

УДК 620.111.3

DOI: 10.18384/2949-5067-2023-4-6-18

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ЗАКРЫТОЙ СОТОВОЙ СИСТЕМЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ ВЛАГУ

**Асеев Е. М., Калашников Е. В.**

*Государственный университет просвещения  
141014, Московская обл., г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,  
Российская Федерация*

### **Аннотация**

**Цель:** экспериментальное изучение фазового перехода «кристалл-жидкость» в интервале температур от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$  в замкнутой системе со структурой типа «пчелиных сот», имеющей скопление воды.

**Процедура и методы исследования.** Используются методы акустической эмиссии, индуцированной изменением внешнего температурного поля. Под действием изменяющегося температурного поля внутри сотовой структуры происходит плавление кристаллов льда, вследствие чего излучаются дискретные ультразвуковые импульсы, которые фиксируются акустико-эмиссионной установкой для последующего анализа. Нагрев осуществляется двумя способами: (1) путём релаксации температуры охлаждённых образцов к значениям комнатной температуры; (2) охлаждённые образцы получают дополнительный, принудительный постоянный нагрев, тем самым увеличивается скорость роста температуры.

**Результаты.** Получены зависимости амплитуд и активности (количества импульсов акустической эмиссии в единицу времени) акустических сигналов от времени, а также частотное распределение зафиксированных ультразвуковых импульсов. Показано, что в результате принудительного нагрева наиболее чётко проявляются сигналы, свидетельствующие о фазовом переходе «лёд-вода» в сотах.

**Практическая значимость.** Проведённые эксперименты показывают, что метод акустической эмиссии при незначительных вариациях температурного поля позволяет обнаруживать дефект в виде наличия влаги в замкнутой сотовой структуре.

**Ключевые слова:** структура пчелиных сот, фазовый переход первого рода, дефекты в структурах, акустическая эмиссия

## ACOUSTIC EMISSION IN A CLOSED HONEYCOMB SYSTEM CONTAINING MOISTURE

**E. Aseev, E. Kalashnikov**

*Federal State University of Education*

*ulitsa Very Voloshinoi 24, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation*

### **Abstract**

**Aim:** experimental study of the “crystal-liquid” phase transition in the temperature range from – 10°C до +25°C in a closed system with a “honeycomb” type structure with accumulation of water.

**Methodology.** Methods of acoustic emission induced by changes in the external temperature field are used. Under the influence of a changing temperature field, melting of ice crystals occurs inside the honeycomb structure, as a result of which discrete ultrasonic pulses are emitted, which are recorded by an acoustic emission installation for subsequent analysis. Heating is carried out in two ways: (1) by relaxing the temperature of cooled samples to room temperature values; (2) cooled samples receive additional, forced constant heating, thereby increasing the rate of temperature rise.

**Results.** The dependences of the amplitudes and activity (the number of acoustic emission pulses per unit time) of acoustic signals on time, as well as the frequency distribution of recorded ultrasonic pulses, were obtained. It is shown that as a result of forced heating, signals indicating an “ice-water” phase transition in the honeycombs most clearly appear.

**Research implications.** The conducted experiments show that the method of acoustic emission at insignificant variations of the temperature field allows to detect a defect in the form of moisture in a closed honeycomb structure.

**Keywords:** honeycomb structure, phase transition of the first kind, defects in structures, acoustic emission

### **Введение**

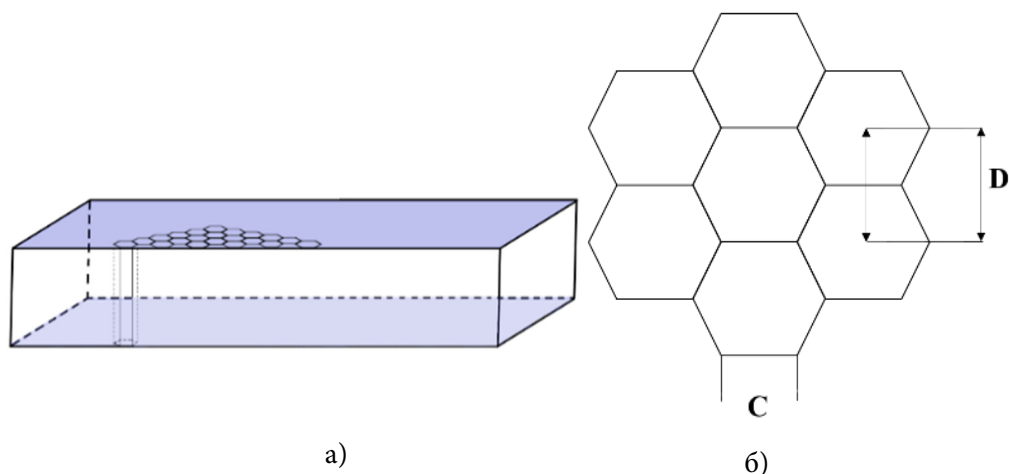
Задачи дефектности в современных материалах активно рассматриваются в современной литературе [2; 3; 5; 6; 7]. И методы акустической эмиссии находят широкое применение [4; 8; 9; 10]. Между тем спектр применения современных материалов очень широк [5; 7; 10], а что собой представляют некоторые дефекты и как они себя проявляют не совсем ясно.

