

На правах рукописи



БАЙТИМЕРОВ РУСТАМ МИНДИАХМЕТОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ  
С УПРАВЛЯЕМОЙ ФОРМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ВПРЫСКИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) (ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)).

Научный руководитель : Погуляев Юрий Дмитриевич,  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Хрящев Юрий Евгеньевич,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры ДВС, ФГБОУ ВПО  
«Ярославский государственный технический  
университет», г. Ярославль

Руднев Валерий Валентинович,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой автомобильного  
транспорта, информационных технологий  
и методики обучения техническим  
дисциплинам, ФГБОУ ВПО «Челябинский  
государственный педагогический  
университет», г. Челябинск

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный  
аграрный университет», г. Уфа

Защита состоится 30 марта 2016 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.09 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

Тел/факс: (351) 267-91-23. E-mail: [D212.98.09@mail.ru](mailto:D212.98.09@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) и на сайте <http://susu.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Е.А. Лазарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В связи с постоянным ужесточением экологических норм на содержание вредных веществ в отработавших газах (ОГ) производители вынуждены интенсивно совершенствовать тепловые двигатели в целом и топливоподающие системы (ТПС) в частности.

**Степень разработанности темы.** Многочисленные расчетные и экспериментальные исследования показывают, что возможность управлять формой характеристики впрыскивания в зависимости от режима работы дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива в цилиндры позволяет улучшить эксплуатационные и экологические характеристики.

Наиболее распространенными на сегодняшний день ТПС дизелей являются аккумуляторные системы (АС) типа Common Rail (CR) и насос-форсунки (НФ) с электрогидравлическим управлением, данные системы позволяют изменять форму характеристики впрыскивания только путем многофазного впрыскивания. Большинство существующих серийных и опытных ТПС с управляемой формой характеристики впрыскивания обладают недостатками, не позволяющими им найти широкое применение, такими как: сложность и дороговизна конструкции; высокий расход топлива на управление; невозможность управления параметрами характеристики впрыскивания в широких пределах и др.

Таким образом, **тема** данной работы, посвященной разработке дизельной ТПС с управляемой формой характеристики впрыскивания, является **актуальной**.

**Цель** данного исследования - разработка дизельной системы топливоподачи с управляемой формой характеристики впрыскивания с широкими возможностями по управлению ее параметрами.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Анализ причин и способов снижения содержания вредных веществ в ОГ дизелей.
2. Анализ существующих ТПС с управляемой формой характеристики впрыскивания.
2. Разработка нового способа управления формой характеристики впрыскивания с широкими возможностями по управлению ее параметрами.
3. Разработка и уточнение математических моделей гидродинамических процессов следующих ТПС: 1) предлагаемой в данной работе аккумуляторной ТПС с управляемой формой характеристики впрыскивания (АС3); 2) аккумуляторных систем фирмы Bosch типа CR 2-го (АС1) и 3-го (АС2) поколения. Проверка адекватности моделей путем сравнения результатов расчета ТПС АС1 и АС2 с литературными экспериментальными данными.
4. Расчетно-теоретическое исследование влияния конструктивных и регулировочных параметров ТПС на характеристику впрыскивания.

### **Научная новизна**

1. Предложен способ управления формой характеристики впрыскивания дизельной ТПС, позволяющий осуществлять прямоугольную, треугольную и ступенчатую характеристики впрыскивания. Способ заключается в установке двух дополнительных электроуправляемых клапанов в корпус традиционной электрогидравлической форсунки (ЭГФ) АС типа Common Rail. Первый клапан

(пьезоэлектрический) устанавливается между форсункой и топливопроводом, соединяющим аккумулятор с форсункой. Второй соединяет форсунку со сливом. При закрытом первом клапане с помощью второго клапана в камере распылителя устанавливается нужное для начала впрыскивания пониженное давление. Первый клапан открывается позже, когда нужно увеличить давление впрыскивания. Таким образом, варьированием проходным сечением и скоростью открытия первого клапана, моментами открытия и закрытия обоих клапанов осуществляется гибкое управление параметрами впрыскивания. Научная новизна подтверждена патентом РФ на изобретение.

2. Разработаны математические модели гидродинамических процессов впрыскивания трех ТПС: предлагаемой в данной работе аккумуляторной ТПС с возможностью управления формой характеристики впрыскивания и систем Common Rail фирмы Bosch 2-го и 3-го поколения с ЭГФ. Модели учитывают переменность физических свойств топлива с изменением давления, деформацию внутренних полостей и подвижных элементов ТПС, переменность гидравлических характеристик отверстий, динамику электромагнитных процессов приводов управляющих клапанов.

**Методика исследования.** Расчетно-теоретическое исследование гидродинамических процессов проводилось и использованием математических моделей разработанных автором. Основу метода моделирования составляет решение уравнений неустановившегося одномерного течения жидкости в топливопроводах с граничными условиями в виде массовых балансов топлива в конечных объемах рассматриваемой ТПС. Расходы топлива определялись с помощью теории истечения жидкости из отверстия, основанной на уравнении Бернулли. Уравнения неустановившегося одномерного течения вязкой сжимаемой жидкости в топливопроводах решалось методом линеаризованного распада-разрыва, предложенного Л.В. Греховым.

Совместно с уравнениями гидродинамических процессов решались уравнения динамического равновесия запирающих элементов (игла, управляющие клапаны) и уравнения электромагнитных процессов исполнительных механизмов: электромагнита (с использованием теории электрических и магнитных цепей с учетом насыщения материала магнитопровода) и многослойного пьезоактюатора (с использованием уравнений термодинамического состояния У. Мэзона).

Для определения гидравлических характеристик отверстий проводился численный эксперимент по исследованию течения в них вязкой сжимаемой жидкости. Моделирование течения топлива в распылителях осуществлялось в пакете ANSYS CFX на основе уравнений Навье-Стокса, при этом использовалась k-ε модель турбулентности и модель кавитации Релея-Плессета.

**Объект исследования.** Гидродинамические процессы в системах топливоподачи дизелей.

**Предмет исследования.** Закономерности, связывающие конструктивные и управляющие параметры ТПС с характеристикой впрыскивания.

**Достоверность и обоснованность** научных положений работы обусловлена применением фундаментальных законов гидродинамики, механики и электромагнетизма; удовлетворительной сходимостью результатов

математического моделирования с результатами экспериментальных исследований, взятых из литературы.

### **Практическое значение работы.**

Динамические модели в среде Matlab/Simulink, реализующие математические модели гидродинамических процессов в трех типах ТПС могут быть использованы при анализе их работы и модернизации, в учебном процессе.

Разработанная библиотека элементов-примитивов (трубопроводы, полости, отверстия, распылитель, игла, электромагнит, клапаны и др.) в среде Matlab/Simulink может быть использована при создании математических моделей новых ТПС.

### **На защиту выносятся:**

- способ управления формой характеристики впрыскивания дизельной аккумуляторной ТПС;
- математические модели и результаты моделирования гидродинамических процессов впрыскивания трех типов ТПС.

**Реализация.** Результаты диссертационной работы используются в ООО "ЧТЗ-Уралтрак" (г. Челябинск) при оценке конструкций форсунок аккумуляторных систем топливоподачи.

**Апробация.** Основные положения диссертации рассматривались и обсуждались: на XLVIII международной научно-технической конференции "Достижения науки - агропромышленному производству", г. Челябинск, 2009 г.; на научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, 2009–2015 гг.; на VII международной научно-практической конференции "Научная дискуссия: инновации в современном мире", 2012 г.; на научных семинарах на кафедре ДВС ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ), 2013-2015 гг.; на международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" 2015", г. Челябинск, 2015 г.

**Публикации.** Основные научные и практические результаты диссертации изложены в 19 работах, в том числе 5 в журналах, рекомендованных ВАК, и 2 в журналах, индексируемых в БД Scopus. Получен патент РФ на изобретение.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста и выводов, списка литературы из 162 наименований. Общий объем диссертации — 147 страниц, включая 86 рисунков и 4 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, описаны методы исследования, показана научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено влияние рабочего цикла дизеля на окружающую среду, механизмы образования вредных веществ в ОГ и требования экологических стандартов.

Способы снижения содержания вредных веществ в ОГ можно разделить на две основные группы: использование систем очистки (фильтры, нейтрализаторы) и управление процессами сгорания в цилиндре. По мнению многих авторов одним из наиболее перспективных методов управления процессом сгорания является

использование систем топливоподачи с возможностью управления характеристикой впрыскивания. Принято различать прямоугольную, треугольную и ступенчатую формы дифференциальной характеристики впрыскивания.

В зависимости от режима работы двигателя та или иная форма характеристики впрыскивания будет оптимальной. Обычно оптимизацию ведут таким образом, чтобы снизить эмиссию оксидов азота без увеличения удельного эффективного расхода топлива и эмиссии твердых веществ.

К примеру на режимах с низкими частотами вращения коленчатого вала наиболее оптимальной считается ступенчатая характеристика впрыскивания. В первой фазе впрыскивания мгновенный расход топлива через распылитель невелик, таким образом за период задержки воспламенения в цилиндр поступает меньшее количество топлива. При этом в фазе быстрого горения снижается скорость тепловыделения и локальные температуры и, следовательно, эмиссия оксидов азота. А поскольку частота вращения коленчатого вала мала, то увеличение длительности впрыскивания практически не сказывается отрицательно на показателях цикла.

На основе проведенного анализа исследований по влиянию формы характеристики впрыскивания на эксплуатационные и экологические показатели дизелей сформулирована цель и задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрены конструкции и принципы работы современных серийных и опытных ТПС. Предложен новый способ управления характеристикой впрыскивания.

Наиболее широко распространенной в мире на данный момент является аккумуляторная система типа CR, которая выпускается несколькими компаниями в различном конструктивном исполнении. Данная ТПС позволяет гибко изменять временные параметры впрыскивания (моменты начала и окончания впрыскивания), но не позволяет управлять формой характеристики впрыскивания. Также достаточно широко используются электроуправляемые насос-форсунки, главным недостатком которых является зависимость скорости нарастания давления впрыскивания от частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Помимо названных ТПС разрабатываются новые, с более широкими возможностями по управлению характеристикой впрыскивания, к ним относятся: APCRS (Amplified-Pressure Common Rail System, фирмы Bosch, Delphi), EU3 (Electronically Unit, фирма Delphi), NCRS (Next-generation Common Rail System, фирмы Mitsubishi, Isuzu), Twin-CR (Ганноверский университет), HiFORS (Ахенский университет), HEUI В (Caterpillar) опытные системы АЗПИ, МАДИ и др. Названные ТПС в той или иной степени способны изменять форму характеристики впрыскивания.

Из перечисленных систем только системы APCRS и EU3 внедрены в серийное производство. Это связано с дороговизной и сложностью конструкции прочих систем с изменяемой формой характеристики впрыскивания. При этом системы APCRS и EU3 имеют ограниченные возможности по управлению параметрами характеристики впрыскивания, не позволяющие полностью раскрыть потенциал управления рабочим циклом дизеля с помощью системы топливоподачи.

Связи с вышесказанным в данной работе предлагается новый способ управления характеристикой впрыскивания, реализуемый путем модернизации форсунки аккумуляторной системы топливоподачи типа CR. Схема предлагаемой форсунки представлена на рис. 1.

Данная форсунка отличается от традиционной форсунки системы Common Rail установкой двух дополнительных клапанов - пьезоэлектрического клапана регулирования давления 1 (КРД1) и электромагнитного клапана регулирования давления 2 (КРД2).

