

# ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ–АНАЛИЗА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ В МАСЛОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ДОРОЖНЫХ МАШИН

Д.т.н. В. Д. Сахацкий, Д.Е.Лихачёв, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Рассмотрены математические модели импульсов давления в двухфазных средах. Предложено использование вейвлет-анализа для обнаружения воздушных пузырьков на ранней стадии их появления в маслопроводных системах высокого давления дорожных машин.*

*Розглянуто математичні моделі імпульсів тиску в двофазних середовищах. Запропоновано використання вейвлет-аналізу для виявлення повітряних бульбашок на ранній стадії їх появи в маслопроводних системах високого тиску дорожніх машин.*

*Reviewed mathematical models of pulse of pressure in two-phase environments. Proposed to use of wavelet analysis for detect air bubbles at an early stage of their appearance in oil-wireline systems of road machines.*

**Ключевые слова:** импульс давления, воздушные пузырьки, помехи, выделение сигнала, вейвлет-преобразования

## Постановка проблемы.

Гидроцилиндры дорожных машин несмотря на все меры по устранению воздуха из рабочей жидкости, имеют остаточные пузырьки, наполненные воздухом или другим газом. Жидкость с пузырьками имеет заметно другие физические свойства, чем жидкость с полностью устранённым воздухом. При резком увеличении нагрузки на гидравлическую систему с пузырьками воздуха возникает ударная волна. Экспериментальному и теоретическому исследованию ударных волн в пузырьковых средах посвящено большое число оригинальных работ.

Результаты работ по изучению волновых процессов в пузырьковых средах обобщены в монографиях [1-3]. В них установлено, что характеристики ударных волн определяются параметрами воздушных сред и зависят от амплитуды самой волны. С увеличением давления ударной волны изменяется и ее структура.

Ударная волна – поверхность разрыва, которая распространяется внутри среды, при этом давление, плотность, температура и скорость ощущают скачек.

В работах показано, что нелинейное возмущение конечной длительности в среде с пузырьками распадается на отдельные волны – солитоны.

При динамических процессах в пузырьковой жидкости начинают проявляться явления инерции жидкости при изменении объема смеси за счет сжатия или расширения пузырьков.

Наличие пузырьков в рабочей жидкости гидравлической системы управления механизмами

дорожных машин также может привести к появлению ударных волн, из-за которых поршень гидроцилиндра начинает колебаться и вибрировать, что приводит к запаздыванию срабатывания, снижению скорости его работы и является причиной быстрого разрушения.

При увеличении концентрации пузырьков возникает опасность возникновения схлопываний, сопровождающихся обратными ударными волнами внутри цилиндра, которые разрушают его внутреннюю часть и слой смазки [4].

Исходя из вышеуказанного, можно сделать вывод о важности определения наличия пузырьков воздуха в рабочей жидкости на ранних стадиях их образования.

Кроме импульсов давления в реальном случае существуют так же другие импульсные сигналы, которые выступают как помехи для искомого информационного сигнала (импульса давления). К ним относятся: работа двигателя, удары корпуса дорожных машин, удары поршня (импульсы от которого переходят в масляную систему как помеха информационному сигналу), белый шум (от всех механизмов системы).

Соответственно определение на ранней стадии наличия пузырьков в рабочей жидкости связано с проблемой выделения информационного сигнала из смеси его с помехами и шумами.

**Анализ литературы и достижений.** Профиль фронта ударной волны рассчитывается на основе уравнения Буссинеска, полученного для газожидкостной среды [5]:

$$\frac{\partial^2 \Delta p}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - c_0^2 p_0 \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2}. \quad (1)$$

$$\left( \frac{\Delta p}{p_0} \right)^2 - 2\beta \frac{\partial^4 \Delta p}{\partial t^2 \partial x^2} = 0,$$

где  $\Delta p$  – возмущение давления в волне, Па;

$c_0^2 = \gamma p_0 / \rho_0 \varphi_0$  – низкочастотная скорость звука в среде, м/с;

$\gamma$  – показатель адиабаты;

$\rho_0$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta = R_0^2 / 6\varphi_0$  – коэффициент дисперсии для газожидкостной среды при изотермическом поведении газа в пузырьках;

$R_0$  – радиус пузырька с воздухом, м;

$\varphi_0$  – объемное содержание пузырьков в среде.

Анализ решения (1) показывает, что при развитой осцилляторной структуре профиль переднего фронта волны будет близким к форме солитона [5]:

$$\Delta p = \Delta p_m \operatorname{sech}^2(x/\delta_p),$$

$$\delta_p = \{[4 + 12\gamma p_0 / (\gamma + 1)\Delta p_m] c_0^2 \rho_0 R_0^2 / 3\gamma p_0\}^{1/2}. \quad (2)$$

Солитонообразный импульс распространяется и при малых стационарных возмущениях [6]

В [5] был проведен эксперимент, результаты которого представлены на рис.1.

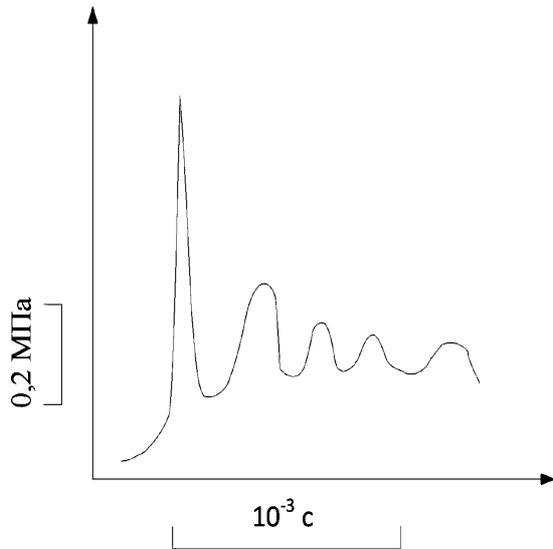


Рис. 1. Структура осциллирующей ударной волны в жидкости с воздушными пузырьками (начальное давление  $p_0 = 0,0014 \text{ МПа}$ ; максимальное давление  $\Delta p_m = 0,59 \text{ МПа}$ ; радиус воздушного пузырька  $R_0 = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ )

Установлено, что длительность импульсного сигнала на уровне  $0,42 \Delta p_{\max}$  составляет  $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Анализ решений уравнения Буссинеска показывает, что при развитой осцилляторной структуре профиль переднего фронта волны близок к форме солитона.

В работе [7] экспериментально изучено взаимодействие ударной волны со сферическими пузырьковыми кластерами в жидкости. Кластер – это объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельный объект со своими свойствами. На рис. 2,а показан профиль ударной волны, которая входит в жидкость, а на рис. 2,б – волна давления в жидкости. Видно, что и в такого рода жидкости возникает солитоноподобный импульс. Из рисунка видно, что длительность импульса меньше чем 0,4 мс.

Таким образом распространяющаяся в пузырьковой среде волна давления имеет солитонообразную форму.

Для выделения сигнала на фоне помех используют различные методы. Наиболее распространенными являются частотная, корреляционная и согласованная фильтрации. Они применяются для обнаружения сигнала заранее известной формы и параметров, с заранее

известной длительностью импульсов. Применение активной фильтрации позволяет проводить высокоточные измерения физических сигналов в реальном масштабе времени. Данный метод фильтрации позволяет успешно снижать уровни шумов и помех и отфильтровывать полезный сигнал, когда его амплитуда меньше уровня шума. Однако реализация активной фильтрации является технически сложной.

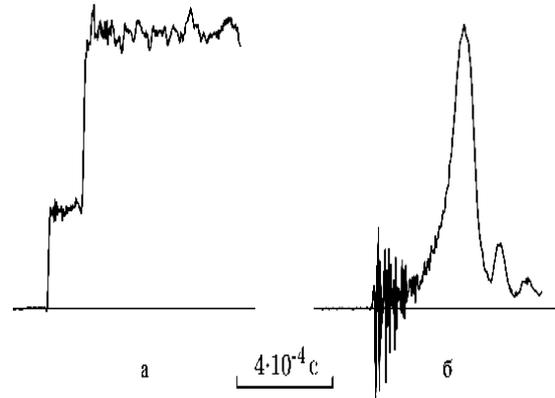


Рис. 2. Профиль ударной волны:  
а) профиль ударной волны, которая входит в жидкость;  
б) профиль отдельной волны давления в жидкости

#### Актуальность работы.

В последние годы проявляется повышенный интерес к использованию нетрадиционных видов сигналов в различных областях науки и техники. К таким видам сигналов относятся, например, сверхширокополосные (СШП) сигналы. Они представляют собой короткие импульсы различной формы.

Для сверхширокополосных сигналов традиционные методы анализа во многих случаях или принципиально неприемлемы, или имеют ограниченные возможности, не соответствующие предъявляемым требованиям. Для их выделения на фоне помех используют вейвлет-преобразование зашумленного сигнала [8].

Солитон также представляет собой короткий импульс давления и по отношению к нему вполне приемлемо использование тех методов, которые применяют для выделения на фоне помех СШП сигналов.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является определение типа вейвлета, который наиболее эффективно позволяет обнаружить солитоноподобный сигнал на фоне шума.

#### Изложение основного материала исследования

Вейвлет-преобразование сигнала состоит в его разложении по базису, сформированному из обладающей определенными свойствами локализованной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. Каждая из функций этого базиса характеризует как определенную пространственную (или временную) частотную составляющую сигнала, так и локализацию этой составляющей в физическом пространстве (или во времени).

В реальных маслопроводных системах возможно загрязнение масла. Частицы загрязняющих веществ создают кластерные структуры, на поверхности которых оседают пузырьки газа. По приведенным в работе [4] параметрам жидкости с кластерными структурами в среде Matlab был смоделирован профиль ударной волны, которая распространяется в жидкости. При этом полагалось, что концентрация пузырьков равнялась 10%, а радиус пузырьков составлял  $10^{-3}$  м.

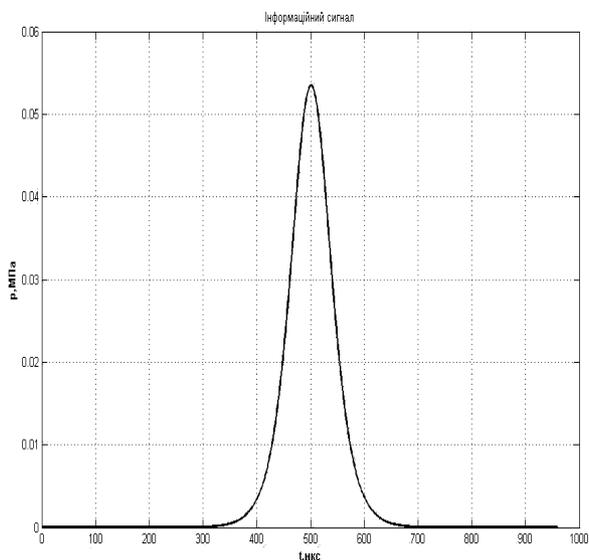


Рис.3. Профиль ударной волны, распространяющейся в жидкости с кластерными структурами

Результат моделирования показан на рис.3. Из рисунка видно, что длительность импульса на уровне  $0,42 \Delta p_{\max}$  равна  $10^{-3}$  с.

Анализ приведенных выше рисунков показывает, что форма солитона весьма близка к форме известного импульса Гаусса. Из результатов эксперимента (рис.1 и рис.2) следует что длительность импульса на уровне  $0,42 \Delta p_{\max}$  примерно равна 0,2 мс. С учетом изложенного для дальнейших исследований в качестве математической модели импульса давления, распространяющегося в маслопроводной системе с пузырьками, был выбран гауссовский импульс единичной амплитуды и длительностью 0,2мс. Для данного информационного сигнала помехой служил шумовой сигнал.

Для выделения информационного сигнала на фоне шумов использовался пакет Wavelet Toolbox в среде Matlab. Это открытый пакет расширения Matlab, который позволяет синтезировать алгоритм обработки информации с использованием вейвлет-функций.

Среди вейвлетов были выбраны для использования различные семейства, описанные в [9]. Результаты исследования показали, что при отношении сигнал/шум равном единице информационный сигнал хорошо выделяется вейвлетами Simlet 4 и Dobechi 3 на шестом уровне разложения.

При отношении сигнал/шум равном 0,5 оба вейвлета также хорошо выделяют информационный сигнал на шестом уровне разложения (рис 4 и рис 5).

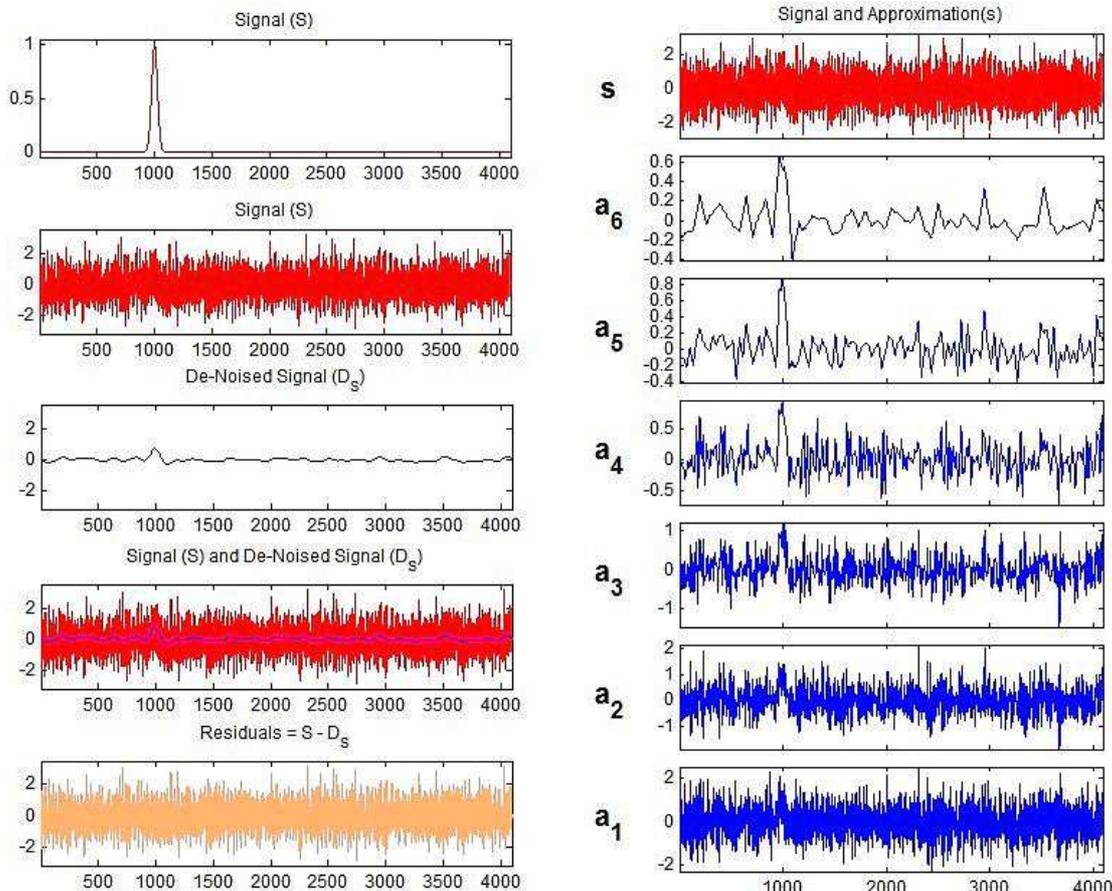


Рис. 4. Результаты выделения информационного сигнала на фоне шума с помощью вейвлета Dobechi 3 на шести уровнях разложения при отношении сигнал/шум равном 0,5

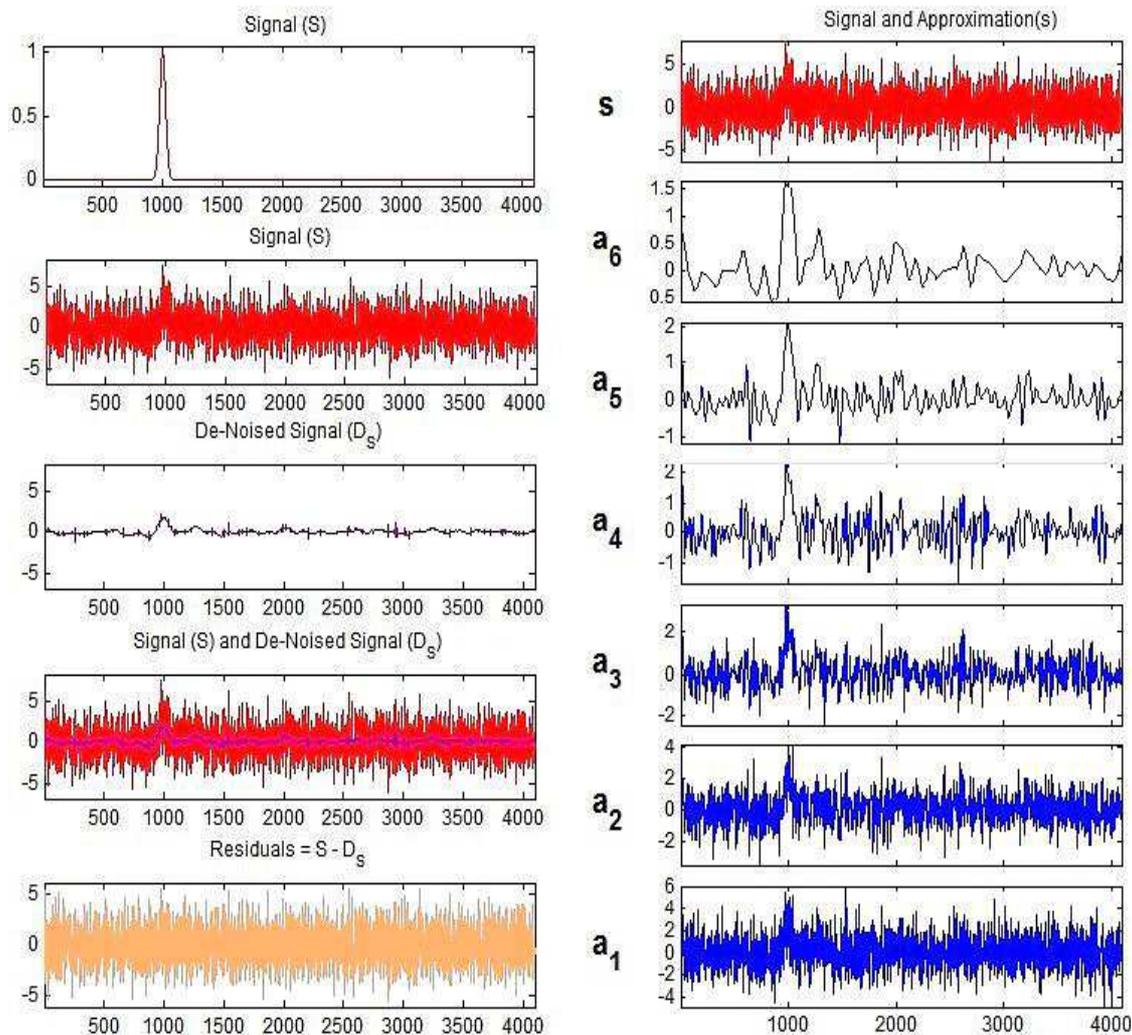


Рис. 5. Результаты выделения информационного сигнала на фоне шума с помощьювейвлетаSimlet 4 на шести уровнях разложения при отношении сигнал/шум равном 0,5

На рисунках в левой колонке сверху вниз показан информационный сигнал –  $S$ , шумовой сигнал –  $S$ , выделенный из смеси с шумом информационный сигнал –  $D_s$ , выделенный информационный сигнал, который наложен на шумовой сигнал и в конце колонки - разница между шумовым сигналом и выделенным информационным сигналом. В правой колонке показан процесс разложения зашумленного сигнала от 1-го до 6-го уровней.

Было показано, что с уменьшением отношения сигнал / шум до 0,3, 0,25, 0,2 и т.д. данные вейвлеты начинают хуже выделять информационный сигнал.

Проанализирован процесс выделения информационного сигнала семействами других вейвлетов, в частности такими как Dmey, Naar и Coif. Оказалось, что они имеют худшие способности выделения данного информационного сигнала из смеси его с помехами.

#### Выводы

Результаты исследования показывают, что для выделения солитоноподобных информационных сигналов в маслопроводной системе дорожных машин с пузырьками воздуха целесообразно использовать вейвлеты Dobechi 3 и Simlet 4 при шести уровнях разложения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Накоряков В.Е. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах / В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев, И. Р. Шрейбер– Новосибирск: Ин-т теплофизики, 1983.- 237 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Нигматулин Р.И. – М.: Наука, 1987.-197с.
3. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели / В. К. Кедринский– Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. -435 с.
4. Донцов В.Е. Распространение волн давления в газожидкостной среде кластерной структуры /В. Е. Донцов // ПМТФ.- 2005. -Т.46. -№ 3.-с. 50–60.
5. Накоряков В.Е. Волны умеренной интенсивности в жидкости с пузырьками газа / В. Е. Накоряков, И. Р. Шрейбер, В. Г. Гасенко – В кн.: Волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980, с. 5–19.
6. Гончаров В.В. Стационарные возмущения в жидкости, содержащей пузырьки газа / В. В. Гончаров, К. А. Наугольных, С. А. Рыбак – ПМТФ, 1976, № 6, с. 90–96.
7. Донцов В.Е. Взаимодействие ударной волны со сферическим газожидкостным кластером /В. Е. Донцов// ПМТФ.- 2004. -Т. 45.- №1.-с.32-36
8. Лазоренко О.В. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения СШП сигналов на фоне помех / О. В. Лазоренко, С. В. Лазоренко // Радиофизика и радиоастрономия.- 2002.- Т. -7.- № 1.- с. 46–63.
9. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши – М.: РХД, 2004.- 464с.