

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА В КАЧЕСТВЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВЫХЛОПА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ САЖИ

Тришкин И.Б.<sup>1</sup>, Стражев Н.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВПО «РГАТУ») Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, Рязань, Россия (390044, г. Рязань, ул. Вишневая, д. 35), e-mail: iv.trishckin@yandex.ru

Проведен анализ возможности выполнения энергоёмких механизированных операций мобильными энергетическими средствами с дизельными двигателями внутреннего сгорания внутри промышленных и сельскохозяйственных помещений ограниченного объёма и воздухообмена (животноводческие фермы, тепличные комбинаты, цеха и т.д.). В процессе их эксплуатации содержание токсичных веществ (ТВ), входящих в состав отработавших газов (ОГ), в воздушной среде данных помещений повышается и превышает предельно допустимые концентрации в несколько раз. Установлено, что одним из основных ТВ ОГ дизельных двигателей является сажа, которая определяет дымность ОГ и оказывает вредное воздействие на здоровье человека, продуктивность животных и т.д. Предложена конструкция электрического сажевого фильтра (Патенты РФ на полезную модель 56964, 56965, 59153). Представлена структурная схема лабораторных испытаний дизельного двигателя Д-21А, устанавливаемого на отечественные тракторы тягового класса 6кН. Испытаниями установлено, что максимальная степень очистки выхлопа двигателя от сажи достигает 45%, при снижении уровня шума на 20% по сравнению со штатной системой выпуска ОГ.

Ключевые слова: мобильное энергетическое средство; токсичное вещество; предельно допустимая концентрация; отработавшие газы; электрический фильтр.

## ELECTRIC FILTER USAGE AS A SOOT CLARIFICATION SYSTEM OF THE EXHAUST IN DIESEL ENGINE

Trishkin I.B.<sup>1</sup>, Strazhev N.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> "Ryazan State Agrotechnological University Named After P.A. Kostychev", Ryazan, Russia (390044, Ryazan, Vishnevaya Str., 35), e-mail: iv.trishckin@yandex.ru

We have conducted analysis of energy-intensive mechanized operations possibility while using mobile power equipment with diesel internal combustion engines in industrial and agricultural areas with a limited amount of air (livestock farms, greenhouses, shops, etc.). In the course of its operation the content of exhaust gas (EG) toxic substances (TS) in the air of the buildings increases and several times exceeds the maximum allowable concentration. We have found out that one of the main EGTS from diesel engines is soot determining smokiness and having adverse health effect and livestock productivity, etc. We have proposed a design of the electric soot filter (RF patents for utility model № 56964, 56965, 59153). We have also presented the the block diagram of diesel engine D-21 laboratory testing at domestic tractors of 6kN drawbar category. Tests have shown that the maximum degree of engine exhaust purification from soot reaches 45%, while reducing the noise level by 20% as compared with the standard exhaust system.

Keywords: mobile energetic means, toxic agent, antipollution standards, exit gas, electric filter.

Поддержание оптимальных параметров микроклимата закрытых помещений является одним из неотъемлемых условий здорового и высокопроизводительного труда работников предприятия.

В большинстве хозяйств выполнение механизированных операций наиболее трудоемких работ осуществляется с помощью мобильных энергетических средств (МЭС), работающих на дизельном топливе. Особое внимание заслуживает эксплуатация дизелей в местах с ограниченным объемом и воздухообменом – цехах, фермах, теплицах и т.д. В процессе их эксплуатации содержание токсичных веществ (ТВ) в воздушной среде данных

помещений превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) в несколько раз. Это негативно сказывается на урожайности и качестве выращиваемых культур, продуктивности животноводства, приводит к ускоренному разрушению строительных материалов зданий и сооружений.

Основной целью по снижению степени вредного воздействия ТВ, образующихся при работе МЭС в помещениях ограниченного объема, является снижение токсичности их выхлопа. Поэтому очевидна необходимость разработки и внедрения эффективных способов и систем очистки отработавших газов (ОГ), обладающих высокой надежностью при умеренной стоимости их производства и не существенно влияющих на мощностные и топливно-экономические показатели МЭС.

На основании проведенного анализа было установлено, что одним из основных ТВ ОГ дизельных двигателей является сажа, на выброс которой может приходиться наибольшая доля токсичности дизеля. Сажа определяет дымность ОГ и оказывает весьма вредное воздействие на здоровье человека, продуктивность животных, способствует появлению смога в больших городах.