В предыдущих работах было установлено, что сигналы акустической эмиссии (их количество и поведение этих сигналов в зависимости от температуры и времени) позволяют идентифицировать дефекты в сотовой структуре типа «пчелиных сот» [1]. Другим проявлением дефектности в такой структуре может быть наличие влаги (воды). При отрицательных температурах вода в таких

структурах существует в виде кристаллов льда. Это приводит к дополнительным напряжениям в сотах. При повышении температуры эти кристаллики начинают таять (плавиться). Это приводит к снятию напряжений в сотах и может оказаться причиной возникновения сигналов акустической эмиссии, которые могут быть зарегистрированы. Таким образом, задачей этой работы являются регистрация и анализ сигналов акустической эмиссии, возникающих в процессе таяния льда в замкнутой структуре типа «пчелиных сот».

### 1. Методика и схема эксперимента

Замкнутая структура представляет собой сэндвич-панель, сотовый наполнитель которой состоит из полимерной бумаги (известной как арамидная) и сопряжён по нормали с угольным композитом (рис. 1). Бумага в процессе производства пропитывается составом на основе спирторастворимых фенолформальдегидных смол. Соты представляют собой шестигранные призмы высотой  $h = 28,5$  мм. Расстояние между центрами сот  $D = 5,2$  мм, ширина грани равна  $C = 3$  мм.



**Рис. 1 / Fig. 1.** Общий вид образца (а) и размеры сот (б) /  
The general view of the sample (a) and the dimensions of the honeycomb (б).

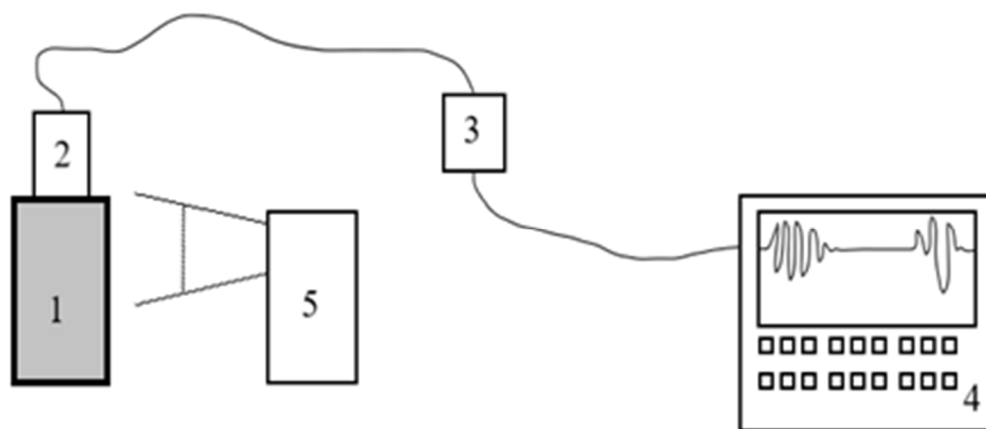
Источник: составлено авторами

В ходе экспериментов рассматривалось два типа образцов. Первый (далее образец «а», малые размеры) имеет размеры  $100 \times 53 \times 30$  мм<sup>3</sup>, а второй является большим по размерам (далее образец «б»):  $225 \times 95 \times 30$  мм<sup>3</sup>.

После изготовления образцов и проведения всего комплекса исследований на бездефектных образцах, в каждый из них было введено некоторое количество воды (в образец «а» – 2 мл, в образец «б» – 4 мл). Далее оба образца (типа «а» и

типа «b») помещались в морозильную камеру на 12 часов и охлаждались до температуры  $-10^{\circ}\text{C}$  для замерзания воды внутри каждого.

