

4. Фомин В.М., Каменев В.Ф., Герасименко С.А. Стратегия стартового прогрева автомобильной системы нейтрализации на основе использования водородного реагента. // Труды НАМИ. – Вып. № 242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств. Сб. науч. тр. – М., 2009. с. 105-132.

### ***Применение биотопливных композиций как альтернатива повышения экологической и топливно-энергетической безопасности на транспорте***

д.т.н. проф. Фомин В.М., к.т.н. доц. Апельинский Д.В., Хергеледжи М.В.  
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)  
*mixelichDM@mail.ru, hergheledji@mail.ru*

**Аннотация.** Обсуждаются проблемы энергообеспечения и повышения экологической безопасности на транспорте, а также один из альтернативных вариантов их совокупного решения на основе использования бинарных биоуглеводородных топлив. Рассмотрены основные физико-химические свойства ряда смесевых топлив и их влияние на показатели работы двигателя. Приведены результаты испытаний двигателей, работающих на топливных двухкомпонентных смесях.

**Ключевые слова:** *автомобильный двигатель, экологические стандарты, энергообеспечение, энергопотребление, биотопливо, биоуглеводородная топливная композиция*

### **Биоэнергетика как важнейший фактор в решении проблем энергообеспечения и защиты окружающей среды**

Ограниченность природных источников органического топлива и возрастающая проблема экологической безопасности на транспорте являются началом наблюдаемого во всем мире нового периода в области развития транспортной энергетики. Наиболее характерными чертами этого периода являются окончание эры дешевой нефти, проведение активной политики сбережения природных источников энергии, возрастание сферы альтернативного энергопотребления.

В этих условиях многократно возрастает роль биоэнергетики, основными преимуществами которой являются ее неисчерпаемость и экологическая чистота, что принципиально отличает ее от традиционной энергетики. При этом развитие биоэнергетики повсеместно считается наиболее перспективным путём решения проблем энергообеспечения как в сфере постоянно растущего энергопотребления в целом, так и в направлении перспективного развития транспортной энергетики. Энергетический потенциал ежегодно произрастающей биомассы в два раза превышает суммарную энергию годового потребления всех видов углеводородного сырья. Современные технологии производства биотоплив позволяют потенциально удовлетворить все энергетические потребности, используя лишь 2% площади поверхности планеты.

Если проанализировать биоэнергетику как относительно молодую сферу деятельности, то можно с уверенностью сказать, что она как нельзя лучше способствует решению проблемы энергообеспечения при сохранении устойчивости биосферных процессов, поскольку:

- способствует сокращению потребления материальных невозобновляемых ресурсов;
- создаёт устойчивые предпосылки для оздоровления окружающей среды;
- позволяет привлекать внешнюю ресурс для своего развития, так как основана на стратегии аккумулирования солнечной энергии;
- не требует значительных материальных и финансовых затрат для своей крупномасштабной реализации;
- решает задачи энергообеспечения как на региональном, так и местном уровнях.

Осознанная необходимость в развитии транспортной биоэнергетики в первую очередь коснулась стран, не обладающих значительными запасами углеводородного сырья: Бразилии, Германии, Франции, Австралии и США. Не случайно именно эти страны и являются в

настоящее время мировыми лидерами по производству моторных биотоплив. В этих и ряде других стран приняты национальные программы и реализуются крупные проекты по развитию альтернативной биоэнергетики. По многим направлениям интенсивно началось ее практическое освоение.

Россия по уровню производства и использования биологических видов топлива может быть отнесена к группе отстающих стран. За последние 15 лет в стране выбыло из оборота около 30 млн гектаров сельскохозяйственных земель, что потенциально соответствует ~ 25 млн тонн биотоплива. Такое количество моторного топлива в состоянии удовлетворить ~ 40-45% общей его национальной потребности в целом. Это обстоятельство должно стимулировать развитие транспортной биоэнергетики в нашей стране, обладающей по сравнению с другими странами обширными площадями для выращивания биологической массы и, следовательно, большими потенциальными возможностями ее воспроизводства. Важно и то, что развитие биоэнергетики является мощным дополнительным стимулом для подъема национального агропромышленного комплекса.

