

УДК 62-97/-98, 629.1-44/-445.9

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕВОДЕ ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СУДОВ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТОПЛИВА

**Иванченко Александр Андреевич<sup>1</sup>**, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок

*e-mail:* [prof\\_ivanchenko@mail.ru](mailto:prof_ivanchenko@mail.ru)

**Скобкин Максим Артурович<sup>1</sup>**, специалист, аспирант

*e-mail:* [maxskobkin@gmail.com](mailto:maxskobkin@gmail.com)

**Замураев Иван Сергеевич<sup>1</sup>**, специалист, аспирант

*e-mail:* [iv.zm@mail.ru](mailto:iv.zm@mail.ru)

<sup>1</sup> Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Постоянное ужесточение нормативов по выбросам вредных веществ с судов послужило мощным толчком к применению математического моделирования и компьютерной оптимизации рабочего процесса судового двигателя внутреннего сгорания. Статья представляет краткий обзор основных программных инструментов для моделирования рабочего процесса судовых ДВС.

**Ключевые слова:** Судовые ДВС, математическое моделирование, альтернативные топлива, дизельная установка, рабочий процесс, дизельная установка.

## APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING IN THE CONVERSION OF SHIPS TO ALTERNATIVE FUELS

**Ivanchenko Aleksandr Andreevich<sup>1</sup>**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants

*e-mail:* [prof\\_ivanchenko@mail.ru](mailto:prof_ivanchenko@mail.ru)

**Skobkin Maksim Arturovich<sup>1</sup>**, Specialist, Doctoral Student

*e-mail:* [maxskobkin@gmail.com](mailto:maxskobkin@gmail.com)

**Zamuraev Ivan Sregevich<sup>1</sup>**, Specialist, Doctoral Student

*e-mail:* [iv.zm@mail.ru](mailto:iv.zm@mail.ru)

<sup>1</sup> Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The constant tightening of regulations on emissions of harmful substances from ships has served as a powerful impetus to the use of mathematical modeling and computer optimization of the workflow of a marine internal combustion engine. The article provides a brief overview of the main software tools for modeling the workflow of marine internal combustion engines.

**Keywords:** Marine internal combustion engines, mathematical modeling, alternative fuels, diesel installation, workflow, diesel installation.

### **Актуальность**

Одной из основных характеристик развития современного общества является стремительный рост энергопотребления. Неуклонно растет число и энерговооруженность судов военно-морского, рыбопромыслового, морского и речного торговых флотов, на которых дизельные установки являются фактически безальтернативным источником энергии, используемым как для движения судна, так и для обеспечения его вспомогательных нужд. Постоянное ужесточение нормативов по выбросам вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ) судовых дизельных установок (СДУ) послужило мощным толчком к переводу их на альтернативные топлива (АТ). Переход промышленности на производство высокофорсированных дизелей, отличающихся значительным усложнением систем и высоким уровнем тепловой и механической напряженности основных деталей, выдвигает в число наиболее актуальных задач обеспечение их высокой экономичности и функциональной надежности при умеренных выбросах вредных веществ на всех режимах эксплуатации. Интенсивный рост мирового дизельного парка, выдвигаемые рынком к производителям СДУ очень жесткие требования по темпам улучшения их качества, ставят в число наиболее актуальных задач проблему сокращения сроков доводочных исследований, применения для этих целей методов численного математического моделирования протекающих в цилиндре сложных физико-химических процессов во всем диапазоне рабочих характеристик не только создаваемых, но эксплуатируемых судовых дизелей (СД).

Стремление сократить расходы по доводке их рабочего процесса (РП) возродило интерес к применению численного математического моделирования и оптимизации РП СД с использованием ЭВМ, требует разработки соответствующих методик и программных пакетов, базирующихся на физических и математических моделях, адекватно описывающих процессы, протекающие в цилиндре СД.

Поэтому настоящая работа, направленная на развитие теории рабочих процессов в СД, физическое и математическое моделирование локальных процессов, протекающих при смесеобразовании и сгорании и, в целом, на совершенствование методов проектирования и эксплуатации стратегических источников энергии, сокращение сроков их конвертирования для работы на альтернативных топливах и получение достоверных расчетных данных по их функциональным характеристикам на этапе эксплуатации является весьма актуальной.

### **Особенности и опыт применения методов математического моделирования**

Стремление специалистов использовать численные методы при доводке РП СД появилось не сегодня. С начала 90-х годов в крупных научных центрах ряда стран развернуты активные работы и уже достигнуты определенные результаты по созданию программных средств для полномасштабного численного моделирования работы двигателей внутреннего сгорания. Это работы фирмы “Мерседес - Бенц” по моделированию процессов в дизеле, активно развиваемые на основе разработок Лос-Аламосской лаборатории, реализованных в виде пакетов прикладных программ (ПА) код KIVA-II и код KIVA-III. Австрийской фирмой AVL разработан пакет FIRE, являющийся базовым для решения широкого круга задач газодинамики горения, адаптируемый в настоящее время к задачам двигателестроения. Аналогичным по кругу решаемых выше задач является англо-американский пакет STAR CD. Трудозатраты на создание каждого из них авторами оцениваются примерно в 100 человеко/лет. При одинаковых возможностях рыночная стоимость каждого из них лежит в пределах нескольких сот тысяч долларов.



Как в России, так и за рубежом сегодня существует множество других моделей и программных продуктов для численного математического моделирования РП СД, однако стоит выделить основные модели, которые наиболее часто используются в современной практике: GT-Power, AVL, Ricardo Software и Gamma Technologies Inc. Указанные модели и расчетные программы практически идентичны по возможностям. В таблице 1 представлены основные термодинамические модели и программы для расчёта СД, используемые в настоящее время.

Таблица 1

**Модели и программные продукты для термодинамического расчета РП СД**

Программа, разработчик	Модель газообмена	Модель сгорания	Примечание
ИМПУЛЬС (ЦНИДИ)	0-D	Вибе; Разлейцев.	Не развивается с 1985г.
ДИЗЕЛЬ-РК (МГТУ им. Баумана)	0-D, 1-D	Вибе; РК-модель.	Коммерческая. 2 и 4 тактные ДВС.
Lotus Engine Simulation (Lotus Engineering)	1-D	Вибе.	Коммерческая.
ВОЛНА (ЦНИДИ)	1-D	Вибе; Разлейцев.	Не развивается с 1985г.
AMESIM (LMS)	1-D	Библиотека моделей	Коммерческая.
BOOST (AVL)	1-D	Вибе, Hironyasu, CFD модель с кодом KIVA и др.	Коммерческая.
WAVE (Ricardo Software)			
GT-POWER (Gamma Technologies Inc.)			

Вместе с тем положенные в основу имеющихся на рынке программных пакетов алгоритмы включают в себя весьма незначительный набор математических моделей физико-химических процессов, протекающих в дизеле. Модели кинетики горения и турбулентного массо-, теплопереноса в дисперсных средах имеют упрощенный вид, что вызывает определенные сложности при проведении расчетов. Несмотря на указанные недостатки существующие методики уже используются для задач: оптимизация систем турбонаддува, улучшение процесса смесеобразования и сгорания для соблюдения норм токсичности, а также экономии топлива, оптимизация газообмена и улучшение работы СД в нестабильных условиях с помощью оптимизации алгоритмов управления РП и процессами в обслуживающих его системах.

Анализ рассмотренных моделей показывает, что на практике применяют два метода математического моделирования РП СД: метод объемного баланса, разработанный Н.М. Глаголевым, и метод энергетического баланса и состояния рабочего тела по методу Б.М. Гончара. Термодинамические модели получили наибольшее распространение.

В таблице 2 указаны сведения об основных моделях и программах для термодинамического расчета РП СД, используемых в настоящее время на практике.

Таблица 2

**Модели и программы на основе технологии пространственной гидродинамики**

Программа, разработчик	Примечание
Star-CD (CD Adapco)	Метод конечных объемов
KIVA (Los Alamos National Lab.)	Метод конечных объемов
Fire (AVL)	Метод конечных объемов



VECTIS (Ricardo Software)	Метод конечных объемов
NSF (МГТУ им. Баумана)	Метод крупных частиц
PHOENICS (CHAM)	Метод конечных объемов
FLUENT (Fluent Inc.)	Метод конечных объемов

Несмотря на большое количество опубликованных работ по моделированию процессов, протекающих в дизеле, далеко не все рассматриваемые вопросы решены, особенно в прикладном плане. Используемые модели противоречивы, большинство из них не приспособлены к описанию локальных параметров рабочего тела. Между тем, для эффективного решения задач согласованного выбора конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры (ТА) и камеры сгорания (КС), обеспечения минимального содержания токсичных веществ в отработавших газах математические модели должны давать возможность рассчитывать именно локальные параметры. Создание такой модели возможно лишь на основе новых теоретических и экспериментальных исследований.

Современные модели и программы математического моделирования позволяют совершенствовать различные аспекты СД, такие как: топливная система, система подачи воздуха, геометрия впускных каналов и т.д. Неотъемлемым условием для обеспечения возможности применения современного специализированного программного обеспечения для решения задач перевода СДУ на АТ является наличие двух основных критериев: способность настраиваться на любой СД, точно моделировать процессы, происходящие в СД и обслуживающих их системах, а также обеспечение надежности результатов. Эти критерии необходимы для эффективного решения сложных задач по оптимизации и доводке РП СД [1].

Основной задачей настоящей работе поставлена оценка возможности применения методов численного моделирования РП СД для прогнозирования и улучшения его характеристик на АТ на различных режимах.

Для успешной оптимизации РП СД на АТ с использованием компьютерной техники необходимы математические модели РП СД, соответствующие особым требованиям. Специфика задач определяет ключевые характеристики моделей, среди которых можно выделить общие требования, включающие в себя:

- Необходимость поддерживать высокую точность, а также универсальность для возможности применения к различным объектам.
- Быстродействие, необходимое для выполнения задач, особенно в случае сложной оптимизации с множеством факторов.

В процессе оптимизации важно учитывать удобство пользовательского интерфейса. Простота использования модели и автоматизация ввода данных значительно упрощают работу с оптимизационными расчётами.

Основными преимуществами использования программ термодинамического расчёта СД являются:

- Возможность подбирать фазы газораспределения для каждого цилиндра индивидуально.
- Возможность выставить различные законы управления фазами газораспределения при переходных режимах работы СД.

Не все из рассмотренных моделей и программных продуктов, позволяют оценивать влияние на протекающие в цилиндрах процессы, воздействием на них различными методами, таким как:

1. Анализ воздействия степени сжатия.
2. Исследование воздействия опережения впрыска.



3. Анализ воздействия с помощью характеристики впрыска.
4. Анализ воздействия интенсивности вихря.
5. Исследование воздействия структуры распылителя.

В рамках текущего развития термодинамических моделей вопросы, связанные с формой камеры сгорания, а также многократным впрыском не могут рассматриваться. Однако, важным преимуществом является совместимость некоторых термодинамических моделей с пакетами моделей пространственной гидродинамики. В этом случае для расчета сгорания и смесеобразования в СД используют трехмерную модель дизельной струи (Рис. 1).

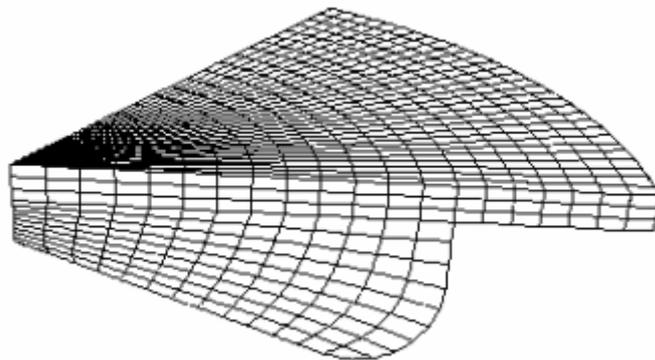


Рисунок 1 - 3D сетка единичного сектора цилиндра, используемая в программе KIVA для расчета дизельной струи, развивающейся в КС

Вместе с тем в специальной литературе уже упоминаются сведения о моделях и их программном обеспечении, которые разрабатываются для улучшения РП СД с учетом рассмотренных факторов. В частности, для решения задач пространственной гидродинамики в объеме с подвижными стенками в настоящее время активно применяется технология, которая в процессе расчета учитывает процессы, проходящие в СД такие как: испарение, сгорание и образование вредных веществ. Наиболее часто используемыми моделями и программными продуктами в рассматриваемом секторе являются такие решения, как: STAR-CD (CD Adapco), FIRE (AVL), VECTIS (Ricardo). Современные модели представляют элементы двигателя, как множество трехмерных ячеек, в каждой из которых решается система уравнений сохранения энергии, массы импульса и состояния (технология пространственной гидродинамики).

При помощи указанного программного обеспечения можно решать множество задач. Например, возможность изучить температурные и концентрационные поля рабочего вещества в рабочем объеме цилиндра, а также движение газов и распыленного топлива в камере сгорания.

Однако рассмотренные модели и методы математического моделирования имеют и недостатки. Основным недостатком является сложность вычисления и необходимость использования большого объема памяти компьютера, что не позволяет применять ее для общего анализа и возможности оптимизации РП СД в связи с большим временем необходимым для расчетов. Несмотря на это рассматриваемое направление использования методов математического моделирования продолжает активно развиваться. Их развитие идет по пути, как совершенствования математического аппарата, так и физических моделей, положенных в их основу, что требует дополнительных затрат на обучение специалистов данного направления.

Вопросам моделирования и расчета процессов в дизелях с использованием вычислительной техники уделяется большое внимание разработчиками и изготовителями

СД во всех развитых странах мира. Ряд работ выполнено в нашей стране и в ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, в частности [7 – 10]. Практика показала, что используемый в моделях набор физических моделей и математический аппарат представляет широкие возможности применения методов численного моделирования при решении практических задач по рациональной организации РП и газотурбинного наддува, оценки различных вариантов КС, выбора систем наддува, подбора регулировок для оптимальной настройки РП СД с различными уровнями форсирования. Исходя из изложенного можно сделать вывод, что разработанные физические модели и математический аппарат позволяют создать модель и программное обеспечение, позволяющие обеспечить моделирование и оптимизацию РП СД при их переводе на АТ. Наиболее реально использовать для этих целей термодинамические модели и программы, в основе которых лежат феноменологическая модель сгорания.

### **Заключение**

Подводя итог можно заключить, что в основу методики моделирования РП для решения задач перевода СДУ на альтернативные топлива должен быть положен принцип базирования модели на общих физических законах. Также в модели должен быть реализован принцип замкнутого моделирования всей совокупности процессов, протекающих одновременно в рабочих цилиндрах, смежных обслуживающих СДУ системах и агрегатах наддува во всей совокупности рабочих режимов СД.

В модели должна быть предусмотрена возможность совершенствования моделей отдельных процессов с использованием информации об объекте и новых экспериментальных данных, полученных на нем.

До проведения работ по численному моделированию и оптимизации РП СДУ переводимой на альтернативные топлива должна быть выполнена настойка математической модели на объект оптимизации и проверена достоверность, получаемых на модели результатов. Для совершенствования в этом плане моделей и программ должна быть предусмотрена возможность использования для настройки модели результатов приемосдаточных испытаний объекта на стенде завода изготовителя и статистических моделей, позволяющие вычислить параметры РП наиболее часто реализующиеся на режимах эксплуатации.

Целесообразность использования численного моделирования при оптимизации РП СДУ при переводе ее на альтернативные топлива обуславливается возрастающей сложностью проблемы и дороговизной доводки РП на стенде завода изготовителя. Очень важно, что численное моделирование при решении задач доводки РП СД позволяет обеспечить реализацию системного подхода с большим объемом вычисления на основе рассмотрения всей совокупности взаимосвязанных процессов в рабочих цилиндрах и смежных системах, как единого целого.

Дальнейшее совершенствование модели и улучшение программных средств должны быть направлены на создание цифрового двойника объекта, переводимого на альтернативные топлива. Это позволит поднять техническую эксплуатацию СДУ на новый технологический уровень, сделав любые оптимизационные задачи в условиях эксплуатации более доступными и практичными.

### **Список литературы:**

1. Гагаев С.Ю. Проблемы и перспективы развития внутреннего водного транспорта в российской федерации // Научный взгляд в будущее. – 2016. – Т. 1. – №. 2. – С. 46 – 50.
2. Суда внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.5.2-703-98. – Москва: Минздрав России, 1998. – 144 с.



3. Правила предотвращения загрязнения окружающей среды. Российский речной регистр. Москва. – 2016 г.;
4. Регистровая книга Российского речного регистра. – URL: <http://www.rivreg.ru/activities/class/regbook/> (дата обращения: 01.01.2020)
5. Экономико-математические методы и модели в управлении морским транспортом: Учеб. для студентов морских вузов. / Е.Н. Воевудский, Н.А. Коневцева, Г.С. Махуренко, И.П. Тарасова; под ред. Е.Н. Воевудского. – М.: Транспорт, 1988. С. 384.
6. Богданов Д.В. Построение сетей коммуникации будущих специалистов в системе высшего образования. // Великие реки 2015: Материалы международной научно-методической конференции. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2015. – URL: <http://вф-река-море.рф/2015/PDF/35.pdf> (дата обращения: 01.01.2020)
7. Иванченко Н.Н. О.Г. Красовский, С.С. Соколов. Высокий наддув дизелей. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983. – 198с.
8. Тузов Л.В., Щербаков А.А., Иванченко А.А. Моделирование и расчет образования вредных веществ в цилиндре дизеля. Тезисы докладов Всероссийской научно-методической конференции «Высшее образование в современных условиях», СПГУВК, СПб., 1996
9. Иванченко А.А., Матвеев В.В., Савицкий Ф.М., Тамбовский Ю.В. Материалы всероссийского семинара «топливо – двигатель – экологическая система. Проблемы северо-западного региона» под общей редакцией В.С. Шпака: СПб.: Северо-Западное отд. РАН, 2003
10. Иванченко А.А., Матвеев В.В., Бордуков В.Т. Численное моделирование рабочего процесса ДВС (дизелей, газовых двигателей и газодизелей) Учебное пособие . СПб.: СПГУВК, 2002