**Вид и схема** экспериментальной установки представлены на рис. 2.



**Рис. 2 / Fig. 2.** Блок-схема экспериментальной установки:

1 – экспериментальный образец, 2 – пьезоэлектрический преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ), 3 – предусилитель, 4 – комплекс акустико-эмиссионный измерительный, 5 – тепловизор / Block diagram of the experimental setup:

1 – experimental sample, 2 – piezoelectric acoustic emission converter (PAEC),  
3 – preamplifier, 4 – acoustic emission measuring complex, 5 – thermal imager

Источник: составлено авторами

После изъятия из морозильной камеры образцы помещаются в экспериментальную установку при комнатной температуре (рис. 2). В результате нагревания кристаллы льда в сотах претерпевают фазовый переход первого рода и переходят в жидкое состояние. При этом переходе напряжения кристаллов льда внутри сот падают, и это является источником дискретной акустической эмиссии [1; 2; 3]. Сигналы АЭ поступают на вход преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) (2), откуда сигнал идёт на вход предусилителя (3) и далее – на блок аналого-цифрового преобразователя системы детектирования и обработки (4). Параллельно с контролем акустической эмиссии в режиме реального времени обеспечивается контроль температуры образца с помощью тепловизора (5).

В процессе эксперимента использовались: низкочастотные пьезоэлектрические преобразователи акустической эмиссии GT-205, масляная контактная смазка для увеличения коэффициента прохождения акустических сигналов на границе «исследуемый образец – ПАЭ», предусилители ALP-01, комплекс акустико-эмиссионный измерительный “A-Line PCI-1”, тепловизор InfReC R550Pro-D.

С помощью тепловизора производилось измерение температурного поля с частотой 1 кадр в 5 секунд.

Эксперимент производился в двух режимах нагрева:

(1) свободная релаксация температуры к её комнатным значениям ( $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ), т. е. образцы, охлаждённые до температуры  $-10^{\circ}\text{C}$ , помещались в комнату, в которой поддерживалось постоянное значение температуры воздуха  $+25^{\circ}\text{C}$ ;

(2) принудительный нагрев экспериментальных образцов до комнатных значений температуры ( $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ).

## 2. Результаты экспериментов

Результаты экспериментов можно представить в двух частях.

**Первая** (2.1) часть рассматривает свободную релаксацию температуры образцов от отрицательных значений температуры до значений комнатной температуры.

**Вторая** (2.2) часть учитывает влияние принудительного режима нагрева.

Все эксперименты проводились на двухканальной системе регистрации сигналов. Это позволило обеспечить одинаковые температурные условия одновременно для двух разных образцов.

### 2.1. Свободная релаксация температуры образцов

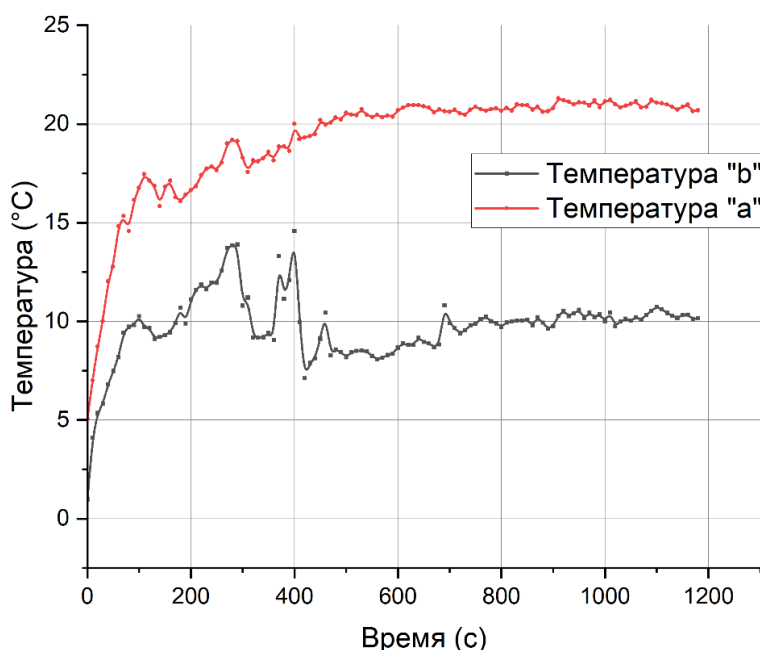
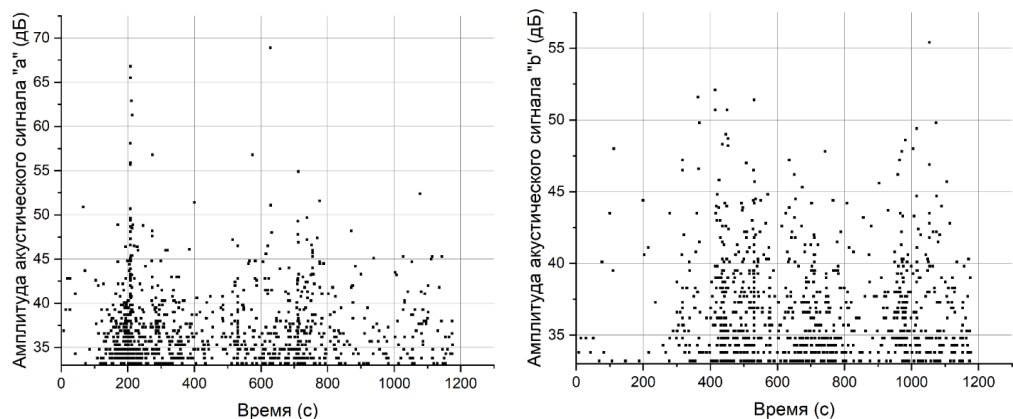


