

МЕХАНИКА, МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.43

С.П. Глушков, В.О. Жидких

Выбор вейвлет-образующей функции для анализа динамических характеристик сигнала двигателя внутреннего сгорания

Автомобильный транспорт, использующий энергию, выделяемую классическими двигателями внутреннего сгорания, вырабатывает большое количество вредных продуктов неполного сгорания углеводородного топлива. Повышение мощности и производительности двигателей является не менее важной причиной поиска альтернативных видов топлива. Поэтому в настоящее время большой интерес представляет водородсодержащий синтез-газ. Преимуществами использования этого вида топлива являются: высокая экологичность отработавших газов, высокие энергетические показатели, низкая цена по сравнению с углеводородными видами топлива.

Несмотря на то, на каком топливе работает двигатель, необходимость мониторинга его технического состояния остается важной составляющей технической системы. Одним из наиболее современных и перспективных методов оценки технического состояния двигателей является вибрационная диагностика, которая осуществляется при помощи специализированного оборудования. На выходе с вибрационных датчиков имеется сигнал, нуждающийся в дальнейшей обработке, преобразовании и анализе. Использование вейвлет-преобразования является наиболее информативным способом анализа нестационарных сигналов ввиду его приспособленности для анализа локальных особенностей сигналов. Вейвлет-преобразование – это представление сигнала в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из материнского вейвлета, обладающего определенными свойствами, за счет операций сдвига во времени и изменения временного масштаба. В зависимости от необходимых свойств сигнала для его анализа производится выбор материнского вейвлета. Для визуализации результатов вейвлет-преобразования представлены три вейвлет-спектрограммы одного и того же сигнала, выраженные с помощью различных материнских вейвлетов.

Ключевые слова: *альтернативные виды топлива, синтез-газ, вибрационная диагностика, вейвлет-преобразование, материнский вейвлет.*

Автомобильный транспорт, работающий с использованием энергии, выделяемой двигателями внутреннего сгорания, вырабатывает продукты неполного сгорания углеводородного топлива и выхлопные газы, которые несут огромный вред окружающей среде, в связи с чем экологи настаивают на поиске и скорейшем внедрении альтернативных видов топлива. Помимо этого, существуют другие причины заинтересованности ученых в поиске альтернативных видов топлива: ограниченность запасов углеводородного топлива, повышение мощности и производительности двигателей, соблюдение действующих экологических норм.

В настоящее время перспективным альтернативным видом топлива является водородсодержащий синтез-газ, интерес к которому основан на преимуществе нескольких его параметров перед традиционными видами топлива. Для воспламенения топливной смеси необходима меньшая концентрация газового топлива, чем углеводородного, что позволяет двигателю работать на более обедненной

смеси; также важными факторами являются: экологичность отработавших газов (так как при сжигании в чистом кислороде продуктами являются высокотемпературное тепло и вода), высокие энергетические показатели, низкая цена природного газа. Но в настоящее время нет возможности провести полную или частичную замену используемого традиционного топлива на топливо с водородом. Это связано с некоторыми недостатками водорода как топлива, например: низким уровнем безопасности использования водорода на транспортных и рабочих машинах из-за его высокой температуры (водород при соединении с кислородом сгорает с выделением очень большого количества тепла), проблемами, связанными с хранением водородного топлива, имеющего низкую температуру ожижения и высокую взрывоопасность [1].

Но независимо от того, на каком топливе работает двигатель, необходимость мониторинга его технического состояния остается важной составляющей технической системы. Существенно и то, что дополнительные

наблюдения за исправной работой всех элементов двигателей, работающих на разных видах топлива, могут дать сравнительную информацию по износу двигателя и его частей при работе на определенном виде топлива. Одним из современных методов оценки технического состояния двигателей внутреннего сгорания является вибрационная диагностика как интегральная составляющая его динамических характеристик [2].

