

## Разработка первого этапа методики проектирования двигателя с внешним подводом тепла для применения в лесопромышленном комплексе

Е.А. Тихонов<sup>1a</sup>, В.С. Сюнев<sup>1b</sup>, О.А. Куницкая<sup>2c</sup>, В.В. Швецова<sup>3d</sup>

<sup>1</sup> Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

<sup>2</sup> Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

<sup>a</sup> tihonov@petsu.ru, <sup>b</sup> siounev@petsu.ru, <sup>c</sup> ola.ola07@mail.ru, <sup>d</sup> vikt.schvetzova2012@yandex.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>,

Статья поступила 17.01.2022, принята 24.01.2022

*Для повышения эффективности освоения запасов удаленных спелых и перестойных эксплуатационных лесов в Сибири и на Дальнем Востоке все шире используется технология лесных терминалов (непостоянных лесных складов). На лесных терминалах при помощи мобильного деревообрабатывающего оборудования производятся пиломатериалы и ряд других продуктов. Важным аспектом работы лесных терминалов является их энергоснабжение. Наиболее оптимальным является энергоснабжение от порубочных остатков и отходов лесопиления, энергия которых преобразуется в двигателях с внешним подводом тепла. В статье рассмотрен один из вопросов разработки методики проектирования двигателя Стирлинга для применения в лесопромышленном комплексе. Разработана методика первого этапа моделирования рабочего процесса двигателя для обоснования оптимальных конструктивных параметров — моделирование обратного рабочего цикла. Для реализации данного этапа выполнено моделирование конвективной теплопередачи от рабочего тела к внутренним стенкам цилиндров двигателя и от внешних стенок цилиндров к окружающему воздуху. Это позволило определить приведенный коэффициент конвективной теплопередачи для дальнейшего использования при моделировании обратного цикла: от 0 до 7,2 Вт/(м<sup>2</sup>°С) — для цилиндра вытеснителя и от 0 до 68 Вт/(м<sup>2</sup>°С) — для цилиндра поршня. При этом погрешность приведения в сравнении с результатами численных экспериментов не превышает 1 % в рассматриваемом диапазоне температур.*

*Авторы выражают глубокую признательность коллегам по научной школе «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» за ценные сведения и замечания, высказанные при подготовке данной работы.*

**Ключевые слова:** лесопромышленный комплекс; двигатель Стирлинга; методика проектирования; приведенный коэффициент конвективной теплопередачи.

## Development of the first stage of the design methodology for an engine with external heat supply for use in the timber industry

E.A. Tikhonov<sup>1a</sup>, V.S. Syunev<sup>1b</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>2c</sup>, V.V. Shvetsova<sup>3d</sup>

<sup>1</sup> Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Republic of Karelia

<sup>2</sup> Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha

<sup>3</sup> St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2-ya Krasnoarmeiskaya St., St. Petersburg, Russia

<sup>a</sup> tihonov@petsu.ru, <sup>b</sup> siounev@petsu.ru, <sup>c</sup> ola.ola07@mail.ru, <sup>d</sup> vikt.schvetzova2012@yandex.ru,

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>,

Received 17.01.2022, accepted 24.01.2022

*To increase the efficiency of development of reserves of remote mature and overmature production forests in Siberia and the Far East, the technology of timber terminals (non-permanent forest storages) is increasingly being used. Timber terminals, using mobile wood processing equipment, produce lumber and a number of other products. An important aspect of forest terminals operation is their power supply. The most optimal is energy supply from felling residues and sawing waste, the energy of which is converted in the engines*

*with external heat supply. The article deals with one of the issues related to development of Stirling engine design methodology for application in timber industry. The methodology of the first stage of modeling of an engine working process for substantiation of optimum design parameters is developed and substantiated: modeling of a reverse working cycle. For realization of this stage, simulation of the convective heat transfer from the working body to the inner walls of the engine cylinders and from the outer walls of the cylinders to the ambient air was performed. It made it possible to determine the reduced convective heat transfer coefficient for further use in modeling the reverse cycle: from 0 to 7.2 W/(m<sup>2</sup>°C) – for the displacer cylinder and from 0 to 68 W/(m<sup>2</sup>°C) – for the piston cylinder. The error of the reduction in comparison with the results of numerical experiments does not exceed 1% in the considered temperature range. The authors express their deep gratitude to their colleagues in the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry" for valuable information and comments made during the preparation of this work.*

**Keywords:** timber industry; Stirling engine; design methodology; reduced convective heat transfer coefficient.

**Введение.** В настоящее время заготовка древесины связана с освоением площадей, все более удаленных от основных объектов инфраструктуры [1–6]. В связи с этим в себестоимости заготовки растет транспортная составляющая [7–10]. Эта часть себестоимости связана не только с транспортировкой непосредственно леса. Значительная часть логистических затрат расходуется на доставку дизельного топлива, в том числе для электрогенераторных установок, обеспечивающих жизнедеятельность отдаленных лесных участков [11; 12]. Дизель-генератор часто является единственным доступным источником электрической энергии на лесозаготовительных объектах. Более того, в различных регионах России, особенно в арктической и субарктической зонах, существуют целые населенные пункты, для которых единственным источником электроэнергии является дизельная электростанция (ДЭС). Например, только в Иркутской области около 100 населенных пунктов снабжаются электроэнергией 6 ч в сутки от ДЭС. Стоимость такой электроэнергии значительно выше, чем стоимость сетевой электроэнергии.

Подключение к сетевой энергосистеме лесозаготовительных предприятий не является решением вопроса, даже при относительной близости линий электропередач. Это связано с высокой стоимостью подключения (согласование и проектные работы) и мобильным характером инфраструктуры лесозаготовок. Поэтому на сегодняшний день ДЭС применяются повсеместно. Подобная схема электроснабжения имеет следующие недостатки: неэкологичность, шумность, необходимость транспортировки и правильного хранения запасов топлива, высокую стоимость 1 кВт·часа электроэнергии (для получения 1 кВт·час сжигается 0,2 л дизельного топлива).

Одним из путей решения данной проблемы является разработка и внедрение линейки генераторов различной мощности на базе двигателя Стирлинга. Двигатели Стирлинга известны с начала XIX в., их разработка и совершенствование основывались на базовых принципах термодинамики и огромном объеме экспериментальных исследований, которые выполнялись фирмами «Филипс», «Форм моторс», «Юнайтед Стирлинг» и «МАН». Наиболее совершенными моделями были двигатели GPU-3 и P-40 фирм «Филипс» и «Юнайтед Стирлинг». Однако данные двигатели не смогли конкурировать по темпам развития с двигателями внутреннего сгорания, обладающими отлично разработанной теоретической базой. На сегодняшний день КПД двигателей Стирлинга ниже, чем КПД дизельных двигателей той же мощности. В то же время, в разрезе рас-

сматриваемой проблемы следует учитывать, что топливом для двигателя Стирлинга может служить древесная биомасса, в избытке имеющаяся на каждой лесосеке [13]. Технологические возможности и схемы заготовки с дальнейшим сжиганием щепы для привода двигателей внешнего сгорания рассмотрены в ряде публикаций [14; 15]. Данные работы ограничиваются теоретическими выкладками, обосновывающими целесообразность использования двигателей Стирлинга, и не имеют реального воплощения. Данный вид топлива отлично подойдет в качестве источника энергии для электростанции на базе двигателя Стирлинга (СЭС).