На сегодняшний день для решения требований экологических стандартов в мире в основном применяются две стандартные технологии [4]:

EGR – Exhaust Gas Recirculation – система очистки выхлопа дизельного двигателя, основанная на использовании рециркуляции ОГ и установке сажевого фильтра в системе выпуска дизеля;

SCR – Selective Catalyst Reduction – система очистки выхлопа дизельного двигателя, использующая впрыск AdBlue (32,5-процентный раствор карбамида в деионизированной воде) в выхлопную трубу перед SCR-нейтрализатором.

Следует отметить, что сложность борьбы с выбросами сажевых частиц заключается в необходимости улучшения полноты сгорания топлива, связанной с увеличением температуры в камере сгорания дизеля, что ведет к росту выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$ . Для снижения их содержания необходимо снижать температуру, что приводит к неполному сгоранию топлива и образованию твердых частиц. Это в свою очередь определяет необходимость использования в системе выпуска двигателя сажевого фильтра. Применение системы очистки EGR определяет жесткие требования к газовому составу свежего заряда и стабильности процесса горения. При этом добавление к свежему заряду ОГ двигателя явно не будет способствовать улучшению рабочих характеристик последнего. Определенные сложности возникают и при использовании системы очистки SCR, которые заключаются в необходимости организации процесса доставки, хранения и заправки МЭС раствором AdBlue, что приведет к дополнительным затратам и снижению прибыли предприятия.

Проведенный анализ основных методов снижения токсичности и дымности ОГ в системе выпуска дизеля определил основные преимущества в работе электрического фильтра (ЭФ) [5-8] по фильтрации сажевых частиц ОГ, с точки зрения эффективности степени очистки выхлопа и незначительного влияния на эффективные параметры двигателя.

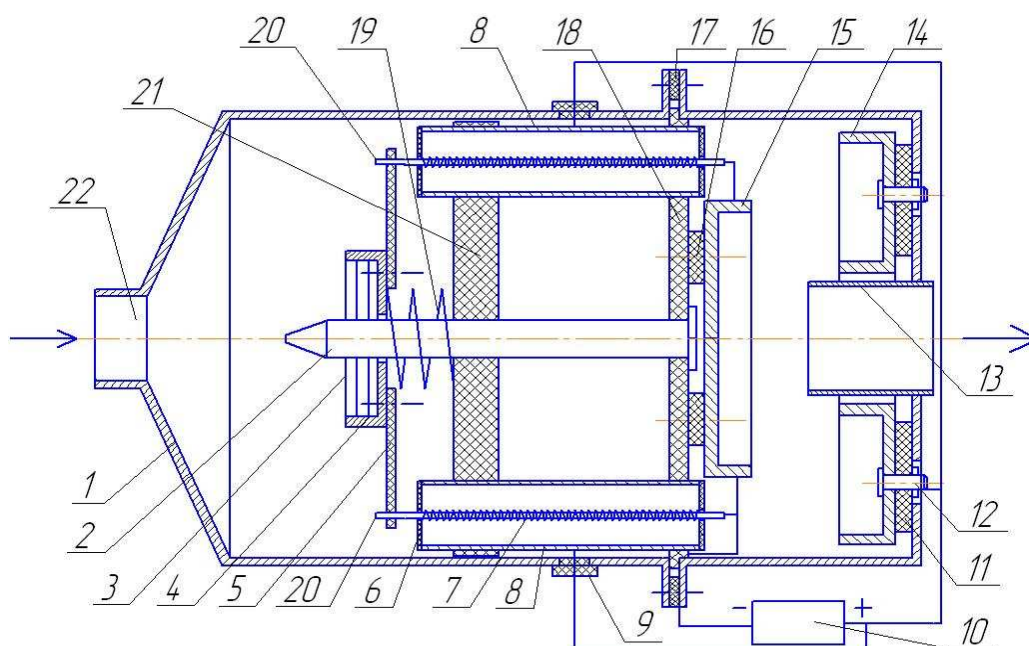


Рисунок 1 – Схема электрического фильтра

1 – корпус фильтра; 2 – направляющая ось; 3 – металлическая путанка; 4 – подвижный стакан; 5 – диэлектрическая пластина; 6 – направляющая; 7 – очиститель сажи; 8 – некоронирующий электрод; 9 – диэлектрическая втулка; 10 – источник высоковольтного питания; 11 – диэлектрическая втулка; 12 – болт; 13 – выпускной канал; 14 – большой сажесборник; 15 – малый сажесборник; 16 – диэлектрическая шайба; 17 – уплотнительная прокладка; 18 – планка; 19 – пружина; 20 – коронирующий электрод; 21 – перегородка; 22 – впускной канал.

С целью увеличения степени очистки устройства, за счет снижения скорости выхлопных газов на участке горения коронного разряда, напротив впускного канала 22, по ходу движения ОГ установлен подвижный стакан 4, связанный с перегородкой 21 упругим элементом 19, служащим для гашения скорости пульсирующего потока выхлопа дизеля. Для поддержания стабильности режима горения коронного разряда внутри подвижного стакана размещена мелкая металлическая путанка 3, выполняющая роль уловителя аэрозолей моторного масла и конденсата, содержащихся в ОГ двигателя. Для предотвращения загрязнения сажей наружных поверхностей коронирующих электродов 20, последние проходят внутри очистителей 7 и могут перемещаться в них за счет действия на подвижный стакан давления потока ОГ. Для более полного улавливания сажи и предотвращения

вторичного ее уноса в атмосферу в зоне выпускного канала установлены два сажесборника 14 и 15, подключенных к разным полюсам источника высоковольтного питания 10.

Устройство работает следующим образом. ОГ через впускной канал 22 поступают в ЭФ. Ввиду того что напротив впускного канала установлены поперечная перегородка 21 и подвижный стакан 4, происходит заметное снижение скорости ОГ двигателя на участке горения коронного разряда, что является необходимым условием для эффективного протекания процесса электрической зарядки частиц сажи. При подаче высокого напряжения к коронирующим электродам 20 между ними и некоронирующими электродами 8 зажигается коронный разряд, в результате чего межэлектродный промежуток будет заполнен в основном отрицательно заряженными ионами газа. ОГ двигателя ионизируются в поле отрицательной короны, т.е. частицы сажи приобретают отрицательный заряд (вследствие адсорбции на них отрицательных ионов). С потоком заряженные частицы поступают в зону выпускного канала 13, где последовательно проходят через большой 14 и малый 15 сажесборники. Такое расположение сажесборников будет способствовать более полному улавливанию сажи, так как поток газов при выходе в атмосферу совершает разворот на  $360^\circ$ , тем самым прижимая своей струей осевшие частицы сажи к торцевым перегородкам сажесборников.

Разработанная конструкция ЭФ позволяет увеличить надежность работы системы очистки дизельного выхлопа за счет обеспечения стабильности процесса электрической зарядки и осаждения сажевых частиц. Применение данного способа очистки ОГ не потребует внесения существенных изменений в конструкцию системы выпуска дизеля и сохранит габаритные размеры МЭС.

В качестве объекта исследований был выбран дизельный двигатель Д-21А, устанавливаемый на тракторы семейства Т-25, Т-30, тягового класса 6 кН. При проведении испытаний загрузка двигателя трактора осуществлялась через трансмиссию беговыми барабанами диагностического стенда КИ-8927.

Лабораторные испытания двигателя трактора проводились на установившихся режимах по внешней скоростной характеристике двигателя трактора и на холостом ходу, в режиме свободного ускорения дизеля [3; 9].

Контрольными точками при испытаниях являлись режимы максимального крутящего момента ( $M_K^{\max}$ ), номинального ( $M_K^{\text{ном}}$ ) и четыре точки между ними [2]. На каждом режиме внешней скоростной характеристики дымность измеряется три раза, при этом разность результатов измерений не должна превышать 4%. За результат измерений принимается среднеарифметическое значение трех измерений дымности ОГ дизеля.

Дымность выхлопа трактора на режиме свободного ускорения двигателя измерялась восемь раз. За результат измерения принимается среднее арифметическое значение четырех

последних измерений, разность между которыми не должна превышать 4%, и они не составляют убывающую или возрастающую последовательность [1].

Структурная схема лабораторных испытаний дизельного двигателя Д-21А представлена на рисунке 2.