Основными условиями широкомасштабного применения биотоплив на транспорте являются наличие соответствующей базы для их производства и экономически оправданной стоимости этого вида топлива. Существующие апробированные технологии переработки отдельных видов биомассы позволяют получать относительно дешевое и экологически чистое топливо для всех типов транспортных энергоустановок. На сегодняшний день основными видами биологических видов топлива в мировой транспортной системе являются биоэтанол (для АТС с ДВС с принудительным воспламенением) и дизельное биотопливо (для АТС с дизельным приводом).

*Биоэтанол.* Рост мирового рынка биоэтанола составляет 25% в год, что существенно опережает темпы роста мирового рынка бензина и в перспективе может составить конкуренцию последнему [1]. При этом экономически оправданный выбор базовой сырьевой культуры зависит от климатических условий региона и от показателя выхода биомассы с 1 гектара посадок. Так, в Бразилии основной сельскохозяйственной культурой для производства биоэтанола является сахарный тростник, в Канаде – кукуруза и пшеница. Особенно динамично производство биоэтанола развивается в США. Основным сырьем для производства биоэтанола в США является кукуруза. Темпы роста производства биоэтанола в странах ЕС значительно ниже, чем в США, Канаде и Бразилии. Это объясняется дефицитом сельскохозяйственных земель для возделывания соответствующих культур.

*Дизельное биотопливо.* Производство этого топлива основано на переработке жидких растительных масел: соевого, подсолнечного, рапсового, пальмового, хлопкового и т.д. С учетом наиболее благоприятных климатических условий по выращиванию базовой сырьевой культуры, для США в качестве таковой характерно использование сои, для Канады и стран ЕС – рапса, для стран азиатско-тихоокеанского региона – пальмового масла. Производство дизельного биотоплива характеризуется постоянным устойчивым ростом, и безусловными лидерами здесь являются страны ЕС, Канада, США и Китай. Наиболее интенсивно развивает производство дизельного биотоплива Германия, где имеется более 70 заводов различной мощности по его производству, развита сеть заправок, а его цена на 10% ниже цены минерального дизельного топлива. В последнее время большое внимание развитию производства дизельного биотоплива стали уделять страны Восточной Европы – Украина и Белоруссия, где разработаны Государственные целевые программы.

#### **Биоуглеводородные топливные композиции**

Проблема использования биологических продуктов в качестве основного топлива для автомобильных двигателей на данном этапе обуславливает необходимость решения ряда серьезных задач. С учетом существенного отличия физико-химических свойств данного вида топлива от традиционных топлив необходимо проведение большого объема исследовательских работ, связанных с поиском рациональной организации процессов смесеобразования и сгорания с последующей разработкой двигателей на основе принципиально новых способов организации рабочего процесса. К проблеме широкого внедрения биологических источников

энергии на транспорте следует дополнительно отнести необходимость существенных финансовых затрат, связанных с переоборудованием существующей технологической базы, ориентированной на выпуск новых видов двигателей, адаптированных к работе на данном топливе.

Поэтому широкомасштабное использование биологических продуктов в качестве основного моторного топлива на автотранспорте в России на ближайший период достаточно проблематично. Более предпочтительной представляется разработка топливных композиций (смесевых топлив). При соответствующем выборе компонентов для смесевых топливных систем и оптимальном варьировании их составом возможно достижение наиболее приемлемых физико-химических свойств, отвечающих требованиям эффективной организации рабочего процесса транспортного двигателя.

#### **Биоуглеводородные топливные композиции для дизелей**

Благодаря высокой экологической эффективности, проявляемой биологическим компонентом в составе бинарного топлива, он может рассматриваться как средство физико-химического воздействия на процессы рабочего цикла дизеля. С учетом этого авторами предлагается интерпретировать биологическую составляющую бинарного топлива как *«физико-химическое средство»*. Подобная терминология достаточно редко используется в теории ДВС. В данном случае предполагается, что по смысловой значимости этот термин определяет биологическую добавку к рабочему телу дизеля как обладающую совокупной способностью проявлять свои свойства в физических и химических актах, лежащих в основе организации рабочего цикла. Свойства биологического компонента как физического средства воздействия обусловлены такими его показателями, как плотность, динамическая вязкость и поверхностное натяжение, которые в значительной мере определяют физические качества процесса смесеобразования, а следовательно, рабочего цикла в целом.