В качестве экспериментальной установки использовался дизель-генератор ВСН-6 с рабочим объемом 0,396 дм³, мощностью 5,5 кВт и номинальной частотой вращения коленчатого вала 3 000 об/мин. Основным рабочим топливом являлось моторное топливо класса ЕВРО-5, к которому через впускной коллектор с помощью запорной арматуры подавался водородсодержащий синтез-газ в соответствующем количестве: 6, 10, 20 дм³/мин. Содержание водорода и СО в составе синтез-газа в процентном соотношении равнялось 50 / 50.

В режиме холостого хода работы дизель-генератора появилась повышенная вибрация и неравномерность крутящего момента. При подаче синтез-газа в количестве 6 дм³/мин произошло снижение динамических характеристик установки. Далее испытания проводились под постоянной нагрузкой на генератор мощностью 3 кВт в режиме номинального напряжения 220 В с частотой вращения коленчатого вала двигателя 2 700 об/мин. Работа установки характеризовалась устойчивой частотой вращения с меньшей неравномерностью вращения коленчатого вала, чем в режиме холостого хода. Для снятия динамических характеристик дизель-генератора применялся датчик мониторинга вибрации АДМВ-05 с использованием вибропреобразователя АР-38.

На выходе с вибродатчиков имеется сигнал, нуждающийся в дальнейшей обработке, преобразовании и анализе. Данная задача по измерениям амплитуд колебаний при рассматриваемой гармонике соответствует возможностям Фурье-анализа. Но при работе энергетических установок в неуставившихся режимах возникает детерминированный процесс, который одновременно учитывает изменение нескольких факторов: возмущающих моментов, внешнего трения на различных участках, а также нелинейность характеристик упругих

элементов. Поэтому построить зависимость каждого из этих параметров от времени наработки энергетической установки на основании Фурье-анализа отклика сигнала системы весьма затруднительно.

Представление сигналов в базисе гармонических функций традиционно рассматривается в теории колебаний, в том числе для расчетов применительно к энергетическим установкам [3, 4]. Выбор гармонических функций в качестве базисных объясняется наличием в составе энергетической установки машины периодического действия с ярко выраженными циклами – двигателя внутреннего сгорания.

Наибольшее распространение при анализе и синтезе сигналов отклика крутильно-колебательных систем энергетических установок получили гармонические функции $u(t)$ вида

$$u(t) = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где A – амплитуда гармонических колебаний; ω – угловая частота; t – время; φ – начальная фаза колебательного процесса.

Но для преобразования нестационарных сигналов, изменяющихся по времени и зависящих от изменения возмущающих моментов, внешнего трения, нелинейности упругих элементов, применение таких базисных функций не приводит к нужному результату.

В настоящее время вейвлет-преобразование является наиболее актуальным для преобразования нестационарных сигналов (изменяющихся во времени) ввиду его приспособленности для анализа локальных особенностей сигнала: такие сигналы присущи техническим системам (ДВС – редуктор – потребитель энергии) транспортных средств. Помимо этого, с помощью вейвлет-преобразования из цифровых сигналов, полученных с реальных технических систем при использовании необходимого специализированного оборудования, возможно определить некоторые динамические характеристики технической системы [5].

Вейвлет-преобразование сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из материнского (порождающего) вейвлета $\psi(t)$, обладающего определенными свойствами, за счет операций сдвига во времени – b и изменения временного масштаба – a [6].

В зависимости от того, какие данные о сигнале необходимы, производится выбор порождающего (материнского) вейвлета. При этом учитываются свойства отдельного вейвлета, так как разные вейвлеты могут по-разному отобразить свойства сигнала. Это связано с тем, что каждый вейвлет имеет свои особенности во временной и частотной областях. Материнский вейвлет играет роль адаптивного окна, ширина которого велика для малых частот ν и мала для больших.

Прямое вейвлет-преобразование содержит комбинированную информацию об анализируемом сигнале и анализирующем вейвлете.

Подход, наиболее эффективный и приемлемый в анализе сложных сигналов $s(t)$, представляет собой разложение сигналов в виде совокупности простых составляющих – базисных функций $\psi_k(t)$, умноженных на некоторые коэффициенты C_k [7]:
$$s(t) = \sum_k C_k \psi_k(t).$$

Принимая во внимание тот факт, что базисные функции не меняют свой вид при различных сигналах, можно сделать вывод, что только коэффициенты содержат информацию об испытуемом сигнале.