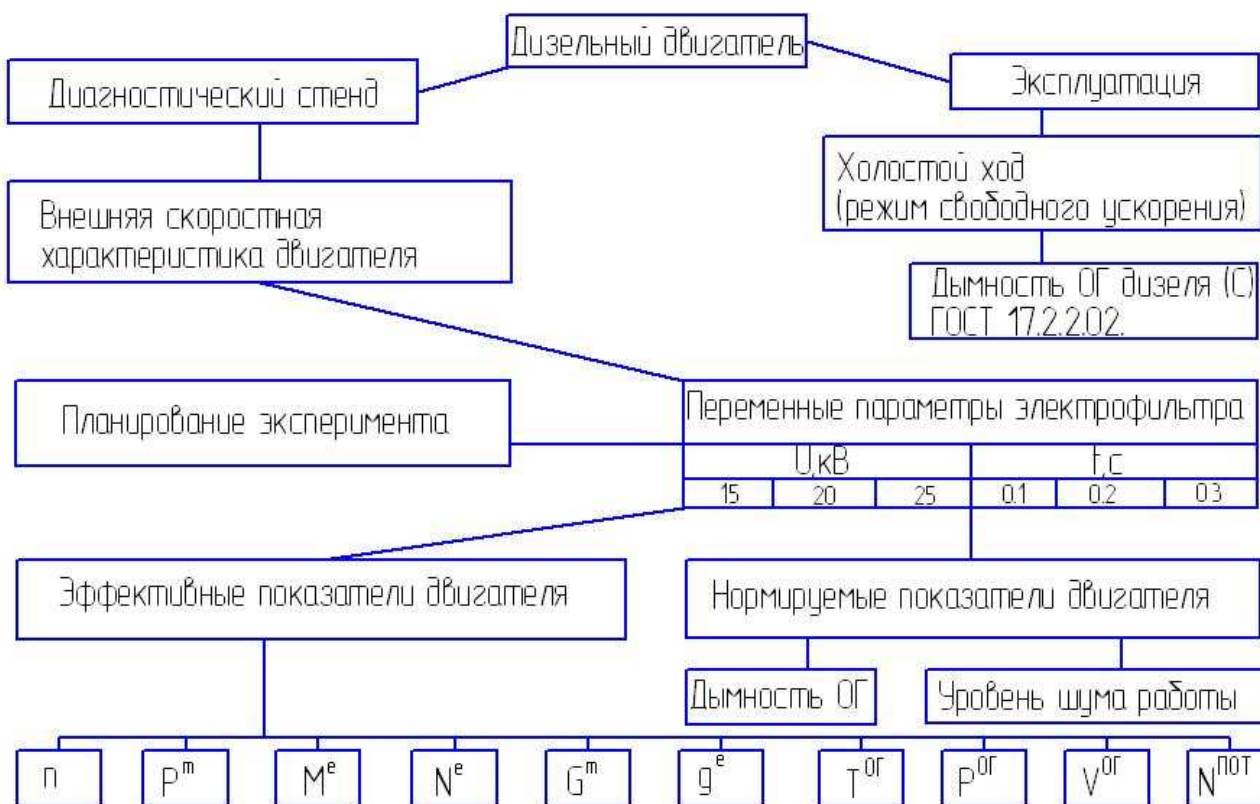


Рисунок 2 – Структурная схема лабораторных испытаний

Для оценки мощностных и экономических показателей работы дизельного двигателя трактора Т-25А был проведен ряд опытов в лабораторных условиях.

При проведении исследований, в процессе снятия внешней скоростной характеристики дизеля трактора, зависимыми факторами являлись величина высоковольтного напряжения питания ЭФ и время нахождения сажевых частиц в зоне зарядки, а параметрами оптимизации были:

- дымность ОГ (С);
- величина общего тока потребления ЭФ (J).

При этом замер дымности ОГ трактора проводился в условиях внешней скоростной характеристики работы двигателя на режимах номинальной мощности и максимального крутящего момента дизеля трактора.

В результате статистической обработки экспериментальных данных были получены математические модели зависимости исследуемых параметров оптимизации дымность ОГ - С и величина общего тока потребления ЭФ - J, графически изображенные на рисунках 3-6.

Режим максимальной мощности двигателя

$$C = 30,6311 + 0,4217U - 31,7667t + 0,0011U^2 - 0,25 U t + 52,3333 t^2$$

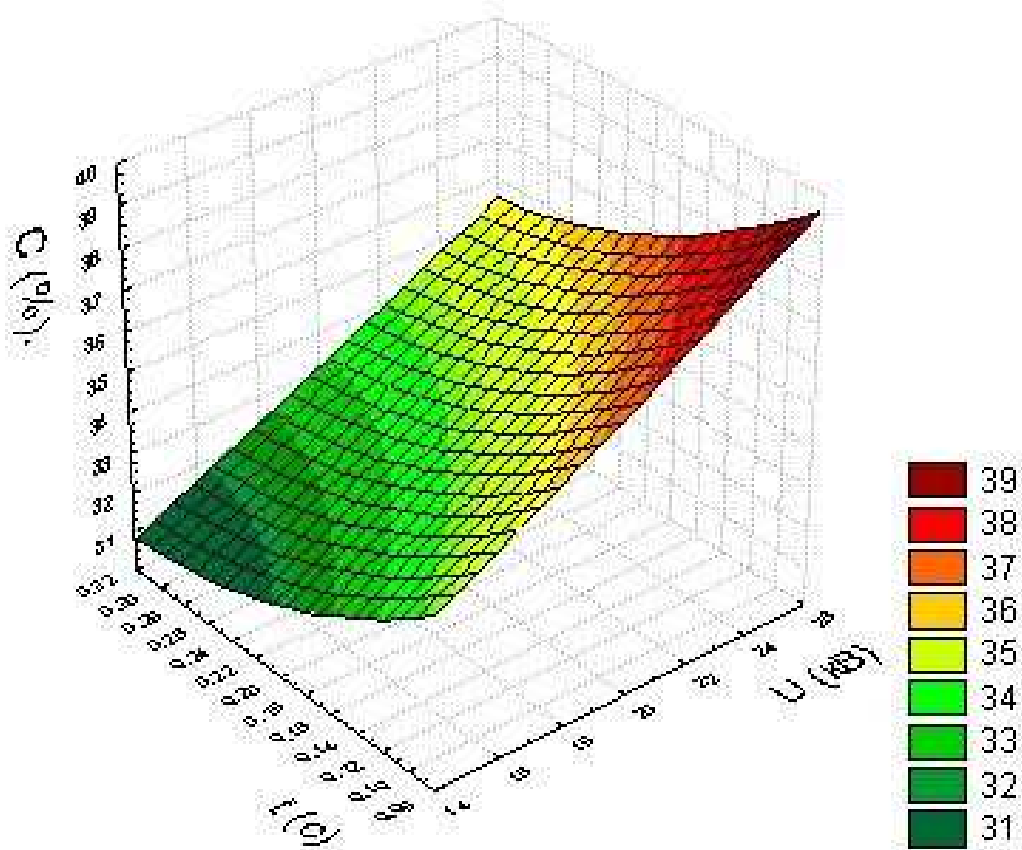


Рисунок 3 – Графическая зависимость дымности отработавших газов трактора  $C$  (%) в режиме максимальной мощности двигателя от величины высоковольтного напряжения ( $U$ ) и времени зарядки сажевых частиц ( $t$ ) в условиях снятия внешней скоростной характеристики дизеля.

Из графических зависимостей видно, что с уменьшением величины высоковольтного напряжения питания ЭФ и увеличением времени зарядки сажевых частиц, происходит снижения дымности ОГ трактора. При этом максимальная степень очистки ОГ дизельного двигателя от сажи составляет около 45% при работе на режиме максимального крутящего момента и значениях напряжения 15 кВ и времени зарядки ( $t$ ) 0.3 с. В режиме работы дизеля на максимальной мощности степень снижения дымности ОГ составляет 40% при вышеуказанных значения переменных факторов.

Режим максимального крутящего момента двигателя

$$C = 46,7289 - 0,2423 U - 55,2 t + 0,0143 U^2 + 0,665 U t + 52,6667 t^2$$

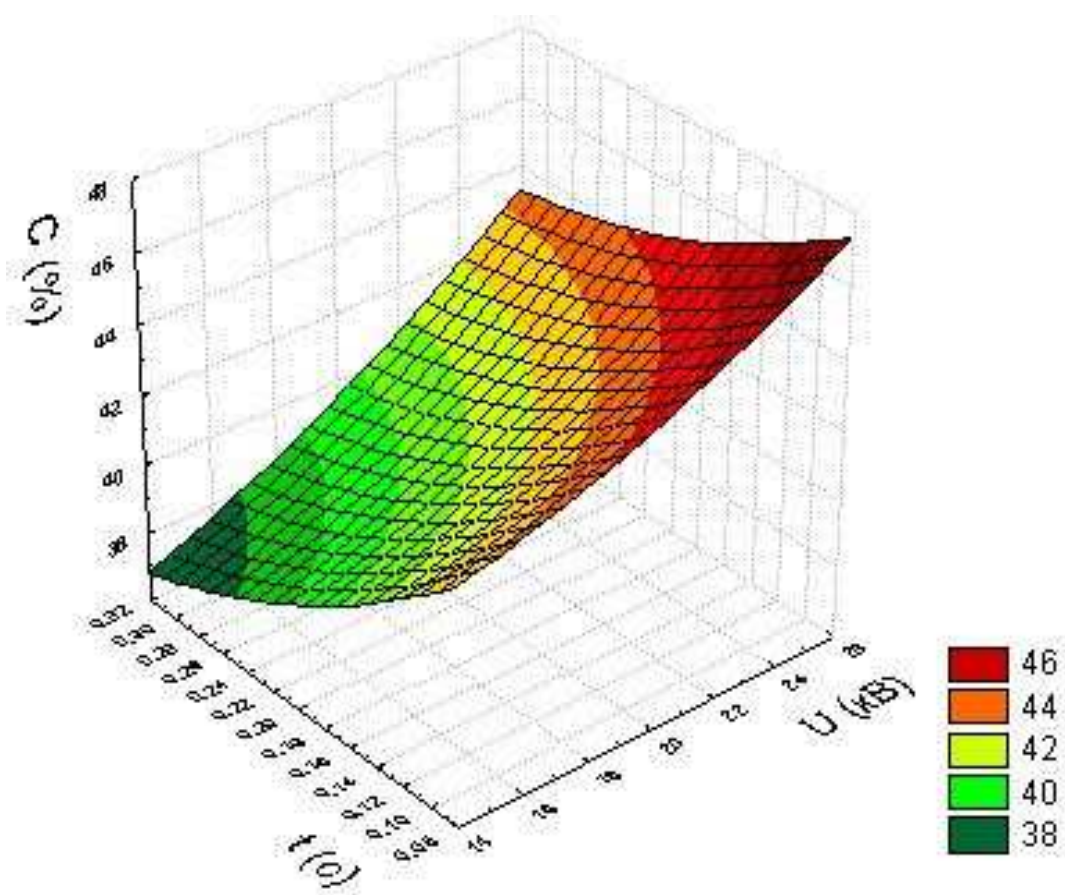


Рисунок 4 – Графическая зависимость дымности отработавших газов трактора С (%) в режиме максимального крутящего момента двигателя от величины высоковольтного напряжения (U) и времени зарядки сажевых частиц (t) в условиях снятия внешней скоростной характеристики дизеля.

По мере роста напряжения питания и уменьшения времени зарядки частиц сажи степень снижения дымности ОГ трактора уменьшается и составляет около 35% при напряжении 20 кВ и 30% - при 25 кВ.

Уменьшение дымности ОГ с возрастанием времени зарядки сажевых частиц связано со стремлением последних получить максимальный электрический заряд, способствующий их эффективному осаждению и дальнейшему удерживанию на поверхности сажесборников фильтра.

Так, при напряжении в 15 кВ степень снижения дымности выхлопа трактора изменятся от 35% при  $t = 0,1$  с до 45% при  $t = 0,3$  с на режиме максимального крутящего момента двигателя. На режиме максимальной мощности работы трактора данное изменение дымности ОГ составляет 34-42% при указанных значениях зависимых факторов.

Для определения энергетических затрат при эксплуатации трактора с модернизированной системой выпуска необходимо исследовать степень влияния указанных



выше факторов на величину общего тока потребления ЭФ, что позволит оценить возможность питания ЭФ от штатной системы электрооборудования трактора.

Режим максимальной мощности двигателя

$$J = 14,3789 - 1,5007U - 1,0667 t + 0,0497 U^2 + 0,215 U t - 5,3333 t^2$$

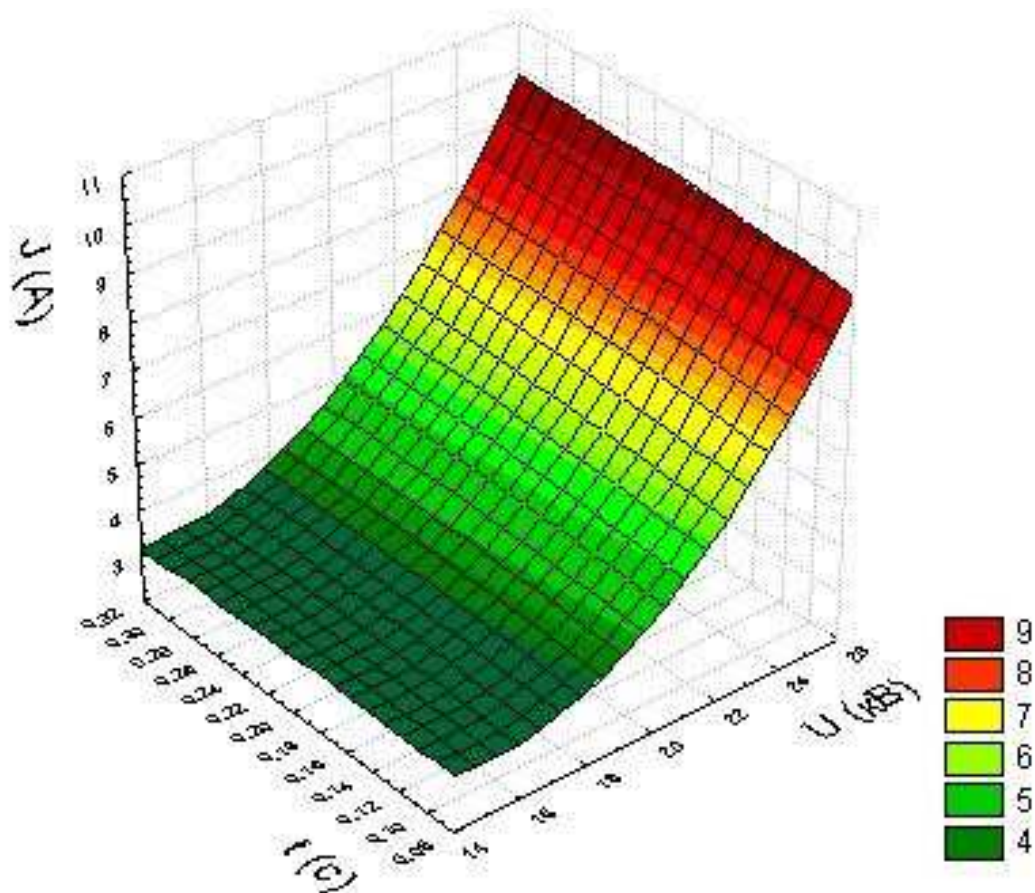


Рисунок 5 – Графическая зависимость общего тока потребления электрофильтром J (А) в режиме максимальной мощности двигателя от величины высоковольтного напряжения (U) и времени зарядки сажевых частиц (t) в условиях снятия внешней скоростной характеристики дизеля.

Режим максимального крутящего момента двигателя

$$J = 14,9922 - 1,5527 U - 2,8167 t + 0,0525 U^2 + 0,015 U t + 6,1667 t^2$$



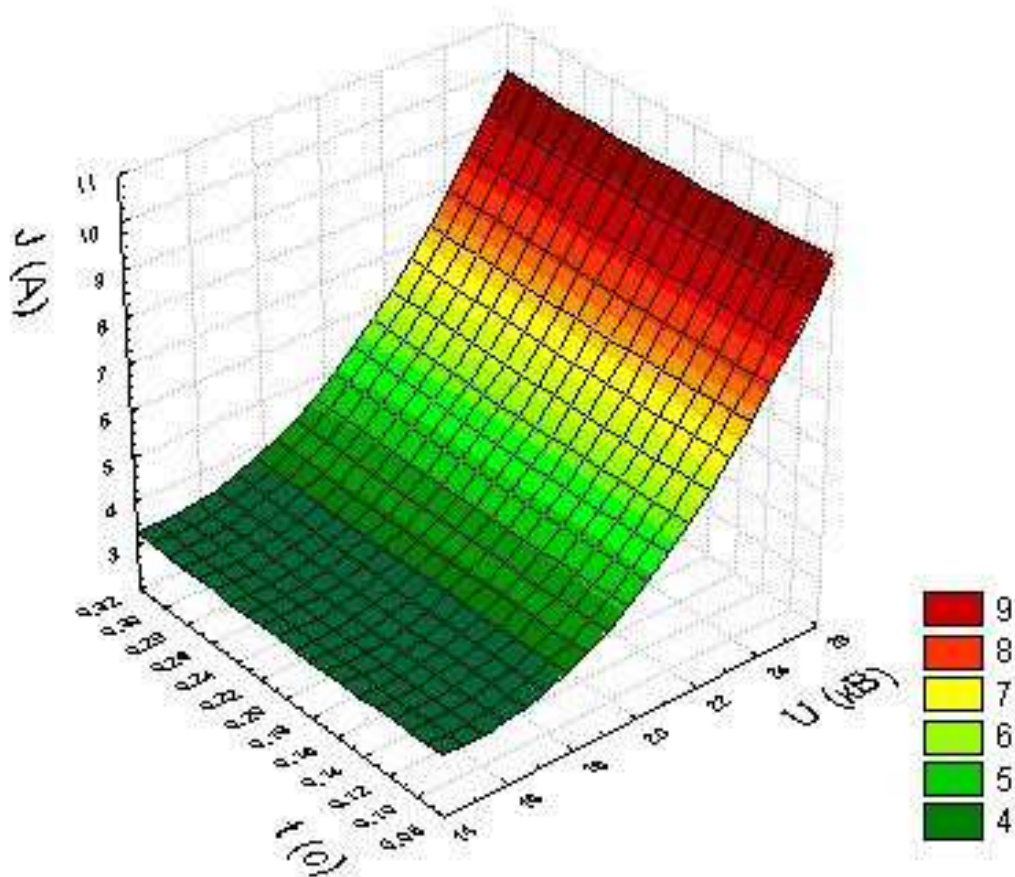


Рисунок 6 – Графическая зависимость общего тока потребления электрофильтром  $J$  (А) в режиме максимального крутящего момента двигателя максимальной мощности двигателя от величины высоковольтного напряжения ( $U$ ) и времени зарядки сажевых частиц ( $t$ ) в условиях снятия внешней скоростной характеристики дизеля.