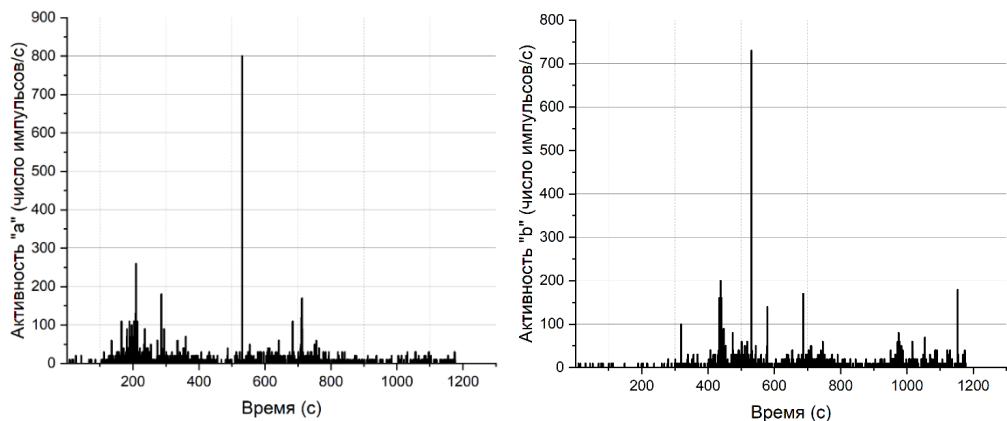
Рис. 3 / Fig. 3. Изменения температуры в режиме свободного нагрева / Temperature changes in the free heating mode.

Источник: составлено авторами



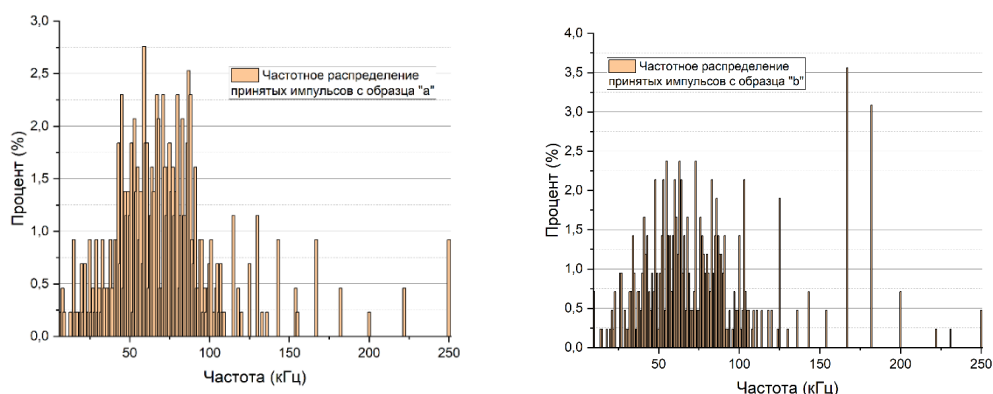
**Рис. 4 / Fig. 4.** Амплитуды пришедших на систему акустических импульсов с течением времени в условиях свободной релаксации к комнатным значениям температуры образцов («а» – малый образец, «б» – большой образец) / Amplitudes of acoustic pulses arriving at the system with time under conditions of free relaxation to room temperature values of samples («a» – small sample, «b» – large sample)

Источник: составлено авторами



**Рис. 5 / Fig. 5.** Активность сигналов акустической эмиссии в условиях свободной релаксации к комнатным значениям температуры образцов («а» – малый образец, «б» – большой образец) / Activity of acoustic emission signals under conditions of free relaxation to room temperature values of samples («a» – small sample, «b» – large sample)

Источник: составлено авторами



**Рис. 6 / Fig. 6.** Частотные распределения сигналов акустической эмиссии в условиях свободной релаксации к комнатным значениям температуры образцов («а» – малый образец, «b» – большой образец) / Frequency distributions of acoustic emission signals under conditions of free relaxation to room temperature values of samples («a» – small sample, «b» – large sample).

Источник: составлено авторами

**Свободная релаксация температуры образцов** представлена на рис. 3–6. Для малого образца основное скопление пришедших импульсов приходится на интервал времени 100÷400 с, а для большого образца скопление пришедших импульсов оказывается равномерно распределённым с 300 секунды вплоть до окончания эксперимента (1200 с). Этот интервал приходится на переход температуры в «насыщение» (рис. 3), когда значения температуры образца остаются практически неизменными. Малый образец «а» начинает активно излучать раньше большого образца «b».

**Амплитуды** пришедших на систему акустических импульсов с течением времени (рис. 4) в условиях свободной релаксации температуры к комнатным значениям проявляют несколько «кучностей», которые, в общем, не коррелируют с всплесками на зависимостях изменений температуры образцов (рис. 3).

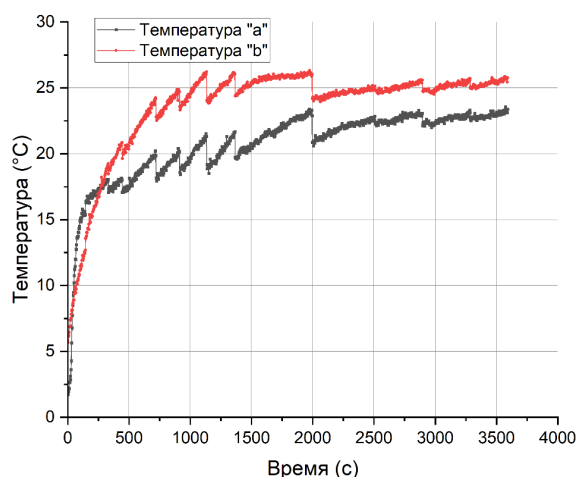
**Активность сигналов** (рис. 5) акустической эмиссии в условиях свободной релаксации к комнатным значениям температуры больших и малых образцов носит случайный характер.

**Частотные распределения сигналов.** Резонансная частота использовавшихся преобразователей GT-205 равна 55 кГц, при этом они демпфированы так, чтобы увеличить рабочую полосу частот (примерно от 40 до 120 кГц). На частотных распределениях сигналов для малых «а» и больших «b» образцов выявляется максимума амплитуд сигналов вблизи частоты 75 кГц (рис. 6). Это предполагает, что в процессе таяния льда в сложной замкнутой структуре типа «пчелиных сот» наиболее эффективно излучение ультразвуковых колебаний приходится на волны с частотами близкими 75 кГц. При этом на расположение максимума частотного распределения (рис. 6) не влияет

амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) использовавшихся пьезоэлектрических преобразователей, и нет зависимости от размера экспериментального образца. Кроме того, максимальная амплитуда импульсов на малом образце, «а» значительно превышает амплитуду импульсов на большом образце «b».

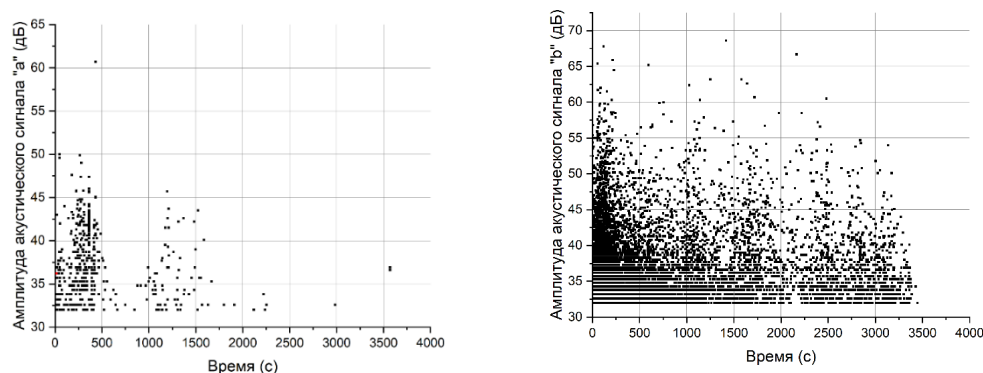
## 2.2. Принудительный нагрев образцов

Этот процесс характеризуется постоянным во времени потоком тепла, сообщаемым образцам. Этому процессу соответствуют рис. 7–10.



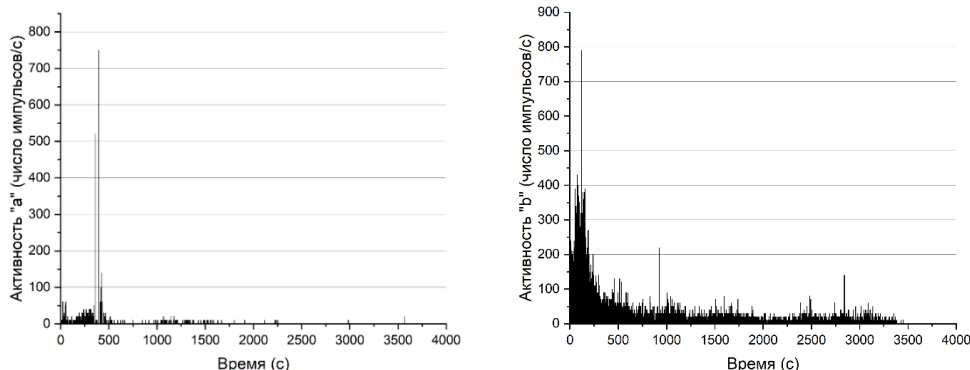
**Рис. 7 / Fig. 7.** Изменения температуры образцов в режиме принудительного нагрева / Temperature changes of samples in forced heating mode

Источник: составлено авторами



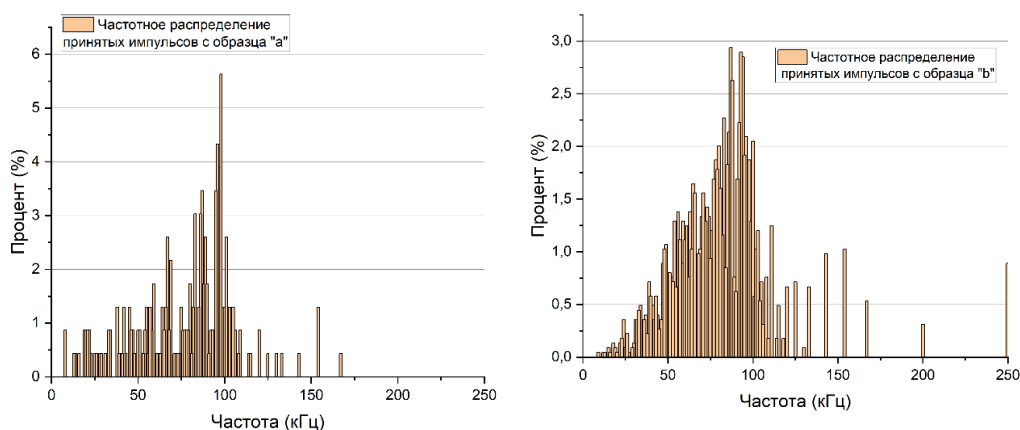
**Рис. 8 / Fig. 8.** Амплитуды пришедших на систему акустических импульсов с течением времени в условиях ускоренного нагрева образцов («а» – малый образец, «b» – большой образец) / Amplitudes of acoustic pulses coming to the system over time under conditions of accelerated heating of samples («а» – small sample, «b» – large sample)

Источник: составлено авторами



**Рис. 9 / Fig. 9.** Активность сигналов акустической эмиссии в условиях ускоренного нагрева образцов («а» – малый образец, «б» – большой образец) / Activity of acoustic emission signals under conditions of accelerated heating of samples («a» – small sample, «b» – large sample)

Источник: составлено авторами



**Рис. 10 / Fig. 10.** Частотные распределения сигналов акустической эмиссии в условиях ускоренного нагрева образцов («а» – малый образец, «б» – большой образец) / Frequency distributions of acoustic emission signals under conditions of accelerated heating of samples («a» – small sample, «b» – large sample)

Источник: составлено авторами

**Частотное распределение** сигналов для принудительного нагрева также обнаруживает максимум, но соответствующий частоте 95 кГц (рис. 10).

Следовательно, на частоту излучения импульсов акустической эмиссии, инициированной таянием льда внутри сотовой структуры, влияет скорость изменения температурного поля, а именно скорость нагрева.

**Активность сигналов** акустической эмиссии в условиях ускоренного нагрева образцов (рис. 9) теперь характеризуется чётким проявлением максимальных значений.

**Амплитуды** пришедших на систему акустических импульсов (рис. 8) с течением времени в условиях ускоренного нагрева образцов характеризуется большим количеством импульсов.

**Изменения температуры** образцов со временем (рис. 7) приобретают пилообразный характер. Такой пилообразный характер проявляется как для малых, так и для больших образцов.

### 3. Обсуждение результатов

Одним из важных результатов работы является выявление возможности обнаруживать дефекты сотовой структуры в виде влаги, содержащейся в сотах при вариациях температуры в интервале от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$ . Эксперименты показывают, что в этом температурном интервале дефекты замкнутой сотовой структуры в виде воды, заполняющей соты, хорошо проявляются.

В заданном интервале температур, влага в виде льда претерпевает фазовый переход «твёрдое тело – жидкость» при нормальном давлении в тройной точке при  $0^{\circ}\text{C}$ . И в этом случае в окрестности этой точки можно было ожидать определённой активности в акустической эмиссии в том виде, как это наблюдали при таянии льда [5]. Однако вся акустическая активность при вариациях температуры во времени начала проявляться при гораздо более высоких температурах, рис. 3 и рис. 7. Более того, при свободной релаксации температуры образцов (рис. 7) температура большого образца так и не достигла комнатных значений температуры, хотя и вышла в режим «насыщения», когда температура образца установилась и практически не менялась. Такая ситуация предполагает, что кристаллы льда в сотах остаются ещё неопределённо долгое время и температура, которая при этом измеряется на внешней части замкнутой сотовой структуры, не соответствует равновесной температуре превращения «кристалл льда – вода».

Совсем другая ситуация возникает при принудительном нагревании образцов. В этом случае в образцы всегда подаётся постоянно одно и то же количество теплоты. Картина изменения температуры со временем (рис. 7) и все остальные характеристики процесса, происходящего в сотах замкнутой системы (рис. 7–10), полностью отличаются от аналогичных характеристик для свободной релаксации температуры образцов (рис. 3–6). Зависимость температуры от времени приобретает пилообразный характер изменения как на больших образцах, так и на малых образцах. Такая пилообразность, по-видимому, связана с тем, что фазовый переход «кристалл – жидкость», во-первых, носит локальный характер. Это значит, что в таком переходе участвует определённое количество вещества в соте, а не все кристаллики льда в соте сразу. А во-вторых, пока всё кристаллическое состояние в соте не перейдёт в жидкое

состояние, в других, соседних, сотах переход кристаллов в жидкое состояние не завершится.

*Статья поступила в редакцию 16.10.2023 г.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Асеев Е. М., Калашников Е. В. Влияние дефектности сотовой структуры в системе «сотовая матрица – композит» на акустическую эмиссию в изменяющемся температурном поле // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2022. № 2. С. 17–27. DOI:10.18384/2310-7251-2022-2-17-27.
2. Бехер С. А., Бобров А. Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии. Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2013. 145 с.
3. Буйло С. И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. 184 с.
4. Кузнецов Д. М., Смирнов А. Н., Сыроешкин А. В. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях в водной среде // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. № 1. С. 114–121.
5. Acoustic Emission / Aggelis D. G., Sause M. G. R., Packo P., Pullin R., Grigg S., Kek T., Lai Y.-K. // Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace / eds. M. G. R. Sause, E. Jasiūnienė. Cham, Switzerland: Springer Aerospace Technology, 2022. P. 175–218. DOI: 10.1007/978-3-030-72192-3\_7.
6. Dislocation unpinning model of acoustic emission from alkali halide crystals / Chandra B. P., Gour A. S., Chandra V. K., Patil Y. // Pramana. Journal of Physics. 2004. Vol. 62. Iss. 6. P. 1281–1292. DOI: 10.1007/BF02704440.
7. Defect Types / Faisal N., Cora Ö. N., Bekci M. L., Śliwa R. E., Sternberg Y., Pant S., Degenhardt R., Prathuru A. // Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace / eds. M. G. R. Sause, E. Jasiūnienė. Cham, Switzerland: Springer Aerospace Technology, 2022. P. 15–42. DOI: 10.1007/978-3-030-72192-3\_3.
8. Kuba M. M., Van Aken D. C. Analysis of acoustic emission during the melting of embedded Indium particles in an aluminum matrix: a study of plastic strain accommodation during phase transformation (presented at Symposium: Atomistic Effects in Migrating Interphase Interfaces: Recent Progress and Future Study. 2012) // Metallurgical and Materials Transactions A. 2013. Vol. 44. Iss. 8. P. 3444–3455. DOI: 10.1007/s11661-012-1468-y.
9. Laschimkea R., Burgera M., Vallen H. Acoustic emission analysis and experiments with physical model systems reveal a peculiar nature of the xylem tension // Journal of Plant Physiology. 2006. Vol. 163. Iss. 10. P. 996–1007. DOI: 10.1016/j.jplph.2006.05.004.
10. Ultrasonic Methods / Samaitis V., Jasiūnienė E., Packo P., Smagulova D. // Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace / eds. M. G. R. Sause, E. Jasiūnienė. Cham, Switzerland: Springer Aerospace Technology, 2022. P. 87–132. DOI: 10.1007/978-3-030-72192-3\_5.