По аналогии с базисными функциями не все свойства вейвлет-преобразования зависят от выбранного материнского вейвлета, на основе которого проводится вейвлет-преобразование. Независимость от вейвлета делает эти свойства (например, линейность, сдвиг) очень важными.

Обладающие большим числом нулевых моментов вейвлеты позволяют, игнорируя наиболее регулярные полиномиальные составляющие сигнала, анализировать мелко-масштабные флуктуации и особенности высокого порядка [7].

Свойство регулярности, число нулевых моментов k и число вейвлет-коэффициентов, превышающих некоторое пороговое значение, были предложены в качестве возможных критериев для выбора конкретного вейвлета в дополнение к требуемым вычислительным затратам.

Вейвлеты принято классифицировать по виду и особенностям образующей функции и по имени ученого, впервые предложившего тот или иной вейвлет. Ниже приведена классификация по некоторым основным свойствам различных вейвлетов.

Грубые вейвлеты. Образно выражаясь, это самые слабые в области преобразования сигналов вейвлеты. Они имеют наименьшее количество свойств, необходимых для анализа сигнала, а именно: невозможна точная реконструкция сигнала; отсутствует функция аппроксимации ϕ_i , которая отвечает за определение деталей сигнала и порождает детализирующие коэффициенты; анализ сигнала не является ортогональным; масштабирующая функция ψ_i , которая отвечает за грубое приближение сигнала и порождает аппроксимирующие коэффициенты, не имеет компактного носителя. Но присутствуют такие свойства, как симметричность, возможность непрерывной декомпозиции сигнала, наличие явной функции ψ_i , которые лучше, чем при обработке Фурье-анализом или быстрым преобразованием Фурье. К грубым вейвлетам принадлежат вейвлеты Гауссова типа, Морлета и вейвлет «мексиканская шляпа», которые часто применяются при идентификации повреждений в мостовых конструкциях [8].

Бесконечные регулярные вейвлеты. К отличительным свойствам данного семейства вейвлетов можно отнести то, что аппроксимирующая (ϕ_i) и детализирующая (ψ_i) функции не определены явно и не имеют компактного носителя, а также невозможность быстрого алгоритма преобразований. Преимуществом является то, что вейвлеты этого типа симметричны и регулярны в бесконечности, что следует из названия группы; имеют ортогональный анализ, наличие функции ϕ_i , т.е. возможность определения деталей сигнала. К данному типу вейвлетов относятся вейвлеты Мейера.

Ортогональные вейвлеты с компактным носителем. К вейвлетам этой группы относятся вейвлеты Добеши, Симлета, Коифлетса. Основными свойствами данной группы являются: наличие ортогонального анализа, аппроксимирующей функции ϕ_i , возможность быстрого алгоритма преобразования, а также четкая локализация в пространстве функций ψ_i и ϕ_i , т.е. функции имеют компактный носитель и определенное число нулевых моментов. Общей отличительной особенностью является недостаточная периодичность. Помимо этого, недостатки данного семейства вейвлетов проявляются в отдельных характеристиках.

ках каждого из них, например: вейвлеты Добеши не являются симметричными, вейвлеты Симлета только близки к симметричным, вейвлеты Коифлетса отличаются отсутствием симметрии, а также аппроксимирующей и детализирующей функций. Следует заметить, что ортогональные вейвлеты с компактным носителем применялись при обработке сигналов с поврежденных подшипников [9].

Биортогональные парные вейвлеты с компактным носителем. Эту группу вейвлетов отличает присутствие биортогонального анализа, наличие обеих функций ϕ и ψ , компактного носителя, что говорит о хорошей локализации в пространстве; для реконструкции сигнала – наличие достаточной периодичности, для декомпозиции – наличие определенного числа нулевых моментов. К достоинствам следует отнести присутствие симметрии с фильтрами, к недостаткам – отсутствие ортогональности. К вейвлетам этой группы относятся В-сплайновые биортогональные вейвлеты.

Комплексные вейвлеты. К данному семейству относятся вейвлеты Гаусса, Морлета, Шенона и частотные В-сплайновые вейвлеты. Их отличает отсутствие аппроксимирующей функции ϕ , быстрого алгоритма преобразований и реконструкции сигнала, функция ψ не имеет компактного носителя [7, 10].

Для обнаружения различий между визуальным представлением преобразований с применением того или иного материнского вейвлета ниже приведены графики сигнала, полученного с дизель-генератора ВСН-7Д с использованием

вибропреобразователя АР-38 и датчика мониторинга вибрации АДМВ-05 (рис. 1–3).

На представленных изображениях показаны графики одного и того же сигнала с выборкой [0 1000] и их вейвлет-спектрограммы с использованием различных вейвлетов: Хаар, биортогонального вейвлета порядка 3.3, вейвлета Dmey.

Вейвлет-спектрограмма несет подробную информацию об исследуемом сигнале, а именно о локальных особенностях сигнала, под которыми понимаются всплески или провалы в сигнале объекта. Вейвлет-спектрограммы строятся в координатах «масштаб – время».

Наиболее информативным графиком из трех представленных является график с вейвлет-обrazующей функцией Dmey (см. рис. 3). Спектрограмма как бы разделена на ярко выраженные фрагменты. Коэффициенты с малыми номерами – нижняя зона спектрограммы – отвечают за детальную картину вейвлет-преобразования сигнала (она показывает зашумленную картину сигнала). Каждый фрагмент сигнала хорошо отслеживается на шкале времени b . Вертикальные яркие полосы соответствуют выдающимся особенностям сигнала – всплескам или провалам.

Из приведенного выше анализа следует, что для разных сигналов (в зависимости от вида и типа, исходных данных и т. д.) подходит тот или иной материнский вейвлет для обеспечения наиболее визуализированного представления вейвлет-спектрограммы сигнала.

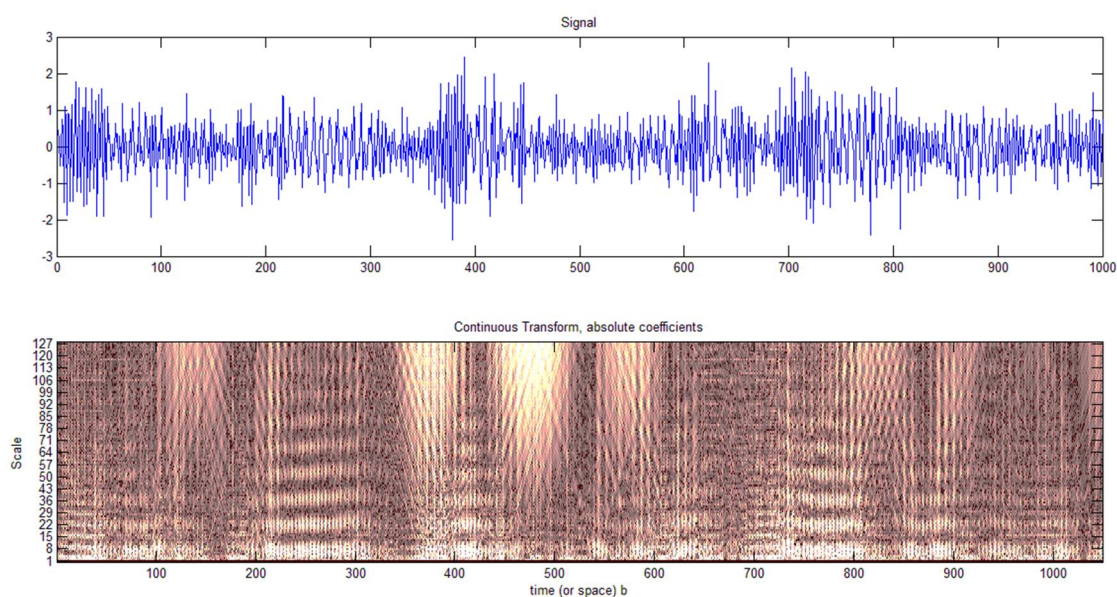


Рис. 1. График вибросигнала и его вейвлет-спектрограмма (вейвлет-образующая функция Хаар)