В то же время добавление к базовому углеводородному топливу кислородосодержащего биологического компонента (как «поставщика» дополнительного кислорода) способствует изменению не только физических, но и химических свойств горючей смеси, что сказывается на ее кинетических характеристиках сгорания. Согласно известным положениям химической кинетики, в условиях избыточного содержания кислорода в реагирующей среде скорости окислительных реакций углеводородов и продуктов их неполного сгорания повышаются, а их концентрация в продуктах сгорания снижается. В этом смысле биологический компонент можно рассматривать как средство изменения реакционной способности реагирующей среды, что, очевидно, является одним из характерных свойств, проявляемых химически активными средствами. Таким образом, сказанное выше позволяет интерпретировать биологическую добавку к топливу как средство, обладающее совокупной способностью физического и химического воздействий на процессы рабочего цикла двигателя.

Как отмечалось выше, свойства биологического компонента как физического средства воздействия проявляются в физических качествах процесса смесеобразования. С целью выявления характера этого проявления проведено предварительное математическое изучение (с использованием программного комплекса MathCAD). При этом в качестве базовых были использованы показатели физических свойств метилового эфира рапсового масла (МЭРМ).

Предпочтительность выбора МЭРМ в качестве биологической составляющей смесевых топлив в данном исследовании была обусловлена следующими соображениями. Результатами предварительного анализа мирового опыта применения биотоплив установлено, что наибольший практический интерес в сфере эксплуатации дизельной техники представляет биологический продукт – метиловый эфир, вырабатываемый из рапса, выращивание которого наиболее адаптировано к почвенно-климатическим условиям России. Данный биологический компонент хорошо смешивается с дизельным топливом, образуя стабильные смеси. Причем при варьировании состава такого смесевых топлив возможно достижение его приемлемых эксплуатационных свойств.

В качестве преамбулы к данному исследованию предварительно отметим одну из известных [2] особенностей в организации процесса смешивания любого вида смесевых топ-

лива с воздушным зарядом в КС дизеля, которая обусловлена различием физических свойств компонентов (биологического и углеводородного), входящих в состав этого топлива. Эта особенность, проявляемая в изменении характера процесса смесеобразования, находит свое объяснение, которое базируется на известном эффекте возникновения так называемых «микровзрывов» при быстром испарении легкокипящих компонентов смесевых топлив. Биологический компонент смесевых топлив (например, МЭРМ) отличается более тяжелым фракционным составом. В условиях рабочего цикла дизеля в первую очередь из состава бинарного топлива испаряются легкокипящие углеводородные фракции, что сопровождается возникновением «микровзрывов», способствующих микротурбулизации более тяжелых фракций дизельного топлива и тяжелых фракций МЭРМ, испаряющихся при более высоких температурах ( $t > 350^\circ\text{C}$ ). Это приводит к дополнительной локальной турбулизации топливовоздушной смеси, улучшению качества смесеобразования в целом, как следствие, повышению полноты сгорания бинарного топлива.

Более сложные и неоднозначные физические изменения в характере смесеобразования биологического компонента топлива проявляются в организации процессов его распыливания и формировании геометрии и дисперсной структуры топливного факела в КС, что и было установлено проведенным моделированием. По результатам моделирования выявлено, что вследствие повышенных показателей плотности, поверхностного натяжения и вязкости для МЭРМ средний диаметр капель увеличивается (по сравнению с дизельным топливом), что должно отразиться на возрастании не только периода задержки воспламенения, но и его температурной чувствительности к процессу воспламенения. При этом угол рассеивания (раскрытия) топливной струи и ее боковая поверхность уменьшаются, что приведет к снижению количества испарившегося топлива за период задержки воспламенения.

Повышенные показатели плотности и динамической вязкости биотоплива способствуют возрастанию дальноточности топливной струи, увеличению доли менее активного пленочного смесеобразования и более медленному изменению давления в цилиндре двигателя в фазе диффузионного сгорания, что сказывается на увеличении длительности процесса сгорания в цикле и соответствующем снижении его эффективности.

