

Распространение акустического излучения в зерновой массе пшеницы

Дмитрий Иванович Борисенко

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Московский политехнический университет
Москва, Россия
dima-luxinzhi@mail.ru
ORCID 0000-0002-1636-9510

Поступила в редакцию 01.03.2023

Принята 21.04.2023

Опубликована 15.05.2023

УДК 631.363.043:534.321.9

EDN SNLLGG

BAK 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

В целях сохранения урожая для разработки новых технологий мониторинга качества зерна, находящегося в хранилище, нужны дополнительные сведения о свойствах зерновой массы. Одним из перспективных направлений представляется использование акустического излучения. Работа посвящена исследованию расстояния прохождения акустического излучения в зерновой массе пшеницы, на котором оно доступно инструментальному контролю. Разработана методика исследования распространения акустического излучения в зерновой массе, создан экспериментальный стенд, получены экспериментальные данные. Показано, что регистрируемые в работе сигналы являются акустическим излучением динамика, а не результатом наводок в аппаратуре, вызванных электрическими эффектами. Установлено, что коэффициент затухания акустического излучения в зерновой массе пшеницы в диапазоне частот от 300 Гц до 5500 Гц изменяется кратно (в разы) и имеет минимальное значение при частотах 1-1,5 Гц. Установлено, что распространяющееся через зерновую массу пшеницы акустическое излучение мощностью менее 100 мВт инструментально регистрируется на расстоянии до 3,5 м и более.

Ключевые слова

зерновая масса, пшеница, акустическое излучение, длина распространения, затухание.

Введение

Одной из важнейших задач мониторинга качества зерна является своевременная диагностика его характеристик. Для разработки новых технологий мониторинга качества зерна, находящегося в хранилище, нужны дополнительные сведения о свойствах зерновой массы, значимых для её сохранности.

Прежде всего интерес представляет передача информации через толщу зерновой массы. Температурные съёмки при диагностике самосогревания, например, в силу низкой теплопроводности зерновой массы могут помочь, только если измерения проводятся в самом очаге самосогревания или непосредственно вблизи него [1, стр.54]. Можно использовать просвечивание электромагнитным, рентгеновским, радиоактивным излучениями. Но с учётом абсолютных размеров скоплений зерновой массы в стандартных банках (ёмкостях) в хранилищах и трюмах мощности этих излучений потребуются такие, что это навредит зерну.

На протяжении всей человеческой истории – сколько хранится зерно – на него оказывается акустическое воздействие: рядом с зерном издаются различные звуки. Это и человеческая речь, и результат работы различных приспособлений. Непосредственно внутри самой зерновой массы постоянно генерируются звуки, сопровождающие жизнедеятельность членистоногих (насекомых и клещей). Поэтому представляется логичным рассмотреть именно акустическое излучение для передачи информации о качественных характеристиках зерновой массы.

Имеющийся опыт акустической диагностики зерновой массы в промышленных условиях позволяет судить о концентрации насекомых в различных частях бункера при установке датчиков через 15 см [2], что для распространённых в РФ зернохранилищ [3] неудобно. Акустическое излучение, генерируемое насекомыми, обитающими в зерновой массе на территории постсоветского пространства, характеризуется частотами 0,5–3,0 кГц [4, стр.69]. Специальные исследования звукопоглощения различных типов зерна, проведенные как раз для акустической диагностики насекомых в зерновой массе [5], к сожалению также ограничиваются толщиной прозвучиваемого слоя зерна в несколько сантиметров (максимум 8 см). Нет данных о распространении звуков в зерне на расстояния в единицы метров и в обзоре работ по акустической диагностике насекомых в различных средах, анализирующем более ста исследований, проведенных с начала 20-го века [6].

Данные о распространении акустического излучения в зерновой массе на более длинные расстояния (метры) автору найти не удалось. Однако, для среды с похожими характеристиками акустическое излучение может быть инструментально зарегистрировано на расстоянии в 2,5–9 м [7, стр.172], т.е. метры (порядок: единицы метров). В [7] подразумеваются горные породы, поэтому для правомочности применения указанных цифр к зерновой массе необходимо экспериментальное исследование затухания акустического излучения в ней.

Целями настоящей работы являются экспериментальное получение зависимости затухания акустического излучения в пшенице от частоты и пройденного пути, а также проверка возможности его инструментальной регистрации на расстоянии в несколько метров.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим внешний вид и принципиальную схему экспериментальной установки. Ее внешний вид с указанием основных элементов представлены на рисунке 1.

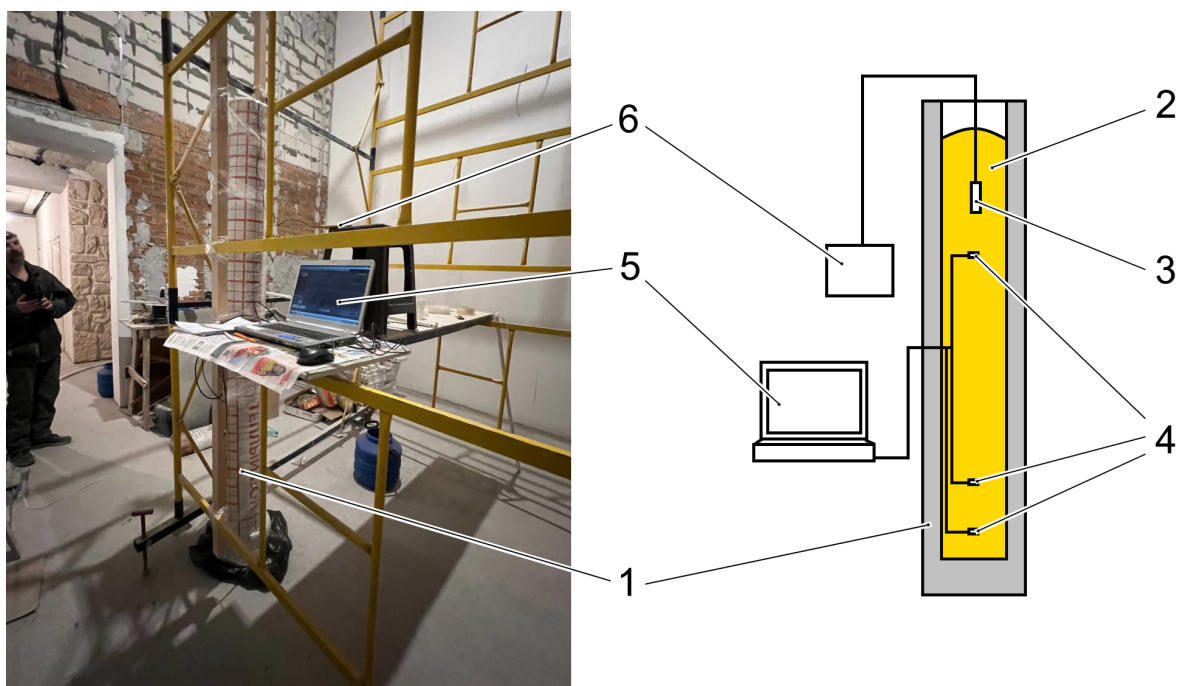


Рисунок 1. Внешний вид и принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – тубус; 2 – зерновая масса (пшеница); 3 – излучатель; 4 – датчики; 5 – компьютер; 6 – генератор

В вертикально ориентированном тубусе из вспененного полиэтилена (1) в толще зерновой массы (2) на различном расстоянии от источника звука (3) располагались пьезоакселерометры ДН-3-М1 (4), подключенные к персональному компьютеру Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 1.70 GHz 1.72 ГГц, 256 МБ ОЗУ (5) со звуковой картой Avance AC97 Audio, где происходила регистрация и обработка сигналов программой Adobe Audition 1.5. Источником звука являлся расположенный в толще зерновой массы динамик диаметром 15 мм, ориентированный рабочей поверхностью вниз, с приделанной латунной трубкой длиной 50 мм, внешним диаметром 15 мм и толщиной 0,3 мм. Мощность динамика составляет менее 100 мВт. Сигнал создавался и регулировался генератором (6). Вспененный полиэтилен выбирался из условий звукоизоляции – чтобы исключить распространение возникающего в толще зерновой массы акустического излучения по стенкам емкости.

Чтобы соответствовать значениям, приведенным в работах по теме исследования (Закладной, 1970; Min, 2005), в эксперименте настоящей работы акустическое излучение осуществлялось на частоте 0,3-5,5 кГц. Значение интенсивности акустического сигнала, измеренное в непосредственной близости от источника, принималось за опорное, и остальные значения делились на него.

В процессе эксперимента прозвучиваемый слой зерновой массы, расположенный между источником и дальним приёмником акустического излучения, увеличивался путём досыпания зерна в тубус. При этом тубус наращивался по высоте, в процессе эксперимента его высота составляла от 1,2 м до 4,8 м. Расположенные в нижней части тубуса датчики оставались на одном месте в процессе всего эксперимента, а верхний датчик переставлялся вместе с источником звука по мере увеличения толщины слоя зерна.

Результаты и обсуждение

Чтобы удостовериться в том, что регистрируемые сигналы имеют акустическую природу, а не связаны с электромагнитными эффектами, наряду с динамиком, приводимым в действие электрическим током, в качестве источника звука использовался камертон, активируемый механическим воздействием (рис. 2).

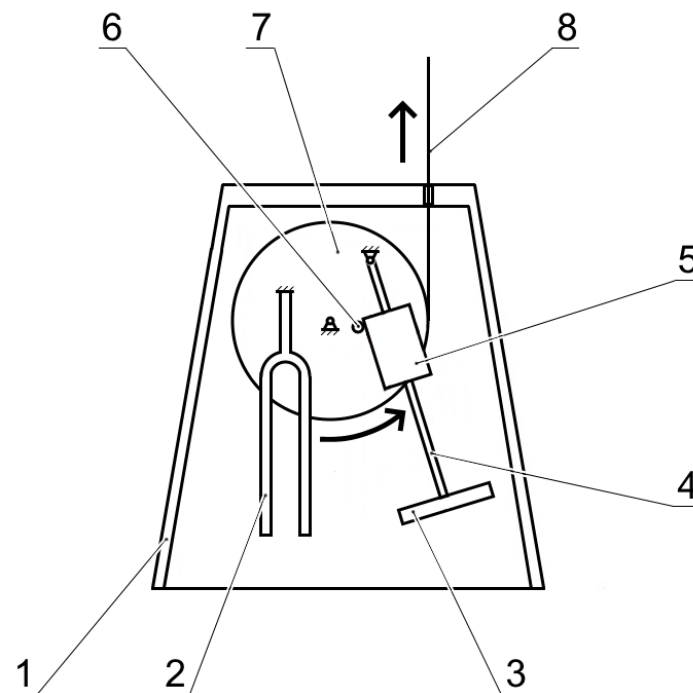


Рисунок 2. Принципиальная схема механического источника акустического излучения: 1 – корпус; 2 – камертон; 3 – боёк; 4 – стержень; 5 – утолщение; 6 – штырь; 7 – диск; 8 – нить

В корпусе (1), выполняющем роль раструба, размещён камертон (2), являющийся источником акустического излучения. Колебания камертона возбуждаются ударом бойка (3), расположенного на свободно подвешенном стержне (4), имеющем утолщение (5). Стержень с бойком образуют било, выводимое из положения равновесия за счёт взаимодействия со штырём (6), закрепленным на диске (7), приводимом во вращение нитью (8). Это устройство размещалось в зерновой массе вместо описанного выше динамика с латунной трубкой в тех же пространственных координатах (на таком же расстоянии от акустических датчиков). Частота камертона выбиралась из соображений попадания в интервал 0,5–3,0 кГц, соответствующий звукам, издаваемым насекомыми (Закладной, 1970). При этом для пшеницы при 630-900 Гц находятся частоты максимального поглощения звука (Min, 2005). Таким образом, частота механического воздействия бралась равной 1024 Гц, чему соответствует медицинский камертон С3, который и использовался в эксперименте.

Необходимо также отметить, что в толще зерновой массы зачастую расположены продолговатые объекты с отличающимися от зерна акустическими свойствами – термоподвески с металлической оплёткой. Для проверки влияния наличия в зерновой массе металлических объектов на регистрацию интенсивности распространяющегося в ней акустического сигнала был проведен следующий эксперимент. В толще зерновой массы был вертикально размещён стальной стержень в виде трубы длиной 2 м, наружным диаметром 22 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Стержень пересекал горизонтальные плоскости расположения источника звука и улавливающего звук датчика.

Результаты и обсуждение

Для акустического сигнала, прошедшего через слой зерновой массы пшеницы толщиной 2 см, на рисунке 3 представлены полученные значения амплитуды, нормированные на максимальное значение, то есть $\bar{A} = A/A_{max}$.

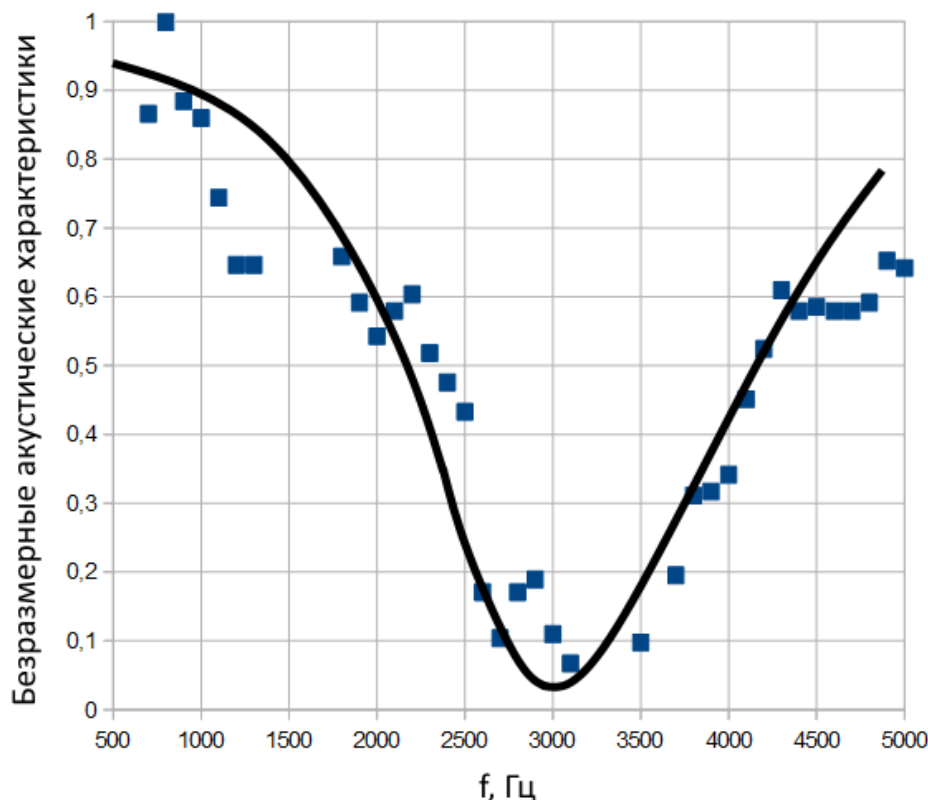


Рисунок 3. Зависимость акустических характеристик для распространения звуковых колебаний через слой пшеницы толщиной 2 см: точки – нормированная на максимальное значение амплитуда прошедшего сигнала (экспериментальные данные настоящей работы); линия – сумма единицы и величины, противоположной коэффициенту звукопоглощения (Min, 2005)

Как видно из рисунка 3, для насыпного слоя пшеницы толщиной в 2 см распределение амплитуды прошедшего сигнала по частоте неравномерно, причём, минимум приходится на интервал от 2500 Гц до 3500 Гц. Это согласуется с имеющимися в литературе данными, где приводится зависимость коэффициента звукопоглощения α от частоты для того же диапазона значений (Min, 2005). Коэффициент звукопоглощения α определяется как поглощенная звуковая энергия, деленная на энергию падающего звука. Соответственно, оставшаяся энергия состоит из двух частей: прошедшей и отражённой. Сумма единицы и величины, противоположной коэффициенту звукопоглощения, как следует из рисунка в работе (Min, 2005), то есть $1 - \alpha$, нанесена на рисунок 3.

Кроме того, на рисунке 4 представлены некоторые значения из полученных данных по ослаблению интенсивности акустического сигнала, прошедшего через зерновую массу, в зависимости от расстояния для частот 800 Гц, 1400 Гц и 2000 Гц.

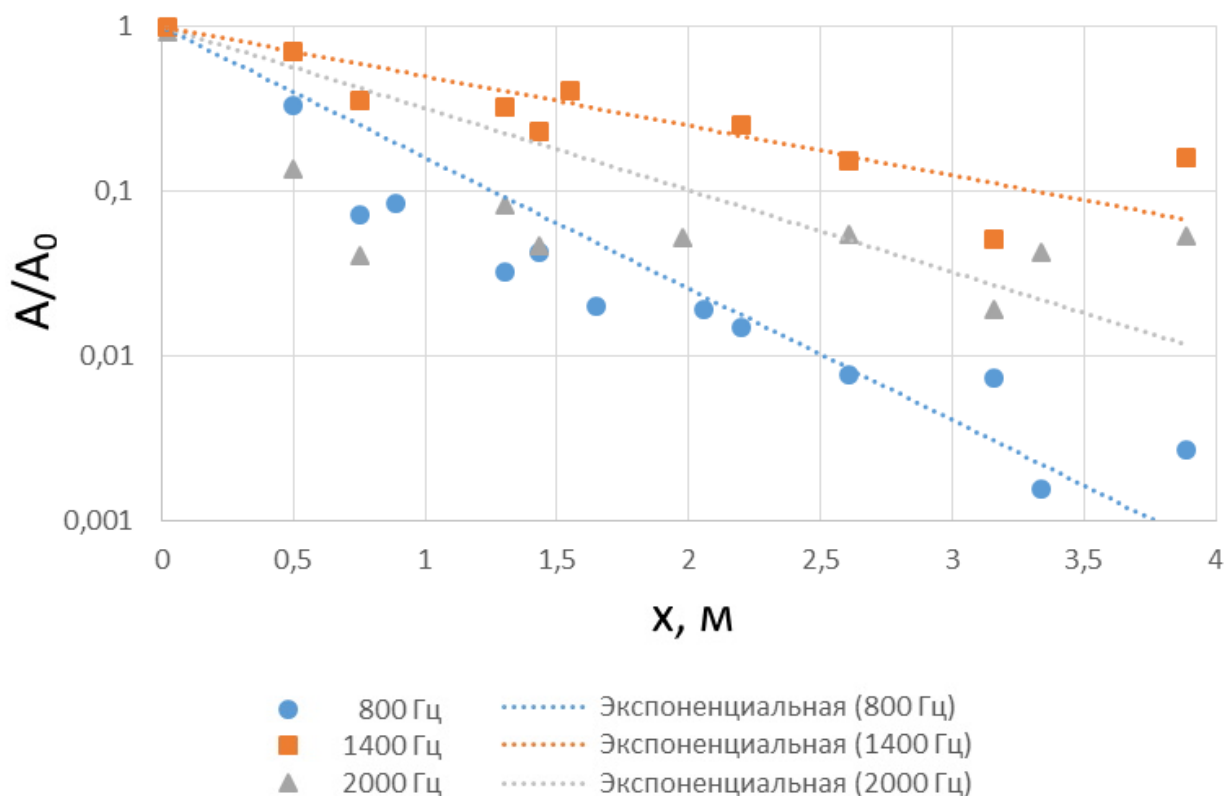


Рисунок 4. Зависимость безразмерной амплитуды от расстояния

Как видно из рисунка, с увеличением расстояния от источника звука его интенсивность ожидаемо уменьшается для всех частот. Однако, снижение амплитуды акустического сигнала с расстоянием для разных частот различно. Так, для 2000 Гц снижение амплитуды с расстоянием меньше, чем для 800 Гц, а для 1400 Гц – ещё меньше. При этом на расстоянии, превышающем 3,5 м, сигнал чётко инструментально измеряется, а значения ослабления интенсивности для указанных частот различаются между собой на порядок.

Коэффициент затухания

Для каждого значения частоты строились зависимости безразмерной амплитуды от расстояния (аналог рис. 4). Для полученных массивов точек строились экспоненциальные линии тренда, проходящие через точку с координатами ($x=0$; $A/A_0=1$). Коэффициенты при x в показателе степени экспоненты принимались за значения коэффициента затухания κ . Зависимость κ от частоты для указанного выше диапазона 500 Гц...3000 Гц представлена на рисунке 5.

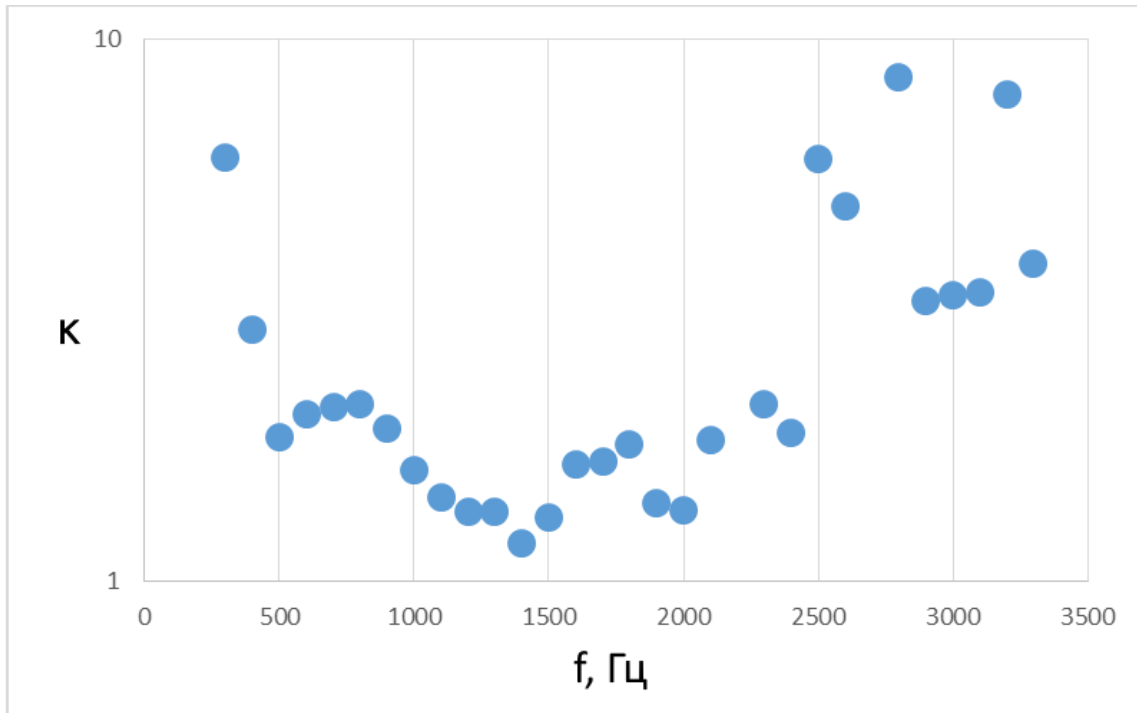


Рисунок 5. Зависимость коэффициента затухания акустического излучения в зерновой массе пшеницы от частоты

Как видно из рисунка 5, при частотах, лежащих ниже 500 Гц, и в интервале от 2500 Гц до 3500 Гц наблюдаются высокие значения коэффициента затухания, что соответствует низким значениям амплитуды. Это согласуется с рисунком 3.

На рисунке 6 приведены значения относительной амплитуды акустического сигнала, прошедшего через зерновую массу пшеницы толщиной 50 см (0,5 м) в зависимости от частоты.

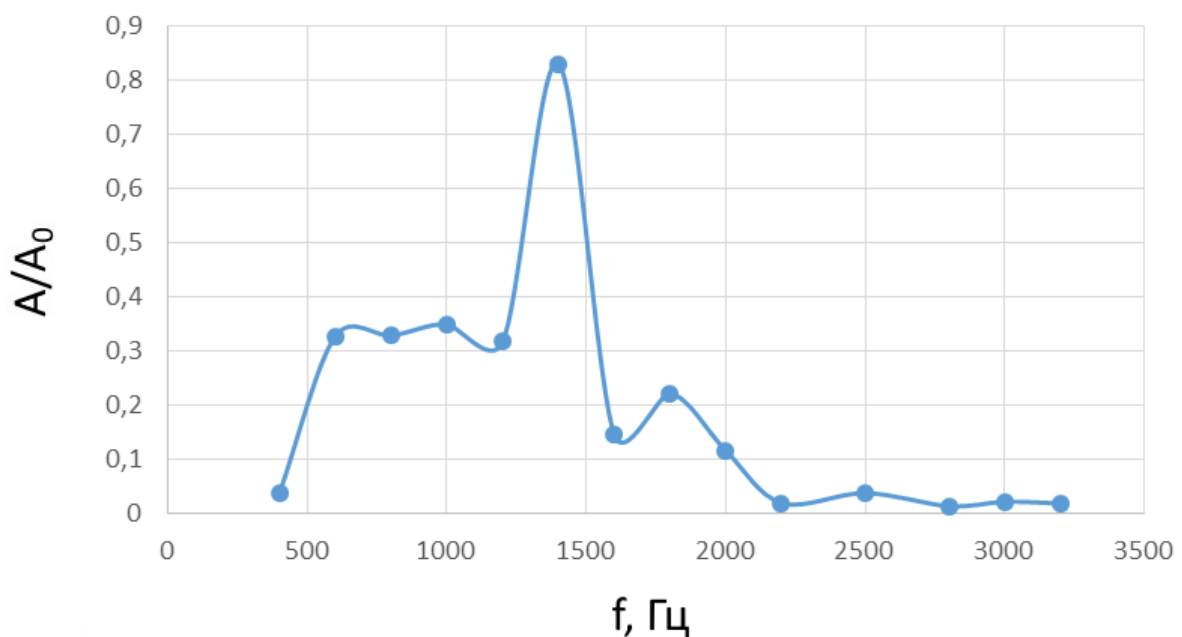


Рисунок 6. Зависимость значений относительной амплитуды акустического сигнала от частоты для слоя пшеницы толщиной 0,5 м: точки – экспериментальные данные; линия – интерполяция сплайном

Как видно из рисунка 6, интенсивность сигнала, проходящего через зерновую массу толщиной 0,5 м, ощутимо зависит от частоты, причём на 1400 Гц приходится максимум. Также заметно, что наибольшие значения сигналов (менее ослабленные) находятся в диапазоне от 500 Гц до 2000 Гц.

При кратном увеличении толщины зерна – в 3 и 8 раз – получаем значения, представленные на рисунках 7 и 8 соответственно.

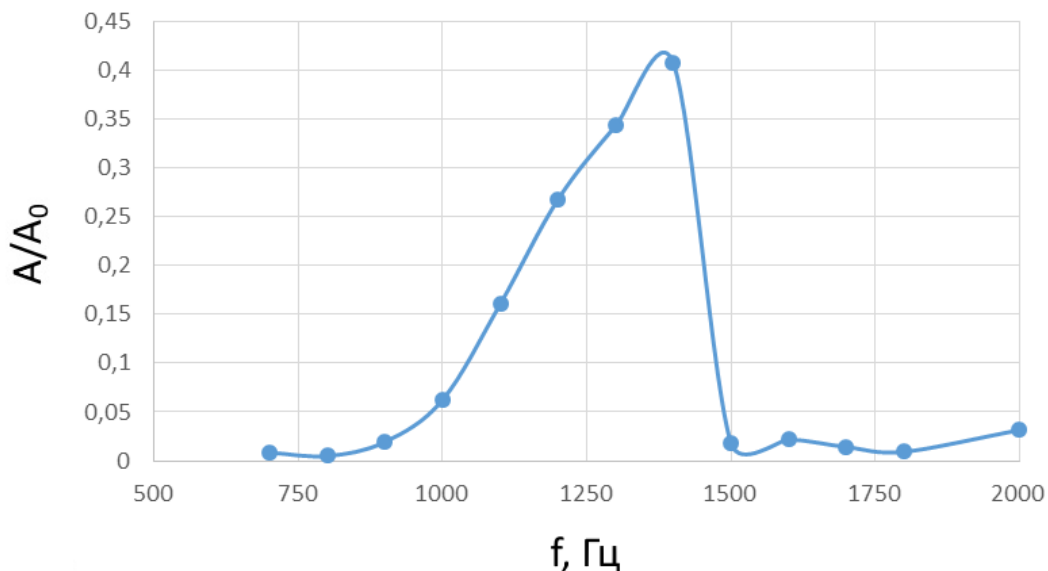


Рисунок 7. Зависимость значений относительной амплитуды акустического сигнала от частоты для слоя пшеницы толщиной 1,55 м: точки – экспериментальные данные; линия – интерполяция сплайном

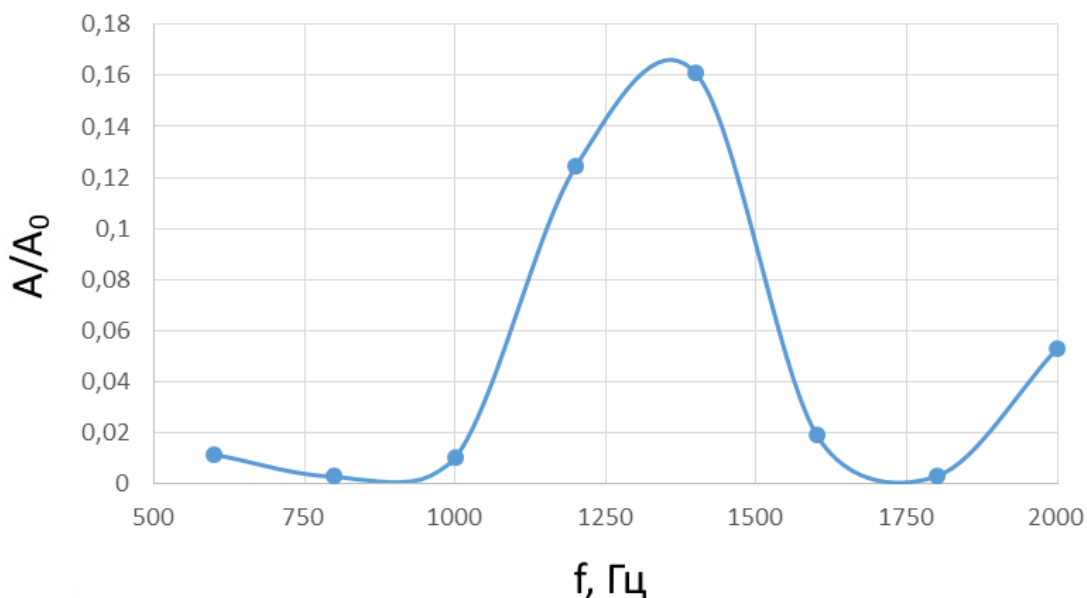


Рисунок 8. Зависимость значений относительной амплитуды акустического сигнала от частоты для слоя пшеницы толщиной 3,89 м: точки – экспериментальные данные; линия – интерполяция сплайном

Как видно из рисунков 6, 7 и 8, в интервале частот от 500 Гц до 2000 Гц значения относительной амплитуды в зависимости от частоты различаются более, чем на порядок (примерно в 50 раз), причём,

максимальные значения лежат в районе 1400 Гц. При этом сигнал частотой 1400 Гц на расстоянии 1,5 м ослабляется кратно (для полученных в настоящей работе данных – менее чем в три раза). А такое расстояние соответствует половине горизонтального характерного размера наиболее распространённых зерновых емкостей элеваторов (Волошин, 2019).

Показания измерительной системы, регистрирующей сигнал, возникающий в результате возбуждения камертона, полностью соответствуют экспериментальным данным, получаемым при работе источника излучения, использовавшегося для возбуждения акустических волн как при 1 кГц, так и на других частотах. К таким показаниям относятся регистрируемая частота и ослабление интенсивности с расстоянием. При тарировочных измерениях на одинаковом расстоянии от источника звука интенсивность регистрируемого сигнала составила примерно одинаковые значения: 25 и 21% от исходного сигнала для динамика и камертона соответственно.

Таким образом, получаемые применяющейся в работе измерительной системой данные соответствуют характеристикам возникающего в зерновой массе акустического поля, а не вызваны электромагнитными эффектами.

Влияние стального стержня оценивалось по сопоставлению интенсивности регистрируемого акустического сигнала, распространяющегося через зерновую массу, при наличии и при отсутствии стержня. Расстояние между источником звука и улавливающим его датчиком составляло примерно 170 см. Отношение значений амплитуды сигнала в присутствии стержня и без него представлены на рисунке 9.

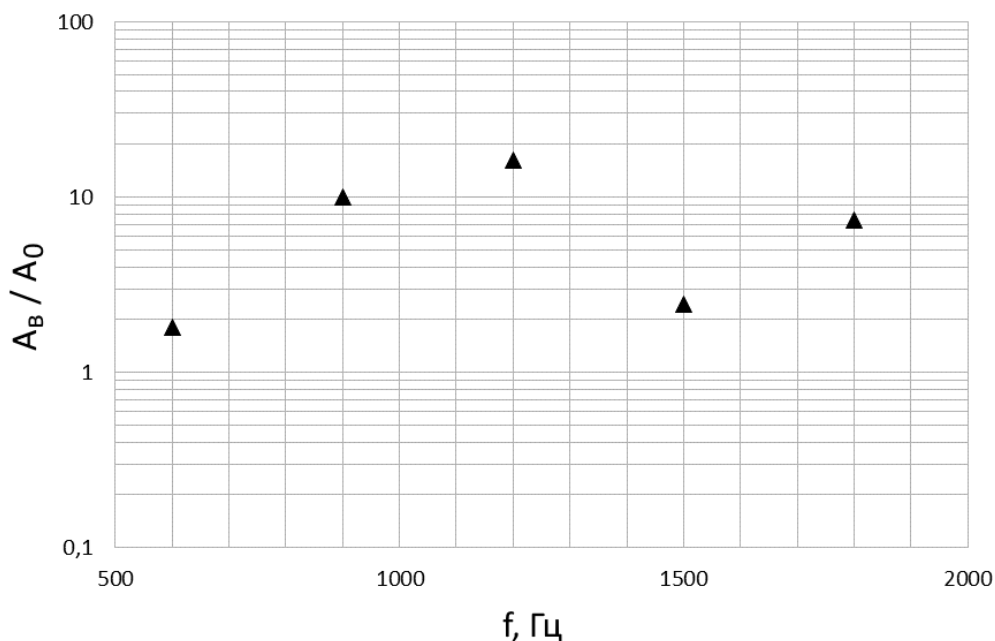


Рисунок 9. Отношение значений амплитуды сигнала, распространяющегося по зерновой массе в присутствии стержня, и без него

Как видно из рисунка 9, наличие объекта с более высокой акустической проводимостью в зерновой массе способствует кратному (иногда на порядок) увеличению интенсивности регистрируемого акустического сигнала, распространяющегося вдоль такого объекта.

Заключение

В рамках проведенной работы разработана методика экспериментального исследования распространения акустического излучения через зерновую массу на расстоянии в несколько метров; создан экспериментальный стенд для осуществления исследований по этой методике; проведены серии

опытов для пшеницы в диапазоне частот от 300 Гц до 5500 Гц и получены экспериментальные данные, в результате чего установлено, что:

- распространяющееся в зерновой массе пшеницы акустическое излучение инструментально регистрируемо на расстоянии нескольких метров (сигнал частотой 1400 Гц на расстоянии 3,5 м ослабевает на порядок);
- ослабление акустических сигналов в зерновой массе пшеницы в зависимости от частоты различается более, чем на порядок (в 50 раз);
- минимальное ослабление акустического излучения в зерновой массе пшеницы на расстоянии нескольких метров наблюдается в районе 1400 Гц;
- наличие в зерновой массе продолговатых объектов (стержней) из материалов с более высокой звукопроводностью, чем у зерновой массы, способствует кратному (для частот в районе 1000 Гц – на порядок) повышению интенсивности регистрируемого акустического сигнала, распространяющегося вдоль таких объектов;
- регистрируемые в работе сигналы являются акустическим излучением, а не результатом наводок в аппаратуре, вызванных электрическими эффектами.

Список литературы

1. Вознесенский А.С. Средства передачи и обработки информации: учеб. М.: ИД НИТУ «МИСиС», 2019. 210 с.
2. Волошин Е.В. Элеваторы и склады: уч. пос. в 2 ч. Ч. 2. Оренбург: ОГУ, 2019. 97 с.
3. Закладной Г.А., Ратанова В.Ф., Гаврилов Л.Р., Сиротюк М.Г., Рябухин В.В. Спектральные характеристики акустического шума вредителей хлебных запасов и прибор для определения зерна // Труды ВНИИЗ. 1970. № 71. С.64-71.
4. Уколов В.С. Тепловой режим зерновой насыпи с очагами повышенного тепловыделения // Сб. науч. тр. ФГБНУ «ВНИИ зерна и продуктов его переработки». 1980. № 93. С.49-55.
5. Min Guo, Zhiyuan Shang, Huanwen Shi. Sound absorption measurements of various types of grain // Acta acustica united with acustica. 2005. Vol. 91. pp. 915-919.
6. Mankin R.W., Hagstrum D.W., Smith M.T., Roda A.L., Kairo M.T.K. Perspective and promise: a century of insect acoustic detection and monitoring // American entomologist. 2011. № 57(1). pp. 30-44.
7. Hagstrum D.W., Flinn P.W. Comparison of acoustical detection of several species of stored grain beetles (Coleoptera: Curculionidae, Tenebrionidae, Bostrichidae, Cucujidae) over a range of temperatures // Journal of economic entomology. 1993. Vol. 86. pp. 1271-1278.

Propagation of acoustic radiation in the grain mass of wheat

Dmitry I. Borisenko

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher

National Research Center «Kurchatov Institute»

Moscow Polytechnic University

Moscow, Russia

dima-luxinzh@mail.ru

ORCID 0000-0002-1636-9510

Received 01.03.2023

Accepted 21.04.2023

Published 15.05.2023

UDC 631.363.043:534.321.9

EDN SNLLGG

VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

In order to preserve the harvest, additional information about the properties of the grain mass is needed to develop new technologies for monitoring the quality of grain in storage. One of the promising directions is the use of acoustic radiation. The work is devoted to the study of the transmission distance of acoustic radiation in the grain mass of wheat, at which it is available for instrumental control. A method for studying the propagation of acoustic radiation in the grain mass has been developed, an experimental stand has been created, and experimental data have been obtained. It is shown that the signals recorded in the work are acoustic radiation from the speaker, and not the result of interference in the equipment caused by electrical effects. It has been found that the attenuation coefficient of acoustic radiation in the wheat grain mass in the frequency range from 300 Hz to 5500 Hz varies multiple times (at times) and has a minimum value at frequencies of 1-1.5 Hz. It has been established that acoustic radiation with a power of less than 100 MW propagating through the grain mass of wheat is instrumentally recorded at a distance of up to 3.5 m or more.

Keywords

grain mass, wheat, acoustic radiation, propagation length, attenuation.

References

1. Voznesensky A.S. Means of transmitting and processing information: textbook. M.: NUST MISIS Publishing House, 2019. 210 p.
2. Voloshin E.V. Elevators and warehouses: uch. pos. at 2 p.m. 2. Orenburg: OSU, 2019. 97 p.
3. Mortgage G.A., Ratanova V.F., Gavrilov L.R., Sirotiyuk M.G., Ryabukhin V.V. Spectral characteristics of acoustic noise of pests of grain stocks and a device for grain determination // Works of VNIIZ. 1970. № 71. pp.64-71.
4. Ukolov V.S. Thermal regime of a grain embankment with foci of increased heat release // Sb. nauch. tr. FGBNU «Research Institute of grain and products of its processing». 1980. № 93. pp.49-55.
5. Min Guo, Zhiyuan Shang, Huanwen Shi. Sound absorption measurements of various types of grain // Acta acustica united with acustica. 2005. Vol. 91. pp. 915-919.
6. Mankin R.W., Hagstrum D.W., Smith M.T., Roda A.L., Kairo M.T.K. Perspective and promise: a century of insect acoustic detection and monitoring // American entomologist. 2011. № 57(1). pp. 30-44.
7. Hagstrum D.W., Flinn P.W. Comparison of acoustical detection of several species of stored grain beetles (Coleoptera: Curculionidae, Tenebrionidae, Bostrichidae, Cucujidae) over a range of temperatures // Journal of economic entomology. 1993. Vol. 86. pp. 1271-1278.