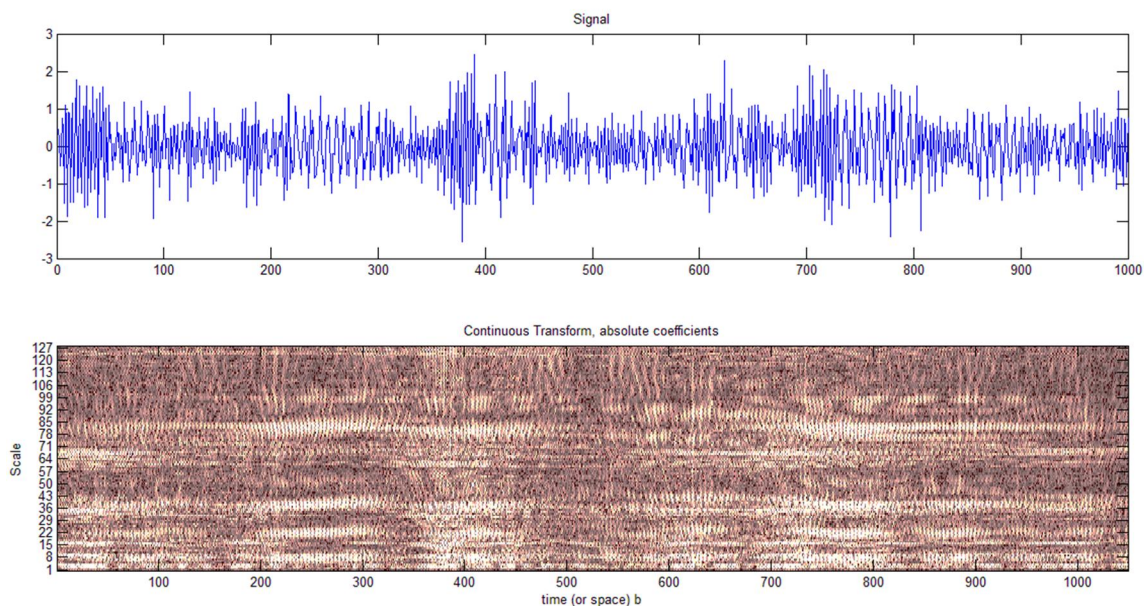


Рис. 2. График вибросигнала и его вейвлет-спектрограмма (вейвлет-образующая функция Bior 3.3)

