

В.Е. Тарасенко
(УО «БГАТУ»,
г. Минск, Республика Беларусь)
А.А. Жешко
(РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь)

**АНАЛИЗ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ
ДИЗЕЛЕЙ С МЕХАНИЧЕСКИМ
И ЭЛЕКТРОННО-АКТУАТОРНЫМ
УПРАВЛЕНИЕМ
ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ**

Введение

Топливные системы (ТС) делятся на четыре основных класса: с механическим управлением топливоподачей; с электронно-актуаторным управлением; с электронным управлением посредством дозирующих клапанов – импульсные и аккумуляторные. В классах выделены характерные группы [1].

Примерами исполнения ТС с механическим управлением топливоподачей являются рядный насос серии типа УТН НЗТА, распределительный насос типа Lucas, распределительный насос типа VE Bosch, насос-форсунка типа ЯАЗ, форсунка с дросселированием на впуске [2, 3, 4].

Все топливные системы, нашедшие широкое применение, осуществляют лишь дозирование количества впрыскиваемого топлива, изменение угла (начало/окончание) подачи и выполнение регулятором корректирующих функций [1].

Основная часть

У рядных насосов эффективны пусковые кромки на плунжере, изменяющие угол опережения впрыска при пуске на $5-8^\circ$, реже применяются насосы с отсечными кромками с переменным углом наклона, еще реже – с наклонной кромкой для изменения момента начала подачи $7-9^\circ$ [3]. Следует отметить, что классическая спиральная кромка для управления отсечкой требует технологических переходов.

В распределительных насосах происходит дозирование втулкой на плунжере (у рядных такая втулка применяется для изменения угла опережения впрыска), дросселированием на впуске и изменением хода плунжеров.

Управление крутизной переднего фронта и дроблением подачи при помощи замедления и последующего разгона плунжера профилем кулачка отражается в патентных источниках, но на практике не используется. Причина – вероятность возникновения ударных нагрузок при переменных ускорениях, даже при обычных профилях кулачков ускорения меняются, например, от $+800 \text{ м/с}^2$ до -1200 м/с^2 [1], а попытка дробить впрыск профилем приведет к недопустимо растянутому по времени впрыску при низком давлении. По этой же причине не применяются выпуклые профили. Так, кулачок с выпуклым профилем, обеспечивающий ход плунжера 10 мм, разгоняет плунжер до скорости 1,6 м/с, а кулачок с тангенциальным участком профиля при меньшей начальной окружности и меньшем максимальном радиусе при том же ходе 10 мм плунжера разгоняет его до 2,4 м/с [1]. Поэтому широко распространены разгонные участки с вогнутыми профилями и с тангенциальными – насосы серии НД, УТН, ЯЗДА. Следует отметить, что кулачок с участком вогнутого профиля обеспечивает интенсивную объемную подачу.

Дополнительная канавка на плунжере позволяет получить предвпрыск, но современные двигатели требуют пилотной порции не менее $1-4 \text{ мм}^3$, что сложно достижимо [4]. Предварительная доза впрыскивания ведет к уменьшению шума и снижению эмиссии NO_x и СН . На рисунке 1 представлено влияние фаз впрыскивания на давление сгорания [3].

Легко реализуется смешивание подаваемого воздуха с небольшой дозой топлива до цилиндра – путем отвода части утечек из форсунок во впускной коллектор. Дробление впрыска возможно и с помощью гидромеханических устройств [3].

Устройства опережения впрыска удовлетворительно работают на распределительных насосах, например VE Bosch, Lucas. Для рядных насосов нашли применение несколько подходов: центробежная муфта на валу привода кулачкового вала, дополнительная втулка или наклонная кромка на плунжере.

Сравнивать рядные насосы и распределительные довольно сложно. Модели рядных насосов принципиально похожи, сейчас наиболее распространены насосы с подвесными секциями, диаметры плунжеров – от 6 до 20 мм. У распределительных насосов возможна компоновка с аксиальным расположением плунжера – VE Bosch, с радиальным ходом плунжеров – Lucas и по схеме фирмы АМВАК International. В рядном насосе менее нагружена плунжерная пара. Сам насос менее чувствителен к качеству топлива, особенно к присутствию воды. В то же время нагрузки в паре «кулачок – ролик» существенно выше. Распределительные насосы меньше по габаритам и весу.

Форсунки современных ТС стали двухпружинными, что способствует снижению шума. Варианты конструктивного исполнения двухпружинных форсунок приведены в работе [5]. Пружины имеют различную жесткость. Сначала работает пружина меньшей жесткости, обеспечивая начало подачи топлива при давлениях порядка 19 МПа, при дальнейшем повышении давления продолжающая подъем игла начинает сжимать и вторую пружину. Этот процесс хорошо виден на графике (рисунок 2) [5]. Так реализуется элемент управления выгоранием через управление крутизной переднего фронта характеристики впрыскивания. Снижая скорость роста давления в цилиндре в процессе сгорания, уменьшают шум работы двигателя.

Это способствовало полному переходу к более экономичным дизелям с непосредственным впрыском, и, как следствие, к отказу от штифтовых распылителей и совершенствованию закрытых многодырчатых, в развитии которых можно выделить несколько направлений.

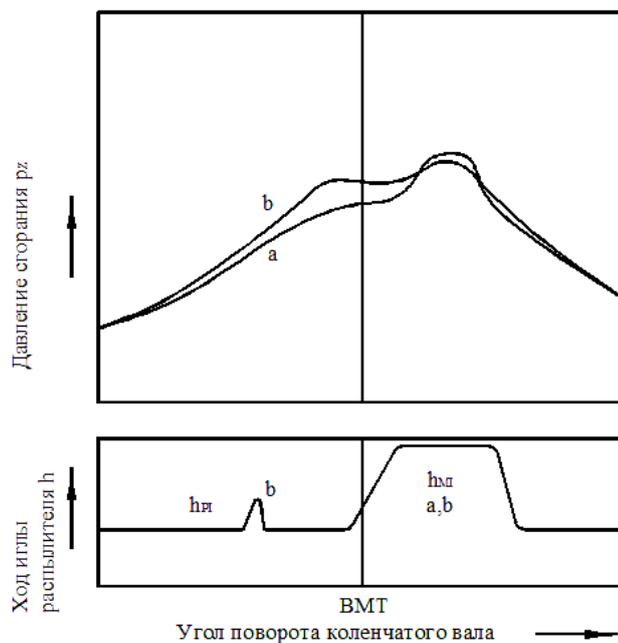


Рисунок 1. – Влияние предварительного впрыскивания на давление сгорания

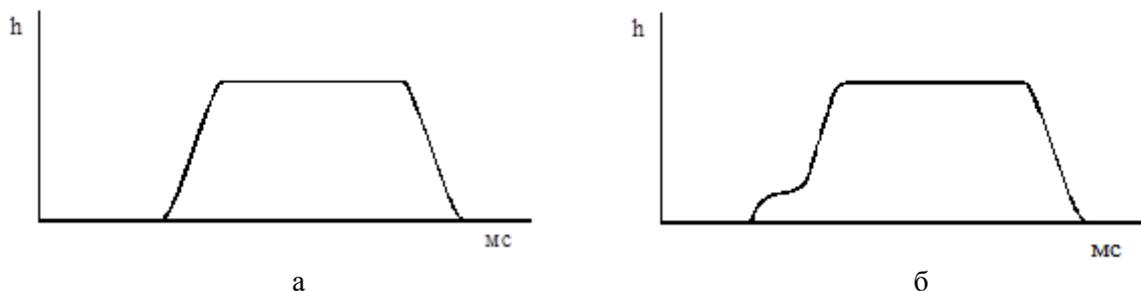


Рисунок 2. – Процесс подъема иглы (а) одно- и (б) двухпружинной форсунки

В работе распылитель подвержен интенсивной тепловой нагрузке. Поэтому применение распылителей размерности Р, имеющих меньшие в сравнении с S габариты, предпочтительнее. Следует заметить, что для двигателей с плохими условиями теплоотвода в зоне установки форсунки эффективны теплоизолирующие прокладки, при достаточном охлаждении головки – медные.

Распылители размерности S имеют диаметр иглы 5 и 6 мм. Применение в распылителях серии Р игл диаметром от 4,5 до 3 мм приводит к повышению давления начала и окончания впрыска, что благоприятно сказывается на качестве распыливания – снижается образование крупных капель при закрытии.

Уменьшение диаметра иглы существенно сказывается на величине усилия пружины и ее диаметре, так как при одном и том же давлении открытия иглу с диаметром 3 мм удерживает усилие, в 4 раза меньшее, чем удерживающее иглу 6 мм. Это важно, так как возможности увеличения диаметра форсунки ограничены, а из-за соотношения диаметра проволоки и самой пружины ее производство представляет серьезные технологические проблемы. Пружины форсунок удовлетворительного качества получают лишь в результате сложного технологического процесса, к примеру, из проволоки OTEVA-70 и на оборудовании фирмы Wafios.

Значительного прогресса в усовершенствовании рабочего процесса удается достичь, повышая давление впрыскивания. Но здесь недостаточно просто уменьшить диаметр иглы распылителя или снизить эффективное проходное сечение за счет ее подъема. Требуется переход к отверстиям для распыливания диаметром до 0,2 мм и увеличение их числа более 5.

При таких размерах начинают влиять граничные условия истечения топлива и требуется применение специальных технологий получения отверстий – электроэрозионным способом, а также последующей их обработки.

Наиболее распространены два способа: продавливание абразивных паст через корпус распылителя и хорошо себя зарекомендовавший электролитно-импульсный способ обработки носика распылителя [6]. Оба мероприятия существенно снижают коксование распыливающих отверстий и улучшают распыливание.

Большое значение имеют правильный выбор формы носика распылителя и обеспечение герметичности соединения «игла – корпус распылителя». При этом стремятся минимизировать объем топлива, оказывающийся под запирающей кромкой иглы, так называемый подыгольный объем.

Применяемые типы распылителей приведены в источниках [4, 7].

Цилиндрическая форма колодца и сферическая носика распылителя позволяет легко ориентировать топливные струи в цилиндре, что важно для двигателей, у которых угол отклонения струи от оси – до 90 градусов. Но при этом объем подыгольного пространства наибольший, что ведет к дымлению, повышению СН, удельного расхода и к коксованию.

Коническая форма колодца обеспечивает уменьшение подыгольного объема, но осложняется сверление отверстий, и их длина может оказаться разной.

Наилучшим является распылитель с конической формой колодца, когда распыливающие отверстия равномерно и максимально приближены к линии запирания. Такие распылители иногда называют «с запиранием по распыливающим отверстиям», что не соответствует действительности, так как для герметичности запирания обеспечивается между конусом иглы и коническим колодцем технологическими допусками гарантированный зазор по угловому размеру до 1,5°.

Наилучшее применение этого типа распылителей – для форсунок с центральным вертикальным положением в цилиндре. При установке такого распылителя в наклонно стоящих форсунках в двигателях с двумя клапанами на цилиндр часть распыливающих отверстий существенно удаляется от герметизирующей кромки. В результате может

произойти коксование распыливающих отверстий, несмотря на очень малый подыгольный объем.

Большое значение имеет длина отверстия – не более 0,8–1,0 мм, иначе уменьшается распыливание и увеличивается дальнобойность струи топлива. У распыливающих отверстий должно сохраняться соотношение «диаметр – длина». Различие между отверстиями вызывает увеличенный расход топлива [1].

Серьезную проблему представляет сохранение характеристик и свойств распылителя в эксплуатации, так как из-за износа может измениться запорный диаметр, подъем иглы и произойти снижение давления открытия, что приведет к появлению крупных капель. Так, с целью сохранения герметичности и величины подъема иглы изготавливаются с подрезкой и обратной разницей углов [4].

Давление у всех топливных систем зависит от частоты вращения коленчатого вала ДВС. Поэтому используются все возможности для его увеличения, например перекрытие окон на втулке выполняется в зоне максимальной скорости плунжера. В наилучшем положении здесь распределительные насосы с радиальным движением плунжеров, так как обеспечивают значительные объемные подачи, а насосы с аксиальным движением плунжера имеют распределение нагрузок по нескольким роликам. Эти насосы смазываются проточным топливом, в результате чего снижается температура и удаляются продукты износа.

Таким образом, топливные системы с механическим управлением имеют следующие возможности в формировании характеристики топливоподачи:

- управление крутизной переднего фронта характеристики топливоподачи (двухпружинной форсункой, профилем кулачка, пропускной способностью тракта и распылителя);
- длительность впрыска (профиль кулачка);
- максимальное (среднее за цикл) давление впрыска (диаметр плунжера, скорость плунжера, пропускная способность тракта и распылителя);
- предварительный впрыск;
- подача топлива в воздухопровод;
- изменение момента (начало/окончание) подачи;
- изменение объема подачи;
- пусковая коррекция подачи топлива;
- атмосферная коррекция;
- коррекция по наддуву.

Расширение возможности механического управления подачей привело к тому, что регулятор превратился в сложный, дорогой и ненадежно работающий узел, не дающий требуемого уровня управления подачей топлива для формирования оптимальной характеристики сгорания. Вполне естественно, что регулятор стал первым узлом, на замену которого были направлены усилия разработчиков.

Переходными от ТС с механическим управлением к электронным, управляемым с помощью дозирующих клапанов, являются ТС с актуаторным (электромагнитным) приводом дозирующего органа ТНВД (топливного насоса высокого давления). Актуатор изготавливается с поворотным или линейным перемещением, с высокими требованиями по быстродействию и точности.

Примерами являются топливные системы, выпускаемые фирмой Bosch – распределительные насосы серии VE...EDC с аксиальным движением плунжера, рядные насосы серий H1 и H1000, а также насосы H3TA-4УТНЭ-1111005-10 с управлением фирмы Heinzmann (Германия) и 4УТНЭ-1111005 с управлением ЭРУС-10 (Российская Федерация).

Следует отметить, что рядные насосы фирмы Bosch серий H1 и H1000 имеют дополнительную втулку на плунжере, что позволяет им при наличии реечного управления поворотом плунжера полноценно управлять углом опережения впрыска.

Появление ТС, в которых сохранены отсечные кромки у плунжеров насосов, но механический регулятор заменен на актуаторный привод рейки или дозатора, было естественным шагом производителей, стремившихся сохранить преемственность при выпуске ТС.

В процессе управления этими ТС обрабатывается значительное количество информации о состоянии двигателя, характеристике заряда и топлива. В памяти контроллера сохранялись данные калибровки об оптимальных параметрах подачи на всех режимах работы двигателя, что привело к улучшению топливной экономичности и токсичности отработавших газов.

Получив повышенное быстродействие, точность, возможность учета большего количества параметров, данные ТС сохранили те же недостатки, что и с механическим управлением – осредненное регулирование двух параметров, при этом цена на них существенно возросла. Но эта ТС впервые предоставила реализуемую возможность оптимизировать работу мобильной машины в целом, например управлять буксованием колес.

Нецелесообразность применения сегодня ТС с актуатором на мобильной машине можно выявить в сравнении с ТС, где дозирующие электроклапаны установлены на каждой секции насоса, а форсунки применены, например, двухпружинные.

Цены этих систем практически одинаковы, поскольку почти одинаков набор компонентов, требуются одинаковые изменения в двигателе, а появление дозирующих клапанов компенсируется упрощением плунжеров и втулок насоса.

Основное улучшение работы двигателя происходит при индивидуальных настройках тракта «насос – форсунка – цилиндр». Уменьшается шум, возрастают мощностно-экономические параметры двигателя внутреннего сгорания (ДВС), уменьшаются выбросы вредных веществ, а при форсировании давления впрыска до 150–180 МПа такие ТС выполняют требования Tier-3. Поэтому данный режим настройки обязателен для каждого конкретного двигателя, критерием для его оптимизации можно избрать перепад температур выхлопных газов в выхлопном патрубке каждого цилиндра.

ТС с актуатором не выполняет данных оптимизирующих настроек, давление впрыска то же, что и у ТС с механическим регулированием, поэтому ее новое применение на мобильных машинах не оправдано.

При этом ТС с актуатором сохранили все возможности по управлению характеристикой впрыска механических систем и дополнили характеристики параметрами:

- учет массового расхода воздуха;
- управление рециркуляцией;
- учет температур воздуха и топлива;
- отслеживание аварийных режимов;
- связь с рабочими режимами мобильной машины или специальной установки;
- оперативная диагностика.

Приведенный перечень датчиков и выполняемых ТС с актуатором функций теоретически осуществим, но на практике наиболее распространены системы с минимальным набором: датчиками частоты и фазы, контроллером, актуатором, электронной педалью, контролем подъема иглы и аварийных состояний ДВС. Высокая степень автоматизации неэффективна при грубом дозировании подачи и управлении углом опережения впрыска.

Актуаторные системы сменили ТС с гибким электронным управлением подачей топлива и одним или несколькими клапанами в зависимости от количества цилиндров двигателя.

Примерами таких ТС являются выпускаемые фирмой Bosch распределительные насосы серии VE...MV с аксиальным движением плунжера, распределительные насосы

серии VR с радиальным движением плунжера, а также распределительные насосы фирмы Lucas [2] и рядный насос НЗТА 432 с управлением фирмы «Дизельавтоматика» (Российская Федерация), индивидуальные ТНВД Bosch серии PF, насос-форсунки фирм Lucas, Bosch, Caterpillar, Cummins SelectTM Plus [8].

Топливоподкачивающие насосы с механическим приводом плунжерного типа, применяемые в системах НЗТА, ЯЗДА, обеспечивают разрежение на всасывании порядка 0,1 МПа и давление топлива около 0,15 МПа, чего совершенно недостаточно для топливной аппаратуры. Здесь необходимы, например, роторно-пластинчатые топливоподкачивающие насосы, серийно выпускаемые Bosch VE. По экспериментальным данным, при настройке давления 0,4–0,6 МПа они удовлетворительно работают с импульсными системами, обеспечивая режим клапанного заполнения надплунжерного пространства.

Для систем с механическим регулированием важно использовать все возможности для повышения давления впрыска, точности дозирования и выполнения корректирующих подачу действий регулятора. Для этого необходимо выбрать профиль кулачка с учетом многих факторов, указанных выше. Скорее всего, выбирать придется между кулачками, имеющими сочетание тангенциальных или вогнутых профилей с радиусными участками постоянной скорости. Решение задачи может состоять из следующих этапов: определения угловой координаты кулачка, соответствующей началу подъема плунжера; нахождения параметров профильных участков кулачков; вычисления координат и размеров впускных и отсечных окон; определения активного хода плунжера.

Заключение

Для расширения возможностей механических систем управления сегодня существует множество различных устройств, но на практике реализуется лишь малая их часть. Связано это, прежде всего, с большими трудностями, возникающими при проектировании, изготовлении и эксплуатации элементов и устройств механического управления, которые при попытке осуществить большой набор функций оказываются громоздкими, дорогими в производстве и ненадежно работающими. Износ устройств управления приводит к нарушению управляемости, а настройки еще более усложняют ситуацию.

Основные недостатки современных ТС с механическим управлением – осредненное регулирование (без учета индивидуальных особенностей тракторов «секция – форсунка – цилиндр») цикловой подачи и момента опережения впрыска, незначительные возможности по дроблению впрыска на дозы. ТС такого типа предоставляют недостаточно возможностей эффективного влияния топливоподдачи на характеристику выгорания.

Появление новых возможностей ТС сопровождается включением в их состав новых элементов, но и под прежним названием в новых ТС обнаруживаются устройства более высокого уровня исполнения.

Модернизированные ТС с механическим управлением подачей, вероятно, сохраняют за собой рынок стационарных и специальных двигателей, на которые не распространяется действие невыполнимых для них правил по токсичности.

02.05.2016

Литература

1. Якубович, А.И. Экономия топлива на тракторах: монография / А.И. Якубович, Г.М. Кухаренок, В.Е. Тарасенко. – Минск: БНТУ, 2009. – 229 с.
2. Голубков, Л.Н. Топливные насосы высокого давления распределительного типа: учебное пособие / Л.Н. Голубков, А.А. Савастенко, М.В. Эмиль. – 6-е изд., доп. – М.: Легион-Автодата, 2003.
3. Bosch. Системы управления дизельными двигателями / пер. с нем. Первое русское издание. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.

4. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
5. Bosch. Dusen und dusenhalter. Technische Beschreibung. – 1995.
6. Кухаренок, Г.М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей. Методы и средства совершенствования / Г.М. Кухаренок. – Минск: БГПА, 1999. – 180 с.
7. Bosch. Автомобильный справочник / пер. с англ. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2000. – 896 с.
8. Тер-Мкртчян, Г.Г. Современное состояние и перспективы развития топливной аппаратуры автотракторных дизелей / Г.Г. Тер-Мкртчян, М.В. Мазинг // Двигателестроение. – 2014. – № 1. – С. 30–35.

УДК 631.314

**Н.Д. Лепешкин,
В.П. Чеботарев, Н.С. Козлов**
*(РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства»),
г. Минск, Республика Беларусь)*

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЕРОЯТНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ
СПИРАЛЬНО-НОЖЕВИДНЫМ КАТКОМ**

Введение

Анализ исследований [1] показал, что в сельскохозяйственном производстве существует значительная проблема послеуборочного измельчения растительных остатков почвообрабатывающими агрегатами. В настоящее время в Республике Беларусь применяются почвообрабатывающие агрегаты, которые не обеспечивают качественного измельчения стеблей на отрезки до 15 см. Для решения этой проблемы все чаще в качестве рабочих органов применяются ножевидные катки, представляющие собой цилиндр, по периметру которого установлены ножи. Их достоинствами в сравнении с другими типами рабочих органов являются: более высокая производительность, обеспечиваемая за счет существенного повышения рабочих скоростей и ширины захвата, простая и компактная конструкция, а также низкое тяговое сопротивление при работе на различных агрофонах.

Однако после уборки сельскохозяйственных культур остаются не только скошенные, но и лежащие хаотично на поверхности поля растительные остатки. Поэтому возникает задача установки рационального количества ножей на катке, для того чтобы обеспечить наибольшую вероятность попадания лезвия ножа на растительные остатки для последующего их перерезания. Теоретически рассмотрим простое одноразовое перерезание остатков стеблей, а затем перерезание до агротехнической длины 0,15 м несколькими ножами (не менее 2).

Основная часть

Поскольку растительные остатки разбросаны на поверхности поля случайным образом, то попадание лезвия на обрабатываемый материал носит вероятностный характер. Для того чтобы определить вероятность измельчения ножами спирально-ножевидного катка растительных остатков, воспользуемся теорией вероятностей, а именно классической «задачей Бюффона» об игле [2].

Представим, что расчерченные параллельные прямые nn' и mm' обозначают развертку спирально-ножевидного катка, а брошенная игла между двумя параллельными прямыми – растительный остаток (рисунок 1).