## REFERENCES

1. Aseev E. M., Kalashnikov E. V. [The effect of defects on the structure in the form of honeycombs in the “honeycomb – composite matrix” system on acoustic emission in a

- changing temperature field]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2022, no. 2, pp. 17–27. DOI: 10.18384/2310-7251-2022-2-17-27.
2. Bekher S. A., Bobrov A. L. *Osnovy nerazrushayushchego kontrolya metodom akusticheskoy emissii* [Fundamentals of non-destructive testing using the acoustic emission method]. Novosibirsk, Siberian Transport University Publ., 2013. 145 p.
  3. Buylo S. I. *Fiziko-mekhanicheskiye, statisticheskiye i khimicheskiye aspekty akustiko-emissionnoy diagnostiki* [Physico-mechanical, statistical and chemical aspects of acoustic emission diagnostics]. Taganrog, Southern Federal University Publ., 2017. 184 p.
  4. Kuznetsov D. M., Smirnov A. N., Syroyeshkin A. V. [Acoustic emission during phase transformations in an aqueous environment]. In: *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Journal of General Chemistry], 2008, vol. 52, no. 1, pp. 114–121.
  5. Aggelis D. G., Sause M. G. R., Packo P., Pullin R., Grigg S., Kek T., Lai Y.-K. Acoustic Emission. In: Sause M. G. R., Jasiūnienė E., eds. *Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace*. Cham, Switzerland, Springer Aerospace Technology, 2022, pp. 175–218. DOI: 10.1007/978-3-030-72192-3\_7.
  6. Chandra B. P., Gour A. S., Chandra V. K., Patil Y. Dislocation unpinning model of acoustic emission from alkali halide crystals. In: *Pramana. Journal of Physics*, 2004, vol. 62, iss. 6, pp. 1281–1292. DOI: 10.1007/BF02704440.
  7. Faisal N., Cora Ö. N., Bekci M. L., Śliwa R. E., Sternberg Y., Pant S., Degenhardt R., Prathuru A. Defect Types. In: Sause M. G. R., Jasiūnienė E., eds. *Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace*. Cham, Switzerland, Springer Aerospace Technology, 2022, pp. 15–42. DOI: 10.1007/978-3-030-72192-3\_3.
  8. Kuba M. M., Van Aken D. C. Analysis of acoustic emission during the melting of embedded Indium particles in an aluminum matrix: a study of plastic strain accommodation during phase transformation (presented at Symposium: Atomistic Effects in Migrating Interphase Interfaces: Recent Progress and Future Study. 2012). In: *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, vol. 44, iss. 8, pp. 3444–3455. DOI: 10.1007/s11661-012-1468-y.
  9. Laschimkea R., Burgera M., Vallen H. Acoustic emission analysis and experiments with physical model systems reveal a peculiar nature of the xylem tension. In: *Journal of Plant Physiology*, 2006, vol. 163, iss. 10, pp. 996–1007. DOI: 10.1016/j.jplph.2006.05.004.
  10. Samaitis V., Jasiūnienė E., Packo P., Smagulova D. Ultrasonic Methods. In: Sause M. G. R., Jasiūnienė E., eds. *Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace*. Cham, Switzerland, Springer Aerospace Technology, 2022, pp. 87–132. DOI: 10.1007/978-3-030-72192-3\_5.

---

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Асеев Евгений Михайлович – аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологий Государственного университета просвещения;  
e-mail: aseevgenij@yandex.ru

Калашиников Евгений Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики и информационных технологий Государственного университета просвещения;  
e-mail: ekevkalashnikov1@gmail.com

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Evgeniy M. Aseev* – Postgraduate Student, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education;  
e-mail: aseevgenij@yandex.ru

*Evgeniy V. Kalashnikov* – Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Department of Computational Mathematics and Information Technology, Federal State University of Education;  
e-mail: ekevkashnikov1@gmail.com

---

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Асеев Е. М., Калашников Е. В. Акустическая эмиссия в закрытой сотовой системе, содержащей влагу // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2023. № 4. С. 6–18.

DOI: 10.18384/2949-5067-2023-4-6-18

### FOR CITATION

Aseev E. M., Kalashnikov E. V. Acoustic emission in a closed honeycomb system containing moisture. In: *Bulletin of Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2023, no. 4, pp. 6–18.

DOI: 10.18384/2949-5067-2023-4-6-18