По нашему мнению, внедрение СЭС на лесозаготовительных предприятиях позволит повысить экономическую и экологическую эффективность отрасли. В сравнении с ДЭС, СЭС будут иметь следующие достоинства: экологичность, низкая шумность, отсутствие необходимости доставки дорогостоящего топлива.

В настоящее время на рынке не представлены СЭС, или серийные двигатели, удовлетворяющие условиям эксплуатации лесозаготовительных предприятий. Серийное производство промышленных двигателей Стирлинга пока не освоено ни в одной стране мира, хотя они серийно производились в XIX в., до повсеместного внедрения ДВС. Существуют экспериментальные образцы, а также двигатели для специфических нужд, например, силовая установка для подводных лодок. Двигатели Стирлинга специального назначения производятся серийно для военно-промышленного комплекса и космической отрасли, но они неприменимы в других отраслях ввиду дороговизны и специфических условий работы.

Практически все опубликованные работы по двигателям Стирлинга носят исключительно теоретический характер, и в очень редких случаях дело доходит до действующего лабораторного образца.

Что касается лесопромышленного комплекса, то все работы в данном направлении сходятся в том, что внедрение энергетических установок на базе двигателей Стирлинга, работающих на биотопливе, — актуальное направление прикладных исследований. Но, к сожалению, на сегодняшний момент никаких практических наработок в данном направлении нет [16].

Следовательно, необходимо разработать универсальную методику проектирования двигателя Стирлинга на требуемую мощность и под определенный вид топлива [17].

Первым этапом разработки методики двигателя будет определение оптимальных конструктивных параметров. Для этого будут применяться численные мето-

ды моделирования газодинамических процессов, которые позволят первоначально обосновать конструкцию без изготовления реальных опытных образцов.

Система численного моделирования *Fluent* из программного пакета *Ansys* позволяет полностью смоделировать рабочий процесс двигателя с получением выходных характеристик на коленчатом валу. Однако прямое моделирование — достаточно трудоемкий процесс как с точки зрения разработки расчетной модели, так и с точки зрения ресурсоемкости выполнения самого моделирования. А так как количество численных экспериментов будет достаточно большим, необходимо разделить процесс обоснования конструктивных параметров на два этапа: ориентировочное определение оптимальных параметров и уточнение оптимальных значений.

Так как двигатель Стирлинга может работать как по прямому, так и по обратному циклу, для первого этапа, гораздо проще будет выполнить моделирование его работы в режиме компрессора. В качестве критерия оценки эффективности работы можно принять разность температур на поверхности цилиндров поршня и вытеснителя (при реализации обратного цикла поршень будет нагреваться, в вытеснитель — охлаждаться).

При такой постановке задачи необходимо будет определить приведенный коэффициент конвективной теплопередачи от рабочего тела к внутренним стенкам цилиндров, который бы учитывал конвективную теплопередачу от наружных стенок цилиндров к окружающему воздуху.

**Цель работы.** В настоящей работе сделана попытка разработки методики проектирования двигателя с внешним подводом тепла для применения в лесопромышленном комплексе.

**Материалы и методы исследования.** Для проведения расчетных экспериментов была разработана цифровая твердотельная модель высокотемпературного двигателя Стирлинга  $\alpha$ -типа (рис. 1).

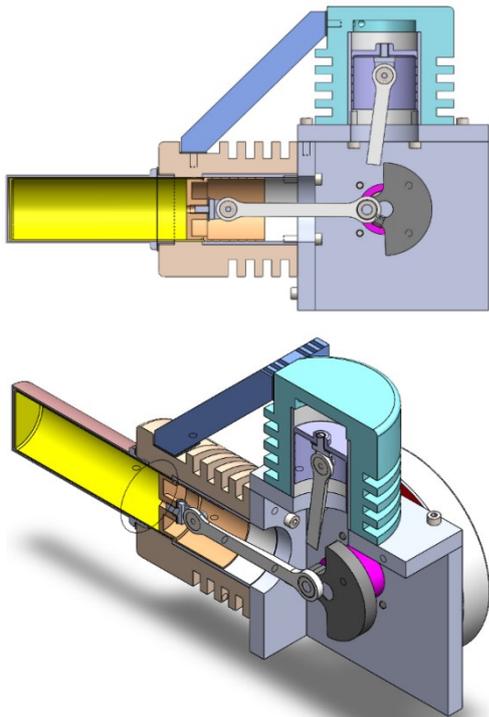


Рис. 1. Цифровая твердотельная модель

Твердотельная модель также будет использоваться для определения зависимости коэффициентов теплопередачи от температуры горячего и холодного цилиндров, а также регенератора.

Дополнительно была разработана твердотельная модель газовой полости (рис. 2).

Так как модель имеет плоскость симметрии, моделироваться будет половина объема. Изначальные геометрические параметры кривошипно-ползунного механизма представлены на рис. 3, максимальный объем полости вытеснителя — на рис. 4.

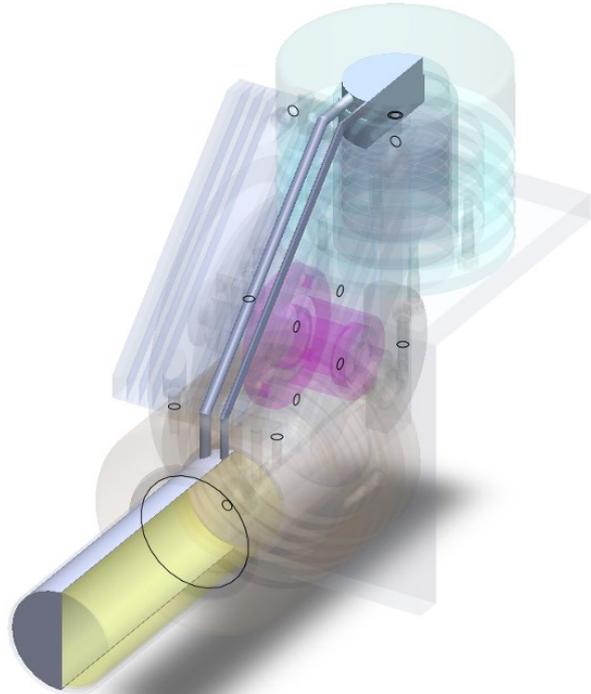


Рис. 2. Газовая полость двигателя

Как видно на рисунке, ход поршня и вытеснителя равен 20 мм. Соотношение рабочих объемов и относительного мертвого объема рассчитано исходя из диаграмм Уокера и обеспечивает удовлетворительную эффективность работы данного двигателя. Основные расчетные параметры представлены в табл. 1.