Обобщая результаты исследования, можно предварительно спрогнозировать, что влияние биологического компонента бинарного топлива как химического реагента может проявиться в снижении эмиссии с ОГ продуктов неполного сгорания ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$  и дисперсных частиц). Его проявление как физического реагента достаточно неоднозначно, которое, в частности, может отразиться на снижении эффективности рабочего цикла дизеля.

Учитывая столь сложный характер влияния доли биологического компонента в составе смесевых топлив на экологические и эффективные показатели дизеля, задача выбора состава смесевых топлив для конкретного двигателя должна ставиться как оптимизационная. Понятно, что основная задача оптимизации должна быть увязана с эффективностью рабочего цикла данного дизеля, а также с нормируемыми экологическими показателями ОГ двигателя.

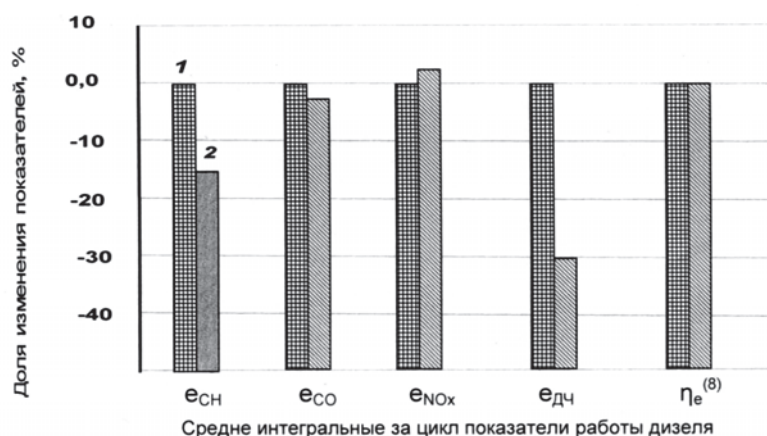
Методы оптимизации компонентного состава биоуглеводородных бинарных топлив подробно рассмотрены в работе [3]. В данном исследовании оценка по выбору оптимального компонентного состава смесевых топлив проводилась применительно к дизелю транспортного средства категории «Т» (дизель 4Ч 10,5/12) с учетом известных его эколого-экономических характеристик. Установлено, что для данного дизеля оптимальному варианту, по условию предельно возможного улучшения его исходных экологических и эффективных показателей, отвечает содержание биологического компонента в составе бинарного топлива в диапазоне 35...45%. Исходя из этого было принято среднее значение этого диапазона, соответствующее 40% содержанию биологического компонента в смеси.

Опытная апробация эффективности применения биоуглеводородной топливной композиции с оптимизированным компонентным составом проведена на испытательном стенде с дизелем типа 4Ч 10,5/12. Программа испытаний строилась в русле стандартного регламента 8-режимного испытательного цикла согласно ГОСТ Р 41.96-2005 (аналог Правил ЕЭК ООН №96) для дизелей транспортных средств категории «Т» [4].



Установлено, что среднеинтегральные за испытательный цикл удельные выбросы нормируемых компонентов ОГ ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$  и дисперсных частиц) для исследуемого дизеля при применении 40% добавки МЭРМ к базовому топливу были снижены:  $e_{\text{CO}}$  на 2,3%,  $e_{\text{CH}}$  на 15,7%,  $e_{\text{ДЧ}}$  на 29,4% (рисунок 1). Однако при этом выбросы оксидов азота  $e_{\text{NOx}}$  возрастали (на 1,8%) по отношению к исходному варианту (работа на дизельном топливе), который для наглядности на диаграмме рисунка 1 принят в качестве базового.

Показатель среднего интегрального за цикл удельного эффективного расхода топлива увеличился на 5%, что обусловлено пониженным значением теплоты сгорания бинарного топлива. Однако показатель результирующего за испытательный цикл эффективного КПД  $\eta_e^{(8)}$  снизился не столь значительно ( $\sim 0,5\%$ ).