Из данных графических зависимостей видно, что с увеличением величины высоковольтного напряжения питания ЭФ происходит заметное увеличение величины общего тока потребления фильтром, которая достигает порядка 10 ампер (А) при напряжении питания в 25 кВ. При этом время зарядки сажевых частиц практически не оказывает влияние на изменение тока потребления фильтром. По мере уменьшения высоковольтного напряжения происходит резкий скачок величины тока в сторону уменьшения, которая достигает 4А при напряжении 15 кВ.

Проведенный статистический анализ полученных зависимостей, который включает проверку воспроизводимости эксперимента, показал, что полученные математические уравнения достаточно точно описывают исследуемые зависимости с вероятностью 99,0%.

На режиме свободного ускорения, при работающем на минимально устойчивой частоте вращения двигателе, орган управления регулятора частоты вращения коленчатого вала в течение 0,5 с перемещался в положение, соответствующее максимальной подаче топлива.

Такое положение органа управления сохранялось 5...10 сек, в течение которых на режиме измерения текущего значения дымности фиксировалось максимальное ее значение [1; 3].

При снятии внешней скоростной характеристики дизеля замер дымности ОГ осуществляется в контрольных точках характеристики при устойчивой работе двигателя трактора на каждом режиме [2]. Время нахождения ОГ в активной зоне ЭФ находилось в рекомендуемых пределах и изменялось путем регулирования расхода газов через ЭФ, путем отвода их части перед входом в фильтр.

В ходе проведения лабораторных испытаний двигателя трактора с установленным в систему выпуска ЭФ переменными факторами, влияющими на снижение дымности его ОГ, были:

- величина высоковольтного напряжения, подаваемого на электроды и сажесборники ЭФ;
- время нахождения ОГ дизеля в активной зоне зарядки частиц ЭФ.

### **Выводы**

Лабораторными исследованиями установлено, что степень снижения дымности отработавших газов изменяется от 15% при напряжении питания 25 кВ, до 40% при напряжении 15кВ в режимах свободного ускорения двигателя трактора. Максимальная степень очистки выхлопа двигателя от сажи составляет около 45% при работе дизеля на режиме максимального крутящего момента и значениях напряжения 15кВ, а времени зарядки сажевых частиц – 0,3с. При оснащении системы выпуска ЭФ снижение уровня шума относительно штатной системы выпуска трактора составило в среднем 14-18%.

Можно утверждать, что процесс улавливания частиц сажи в ЭФ определяется режимом горения коронного разряда и зависит от времени их зарядки, величины напряженности электрического поля, а также скорости ОГ в активных зонах фильтра. В связи с этим необходимо значительно снижать скорость ОГ в зоне зарядки путем увеличения площади поперечного сечения активной зоны ЭФ и тем самым увеличивать время пребывания сажевых частиц в межэлектродном промежутке фильтра.

Разработанное устройство незначительно влияет на эффективные показатели работы двигателя трактора и обладает малым газодинамическим сопротивлением его выхлопу.

### **Список литературы**

1. ГОСТ 17.2.2.02. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности ОГ дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.
2. ГОСТ 17.2.2.05. Атмосфера. Нормы и методы определения выбросов вредных веществ с ОГ дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

3. Колчин А.В., Каргиев Б.Ш., Саяпин С.Н. и др. Технологическое руководство по контролю и регулировке дымности и токсичности отработавших газов дизелей тракторов и самоходных машин (сельскохозяйственных, дорожно-строительных и др.). – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 84 с.
4. Линия защиты SKR BLUE TEC // Коммерческий транспорт. - 2008. - № 2 (62) – март. - С. 28-42.
5. Устройство для очистки отработавших газов и снижения уровня шума двигателя внутреннего сгорания : патент РФ на полезную модель № 56964, F 01 N 3/01, 27.09.2006. Бюл. / Тришкин И.Б., Стражев Н.П., Мяснянкина М.Н.
6. Устройство для очистки отработавших газов и снижения уровня шума двигателя внутреннего сгорания : патент РФ на полезную модель № 56965, F 01 N 3/08, 27.09.2006 / Тришкин И.Б., Стражев Н.П.
7. Электрический фильтр для очистки от сажи отработавших газов двигателя внутреннего сгорания : патент РФ на полезную модель № 59153, F 01 N 3/08, 10.12.2006 / Некрашевич В.Ф., Тришкин И.Б., Стражев Н.П.
8. Тришкин И.Б. Вопросы теории снижения токсичности дизелей. – Рязань, 2009. – 198 с.
9. Черноиванов В.И. Инструментальный контроль технического состояния тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин при эксплуатации. (Технологические рекомендации для Инспекции Ростехнадзора). - М. : ГОСНИТИ, 2003.

**Рецензенты:**

Ульянов В.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой механизации животноводства ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», г. Рязань.

Пашенко В.М., д.б.н., профессор, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», г. Рязань.