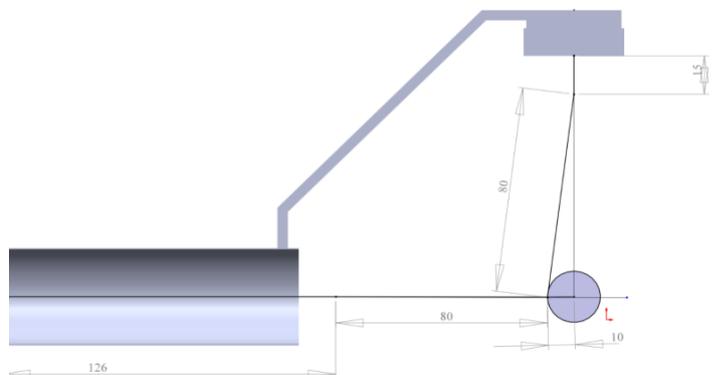


Рис. 3. Газовая полость двигателя и геометрические параметры кривошипно-ползунной группы

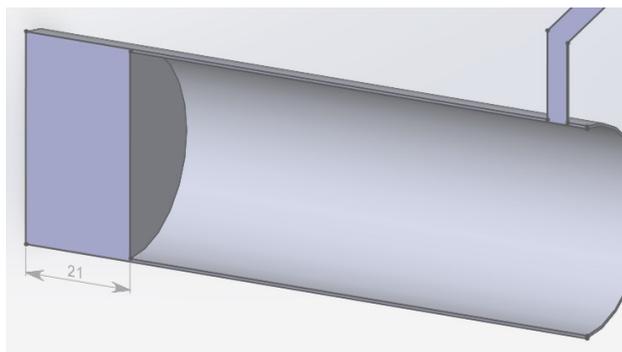


Рис. 4. Максимальный объем полости вытеснителя, мм

Как видно из таблицы, фактические параметры двигателя хорошо согласуются с рекомендуемыми в [14].

Таблица 1. Основные расчетные параметры двигателя

Параметр	Абсолютные значения	Отношения	Рекомендуемые диапазоны по Уокеру
Объем вытеснителя, см <sup>3</sup>	23,81	0,95	0,9...1,2
Объем поршня, см <sup>3</sup>	25,17	1,06	0,9...1,2
Мертвый объем, см <sup>3</sup>	12,34	1,93	1,3...1,7

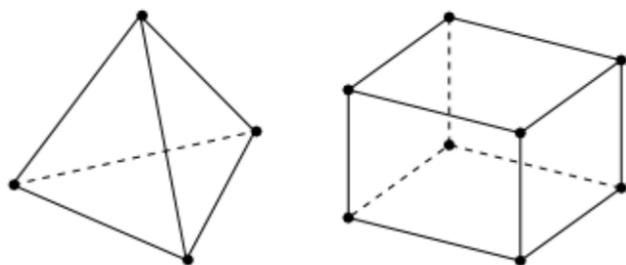


Рис. 5. Тетраэдральный элемент конечно-элементной сетки

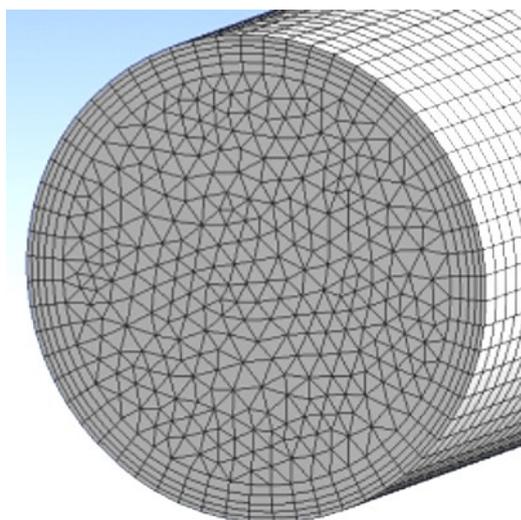


Рис. 6. Сетка из тетраэдральных и гексаэдральных элементов

Для максимизации использования расчетной сетки, базирующейся на гексагональных элементах, модель газовой полости была разделена на отдельные части (рис. 7).

Далее все численные исследования будем выполнять при помощи технологии CFD, используя программное обеспечение *Fluent* пакета *Ansys*.

Расчетная сетка будет базироваться на тетраэдральных элементах. Пристенные слои газа моделируются гексаэдральными элементами (рис. 5).

Градиенты температуры и скорости в направлении, перпендикулярном стенке, обычно существенно превосходят градиенты в направлении, параллельном стенке. Пристеночные слои (*inflation layers*) специально разработаны для создания сетки из тонких элементов, которая способна уловить градиенты в пограничном слое по нормали к поверхности с использованием минимального числа элементов. Пример моделирования сетки представлен на рис. 6.

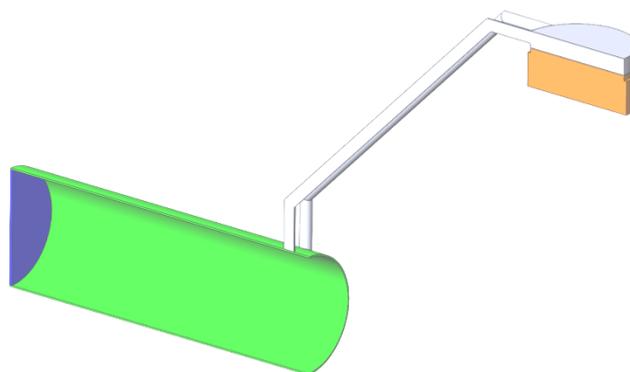


Рис. 7. Газовая полость, разделенная на зоны

Часть объема полости поршня разбита на гексагональные конечные элементы, а часть, соединяющаяся с объемом перетока — на тетраэдральные с разбиением пристенных при помощи операции *inflation* (рис. 8). Выход канала перетока в полость вытеснителя представлен на рис. 9, разбиение динамической части сетки полости поршня — на рис. 10.

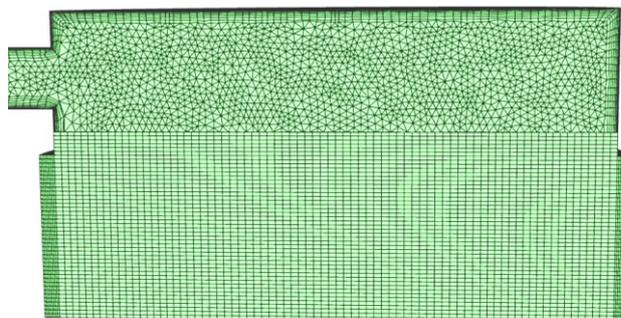


Рис. 8. Объем полости поршня, разбитый на конечные элементы

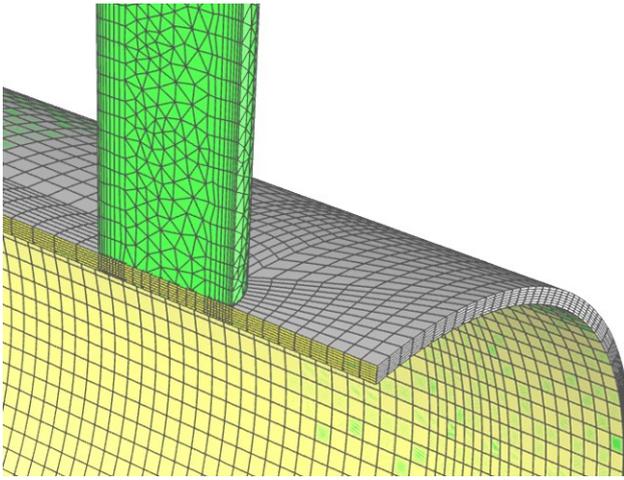


Рис. 9. Разбиение выхода канала перетока в полость вытеснителя

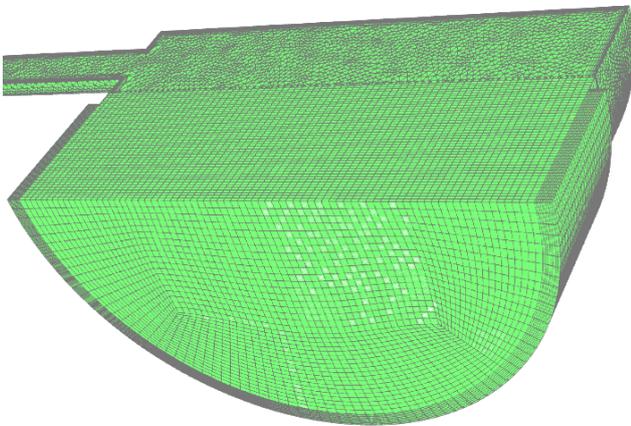


Рис. 10. Динамические части сетки полости поршня

Основная динамическая характеристика нестационарного потока жидкости или газа — это турбулентность. Турбулентность — это нестационарное случайное вихревое движение, наблюдаемое в газах и жидкостях при среднем и высоком числе Рейнольдса.

Почти все потоки газов в инженерном деле являются турбулентными. Многие величины, представляющие технический интерес, зависят от турбулентности, например, потери давления, эффективный расход, кавитация и т. д.

Хотя турбулентность в принципе описывается уравнениями Навье – Стокса, в большинстве ситуаций решение сколь-нибудь масштабных задач с помощью прямого численного моделирования (DNS) приводит к значительному увеличению требуемой вычислительной мощности либо время моделирования критически возрастает.

Для устранения данной ситуации к уравнениям Навье – Стокса применяются различные процедуры упрощения и прогнозирования вихрей, которые в итоге являются различными моделями турбулентности: RANS, SRS (LES) и т. д. На сегодняшний день ни одна модель турбулентности не является общепризнанной как универсальная для решения всех типов задач [18; 19]. Выбор модели турбулентности будет зависеть от таких соображений, как физика потока, сложившаяся практика для конкретного класса задач, требуемый

уровень точности, доступные вычислительные ресурсы и количество времени, доступное для моделирования.

*Ansys Fluent* предоставляет достаточно широкий выбор моделей турбулентности: вариация RANS (приближение Буссинеска); модель нагрузки Рейнольдса; метод крупных вихрей LES (*Large Eddy Simulation*) [20]; локальное вихревое моделирование (*Detached eddy simulation, DES*); прямое численное моделирование (*Direct Numerical Simulation*); когерентное вихревое моделирование (*Coherent vortex simulation, CVS*) [21]; методы плотности вероятности (*Probability density function, PDF*); вихревой метод; метод ограничения завихренности (*Vorticity confinement method — VC*) и линейная вихревая модель.

Исходя из вышесказанного и того, что в расчете будет применяться модель идеального газа с функцией зависимости плотности от температуры, а также выполнив анализ опыта применения различных моделей турбулентности для решения инженерных связанных газодинамических и тепловых задач, выберем реализуемую  $k-\zeta$  модель как разновидность моделей RANS. Рассматривать уравнения выбранной модели не имеет смысла, так как они присутствуют в настройках системы *Fluent* и не требуют их непосредственного введения.

Ввиду планируемого большого количества требуемых вычислений необходимо максимально упростить расчетную модель. Один из вариантов — исключить необходимость моделирования обтекания наружным воздухом корпуса двигателя. Прямое численное решение задачи конвективной теплоотдачи можно исключить путем подстановки в расчетную модель аналитической зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи.

Как известно, коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от площади контакта, геометрической формы тела и скорости обтекания его воздухом. В расчетном случае нас будут интересовать три детали рассматриваемого двигателя — цилиндр вытеснителя, цилиндр поршня и корпус перепускных каналов (рис. 11 и 12).

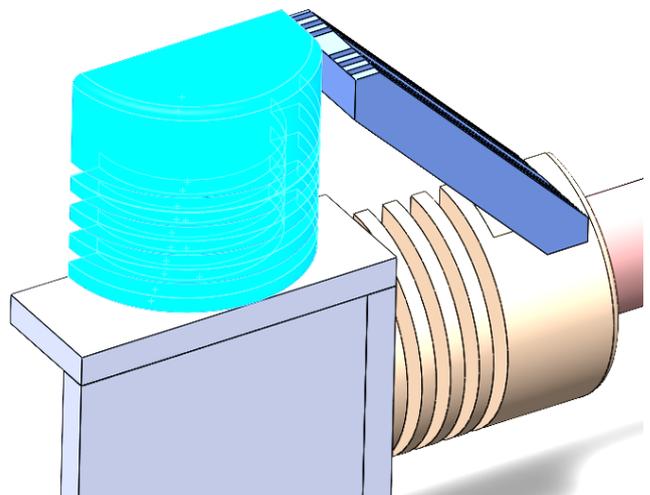


Рис. 11. Цилиндр поршня

В расчетной модели кривошипно-ползунная группа исключена (рис. 13). Граничные условия расчетной модели приведем в табл. 2. Так как первым этапом

численного эксперимента идет моделирования работы обратного цикла двигателя, то цилиндр вытеснителя будет охлаждаться, а цилиндр поршня наоборот нагреваться. Шаг расчета примем равным 1 °С.

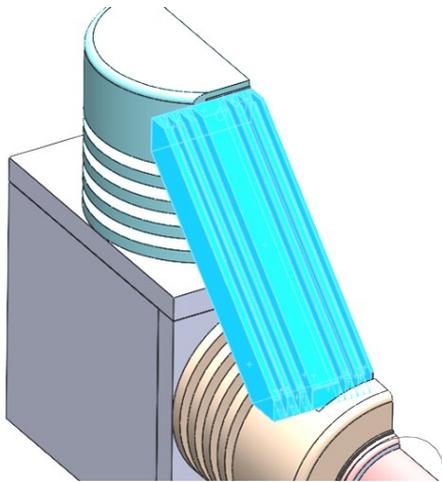


Рис. 12. Корпус каналов перепуска

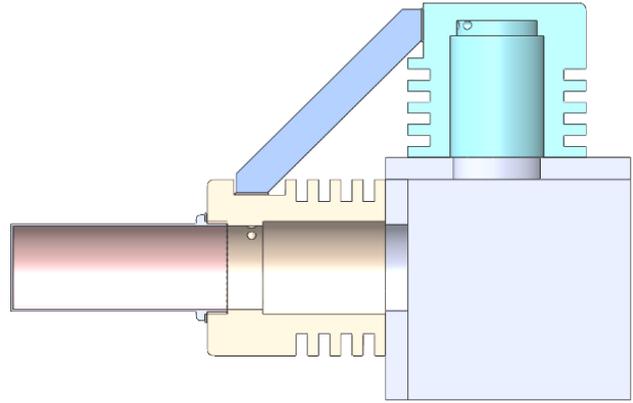


Рис. 13. Расчетная геометрия двигателя

В качестве выходных параметров расчета примем: коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ ,  $Вт/(м^2К)$ ; тепловой поток  $Q$ ,  $Вт$ .

Таблица 2. Граничные условия расчетной модели

Параметр	Ед. изм.	Значение
Температура окружающего воздуха	°С	20
Температура цилиндра вытеснителя	°С	от -50 до 20
Температура цилиндра поршня	°С	от 20 до 450
Температура корпуса перепускных каналов	°С	от -50 до 450

**Результаты исследования.** Результаты моделирования представлены в виде серии расчетов полей распределения температур. Пример распределения представлен на рис. 14. При этом температуры цилиндра поршня и корпуса перепускных каналов оставались неизменными и равными 20 °С.

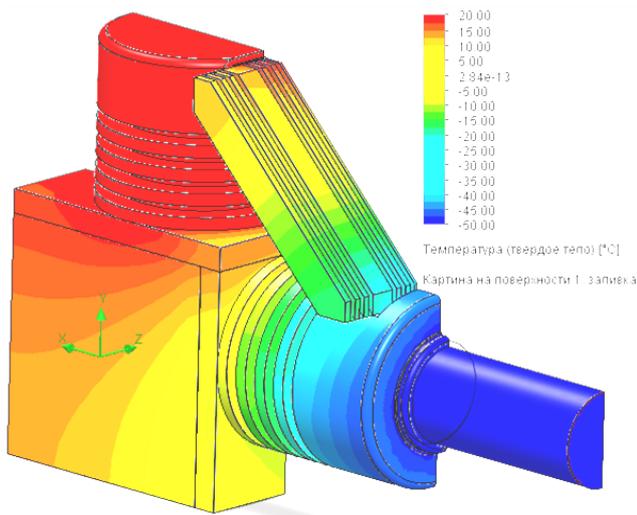


Рис. 14. Поле распределения температур по поверхности двигателя при температуре цилиндра вытеснителя -50 °С

Для оценки адекватности моделирования оценим параметры окружающего воздуха вокруг цилиндра вы-

теснителя на предмет изменения плотности и направления перемещений (рис. 15). Как видно на рисунке, воздушные массы перемещаются вниз из-за увеличенной плотности ввиду снижения температуры. Это полностью согласуется с физической картиной процесса конвективной теплопередачи.

Распределение коэффициента конвективной теплопередачи от поверхности цилиндра вытеснителя окружающему воздуху показано на рис. 16.

Тепловой поток определялся интегрированием по поверхности цилиндра вытеснителя. Для дальнейшего применения в расчетной модели будем использовать средний коэффициент конвективной теплопередачи (ККТ). При этом необходимо проверить распределение значений ККТ для определения адекватности аналитического расчета. Для этого определим удельный аналитический тепловой поток:

$$q_t = \alpha_{cp} \cdot S_{выт} \cdot (t_{воз} - t_{цил}) \quad (1)$$

Отсюда, зная разницу температур между окружающим воздухом и цилиндром вытеснителя, определим аналитический тепловой поток:

$$Q_A = q_t \cdot (t_{воз} - t_{цил}) \cdot (Bm) \quad (2)$$

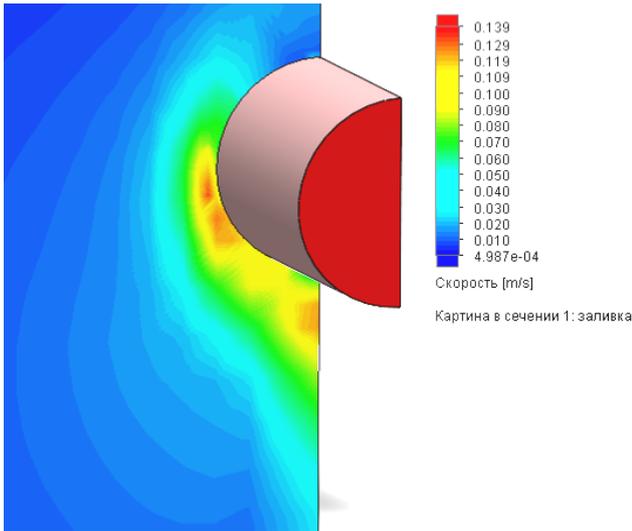


Рис. 15. Поле распределения скоростей воздуха

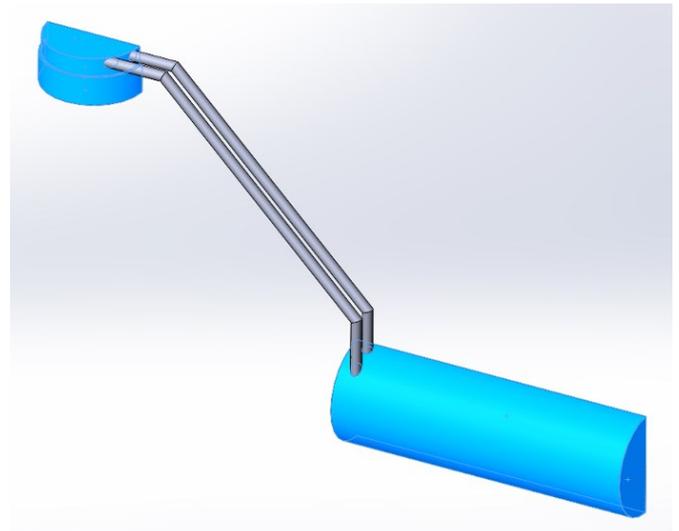


Рис. 17. Поверхности теплообмена с газовой полостью поршня и вытеснителя

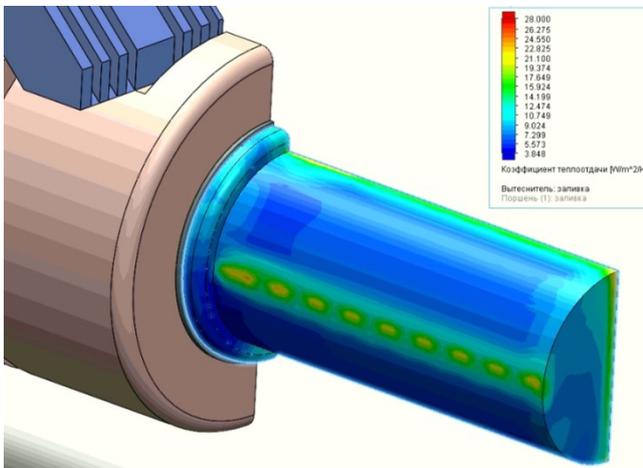


Рис. 16. Поле распределения коэффициента конвективной теплопередачи по поверхности цилиндра вытеснителя

Далее определим отклонение значения аналитического теплового потока от значения, полученного численным моделированием.

Так как площадь теплообмена в дальнейших расчетах будут внутренние площади цилиндров поршня и вытеснителя (рис. 17), то для определения приведенного коэффициента конвективной теплопередачи необходимо учесть отношение площадей внешних и внутренних поверхностей цилиндров:

$$\alpha_{\text{вытприв}} = \alpha_{\text{ср}} \cdot \frac{S_{\text{выт}}}{S_{\text{вытвнутр}}} \cdot \left( \frac{Bm}{M^2 \cdot ^\circ C} \right). \quad (3)$$

Отклонение значений теплового потока, полученных в результате численного и аналитического расчетов, в целом не превышает 1 % (рис. 18).

Как видно на графике, экспоненциальный рост отклонения наблюдается в диапазоне минимальной разницы температур между цилиндром вытеснителя и окружающим воздухом. Данная ситуация будет происходить на начальном этапе работы двигателя и не представляет большого интереса, так как для оценки эффективности работы двигателя необходимо оценивать устоявшийся режим работы.

График изменения приведенного ККТ показан на рис. 19. Полученная зависимость будет использоваться как граничное условие теплопередачи для моделирования работы двигателя Стирлинга при реализации обратного рабочего цикла.

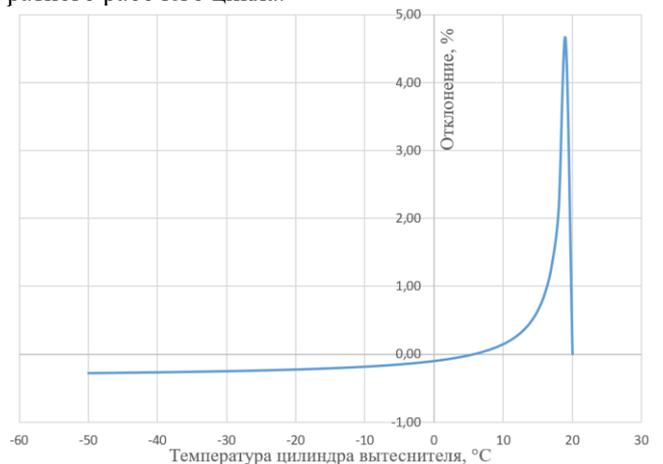
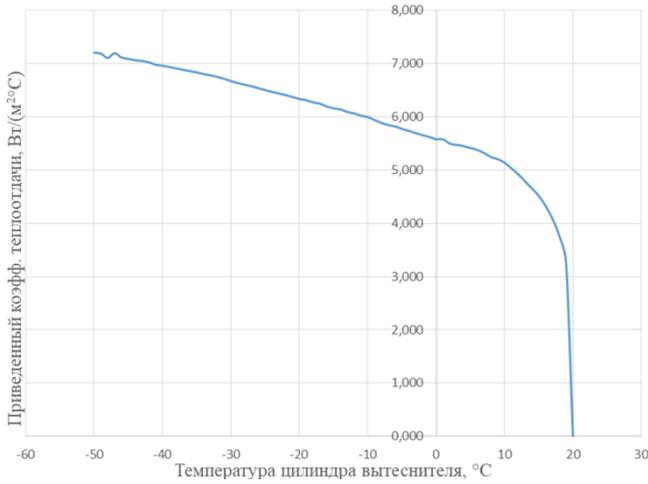


Рис. 18. Отклонение значений численного и аналитического теплового потоков

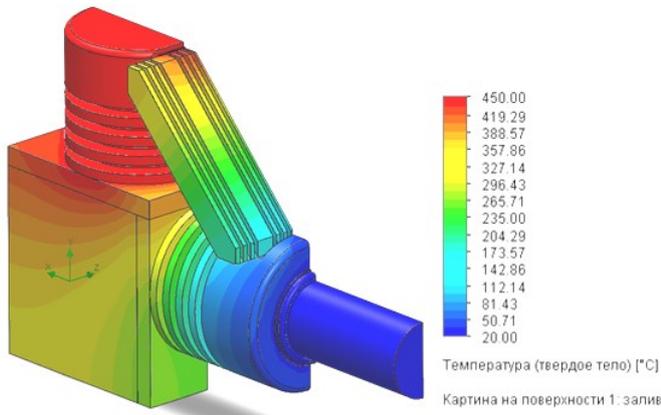


**Рис. 19.** Приведенный коэффициент конвективной теплопередачи

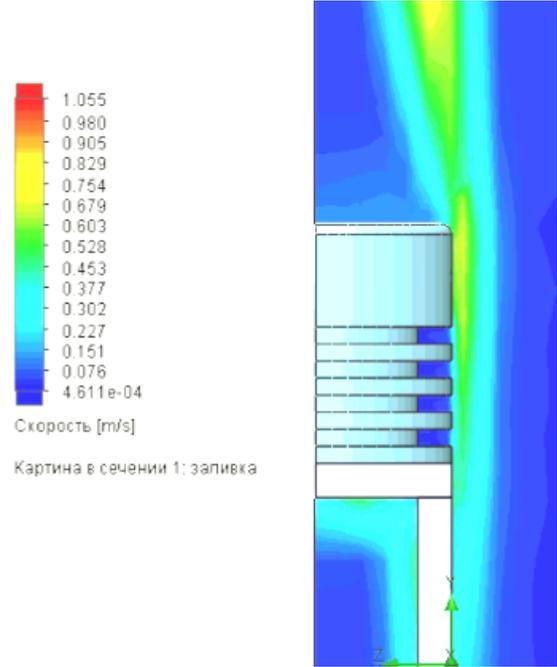
Далее представим результаты аналогичного моделирования для поршня. Поле распределения температур представлено на рис. 20. При этом температуры цилиндра вытеснителя и корпуса перепускных каналов оставались неизменными и равными 20 °С.

Для оценки адекватности моделирования рассмотрим параметры окружающего воздуха вокруг цилиндра поршня на предмет изменения плотности и направления перемещений (рис. 21). Как видно на рисунке, воздушные массы перемещаются вверх из-за сниженной плотности воздуха в непосредственной близости к цилиндру поршня ввиду повышения температуры. Это полностью согласуется с физической картиной процесса конвективной теплопередачи.

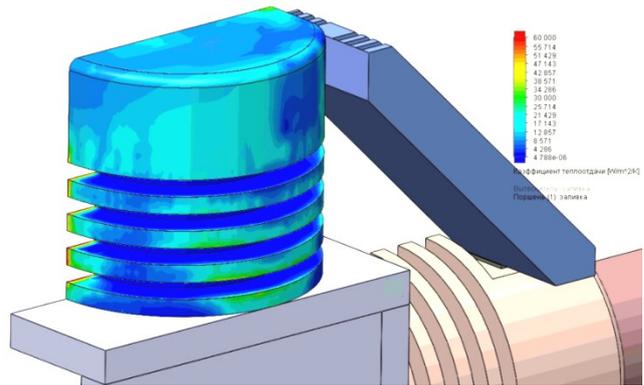
Распределение коэффициента конвективной теплопередачи от поверхности цилиндра поршня окружающему воздуху показано на рис. 22. Тепловой поток определялся по формулам (1)–(3). В формуле (3) используется соотношение площадей, представленных на рис. 23.



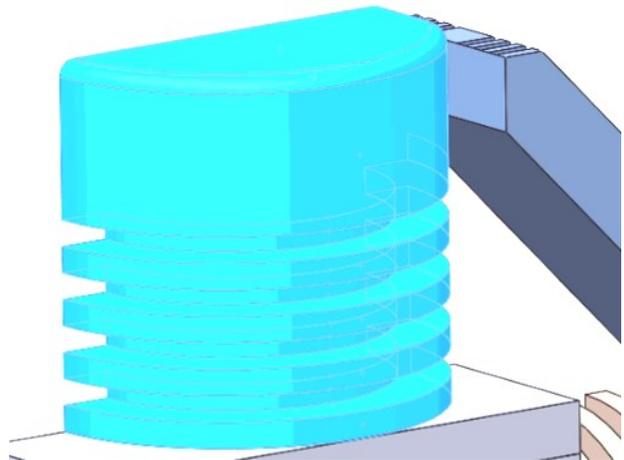
**Рис. 20.** Поле распределения температур по поверхности двигателя при температуре цилиндра поршня 450°С



**Рис. 21.** Поле распределения скоростей воздуха



**Рис. 22.** Поле распределения коэффициента конвективной теплопередачи по поверхности цилиндра вытеснителя



**Рис. 23.** Площади поверхностей теплообмена поршня

Отклонение значений, полученных в результате численного и аналитического расчетов, в целом не превышает 1 % (см. рис. 24).

Как видно на графике, величина отклонения стабилизируется по мере роста разницы температур между цилиндром поршня и окружающим воздухом и стабилизируется при достижении разницы 100 °С.

График изменения приведенного ККТ показан на рис. 25. Полученная зависимость будет использоваться как граничное условие теплопередачи от внутренней поверхности поршня для моделирования работы двигателя Стирлинга при реализации обратного рабочего цикла.

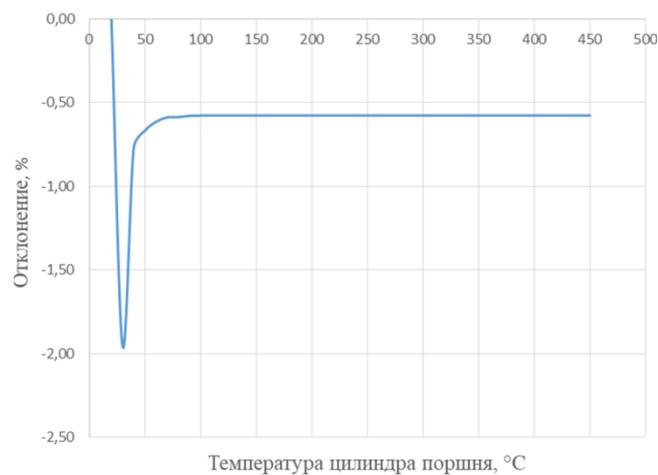


Рис. 24. Отклонение значений численного и аналитического теплового потоков

#### Литература

1. Григорьев И.В., Давтян А.Б., Григорьева О.И. Выбор системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием (26 февр. 2021 г.). Якутск, 2021. С. 271-278.
2. Григорьева О.И., Давтян А.Б. Целевое лесовыращивание как основной путь повышения эффективности лесного комплекса России // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Седьмой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2021. С. 32-33.
3. Rego G.E., Voronov R.V., Grigoreva O.I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Ser. «II All-Russian Scientific-Technical Conference Digital Technologies in Forest Sector», 2021. P. 012025.
4. Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения эффективности доставки сил и средств пожаротушения с учетом уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 4 (52). С. 57-62.
5. Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения оптимального месторасположения лесных

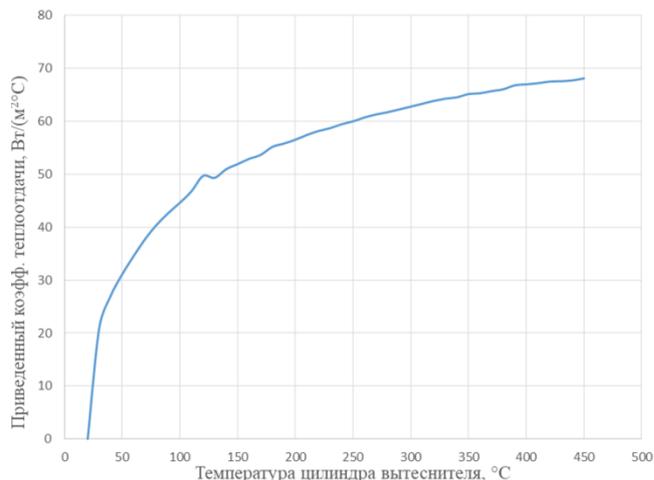


Рис. 25. График изменения приведенного ККТ

**Выводы.** Полученные значения приведенных коэффициентов конвективной теплопередачи позволят выполнить моделирование обратного рабочего цикла двигателя Стирлинга и исследовать разность температур между цилиндрами вытеснителя и поршня. Чем больше данный показатель — тем выше эффективность работы двигателя, в том числе и при реализации прямого цикла. Изменяя различные конструктивные параметры (вылет кривошипа, длина шатунов, угол расположения осей цилиндров) в рамках выполнения многофакторного исследования и дальнейшего регрессионного анализа, возможно получить уравнение регрессии и определить оптимальное соотношение конструктивных параметров, которое обеспечит максимальную разность температур и, как следствие, максимальную эффективность работы двигателя Стирлинга при реализации как обратного, так и прямого цикла.

- пожарно-химических станций с учётом уровня развития транспортных сетей на территории лесного фонда // Resources and Technology. 2021. V. 18. № 4. P. 77-92.
6. Чемшикова Ю.М., Давтян А.Б., Григорьева О.И. Транспортно-технологические системы для лесоразведения на базе гусеничных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (22 окт. 2020 г.). Тюмень, 2020. С. 400-403.
7. Григорьев И.В., Рудов С.Е., Каляшов В.А. Транспортно-технологические комплексы на базе лесных машин и самоходных лебедок для проведения рубок леса на склонах // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (15 апр. 2021 г.). Тюмень, 2021. С. 59-62.
8. Григорьев И.В., Рудов С.Е. Перспективы создания транспортных средств для лесозаготовительного производства в Арктической зоне // Лесозэксплуатация и комплексное использование древесины: сб. ст. Всерос. науч.-практической конф. (10 марта 2021 г.). Красноярск, 2021. С. 70-74.
9. Григорьев И.В., Мануковский А.Ю., Федорова Т.Н. Технические решения для уменьшения расхода топлива и износа колес грузового автотранспорта // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. (9-10 июня 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 109-114.
10. Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Эффективность лесопользования в

- криолитозоне // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. (9-10 июня 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 460-463.
11. Григорьев И.В. Перевозка лесоматериалов по железной дороге // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства: сб. тр. конф. (20 марта 2019 г.). Якутск, 2019. С. 5-9.
  12. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Тетеревлева Е.В., Чемшикова Ю.М. Увеличение подвижности гусеничных и колесных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4-10.
  13. Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (19 апр. 2018 г.). Тюмень, 2018. С. 79-83.
  14. Михайлова С.А. Сравнительный анализ применения двигателя Стирлинга и дизельного генератора для системы электро- теплоснабжения объектов в Арктических районах России // Молодой ученый. 2016. Т. 8. С. 261-265.
  15. Sepehr Sanaye, Navid Khakpaay, Ata Chitsaz. Thermo-economic and environmental multi-objective optimization of a novel arranged biomass-fueled gas engine and backpressure steam turbine combined system for pulp and paper mills // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020. V. 40. P. 100778.
  16. Узиков Г.Н., Раббимов Р.Т., Давланов Х.А. Моделирование и расчет теплового баланса пиролизной установки для получения альтернативного топлива из биомассы // Молодой ученый. 2014. № 18 (77). С. 306-312.
  17. Кукис В.С., Куколев М.И., Костин А.И. Перспективы улучшения характеристик двигателей Стирлинга // Двигателестроение. 2012. № 3 (249). С. 3-6.
  18. Rahim Şibil, Egemen Aras, Murat Kankal. Comparison of various turbulence model performance in computational fluid dynamics analyses of the oxidation ditches with experimental validation // Process Safety and Environmental Protection. 2021. V. 154. P. 43-59.
  19. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. V. 3, iss. 2. P. 269-289.
  20. Jin Yi, Lu Lu, Ziwei Huang, Xingsi Han. Numerical investigation of flat-plate film cooling using Very-Large Eddy Simulation method // International Journal of Thermal Sciences. 2022. V. 171. P. 107263.
  21. Farge Marie, Schneider Kai. Coherent Vortex Simulation (CVS), A Semi-Deterministic Turbulence Model Using Wavelets // Flow, Turbulence and Combustion. 2001. V. 66 (4). P. 393-426.
- References*
1. Grigor'ev I.V., Davtyan A.B., Grigor'eva O.I. Choice of machinery system for creation and operation of forest plantations // Upravlenie zemel'nymi resursami, zemleustrojstvo, kadastr, geodeziya i kartografiya. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (26 fevr. 2021 g.). YAkutsk, 2021. P. 271-278.
  2. Grigor'eva O.I., Davtyan A.B. Targeted reforestation as the main way to improve the efficiency of the forest complex of Russia // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Sed'moj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem. Petrozavodsk, 2021. P. 32-33.
  3. Rego G.E., Voronov R.V., Grigoreva O.I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Ser. «II All-Russian Scientific-Technical Conference Digital Technologies in Forest Sector», 2021. P. 012025.
  4. Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Mathematical model for determining the efficiency of delivery of firefighting forces and means taking into account the level of transport network development in the forestry fund // Systems. Methods. Technologies. 2021. № 4 (52). P. 57-62.
  5. Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Mathematical model for determining the optimal location of forest fire and chemical stations, taking into account the level of transport networks in the forest fund // Resources and Technology. 2021. V. 18. № 4. P. 77-92.
  6. ChEmshikova YU.M., Davtyan A.B., Grigor'eva O.I. Transport-technological systems for forestry based on tracked all-terrain vehicles // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (22 okt. 2020 g.). Tyumen', 2020. P. 400-403.
  7. Grigor'ev I.V., Rudov S.E., Kalyashov V.A. Transport-technological complexes based on forest machines and self-propelled winches for logging on slopes // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (15 apr. 2021 g.). Tyumen', 2021. P. 59-62.
  8. Grigor'ev I.V., Rudov S.E. Prospects for creating transport vehicles for logging in the Arctic zone // Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sb. st. Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (10 marta 2021 g.). Krasnoyarsk, 2021. P. 70-74.
  9. Grigor'ev I.V., Manukovskij A.YU., Fedorova T.N. Technical Solutions to Reduce Fuel Consumption and Wear of Truck Wheels // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (9-10 iyunya 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 109-114.
  10. Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Grigor'ev M.F., Grigor'eva A.I. Efficiency of forest management in cryolithozone // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (9-10 iyunya 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 460-463.
  11. Grigor'ev I.V. Timber transportation by rail // Potencial nauki i obrazovaniya: sovremennye issledovaniya v oblasti agronomii, zemleustrojstva, lesnogo hozyajstva: sb. tr. konf. (20 marta 2019 g.). YAkutsk, 2019. P. 5-9.
  12. Dobrecov R.YU., Grigor'ev I.V., Rudov S.E., Teterlevleva E.V., ChEmshikova YU.M. Increasing the mobility of tracked and wheeled machines // Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization). 2019. № 11. P. 4-10.
  13. Grigor'eva O.I. Efficiency of transport-technological systems for forestry // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (19 apr. 2018 g.). Tyumen', 2018. P. 79-83.
  14. Mihajlova S.A. Comparative analysis of Stirling engine and diesel generator application for power and heat supply systems in Arctic regions of Russia // Young Scientist. 2016. V. 8. P. 261-265.
  15. Sepehr Sanaye, Navid Khakpaay, Ata Chitsaz. Thermo-economic and environmental multi-objective optimization of a novel arranged biomass-fueled gas engine and backpressure steam turbine combined system for pulp and paper mills // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020. V. 40. P. 100778.
  16. Uzakov G.N., Rabbinov R.T., Davlanov H.A. Modeling and calculation of the thermal balance of pyrolysis unit for obtain-

- ing alternative fuel from biomass // *Young Scientist*. 2014. № 18 (77). P. 306-312.
17. Kukis V.S., Kukolev M.I., Kostin A.I. Prospects for Improving Stirling Engine Performance // *Dvigatelistroyeniye (Engines construction)*. 2012. № 3 (249). P. 3-6.
  18. Rahim Şibil, Egemen Aras, Murat Kankal. Comparison of various turbulence model performance in computational fluid dynamics analyses of the oxidation ditches with experimental validation // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. V. 154. P. 43-59.
  19. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974. V. 3, iss. 2. P. 269-289.
  20. Jin Yi, Lu Lu, Ziwei Huang, Xingsi Han. Numerical investigation of flat-plate film cooling using Very-Large Eddy Simulation method // *International Journal of Thermal Sciences*. 2022. V. 171. P. 107263.
  21. Farge Marie, Schneider Kai. Coherent Vortex Simulation (CVS), A Semi-Deterministic Turbulence Model Using Wavelets // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2001. V. 66 (4). P. 393-426.