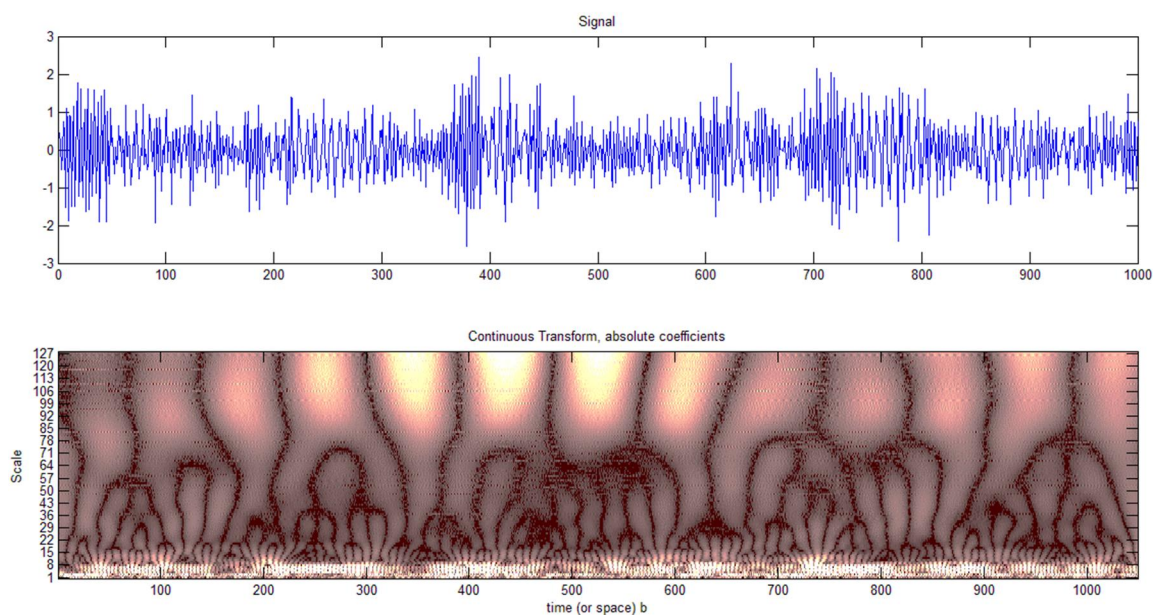


Рис. 3. График вибросигнала и его вейвлет-спектрограмма (вейвлет-образующая функция Dmey)

Библиографический список

1. Кочергин В.И., Далюк И.К., Красников В.В. Перспективные направления использования газомоторного топлива на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015. № 1. С. 19–21.
2. Динамические характеристики ДВС / С.П. Глушков, С.С. Глушков, С.С. Савельев, А.В. Ярославцева // Сибирский научный вестник. 2007. Вып. 10. С. 164–167.
3. Вибрации в технике: Справ.: В 6 т. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 352 с.
4. Коврижных Л.М., Глушков С.С. Расчет амплитуд свободных колебаний дискретных многомассовых систем // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 2. С. 162–164.
5. Глушков С.П., Глушков С.С., Сигимов В.И. Вейвлет-функции Морлета в исследовании переменных составляющих крутящего момента двигателей внутреннего сгорания // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2. С. 45–51.

6. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 104 с.
7. Цифровая обработка сигналов: Учеб. пособие / Ю.Н. Матвеев, К.К. Симончик, А.Ю. Тропченко, М.В. Хитров. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013. 166 с.
8. Глушков С.П., Соловьев Л.Ю., Донец Н.А. Идентификация повреждений в мостовых конструкциях на основе анализа их колебательных процессов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 4. С. 209–220.
9. Идентификация повреждений подшипников судовых валопроводов / С.С. Глушков, Б.О. Лебедев, В.В. Коновалов, Н.С. Ткаленко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 2. С. 200–204.
10. Дьяконов В., Абраменкова И. Обработка сигналов и изображений MATLAB. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 601 с.

S.P. Glushkov, V.O. Zhidkikh

The Choice of Mother Wavelet Function for Analysis of Dynamic Characteristics of the Internal-Combustion-Engine Signal

Abstract. The motor transport, powered by the classic internal combustion engines, produces a huge amount of harmful products resulting from incomplete combustion of hydrocarbon fuels. Another important aspect stimulating the search for alternative fuels is the necessity of increasing the power and capacity of internal combustion engines. Due to this fact, of much interest for scientists nowadays is hydrogen synthesis gas. The advantages of using this fuel include the high environmental quality of exhaust gases, the high-energy performance of the fuel, and its low price in comparison with hydrocarbon fuel.

Whatever the fuel used, the necessity of monitoring the operating conditions of engines remains an important part of the technical system. A most advanced and promising method to estimate the operating conditions of an engine is the vibrational control carried out with special equipment. At the outlet of vibration sensors, there is a signal that is to be subjected to processing, transformation, and subsequent analysis. The wavelet transform is a most informative tool permitting analysis of non-stationary signals due to its ability to analyze local features in signals. The wavelet transform is a representation of a signal with a generalized series or a Fourier integral in a system of basic functions, derived from a mother wavelet function; such a representation possesses unique properties due to using time-shift and time-scale change operations. The choice of a mother wavelet is made with due consideration for wavelet properties necessary for signal analysis. For visualization of wavelet-transform results, in the present article three wavelet spectrograms of the one and the same signal, expressed in terms of different mother wavelets, are presented.

Key words: *alternative fuel; synthesis gas; vibrational control; wavelet-transform; mother wavelet.*

Глушков Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. E-mail: rcpl@ngs.ru

Жидких Вероника Олеговна – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» СГУПС. E-mail: zhidkihveronika@mail.ru