, повышает его экологические показатели.

Рассмотрены природно-климатические и дорожные условия эксплуатации строительных и специальных машин на нефтяных месторождениях Тюменской области на примере машины ППУА-1600/100.

ППУА-1600/100 представляет собой передвижную, автономную, многофункциональную котельную установку, предназначенную для выработки насыщенного пара. Хотя машина была создана изначально для депарафинизации нефтяных скважин, она оказалась весьма функциональной также при строительстве и ремонте в условиях отрицательных температур. На сегодня ППУА является практически незаменимой машиной при разработке мерзлых грунтов, например для ремонта коммуникаций водоснабжения и отопления зимой.

Во время эксплуатации этой машины в зимний период существует опасность замерзания трубопроводов гидравлической системы паровой установки. При переезде с объекта на объект, при температуре окружающего воздуха  $-20^{\circ}\text{C}$ , оператору приходится останавливаться через каждые 35-40 км разогревать паровой котел и прокачивать подогретую воду через гидравлическую систему паровой установки. Это приводит к значительным затратам времени, нерациональному расходу топлива. Решить проблему можно путем использования тепла ОГ ДВС.

Годовой анализ работы паровой передвижной установки ППУА-1600/100 (рис.1) показал, что зимой объем работ, производимых машиной, возрастает более чем на 30% по сравнению с летним периодом. Это связано, прежде всего, с необходимостью тепловой подготовки строительных и ремонтных работ.



**Рис. 1. Годовой цикл среднемесячного пробега паровой передвижной установки ППУА-1600/100: 1-й режим работы ( $T_{\text{пара}} = 100 \div 165^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 6 \div 20 \text{ кгс/см}^2$ ); 2-ой режим работы ( $T_{\text{пара}} = 310^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 100 \text{ кгс/см}^2$ )**

Рассмотрен тепловой баланс дизельного двигателя ЯМЗ-238, установленного на ППУА-1600/100. Определено, что значительная часть ( $\approx 26\%$ ) тепловой энергии сгораемого в двигателе топлива уносится с отработавшими газами в окружающую среду.

Средний годовой пробег паровой передвижной установки ППУА-1600/100 составляет 40-45 тыс. км. Таким образом, за год потери тепла выбрасываемого в окружающую среду с отработавшими газами составляют более 100 тыс. МДж. Этой энергии вполне достаточно для отопления жилого дома площадью  $250 \text{ м}^2$ . Это подтверждает целесообразность использования тепла ОГ ДВС для повышения эффективности эксплуатации машины ППУА-1600/100 зимой.

Проведенный международный патентный анализ средств и методов утилизации тепловой энергии ОГ ДВС показал высокий интерес к этой проблеме современных исследователей во всем мире. На основании анализа предложена общая классификация устройств для утилизации тепла отработавших газов ДВС (рис.2).

Рассмотрены существующие разработки систем утилизации тепла ОГ ДВС. Выявлено, что многие исследователи предлагают различные способы использования тепла ОГ ДВС, однако конструкции теплообменников для утилизации этого тепла до сих пор практически не исследовались, и поэтому нельзя точно сказать, какой из теплообменников является наиболее эффективным.



**Рис.2. Способы утилизации и использования тепловой энергии отработавших газов ДВС**

Поэтому были проанализированы и математически исследованы три конструкции теплообменников, наиболее подходящие для утилизации тепла отработавших газов ДВС.

На основе научно обоснованных критериев сравнения выбрана конструкция теплообменника для утилизации тепловой энергии ОГ ДВС – компактный трубчато-ребристый теплообменник (КТРТ), оптимальный по теплофизическим параметрам процесса теплопереноса. Несмотря на сравнительно невысокий коэффициент теплопередачи, КТРТ, благодаря большой площади теплообмена, обладает высокой эффективностью. Прямые гладкие (без турбулизаторов) каналы теплообменника позволяют максимально уменьшить гидравлические потери в теплообменнике, а значит и потери давления в выпускной магистрали ДВС. Кроме того, конструкция этого теплообменника компактна и проста в изготовлении.

Существующие методики расчета и математические модели процесса теплопереноса не позволяют учесть условий эксплуатации теплообменника для утилизации тепла ОГ ДВС. К этим условиям относятся изменяющаяся величина теплового потока ОГ и отложение на поверхности теплопередачи сажи и других продуктов сгорания топлива. Для расчета конструкции теплообменника для утилизации тепла ОГ необходимо определить тепловой поток ОГ и его зависимость от режимов и условий эксплуатации машины.

На основе проведенного анализа были сформулированы **задачи исследования:**

1. Разработать математическую модель процесса теплопереноса в компактном трубчато-ребристом теплообменнике для утилизации тепла отработавших газов ДВС;
2. Установить зависимость величины теплового потока отработавших газов ДВС от режимов и условий эксплуатации строительной машины, на примере ППУА-1600/100;
3. Установить влияние отложения продуктов сгорания на теплообменной поверхности на эффективность теплопереноса в компактном трубчато-ребристом теплообменнике.
4. Разработать систему утилизации тепла отработавших газов ДВС для повышения эффективности работы ППУА-1600/100.

**Вторая глава** посвящена аналитическим исследованиям. Представлена общая методика проводимых исследований, включающая в себя анализ состояния исследуемого вопроса, теоретический и экспериментальный блоки, а также результаты обработки исследований, с предложением вариантов их практического применения.

Математическая модель процесса теплопереноса в компактном трубчато-ребристом теплообменнике для утилизации тепла ОГ ДВС представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$dQ_{1i} = \frac{\partial T}{\partial x} k\beta_i F_{1i} dx d\tau \quad (1)$$

$$dQ_{2i} = \frac{\partial T}{\partial x} kF_{2i} dx d\tau \quad (2)$$

где  $Q_{1i}$ ,  $Q_{2i}$  – тепловой поток на  $i$ -ом участке теплообмена, Дж/с, переданный от отработавших газов ДВС к наружной стенке теплообменника и от внутренней стенки к холодному теплоносителю соответственно;  $F$  – площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>;  $\frac{\partial T}{\partial x}$  – разность температур горячего и холодного теплоносителя на участке теплопереноса;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий отложение продуктов сгорания на поверхности теплопереноса;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\tau$  – время, с.

Уравнения (1) и (2) описывают процесс теплопереноса от горячего теплоносителя к наружной стенке теплообменника и от внутренней стенки теплообменника к холодному теплоносителю соответственно.

Ввиду разнородности массообменных процессов и их нелинейности аналитическое решение такой задачи затруднено. Наиболее целесообразным способом решения системы уравнений (1)-(2) является численный. Для этого необходимо вместо бесконечно малых  $dx$ ,  $d\tau$  использовать конечные разности  $\Delta x$ ,  $\Delta \tau$ , а также заменить непрерывные функции и их производные на дискретные уравнения.

С целью максимального упрощения алгоритма вычислений необходимо разделить теплообменник по длине на элементарные участки  $\Delta x$  (рис. 3). Тогда тепловой поток  $Q$ , проходящий через теплообменник на участке  $\Delta x$ , с достаточной степенью вероятности можно считать постоянным на всей площади сечения теплообменника  $S=bl_1$ .

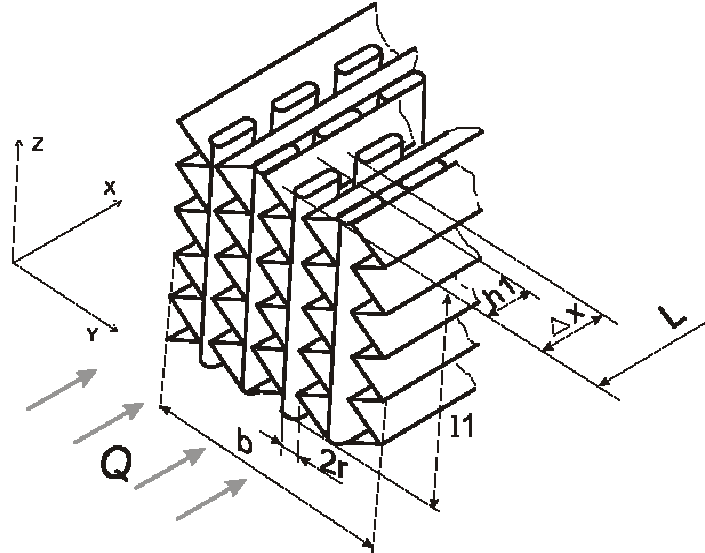


Рис.3. Расчетная схема процесса теплопереноса в компактном трубчато-ребристом теплообменнике

Подставив в систему уравнений известные величины и проинтегрировав, получим частный случай математической модели процесса теплопереноса в КТРТ для утилизации тепла ОГ ДВС:

$$Q_{1i} = k\beta(S - S_r)(h_2 + a) \int_{T_{01}}^{T_{11}} T(x) dx \quad (3)$$

$$Q_{2i} = 2kn_2 l_1 r (\pi - 2) \int_{T_{02}}^{T_{12}} T(x) dx \quad (4)$$

где,  $S_r$  – площадь «живого» сечения,  $m^2$ , т.е. площадь сечения теплообменника за вычетом пространства, занимаемого оребренными трубками:

$$S_r = 2n_2 l_1 r \left( 1 - \frac{\delta_p}{h_p} \right), \quad (5)$$

где  $n_2$  – количество оребренных трубок;  $2r$ ,  $l_1$  – ширина и высота оребренной трубки, м;  $\delta_p$  и  $h_p$  – толщина ребра и расстояние между ними, м.

Коэффициент теплопередачи  $k$  определяется с учетом удельной поверхности оребрения теплообменника:

$$k = \left[ \frac{1 - \varphi}{\alpha_1} + \delta \frac{1 - \varphi}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи отработавших газов и холодного теплоносителя соответственно;  $\delta, \lambda$  – толщина стенки (м) и коэффициент теплопроводности материала теплообменника (Вт/мК);  $\varphi$  – коэффициент оребрения, характеризующий площадь ребер, приходящуюся на единицу площади пластины:

$$\varphi = \frac{F_1}{F_1 - F_2} = 1 - \frac{F_1}{F_2}, \quad (7)$$

где  $F_1, F_2$  – площади поверхности теплообменника, м<sup>2</sup>, со стороны горячего и холодного теплоносителя соответственно.

Для учета влияния отложения сажи и других продуктов сгорания на поверхности теплопереноса в КТРТ предлагается использовать коэффициент  $\beta$ , характеризующий толщину слоя отложений в зависимости от режимов работы двигателя:

$$\beta = 1 - \frac{\Delta T_b}{\Delta T_{ln}} \quad (8)$$

где  $\Delta T_b = T_1 - T'_1$  – падение температуры на слое отложений продуктов сгорания, К;  $\Delta T_{ln}$  – логарифмическая разность температур горячего и холодного теплоносителя, К.

Согласно закону Фурье:  $q = -\lambda \int_{x=0}^b \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta T_b}{b}$ , тогда уравнение (8)

примет вид:

$$\beta = 1 - \frac{qb}{\lambda \Delta T_{ln}} \quad (9)$$

где  $q$  – плотность теплового потока отработавших газов ДВС, Вт/м<sup>2</sup>;  $b$  – толщина слоя отложений продуктов сгорания на поверхности теплопереноса, м;  $\lambda$  – теплопроводность слоя отложений, Вт/мК.

Плотность теплового потока и толщина слоя отложений продуктов сгорания топлива на поверхности теплопереноса зависит от количества и температуры сгораемого в двигателе топлива, которые в свою очередь можно определить в зависимости от нагрузки на двигатель. Тогда можно предположить, что зависимость плотности теплового потока будет иметь вид:

$$q = A_0 + A_1 N, \quad (10)$$

а зависимость толщины слоя отложений от нагрузки на ДВС можно описать с помощью полинома второй степени:

$$b = A_0 + A_1 N^2 + A_2 N. \quad (11)$$

Для установления влияния на тепловой поток ОГ ДВС режимов и условий работы строительной машины, на основе анализа априорной информации было выбрано три фактора:

$X_1$  – расход топлива двигателем, Г, л/ч;

$X_2$  – температура окружающего воздуха, t<sup>0</sup>С;

$X_3$  – скорость воздушного потока, омывающего выхлопной тракт при движении машины,  $V_{воз}$ , м/с.

В качестве гипотезы совместного влияния факторов принято уравнение регрессии в виде:

$$Q = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3. \quad (12)$$

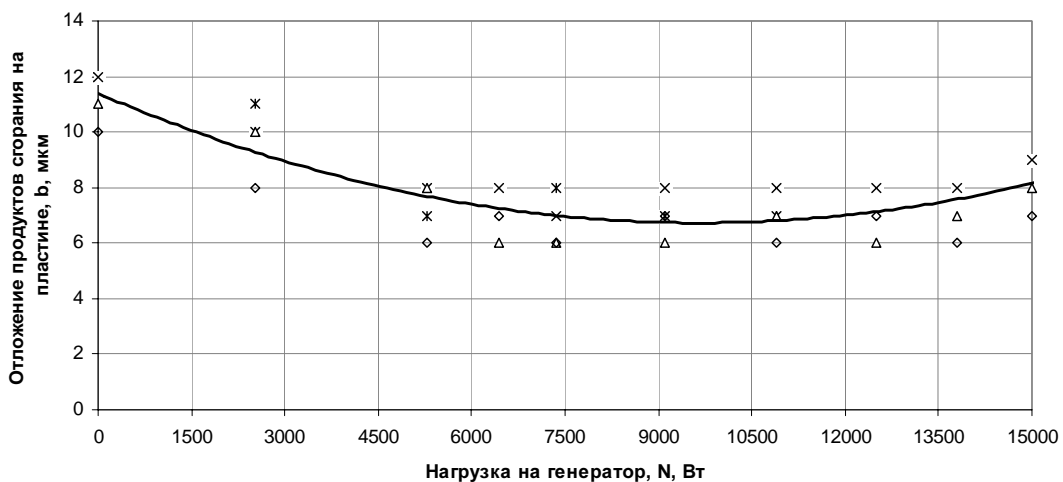
где:  $Q$  - функция отклика – тепловой поток отработавших газов ДВС на выходе из коллектора;  $A_i$  - коэффициенты уравнения регрессии;  $X_i$  - значение факторов.

Для подтверждения адекватности выдвинутых предположений были проведены экспериментальные исследования.

**В третьей главе** представлены методика проведения и результаты экспериментальных исследований, цель которых заключается в оценке эффективности использования КТРТ для утилизации тепла отработавших газов ДВС, в проверке гипотез, выдвинутых в теоретических исследованиях и определении численных значений регрессионных моделей. Эксперименты проводились в три этапа.

На первом этапе исследовалось влияние отложения сажи и других продуктов сгорания топлива на поверхности теплопередачи на эффективность теплопереноса в КТРТ.

Для решения поставленной задачи использовался пассивно-активный однофакторный эксперимент. Эксперимент проводился на дизель-генераторной установке SDMO TM 20. В выходной коллектор на пути отработавших газов устанавливалась тонкая металлическая пластина. При различной нагрузке на генератор в течение одинакового отрезка времени работы фиксировалось изменение температуры отработавших газов ДВС. Затем пластина вынималась и остужалась до температуры 20<sup>0</sup>С. После этого рычажным микрометром часового типа МР-25 с ценой деления 0,001 мм, на пластине замерялась толщина слоя отложений сажи и других продуктов сгорания топлива в дизеле (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость толщины отложений сажи и других продуктов сгорания на металлической пластине, помещенной в выпускной коллектор двигателя от нагрузки на дизель-генераторную установку

Для определения плотности теплового потока измерялась температура ОГ в коллекторе двигателя. С учетом полученных коэффициентов уравнение зависимостей (10) и (11) имеют вид:

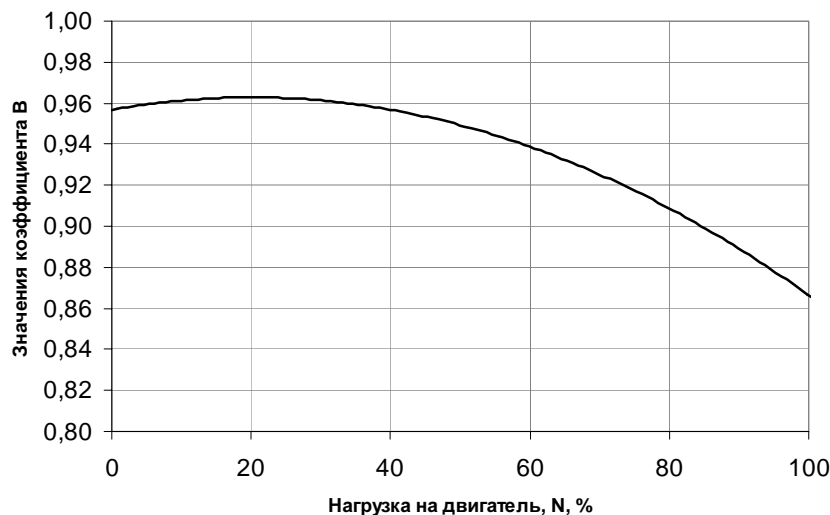
$$q = 6270 + 0,82N, \quad (13)$$

$$b = 11,39 + 5 \cdot 10^{-8} N^2 - 0,001N \quad (14)$$

На холостых оборотах и при малой нагрузке на генератор ( $N < 5$  кВт) толщина слоя отложений на поверхности пластины достигает 12 мкм. При этом в структуре отложений отчетливо видна смолянистая пленка, образованная в результате неполного сгорания топлива в цилиндрах двигателя. В диапазоне нагрузки  $N = 7,5 \div 12$  кВт, что составляет примерно 35÷60% от максимально возможной нагрузки на двигатель (21 кВт), наблюдается наименьшая толщина (6-8 мкм) отложений сажи и других продуктов сгорания на поверхности пластины.

С увеличением нагрузки  $N > 12$  кВт происходит увеличение толщины слоя отложений до 8÷9 мкм для  $N = 15$  кВт. Однако в отложениях уже не заметно столь явно смолянистых составляющих, налет является матовым, что указывает на наличие в его структуре в основном сажи.

Для того, чтобы получить зависимости коэффициента  $\beta$  от режимов работы строительной машины представим нагрузку в процентах от максимально возможной  $N_{\%} = N/N_{max}$ . Подставляя средние значения для  $q$  и  $b$  в формулу (9) получаем зависимость коэффициента  $\beta$  от нагрузки на двигатель (рис. 5).



**Рис. 5. Зависимость коэффициента  $\beta$  от нагрузки на двигатель**

Уравнение зависимости имеет вид:

$$\beta = 0,9568 - 2 \cdot 10^{-5} N_{\%}^2 + 0,0006N_{\%} \quad (15)$$

На втором этапе экспериментальных исследований определялась величина теплового потока отработавших газов ДВС и ее зависимость от режимов работы двигателя и условий эксплуатации машины. При решении поставленной задачи использовался пассивно-активный многофакторный

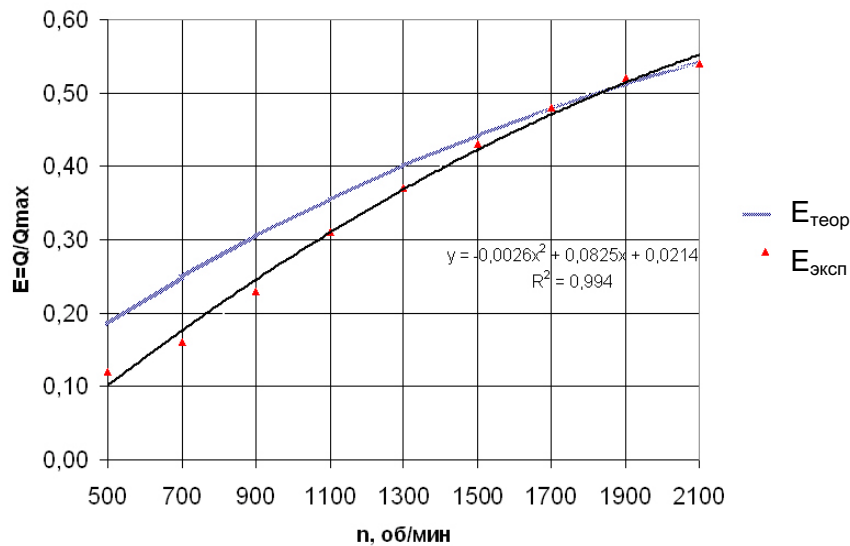
эксперимент. Для этого был использован натуральный образец – паровая промышленная установка ППУА-1600/100.

Для установления степени совместного влияния исследуемых факторов на тепловой поток, использовался аппарат корреляционно-регрессионного анализа. Расчеты выполнялись с использованием программы «REGRESS», позволяющей определить численные значения параметров для многофакторных зависимостей.

Полученное уравнение регрессии адекватно предложенной в качестве рабочей гипотезы математической модели процесса теплопереноса в КТРТ (коэффициенты: корреляции – 0,99; детерминации – 0,97). После преобразования зависимость имеет вид:

$$Q = 1277 X_1 - 0,58 X_2 - 18,9 X_3 - 7582 . \quad (16)$$

Из рассмотренных факторов наиболее влиятельным является расход топлива двигателя, затем по степени влияния следуют воздушный поток (скорость движения машины) и температура окружающей среды.



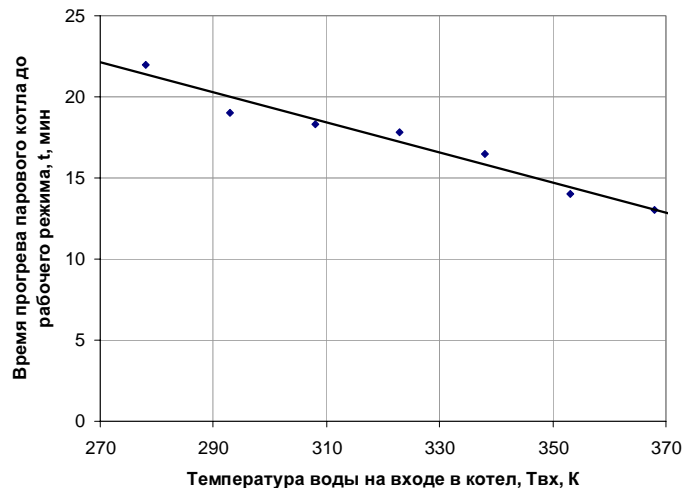
**Рис. 6. Теоретическая и экспериментальная зависимости эффективности теплопередачи ОГ в КТРТ от режима работы двигателя**

На рис. 6 представлены графики зависимости эффективности теплопередачи в КТРТ от режима работы двигателя, полученные теоретическим и экспериментальным путем. Видно, что теоретическая кривая эффективности при малых оборотах двигателя проходит несколько выше кривой, полученной экспериментально.

С увеличением оборотов двигателя кривые постепенно сближаются и при достижении области номинального режима работы двигателя ( $n=1800\div 2100$  об/мин) – сходятся вместе. Такое расхождение можно объяснить следующим. На малых оборотах двигателя скорость течения отработавших газов также невелика, поэтому возрастает величина неучтенных тепловых потерь  $Q_{ост}$ , которые идут на нагрев цилиндров, головок, коллектора и других частей системы выпуска двигателя. С увеличением числа оборотов, возрастает величина и скорость теплового

потока отработавших газов. Большое количество теплоты проходит через систему выпуска за меньшее время. Влияние неучтенных потерь таким образом становится менее значительным. Это обстоятельство не было учтено в теоретических расчетах, что и вызвало расхождение функций.

Цель третьего эксперимента – подтверждение целесообразности оснащения паровой передвижной установки ППУА-1600/100 системой утилизации тепла ОГ ДВС. Результаты эксперимента представлены на рис. 7.



**Рис. 7. Зависимость времени разогрева котла паровой установки до рабочего режима от начальной температуры воды**

Полученное уравнение зависимости времени парообразования ( $t$ ) от температуры воды на входе в котел ( $T$ ) имеет вид:

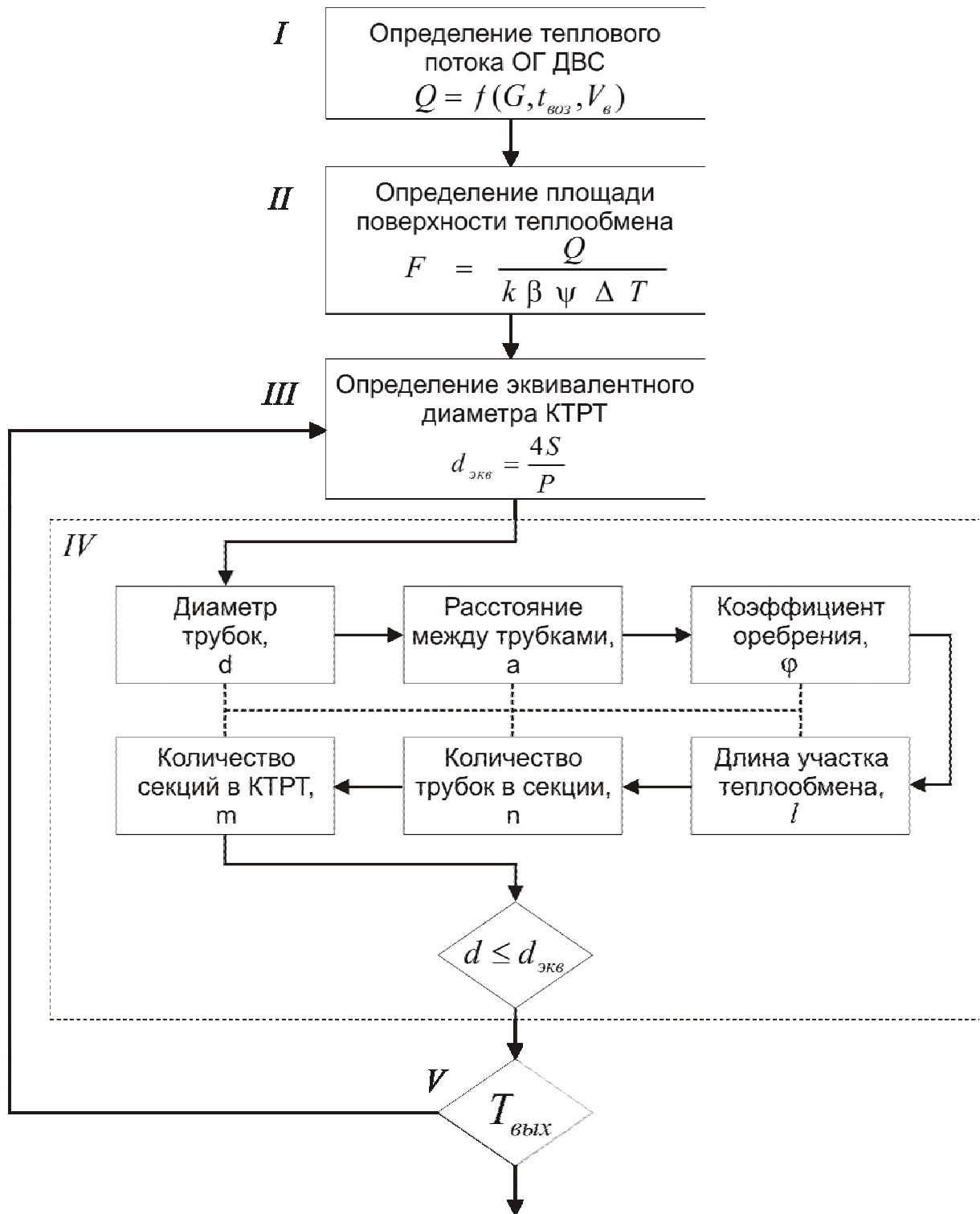
$$t = 47 - 0,09T \quad (17)$$

Предварительный разогрев воды до температуры  $95^{\circ}\text{C}$  ( $368\text{ K}$ ) сокращает время подготовки котла к работе до 13 минут, что на 35% (7 мин) меньше нормы завода изготовителя (20 мин) и на 40% (9 мин) меньше экспериментально полученного значения при начальной температуре воды  $5^{\circ}\text{C}$ .

Сравнение полученных результатов с параметрами базовой машины подтверждает целесообразность использования системы утилизации тепла ОГ ДВС с компактным трубчато-ребристым теплообменником для повышения эффективности работы паровой передвижной установки ППУА-1600/100.

**В четвертой главе** рассмотрены возможные варианты практического применения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Предложена методика расчета КТРТ для утилизации тепла отработавших газов не только двигателей внутреннего сгорания, но и различных паровых и водогрейных котлов, установленных в отопительных котельных на гражданских и промышленных объектах (рис.8).



**Рис.8. Блок-схема алгоритма расчета компактного трубчато-ребристого теплообменника для утилизации тепла отработавших газов ДВС.**

В соответствии с методикой на I этапе необходимо определить тепловой поток горячего теплоносителя, т.е. то количество теплоты, которое выбрасывается с отработавшими газами в атмосферу при сгорании топлива.

На II этапе необходимо определить площадь поверхности теплопередачи для снятия с теплового потока отработавших газов требуемого количества теплоты. Для этого используются известные теплотехнические способы расчета.

На III этапе расчета с помощью предложенной математической модели определяется эквивалентный диаметр КТРТ. При этом учитываются условия эксплуатации теплообменника, ограничивающие его по массогабаритным параметрам.

На IV этапе определяются шесть конструктивных параметров теплообменника – диаметр трубок, расстояние между ними, коэффициент оребрения, длина участка теплообмена, количество трубок в одной секции и количество секций в теплообменнике. Если выбранные значения удовлетворяют условию  $d \leq d_{экр}$ , то можно перейти к следующему этапу расчета, иначе подбираются другие значения рассматриваемых величин.

На последнем V этапе производится проверка полученных конструктивных параметров компактного трубчато-ребристого теплообменника. Для чего рассчитывается температура холодного теплоносителя на выходе из теплообменника. Если значение температуры удовлетворяют заданным условиям, полученные конструктивные параметры теплообменника принимаются, иначе расчет необходимо производить снова, начиная с третьего этапа – определения эквивалентного диаметра.

Разработана конструкция системы утилизации тепла отработавших газов ДВС для паровой передвижной установки ППУА-1600/100, которая включает в себя компактный трубчато-ребристый теплообменник.

Установка теплообменника в гидравлическую систему паровой установки позволяет за счет тепла ОГ ДВС машины поддерживать положительную температуру воды в трубопроводах паровой установки и избежать выхода из строя дорогостоящего оборудования при отрицательных температурах окружающего воздуха. Кроме того, снижается время разогрева парового котла до рабочих режимов, поскольку подаваемая в котел вода уже предварительно подогрета.

Оптимальная установка теплообменника – на место штатного глушителя машины. Для этого конструкция была рассчитана и доработана до глушителя-утилизатора (рис.9), который позволяет эффективно использовать тепло отработавших газов без изменения шумовых и мощностных характеристик двигателя машины.

Представлено технико-экономическое обоснование модернизации специальной машины ППУА-1600/100. Расчетный годовой экономический эффект от снижения расхода топлива на прогрев паровой установки, составил около 13 тыс. рублей. Срок окупаемости – 9 месяцев.

Расчет экологического эффекта показал, что внедрение предложенной СУТ позволит на 40% сократить объем вредных выбросов в окружающую среду за время прогрева котла паровой установки до рабочих режимов.

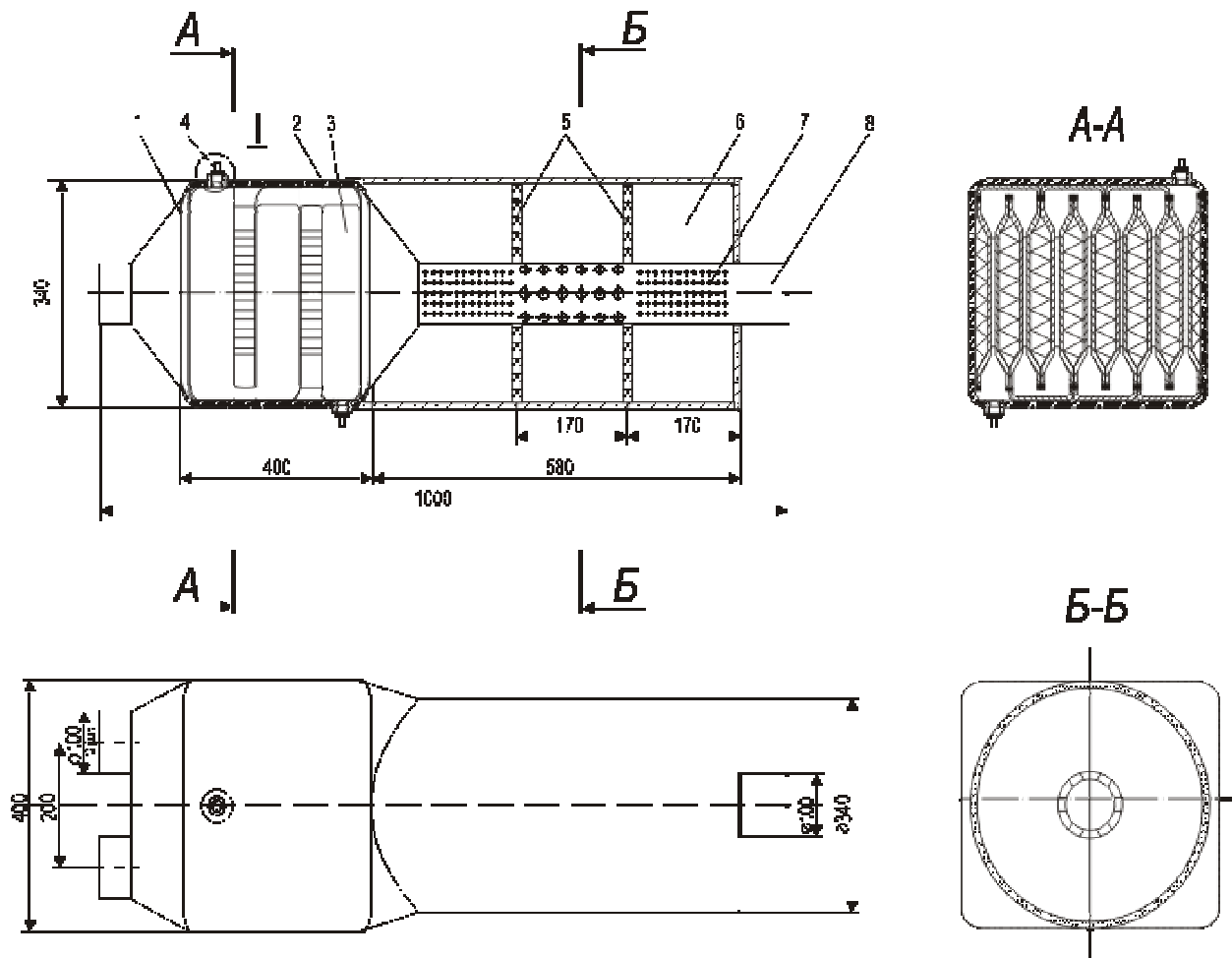


Рис.9. Глушитель-утилизатор:

1 - змеевик; 2 - теплоизоляция; 3 - пластинчатые ребра; 4 - штуцер; 5 - перегородки резонатора; 6 - резонатор; 7 - перфорация; 8 - труба отвода выхлопных газов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Решена научно-практическая задача по повышению эффективности строительных мобильных машин путем утилизации тепла отработавших газов ДВС.
2. Предложена математическая модель процесса теплопереноса в КТРТ, представляющая собой систему дифференциальных уравнений, решение которой позволяет получить конструктивные параметры теплообменника с учетом заданных режимов работы двигателя и условий эксплуатации.
3. Определена величина теплового потока отработавших газов на различных режимах работы строительной машины. Определены факторы, влияющие на эффективность теплопереноса. Экспериментально установлено, что наибольшее влияние на величину теплового потока отработавших газов оказывает изменение расхода топлива ДВС.

4. Предложено для учета влияния отложений продуктов сгорания на поверхности теплопереноса ввести в предложенную математическую модель коэффициент  $\beta$ . Экспериментально установлена зависимость изменения толщины слоя отложений сажи и других продуктов сгорания топлива на поверхности теплопереноса от режимов работы ДВС и ее влияние на эффективность теплообмена. Подтверждена адекватность полученных зависимостей.
5. Представлены пути практического использования результатов исследования:
  - методика расчета компактного трубчато-ребристого теплообменника для утилизации тепла отработавших газов ДВС;
  - система утилизации тепла отработавших газов ДВС, включающая КТРТ, для передвижной паровой установки ППУА-1600/100 с оригинальной конструкцией глушителя-утилизатора.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Карнаухов, Н.Н. К вопросу эффективного использования тепловой энергии отработавших газов ДВС [Текст] / Н.Н. Карнаухов, М.И. Самойлова, А.В. Яркин // Транспортный комплекс – 2002: Материалы научно-практического семинара, - Тюмень: ТюмГНГУ, 2002 г. – С. 145-147.
2. Пат. 2215167 Российская Федерация, МКП<sup>7</sup> F 02 G 5/02, H 01 L 37/04. Устройство для преобразования тепловой энергии отработавших газов ДВС [Текст] / Самойлова М.И., Перевозкин А.Ю., Чарков С.Т., Квашнин Г.Р., Яркин А.В. ; заявитель патентообладатель Тюменский гос. нефтегазовый ун-т - № 2002107189/06; заявл. 20.03.02 ; опубл. 27.10.03, Бюл. № 23 (ч.II). – 4 с. : ил.
3. Яркин, А.В. Повышение эффективности ДВС строительных машин за счет использования тепла отработавших газов [Текст] / А.В. Яркин // Техника, технологии и перспективные материалы: Межвузовский сборник научных трудов/ Под ред. А.Д. Шляпина. – М.: МГИУ, 2003 г. – С. 158-163.
4. Яркин, А.В. Метод утилизации и использования тепловой энергии отработавших газов двигателя строительной машины [Текст] / А.В. Яркин, М.И. Самойлова // Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта: Материалы региональной научно-практической конференции. Часть 2./ Отв. редактор Ш.М. Мерданов.- Тюмень, 2004 г. – С. 146-150.
5. Карнаухов, Н.Н. Анализ конструкций теплообменников для утилизации для утилизации тепла отработавших газов ДВС [Текст] / Н.Н. Карнаухов, А.В. Яркин, М.И. Самойлова // Интерстроймех-2005: Труды международной научно-технической конференции. Часть 1./ Отв. редакторы А.А. Серебrenников, Ш.М. Мерданов.- Тюмень: ТюмГНГУ, 2005 г. – С. 293-296.

6. Яркин, А.В. Методика расчета теплопередачи при утилизации тепла отработавших газов ДВС. Новые технологии – нефтегазовому региону / А.В. Яркин // Материалы научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Тюмень: издательство «Вектор Бук», 2005 г. – С. 143-144.
7. Яркин, А.В. Оптимизация теплообменника для утилизации тепла отработавших газов ДВС [Текст] / А.В. Яркин, Г.В. Бахмат // Материалы докладов II-й научной школы-семинара молодых ученых: «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника», Тюмень 19-20 мая 2005 г. – С. 201-203.
8. Яркин, А.В. Исследование эффективности использования теплообменника для утилизации тепла ОГ ДВС [Текст] / А.В. Яркин, М.И. Самойлова // Материалы 4-ой Международной научно-технической конференции «Итоги строительной науки». – Владимир: ВГУ, 2005 г. – С. 157-161.
9. Яркин, А.В. Компактный трубчато-ребристый теплообменник для утилизации тепла отработавших газов ДВС [Текст] / А.В. Яркин // Материалы международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири»: Т.2. – Тюмень: «Феликс», 2005. – С. 176-177.

Подписано к печати \_\_.\_\_.2005 г.  
Заказ №  
Формат 60/90 1/16  
Отпечатано на RISO GR 3750

Бум. писч. №1  
Уч. изд. л. 1,0  
Усл. печ. л. 1,0  
Тираж 100 экз.

---

**Издательство «Нефтегазовый университет»**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Тюменский государственный нефтегазовый университет»  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38  
Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38