**Рисунок 1. Влияние оптимизированной биологической добавки (МЭРМ) к дизельному топливу на среднеинтегральные за цикл показатели удельных выбросов вредных веществ и эффективного КПД дизеля 4Ч 10,5/12 при его работе по регламенту 8-режимного испытательного цикла Правил ЕЭК ООН №96: 1 – работа на дизельном топливе; 2 – работа на смесевом топливе (60% дизельного топлива + 40% МЭРМ)**

По результатам данного исследования можно заключить, что использование биоуглеводородных топливных композиций может решать целый ряд задач по совершенствованию экологических качеств транспортных дизелей, а также задачи энергообеспечения транспорта альтернативными видами топлива из возобновляемых сырьевых источников. Однако для окончательного решения проблемы в целом потребуются разработка дополнительных мер, в частности, для снижения эмиссии оксидов азота, что является характерной проблемной задачей, связанной с применением для дизелей практически любого вида биологического топлива [1, 2]. Ее решение является предметом самостоятельного исследования, проведение которого запланировано на кафедре «Автомобильные и тракторные двигатели» Университета машиностроения на ближайшее время.

#### **Биоуглеводородные топливные композиции для двигателей с принудительным зажиганием**

Используемые в ДВС с принудительным зажиганием бензины – это сложный, квалифицированный и дорогостоящий энергоноситель. Для их получения используют сложный комплекс технологических процессов первичной и вторичной переработки нефти, а также различные присадки и добавки, обеспечивающие соответствие современным требованиям к составу и качеству этого вида моторного топлива. Рекомендуется для повышения октанового числа и полноты сгорания, т.е. с целью уменьшения выброса вредных веществ, вводить в бензины кислородсодержащие компоненты.

Наиболее распространенными и широко применяемыми кислородсодержащими компонентами являются метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ, МТВЕ), этил-трет-бутиловый эфир (ЭТБЭ, ЕТВЕ), этанол, а также метил-трет-амиловый эфир (МТАЭ, ТАМЕ). ЕТВЕ – этил-трет-бутиловый эфир – содержит 50% топливного этанола, МТВЕ – метил-трет-бутиловый эфир, в составе которого метанол составляет 33%, и ТАМЕ – трет-амил-метиловый эфир –

содержит – 10% метанола. Метанол – сильный яд, поэтому в США начиная с 2006 года действует запрет на применение МТБЭ для производства бензинов (Закон S.2962) в связи с проблемой загрязнения грунтовых вод. [5]

В современном мире существует два основных способа использования этанола в качестве компонента автомобильного топлива:

1. В качестве смеси 10% (об.) этанола с 90 % (об.) бензина, которая в США получила название «газохол» или топливо «E10». В результате применения E10 отмечается снижение на 6 % – потребления нефтепродуктов; на 1 % – выброса газов, вызывающих парниковый эффект; на 3 % – использования энергии ископаемого топлива [6]. Однако, несмотря на то что топливо E10 позволяет уменьшить выброс загрязняющих веществ в окружающую среду, оно не рассматривается в качестве альтернативного топлива.
2. В качестве основного компонента топлива, полученного в результате компаундирования 85 % (об.) этанола с 15% (об.) бензина, которое в США выпускается под маркой E85. Топливо E85 является альтернативным биотопливом. В результате использования E85 уменьшается на 73–75 % – потребление нефтепродуктов; на 14–19% – выброс газов, вызывающих парниковый эффект; на 34–35 % – использование энергии ископаемого топлива [6].

В настоящее время на кафедре «Автомобильные и тракторные двигатели» Университета машиностроения начата инициативная научно-исследовательская работа, посвященная исследованию рабочих процессов, протекающих в ДВС с принудительным зажиганием, работающем на топливе с добавками биоэтанола. Изучение проводится на основе совокупного сочетания расчетно-теоретических и экспериментальных работ. Для проведения расчетно-теоретических исследований разработана математическая модель рабочего процесса ДВС, работающего на этаноле и бензоэтанольных смесях, позволяющая определить энергетические и экономические показатели ДВС, а также параметры процесса, лежащие в основе образования вредных веществ.

В разработанной математической модели используется сокращенный кинетический механизм горения бензоэтанольных топливовоздушных смесей в цилиндре ДВС. Модель основана на синтезе детальных кинетических механизмов сгорания легкого углеводородного топлива (В.Я. Басевич и С.М. Фролов) и этанола (N.M. Marinov, J. Li, P. Saxena). Теоретический анализ процессов распыливания и испарения бензоэтанольных топливных смесей для различных конструктивных решений систем впрыска ведется при помощи программного комплекса «Ansys». Для описания процесса сгорания используется квазимерная модель Близарда – Кекка.