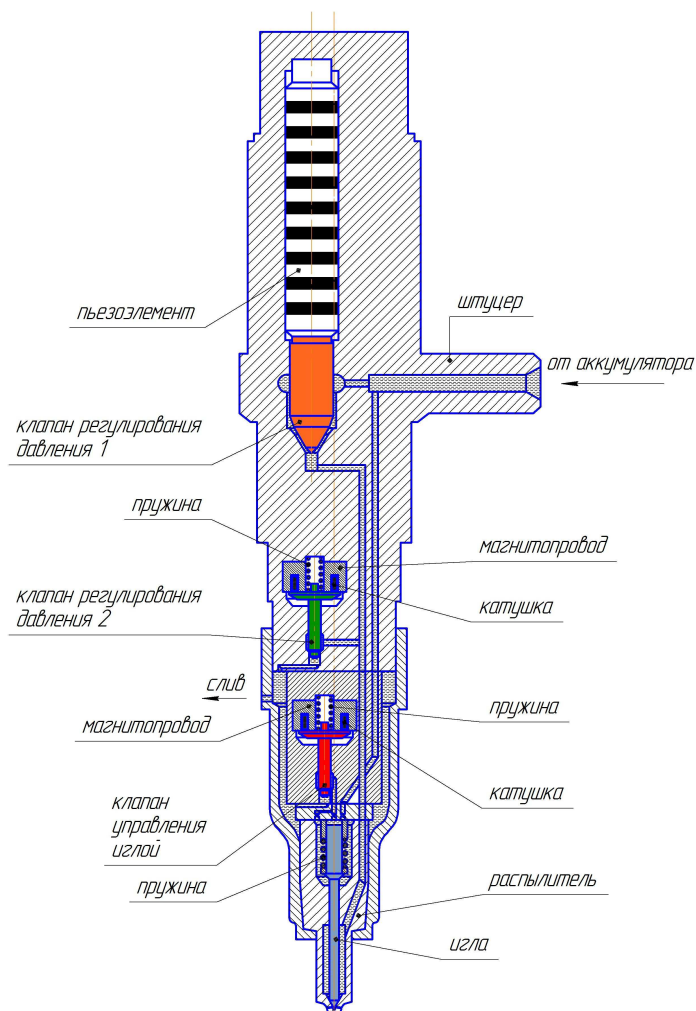


Рис. 1 - Схема форсунки предлагаемой аккумуляторной ТПС (АСЗ)

КРД1 позволяет изменять количество поступающего в форсунку топлива за счет изменения проходного сечения. КРД2 связывает форсунку со сливом.

Перед очередным впрыскиваем КРД1 перекрывает поступление топлива от аккумулятора. КРД2 открывается, понижая давление в форсунке до необходимого. Впрыск начинается с подъемом иглы, игла управляется независимо посредством традиционного электромагнитного клапана управления иглой.

Для увеличения давления впрыскивания открывается КРД1, скорость нарастания давления впрыскивания зависит от площади проходного сечения КРД1.

Таким образом осуществляется управление формой характеристики впрыскивания. Если КРД1 открывается в начале впрыскивания форма характеристики треугольная, если позже - форма характеристики ступенчатая.

**Третья глава** посвящена разработке математической модели гидродинамических процессов в предлагаемой аккумуляторной системе (АСЗ). Для проверки адекватности применяемого метода моделирования также разработаны модели двух типов серийных ТПС: аккумуляторных систем фирмы Bosch типа Common Rail (CR) 2-го (АС1) и 3-го (АС2) поколений, с целью сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, взятыми из литературы.

Разработкой методов математического моделирования дизельных ТПС занимались следующие отечественные и зарубежные ученые: Г.Г. Калиш, Б.И. Сифман, Л.И. Седов, И.В. Астахов, Л.Н. Голубков, Т.Ф. Кузнецов, Ю.Я. Фомин, В.И. Трусков, А.С. Хачиян, Ф.И. Пинский, Л.В. Грехов, В.А. Марков, R.D. Reitz, M. El-Erian, M. Goyal, K. Kumar, D. Sobel, W. Egler, A. Ficarella, D. Laforgia, J. Kiijarvi, G.M. Bianchi, A.E. Catania, M. Coppo, F.J. Salvador и другие.

Для расчета процессов в трубопроводах решались уравнения одномерного нестационарного вязкого течения топлива:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{Ku}{f}; \\ \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

здесь  $t$  - время;  $\rho$  - плотность топлива;  $u$  - средняя скорость течения топлива в трубопроводе;  $p$  - давление топлива;  $x$  - координата рассматриваемого сечения трубопровода от его начала;  $K$  - диссипативный множитель.

Уравнения (1) решались методом линеаризованного распада-разрыва, предложенного проф. Греховым Л.В.

В качестве граничных условий выступали уравнение массового баланса в полостях:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{\frac{1}{\rho_i} \sum_{k=1}^K G_{i-k} + \sum_{n=1}^N U_{i-n} f_n + \sum_{j=1}^J \frac{dV_{i-j}}{dt}}{\beta V_i}; \quad (2)$$

здесь  $\rho_i$  - плотность топлива в  $i$ -й полости;  $U_{i-n}$  - скорость втекания из (в)  $n$ -го топливопровода;  $f_n$  - площадь поперечного сечения  $n$ -го топливопровода;  $p_i, V_i$  - соответственно текущие давление и объем  $i$ -й полости;  $\beta$  - коэффициент сжимаемости топлива;  $G_{i-k}$  - массовая скорость перетечек топлива между  $i$ -й и  $k$ -й полостями, определяемая согласно уравнению Бернулли:

$$G_{i-k} = \text{sign}(p_k - p_i) (\mu f)_{i-k} \sqrt{2\rho_k |p_k - p_i|}. \quad (3)$$

здесь  $(\mu f)_{i-k}$  - эффективное проходное сечение отверстия между  $i$ -й и  $k$ -й полостями.

Гидравлические характеристики отверстий между полостями форсунок оказывают значительное влияние на гидродинамические процессы. Поэтому для



уточнения математических моделей ТПС были проведены расчеты эффективного проходных сечений характерных отверстий рассматриваемых форсунок с использованием программного комплекса ANSYS CFX с учетом турбулентности потока топлива, сжимаемости топлива и явления кавитации. Для учета турбулентности использовалась модель  $k-\epsilon$ , а для учета кавитации - модель Релея-Плессета.

На рис. 2 представлена расчетная сетка распределения давления, скорости, объемной доли пара и плотности по среднему сечению распыливающего отверстия отверстия распылителя ЭГФ фирмы Bosch для случая: давление впрыскивания  $P_{впр}=160$  МПа, давление газов в цилиндре  $P_{цил}=5$  МПа.

Для проверки адекватности применяемой математической модели течения топлива через отверстия было проведено сравнение результатов численного исследования распылителя с известными размерами с результатами физических экспериментов, взятыми из литературы. Максимальное отклонение составило 6,5%.

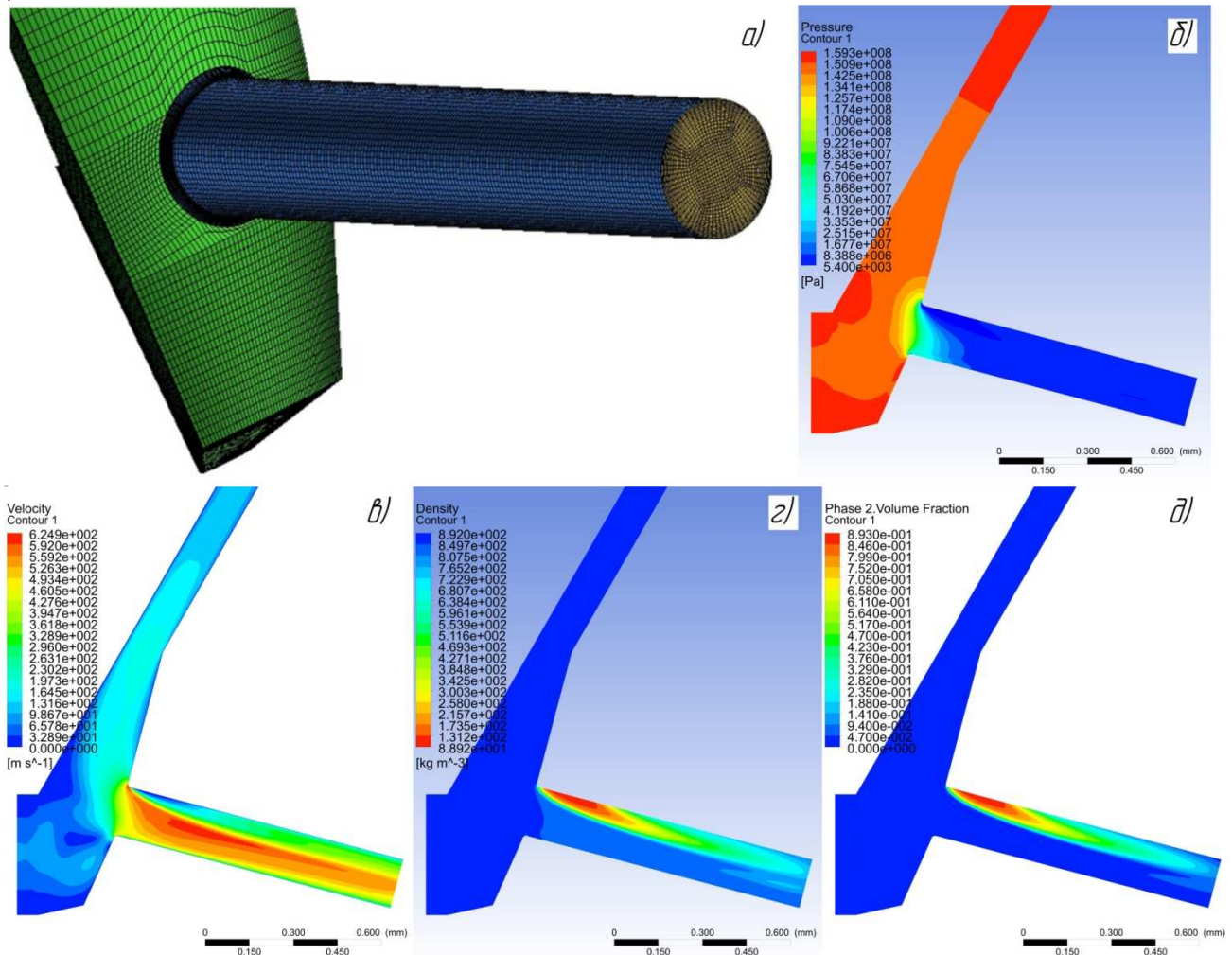


Рис. 2 Расчетная сетка (а) и распределения давления (б), скорости (в), плотности (г) и объемной доли пара (д) по среднему сечению распыливающего отверстия

Совместно с уравнениями гидродинамических процессов решались уравнения динамического равновесия запирающих элементов (игла, управляющие клапаны) и уравнения электромагнитных процессов исполнительных механизмов:

электромагнита (с использованием теории электрических и магнитных цепей с учетом насыщения материала магнитопровода) и многослойного пьезоактюатора (с использованием уравнений термодинамического состояния У. Мэзона).

Математические модели реализованы в среде Matlab/Simulink.

Адекватность применяемого метода моделирования оценена путем сравнения результатов расчета АС1 и АС2 с результатами экспериментов из литературы (рис.3).

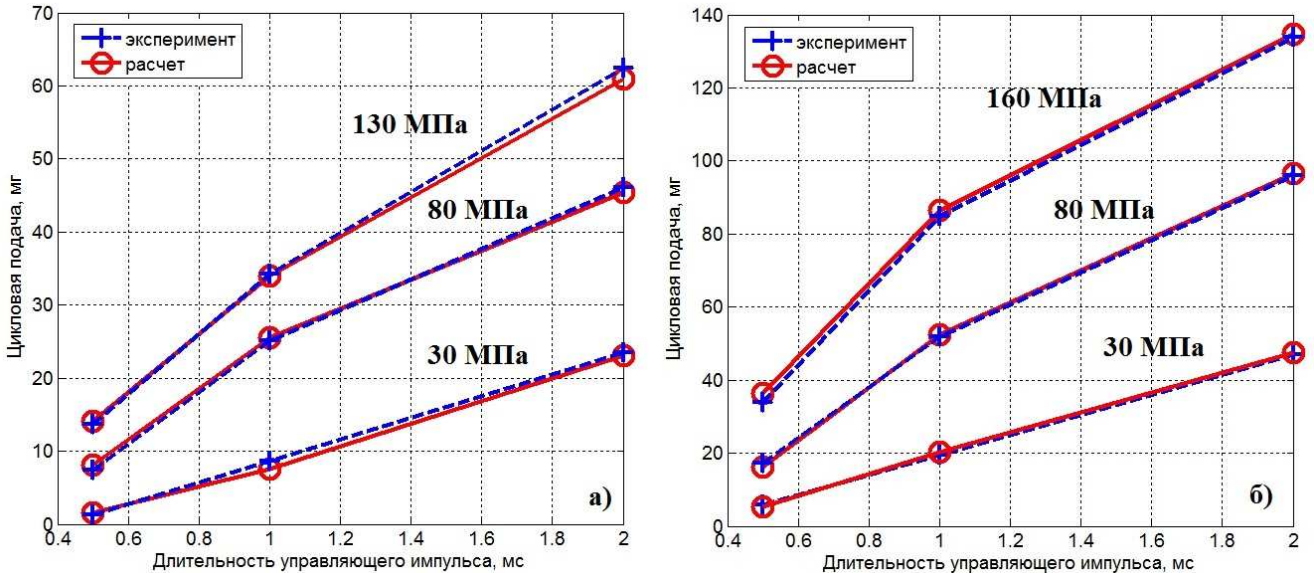


Рис. 3 Сравнение расчетных и экспериментальных величин цикловой подачи топлива от давления и длительности управляющего импульса  
а) АС1; б) АС2

**В четвертой главе** проведено расчетно-теоретическое исследование рассматриваемых ТПС.

Форсунка фирмы Bosch 3-го поколения имеет высокую гидравлическую эффективность, обусловливаемую высоким быстродействием пьезоэлектрического клапана и большими (до 0,9 мм) подъемами иглы. Данная ЭГФ способна осуществлять пять и более впрыскиваний за цикл топливоподачи и регулировать длительность время начала каждого впрыскивания, однако, не способна изменять форму характеристики впрыскивания и давление отдельных впрыскиваний в рамках одного цикла топливоподачи.

Расчетное исследование предлагаемой аккумуляторной ТПС показало, что она, как и система APCRS, позволяет осуществлять различные характеристики впрыскивания, при этом данная ТПС позволяет помимо временных параметров характеристики впрыскивания регулировать также величины давления впрыскивания и скорости нарастания давления.

На рис. 4 представлены диаграммы рабочих процессов в предлагаемой форсунке для ступенчатой формы характеристики впрыскивания.

Давление в камере распылителя форсунки после предыдущего впрыскивания будет близко к давлению в аккумуляторе, следовательно, для формирования пониженного давления открывается КРД2 (КРД1 при этом закрыт). Длительность нахождения в открытом состоянии клапана КРД2 определяет давление начала впрыскивания (участок  $t_1-t_2$  на рис. 4, а и в).

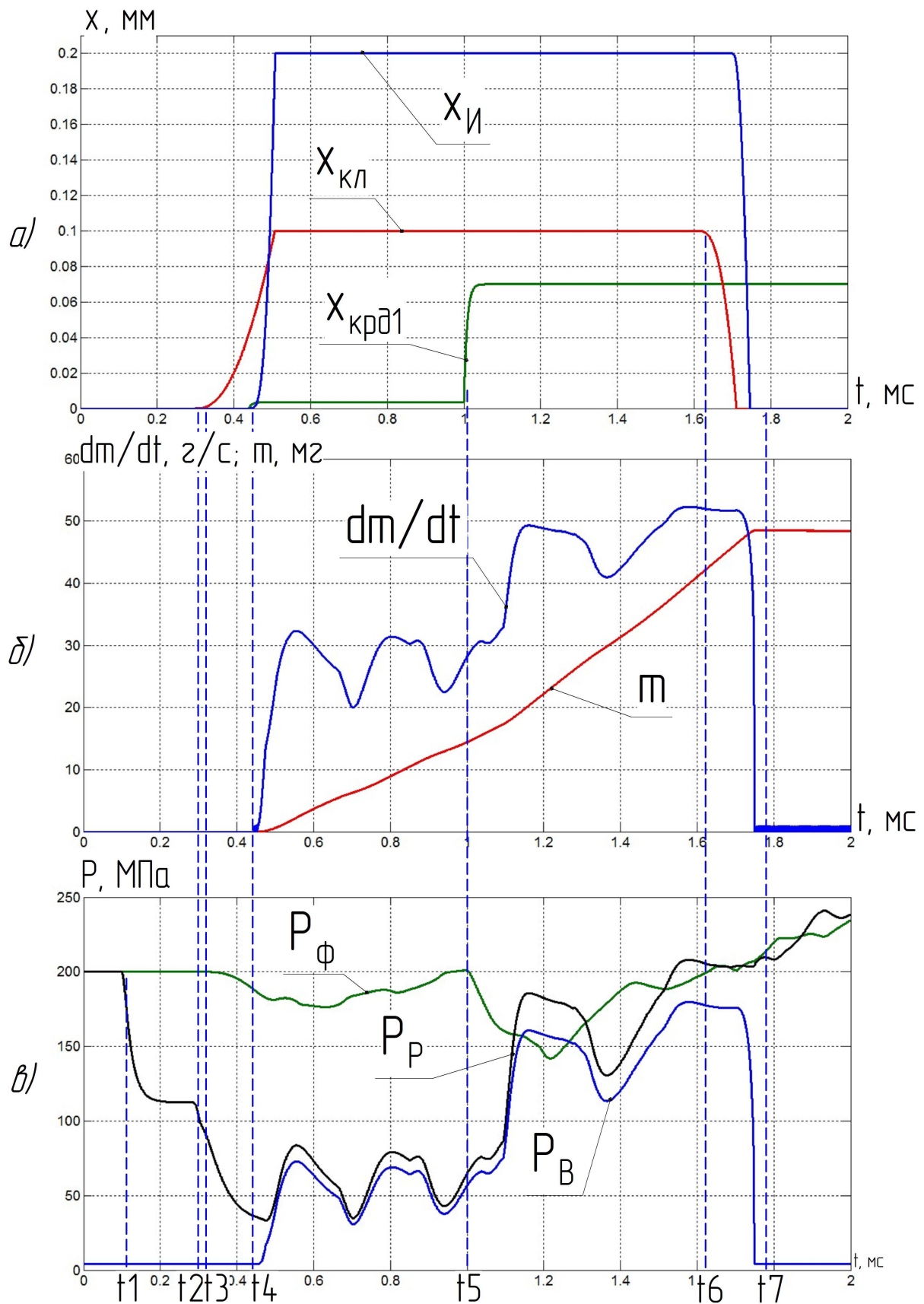


Рис. 4 Диаграмма рабочих процессов АСЗ для ступенчатого впрыскивания

а) перемещения иглы  $x_{И}$ , двухпозиционного клапана  $x_{КЛ}$ , КРД1  $x_{КРД1}$ ;

б) дифференциальные  $dm/dt$  и интегральные  $m$  характеристики впрыскивания; в) давления в кармане распылителя  $P_P$ , перед распыливающими отверстиями  $P_B$  и на входе в форсунку  $P_Ф$

После подачи управляющего импульса на обмотки электромагнита управляющий клапан открывается (момент  $t_3$ ). Давление в камере управления падает, и игла начинает подниматься (рис. 4, а и в, момент  $t_4$ ). После этого давление в камере распылителя будет уменьшаться. Чтобы этого не случилось одновременно с подъемом иглы приоткрывается КРД1 (момент  $t_4$ ), проходное сечение выбирается таким образом, чтобы давление в камере распылителя не менялось. Таким образом формируется "первая ступенька" характеристики впрыскивания (участок  $t_4$ - $t_5$  на рис. 4, б).

В момент времени  $t_5$  КРД1 открывается еще шире, давление в камере распылителя, а следовательно и давление впрыскивания, начинает расти, через некоторое время достигая горизонтального участка с максимальным давлением впрыска (участок  $t_5$ - $t_7$  на рис. 4, б). Наклон кривой давления впрыскивания зависит от проходного сечения КРД1.

В момент времени  $t_6$  управляющий клапан начинает закрываться, а после короткой задержки закрывается и игла.

На рис. 5 представлены несколько ступенчатых характеристик впрыскивания, отличающихся величиной давления "первой ступеньки". Количество топлива, затрачиваемое на управление давлением, зависит от давления начала впрыскивания. Чем ниже это давление, тем больше топлива нужно слить через КРД2, чтобы его добиться.

Наклон кривой давления впрыскивания можно изменять варьируя величину проходного сечения КРД1. Однако, от величины проходного сечения КРД1 зависит также максимальное давление впрыскивания. Поэтому лучшим способом изменения наклона кривой давления представляется изменение скорости открытия КРД1.

На рис. 5 представлены несколько ступенчатых характеристик впрыскивания с разными наклонами кривой давления впрыскивания.

Помимо ступенчатой формы характеристики впрыскивания предлагаемая форсунка может осуществить треугольную и прямоугольную формы характеристики впрыскивания. В последнем случае форсунка работает в режиме традиционной ЭГФ систем CR: КРД1 полностью открыт, КРД2 закрыт. Впрыскивание осуществляется при постоянном давлении в кармане распылителя.

В случае ступенчатой характеристики КРД1 начинает открываться одновременно с иглой, причем наклон характеристики определяется скоростью открытия клапана.

На рис. 6 представлены несколько вариантов реализации треугольной формы характеристики впрыскивания АСЗ, отличающиеся скоростью открытия КРД1.

АСЗ обладает схожими возможностями по управлению формой характеристики впрыскивания с двухаккумуляторной ТПС Twin-CR Ганноверского университета (наиболее совершенной с точки зрения возможностей управления формой характеристики впрыскивания), при этом не требуется установка дополнительного аккумулятора и топливного насоса.

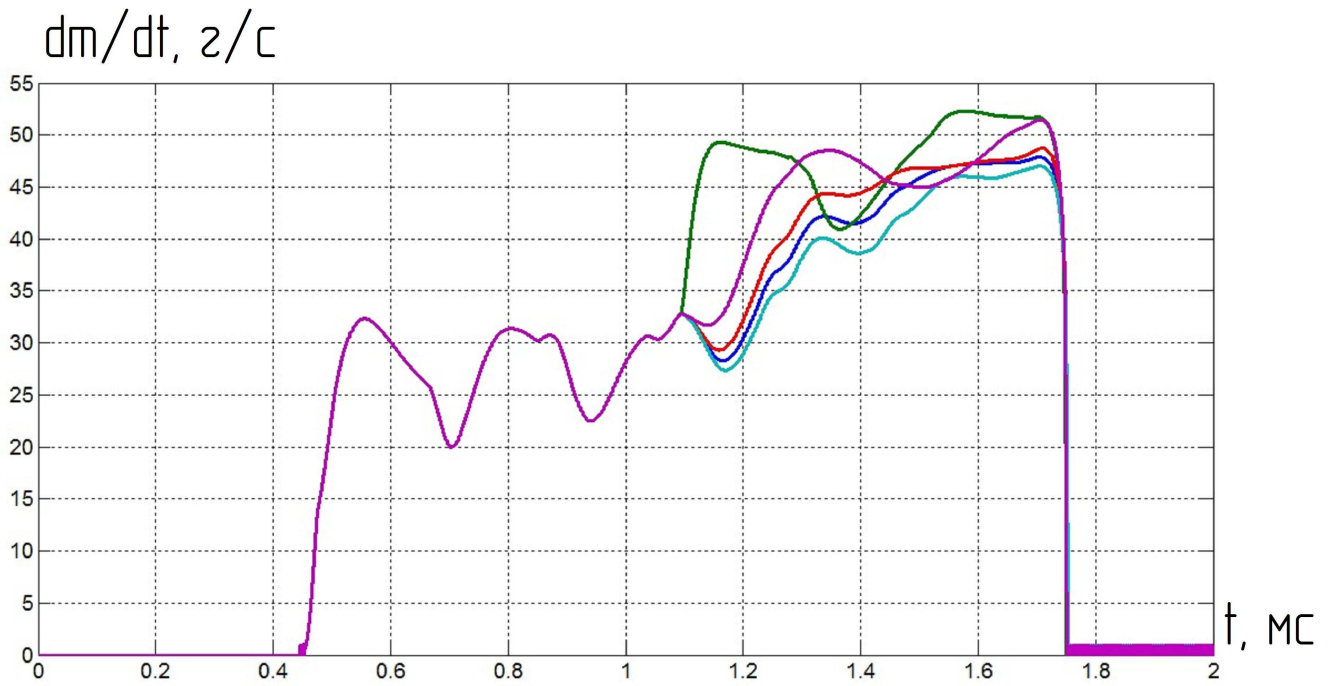


Рис. 5 Ступенчатые характеристики впрыскивания с разными наклонами кривой давления впрыскивания

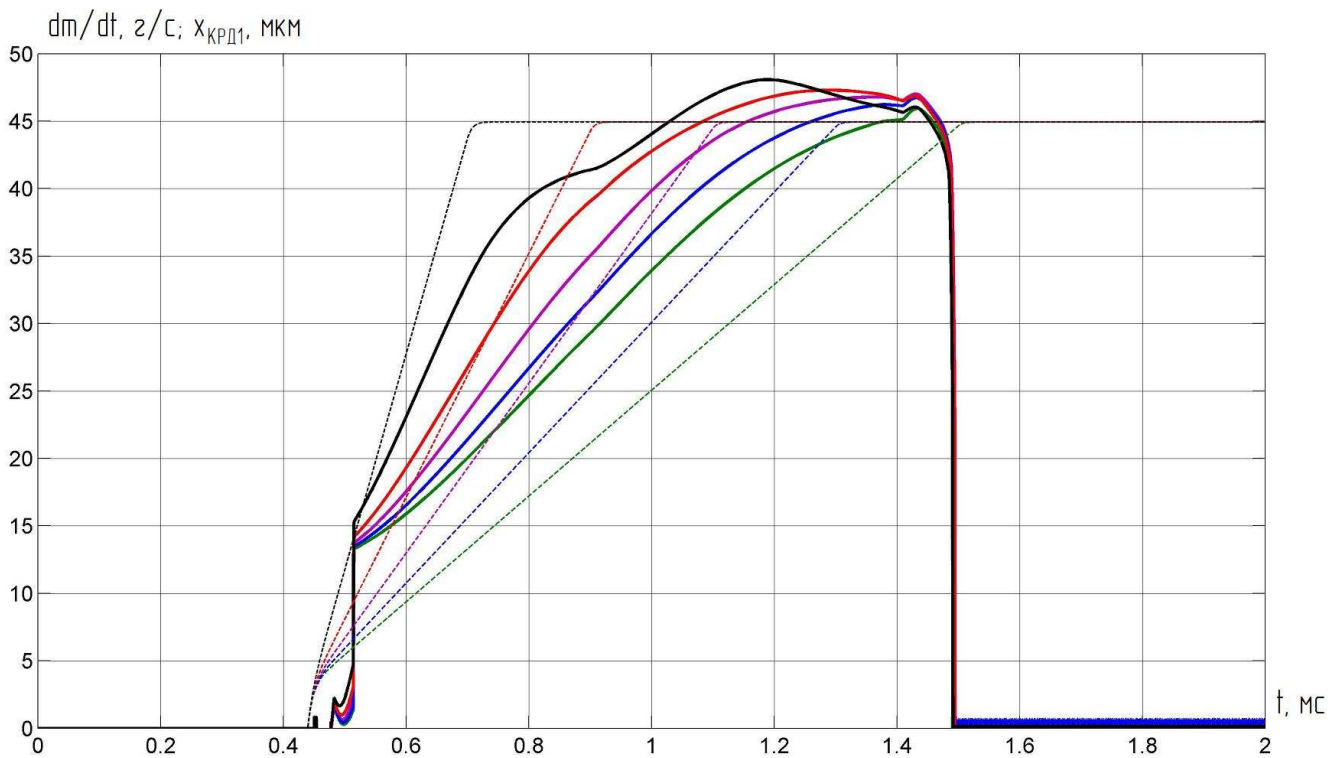


Рис. 6 Треугольные характеристики впрыскивания (сплошной) с разными наклонами кривой давления впрыскивания

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен способ управления формой характеристики впрыскивания дизельной ТПС, позволяющий осуществлять прямоугольную, треугольную и ступенчатую характеристики впрыскивания с широкими возможностями по управлению их параметрами.

2. Разработаны математические модели рабочих процессов предлагаемой в данной работе аккумуляторной ТПС с возможностью управления формой характеристики впрыскивания (АС3) и аккумуляторных систем фирмы Bosch типа CR 2-го (АС1) и 3-го (АС2) поколения. Разработанные математические модели позволяют получать достоверные результаты и могут быть использованы для анализа и оптимизации рассматриваемых систем.

Создана библиотека элементов-примитивов (трубопроводы, полости, отверстия, распылитель, игла, электромагнит, клапаны и др.) в среде Matlab/Simulink может быть использована при создании математических моделей новых ТПС.

3. Проведены численные эксперименты по определению коэффициентов расхода характерных отверстий рассматриваемых форсунок. Расчет проводился в программном комплексе ANSYS CFX с учетом турбулентности потока, сжимаемости топлива и явления кавитации. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными для распылителей форсунок фирмы Bosch типа CR 2-го (АС1) и 3-го (АС2) поколения показало хорошую сходимость (максимальное отклонение 6,5%). Экспериментальные данные взяты из литературы.

По результатам численного эксперимента получены зависимости, которые были использованы для уточнения математических моделей ТПС.

4. Результаты расчета рабочих процессов для АС1 и АС2 показали удовлетворительное совпадение с экспериментом (максимальное расхождение по цикловой подаче при длительности управляющего импульса  $t_{упр} \geq 0,5$  мс для трех разных давлений в аккумуляторе составило 10,4%). Следовательно, применяемые методы математического моделирования адекватно описывают гидродинамические процессы в ТПС.

5. Расчетное исследование предлагаемой аккумуляторной ТПС (АС3) показало, что АС3 позволяет осуществлять прямоугольную, треугольную и ступенчатую форму характеристики впрыскивания с возможностью изменения их параметров. Несмотря на то, что полученная высокая управляемость характеристикой впрыскивания достигается за счет установки двух дополнительных клапанов и снижения гидравлической эффективности форсунки, в сравнении с существующими системами, обладающими подобными возможностями, предлагаемая система менее сложная и/или более гидравлически эффективная.

**Дальнейшее развитие работы** предполагает оптимизацию конструкции предлагаемой дизельной форсунки с целью повышения ее гидравлической эффективности и динамических характеристик, изготовление форсунки и проведение натурных испытаний. Также планируется уточнение математических моделей гидродинамических процессов в форсунке путем учета неизотермичности процессов.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Погуляев, Ю.Д. Устройство для управления энергетическими режимами тракторных агрегатов / Ю.Д. Погуляев, С.А. Белоногов, **Р.М. Байтимеров** // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – №4. – С. 23-25.
2. Погуляев, Ю.Д. Новая концепция системы управления подачей топлива / Ю.Д. Погуляев, С.Н. Капов, С.А. Белоногов, **Р.М. Байтимеров** // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – №7. – С. 26-30.
3. Наумов, В.Н. Расчетное исследование систем топливоподачи с насос-форсунками / В.Н. Наумов, **Р.М. Байтимеров**, Ю.Д. Погуляев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – №10. – С. 47-55.
4. Наумов, В.Н. Двухуровневая форсунка для дизельного двигателя с прямым механическим приводом иглы и втулки / В.Н. Наумов, **Р.М. Байтимеров**, Ю.Д. Погуляев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – №11. – С. 20-27.
5. Погуляев, Ю.Д. Форсунка с двумя уровнями отверстий / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров**, В.Н. Наумов, Чижов Д.А. // Журнал ААИ. – 2013. – №6. – С. 24-27.

### Публикации в изданиях, входящих в БД Scopus:

6. Naumov, V.N. New Diesel Engine Fuel Supply System Able to Control Pressure of Pre- and Post-Main Injections / V.N. Naumov, Yu.D. Pogulyaev, **R.M. Baitimerov**, D.A. Chizhov // SAE Technical Paper 2015-01-2805. – 2015. – 6 p.
7. Pogulyaev, Yu.D. Detailed Dynamic Modeling of Common Rail Piezo Injector / Yu.D. Pogulyaev, **R.M. Baitimerov**, Y.V. Rozhdestvenskii // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 93-98.

### Другие публикации:

8. Погуляев, Ю.Д. Математическая модель процесса впрыска топлива форсункой с двухпозиционным клапаном / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров** // Строительные и дорожные машины. – 2012. – №9. – С. 33-38.
9. Погуляев, Ю.Д. Расчетные исследования впрыска топлива гидравлической форсункой с двумя уровнями отверстий распылителя / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров** // Строительные и дорожные машины. – 2013. – №5. – С. 18-23.
10. Погуляев, Ю.Д. Исследование топливоподающей системы с новым принципом управления / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров** // Строительные и дорожные машины. – 2013. – №9. – С. 28-31.
11. Погуляев, Ю.Д. Универсальная система нового поколения управления подачей топлива в дизелях / Ю.Д. Погуляев, В.Н. Наумов, **Р.М. Байтимеров** // Строительные и дорожные машины. – 2013. – №10. – С. 24-27.
12. Погуляев, Ю.Д. Универсальная система нового поколения управления подачей топлива в дизелях (окончание) / Ю.Д. Погуляев, В.Н. Наумов, **Р.М. Байтимеров** // Строительные и дорожные машины. – 2013. – №11. – С. 28-31.
13. Погуляев, Ю.Д. Расчетное исследование новой системы топливоподачи для дизеля / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров**, В.Н. Наумов, Д.А. Чижов // Строительные и дорожные машины. – 2014. – №1. – С. 25-29.

14. Погуляев, Ю.Д. Определение коэффициентов расхода сопловых каналов распылителей форсунок дизельных двигателей / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров** // Строительные и дорожные машины. – 2014. – №11. – С. 20-23.

15. Погуляев, Ю.Д. Моделирования впрыскивания топлива системой Common Rail третьего поколения с пьезоэлектрической форсункой / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров**, // Строительные и дорожные машины. – 2014. – №12. – С. 24-28.

16. Погуляев, Ю.Д. Новая система топливоподачи для дизеля, позволяющая управлять давлениями предварительных впрысков и впрысков после основного / Ю.Д. Погуляев, В.Н. Наумов, **Р.М. Байтимеров**, Д.А. Чижов, К.Ю. Машков // Автомобильная промышленность. – 2014. – №12. – С. 7-9.

17. Погуляев, Ю.Д. Определение коэффициента деформации полостей систем топливоподачи дизелей / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров** // Строительные и дорожные машины. – 2015. – №8. – С. 11-14.

18. Погуляев, Ю.Д. Топливоподающая система с насосом-форсункой нового типа / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров**, В.Н. Наумов, Д.А. Чижов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 10. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/980.html>.

**По результатам работы получен патент РФ на изобретение:**

19. Патент 2521696 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 02 М 61/18, F 02 М 47/02, F 02 М 51/06. Способ управления подачей топлива и устройство управления подачей топлива / Ю.Д. Погуляев, **Р.М. Байтимеров**, В.Н. Наумов. – № 2013132726/06; заявл. 15.07.13; опубл. 10.07.14, Бюл. №19. – 25 с.