### Вывод

Обобщая результаты анализа всего материала, приведенного в данной статье, можно с уверенностью сказать, что применение биотопливных композиций следует рассматривать как одно из наиболее перспективных направлений при решении социально важных проблем повышения экологической и топливно-энергетической безопасности на российском транспорте. Это касается всей структуры транспортных средств, оснащенных как двигателями с принудительным зажиганием, так и дизелями.

### Литература

1. Котиков Ю.Г., Ложкин В.Н. Транспортная энергетика: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.
2. Работа дизелей на традиционных топливах: Учебное пособие / В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов и др. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. – 464 с.
3. Фомин В.М., Атраш Рами. Разработка бинарных топлив на основе биоуглеводородных композиций оптимизированного компонентного состава для энергетических установок транспортных средств// Транспорт на альтернативном топливе. – 2012.- №4 (28).- С.
4. ГОСТ Р 41.96 – 2005 (Правила ЕЭК ООН №96) Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной техники, в отношении выброса вредных

- веществ этими двигателями. – Введ. 2008.01.01. – Издание офиц. М.: Стандарт информ, 2005. –108 с.
5. Мирзоев Вагиф, Пущик Евгений. Европейский рынок добавок к бензинам: этанол, МТБЭ и ЭТБЭ // Проблемы местного самоуправления. – 2010.- № 41
6. Автомобильное топливо с биоэтанолом/ Карпов С.А., Капустин В.М., Старков А.К. – М.: КолосС, 2007 – 216 с. : ил.

### **Моделирование случайного микропрофиля дорожной поверхности методом формирующего фильтра**

к.т.н. доц. Чабунин И.С.

Университет машиностроения

8(495)223-05-23 (доб. 1457), tchabunin@rambler.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос моделирования случайного микропрофиля дорожной поверхности методом формирующего фильтра. Получены дифференциальные уравнения формирующего фильтра для различных корреляционных функций.

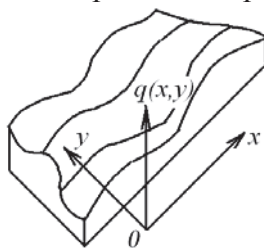
**Ключевые слова:** микропрофиль дорожной поверхности, формирующий фильтр, случайный процесс

В настоящее время для исследования колебательных процессов, протекающих в транспортном средстве, широко используются методы статистической динамики, которые в сочетании с современными мощными ЭВМ дают возможность получить реакцию машины практически на любое случайное воздействие, конечно, при условии наличия адекватной расчетной схемы.

Поверхность дороги, даже очень хорошего качества, не является идеально ровной. В общем случае аналитически такую поверхность можно выразить как функцию двух переменных (рисунок 1):

$$q = q(x, y),$$

где:  $x$  и  $y$  – координаты некоторой (обычно срединной) плоскости, относительно которой измеряют высоту  $q$  неровностей поверхности дороги.



**Рисунок 1. Микропрофиль поверхности дороги как функция двух переменных**

Для однородного по типу и степени его износа покрытия участка дороги микропрофиль можно рассматривать как случайную стационарную, нормально распределенную, эргодическую функцию  $q(x, y)$  высот  $q$  микронеровностей от координат  $x, y$  с нулевым средним значением. Тогда исчерпывающей вероятностной характеристикой является ее двумерная корреляционная функция:

$$R_q(x_1, y_1, x_2, y_2) = \langle q(x_1, y_1) \cdot q(x_2, y_2) \rangle, \quad (1)$$

где:  $\langle \dots \rangle$  – символ осреднения;

$q(x_1, y_1), q(x_2, y_2)$  – значения функции  $q(x, y)$  для «путевых» координат  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ .

Для стационарных случайных функций начало отсчета  $x_1, y_1$  можно принять произвольным. Тогда если ввести переменные  $x_s = x_2 - x_1$  и  $y_s = y_2 - y_1$ , то корреляционная функция станет функцией двух переменных: