

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННОЙ СТРУИ ГАЗА С СЫПУЧИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Д. М. Мордасов<sup>1</sup>, М. М. Мордасов<sup>2</sup>,  
А. В. Фирсова<sup>1</sup>, М. Д. Мордасов<sup>1</sup>

*Кафедры: «Материалы и технология» (1); «Мехатроника и технологические измерения» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; e-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru*

**Ключевые слова:** акустическая модуляция; отражающая поверхность; плотность; порозность; стоячая волна; струйная акустика; сыпучий материал.

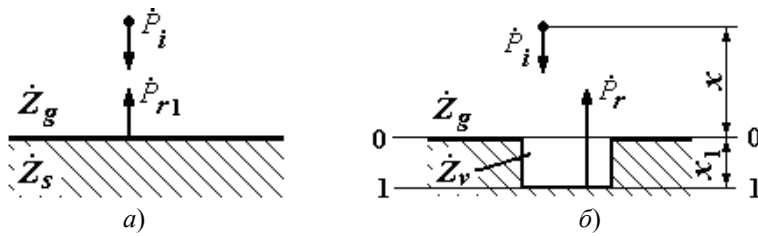
**Аннотация:** Изучена физика процессов взаимодействия акустически модулированной струи газа с сыпучими материалами. Показано, что взаимодействие струйно-акустического сигнала с сыпучим материалом сопровождается полным его отражением с формированием в пространстве между генератором и нагрузкой режима стоячих волн. Приведено математическое описание физических эффектов, выявлены механизмы влияния высоты слоя сыпучего материала, его гранулометрического состава и скорости перемещения на происходящие процессы. Представлены результаты экспериментальных исследований, которые позволяют расширить знания в области взаимодействия низкочастотных акустических колебаний с гетерогенными материалами и могут быть положены в основу принципиально новых методов и устройств контроля их физико-механических свойств.

---

Струи газа после прохождения через однодиафрагмовый звукообразующий элемент [1], являющийся генератором акустических колебаний, становятся акустически модулированными и приобретают ряд особенностей, проявляющихся при взаимодействии с различными материалами. Малоизученным до настоящего времени является взаимодействие таких струй с веществами, представляющими собой гетерогенные системы, состоящие из твердой и газовой фаз.

Пространство, образованное акустически модулированной затопленной струей газа, поступающей от генератора к нагрузке (отражающей поверхности), представляет собой однородную струйно-акустическую длинную линию. Согласно теории цепей с распределенными параметрами [2], линия считается длинной, если ее длина превышает 0,1 длины волны  $\lambda$  распространяющихся в ней колебаний. Рассмотрим струйно-акустическую длинную линию с нагрузкой в виде слоя сыпучего материала (СМ) высотой  $h_{bm}$ , средний диаметр частиц которого значительно меньше длины волны  $\lambda$  распространяющихся в линии колебаний звуковой частоты. При изучении процессов, происходящих в такой линии, учитывая неоднородность нагрузки, целесообразно рассматривать твердую и газовую фазы СМ раздельно с последующим объединением полученных результатов.

Представим твердую фазу СМ в виде монолита, от которого происходит отражение падающей волны (рис. 1, а), а газовую фазу, заполняющую пространство между частицами – в виде акустической емкости (рис. 1, б) с приведенной высотой  $x_1$ .



**Рис. 1. Модельное представление сыпучего материала:**

*a* – твердая фаза как сплошное вещество; *б* – газовая фаза как акустическая емкость

При взаимодействии струйно-акустического сигнала с твердой плоской поверхностью (см. рис. 1, *a*), волновое сопротивление  $\dot{Z}_s$  которой ( $\dot{Z}_s = \rho_s c_s$ , где  $\rho_s$ ,  $c_s$  – плотность вещества образующего поверхность и скорость звука в нем соответственно) значительно превышает волновое сопротивление среды  $\dot{Z}_g$  (воздуха), в которой распространяется звуковая волна  $\dot{P}_i$ , перенос энергии в нагрузку отсутствует, и звуковая волна полностью отражается от нее (формируется волна  $\dot{P}_{r1}$ ). Амплитуды звуковых давлений в падающей ( $\dot{P}_{mi}$ ) и отраженной ( $\dot{P}_{mr1}$ ) волнах равны, а распределение амплитуд звукового давления в линии в режиме стоячих волн (рис. 2, *a*) будет определяться выражением [3]

$$|\dot{P}_{ms}(x)| = 2|\dot{P}_{mi}| \cos(kx - \varphi), \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\varphi$  – фаза комплексного коэффициента отражения, зависящая от свойств нагрузки.

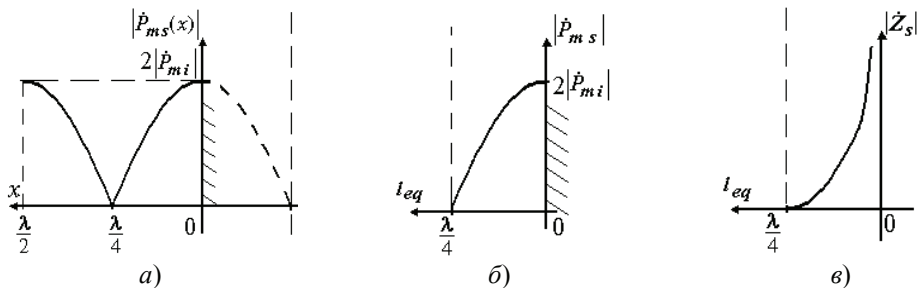
Уравнение (1) с учетом  $\varphi = \pi\sigma/2$  запишем в виде

$$|\dot{P}_{ms}(x)| = 2|\dot{P}_{mi}| \cos\left[k\left(x - \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\pi\sigma}{2}\right)\right],$$

или

$$|\dot{P}_{ms}(x)| = 2|\dot{P}_{mi}| \cos[k(x - l_{eq})], \quad (2)$$

где  $\sigma$  – скачок фазы комплексного коэффициента отражения;  $l_{eq} = \frac{\lambda}{4}\sigma$  – изменение длины струйно-акустической линии, эквивалентное внесенной нагрузке. Скачок фазы  $\sigma$  определяется числом четвертей длины акустической волны  $\lambda$ , на которое смещается ближайший экстремум стоячей волны относительно его положения перед твердой отражающей поверхностью, когда  $\sigma = 0$ .



**Рис. 2. Распределение амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн (а), амплитуд звукового давления на нагрузке (б) и зависимость длины эквивалентного отрезка  $l_{eq}$  от сопротивления нагрузки в виде однородной твердой плоской поверхности (в)**

Акустический импеданс твердой плоской поверхности  $\dot{Z}_s = \frac{\dot{P}_{m s}}{\dot{V}_{m s}}$ , где  $\dot{P}_{m s}$

и  $\dot{V}_{m s}$  – комплексные амплитуды давления и скорости частиц на нагрузке соответственно, с учетом того, что в режиме стоячих волн на отражающей поверхности (при  $x = 0$ ) скорость отстает по фазе от звукового давления на  $\pi/2$ , представим в виде

$$\dot{Z}_s = \dot{Z}_g \operatorname{ctg}(kl_{eq}). \quad (3)$$

На рисунке 2, в показана зависимость длины отрезка  $l_{eq}$  от сопротивления нагрузки в виде однородной твердой плоской поверхности. При взаимодействии акустически-модулированной струи газа с нагрузкой в виде акустической емкости (см. рис. 1, б), газ проникает внутрь нагрузки и заполняет емкость. В силу того, что отсутствует поглощение энергии, происходит полное отражение акустического сигнала, при этом в линии устанавливается режим стоячих волн.

Акустический импеданс  $\dot{Z}_v$  акустической емкости (см. рис. 1, б), является функцией ее линейного размера, в отличие от импеданса линии с нагрузкой в виде твердой поверхности, который на низких частотах является функцией физических свойств вещества поверхности.

При анализе и описании происходящих процессов примем следующие допущения:

- струйно-акустическая длинная линия однородная и без потерь;
- отрезок струйно-акустической длинной линии, в котором распространяется звуковая волна, ограничен генератором с одной стороны и плоскостью 0–0 – с другой, а его длина определяется координатой  $x$ ;
- эффективное отражение звуковой волны происходит от поверхности, расположенной в плоскости 1–1, отстоящей от плоскости 0–0 на расстоянии  $x_1$ ;
- расстояние  $x_1$  от плоскости 0–0 до плоскости 1–1 определяет величину акустической емкости и является свойством нагрузки;
- стенки акустической емкости абсолютно жесткие;
- в установившемся режиме параметры изменяются во времени по периодическому закону с угловой частотой  $\omega$ .

В комплексной форме выражения для звуковых давлений, действующих в рассматриваемой струйно-акустической системе (см. рис. 1, б), будут иметь вид

$$\begin{cases} \dot{P}_i = \dot{P}_{m i} \exp(j(\omega t + k(x + x_1))), \\ \dot{P}_r = -\dot{P}_{m r} \exp(j(\omega t - k(x + x_1))), \end{cases}$$

где  $\dot{P}_i$ ,  $\dot{P}_r$  – пространственно-временное распределение комплексных давлений в падающей и отраженной от плоскости 1–1 волне соответственно;  $\dot{P}_{m i}$ ,  $\dot{P}_{m r}$  – комплексные амплитуды давлений  $\dot{P}_i$ ,  $\dot{P}_r$  соответственно;  $t$  – время.

Звуковое давление, возникающее в результате интерференции падающей и отраженной волн в струйно-акустической линии относительно плоскости 0–0 (см. рис. 1, б) определим выражением

$$\dot{P} = |\dot{P}_{m i}| \exp(j(\omega t + k(x + x_1))) - |\dot{P}_{m r}| \exp(j(\omega t - k(x + x_1)))$$

или с учетом того, что  $|\dot{P}_{m i}| = |\dot{P}_{m r}|$  при отражении от абсолютно жесткой поверхности 1–1,

$$\dot{P} = 2j|\dot{P}_{m i}| \sin[k(x + x_1)] \exp(j\omega t). \quad (4)$$

Распределение амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн из (4) запишем в виде

$$|\dot{P}_{mv}(x)| = 2|\dot{P}_{mi}| |\sin[k(x+x_1)]|. \quad (5)$$

Величина  $x_1$  в уравнении (5) представляет собой изменение длины струйно-акустической линии, эквивалентное внесенной нагрузке.

В режиме стоячих волн на отражающей поверхности ( $x = 0$ ) скорость отстает по фазе от звукового давления на  $\pi/2$ , поэтому акустический импеданс нагрузки  $\dot{Z}_v$  в виде акустической емкости определим как

$$\dot{Z}_v = \dot{Z}_g \operatorname{tg}(kx_1), \quad (6)$$

где  $\dot{Z}_g$  – акустический импеданс среды (воздуха), в которой распространяется звуковая волна.

На рисунке 3, а показана зависимость длины эквивалентного отрезка  $x_1$  от сопротивления нагрузки в виде акустической емкости и соответствующие ей распределения амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн (рис. 3, а) и амплитуд звукового давления на нагрузке (рис. 3, б). Как видно из рис. 3, в, увеличение высоты акустической емкости приводит к увеличению сопротивления такой нагрузки  $|\dot{Z}_v|$  и амплитуды звукового давления на ней.

При помещении на пути распространения звуковой волны нагрузки в виде акустической емкости, длина линии уменьшается на величину, численно равную высоте образованной акустической емкости.

Используем выражения для акустических импедансов твердой плоской поверхности (3) и нагрузки в виде акустической емкости (6).

Акустически модулированная струя газа поступает от генератора к поверхности СМ, взаимодействует с его частицами и одновременно проникает внутрь слоя, то есть происходит заполнение акустической емкости. Акустический импеданс слоя СМ, учитывая параллельность соединения сопротивлений твердой поверхности и акустической емкости, будет определяться уравнением

$$\dot{Z}_{bm} = \frac{\dot{Z}_v \dot{Z}_s}{\dot{Z}_v + \dot{Z}_s}. \quad (7)$$

Подстановка (3) и (6) в (7) для акустического импеданса СМ дает выражение

$$\dot{Z}_{bm} = \dot{Z}_g \left( \frac{1}{\operatorname{tg}(kx_1)} + \frac{1}{\operatorname{ctg}(kl_{eq})} \right)^{-1}. \quad (8)$$

В общем случае акустический импеданс определяется формулой [3]

$$\dot{Z} = \dot{Z}_b \operatorname{ctg} \psi, \quad (9)$$

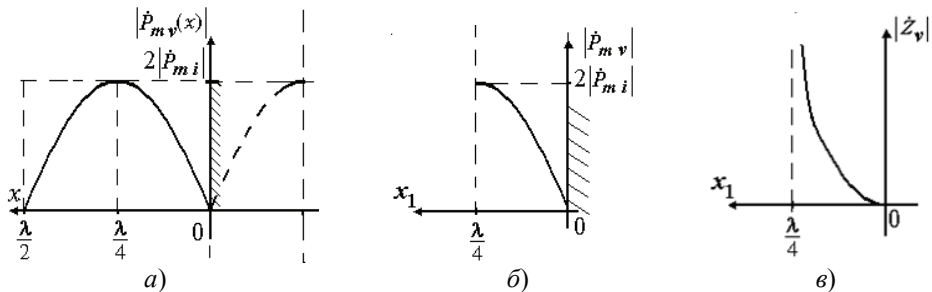


Рис. 3. Распределение амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн (а), амплитуда звукового давления на нагрузке (б) и зависимость длины эквивалентного отрезка  $x_1$  от сопротивления нагрузки в виде акустической емкости (в)

где  $\psi$  – комплексная функция, мнимая часть которой определяет коэффициент поглощения, а действительная представляет собой скачок фазы при отражении.

Так как рассматриваемая струйно-акустическая длинная линия является линией без потерь, то поглощение энергии отсутствует, а фазовые изменения вызваны отражением от нагрузок с соответствующими свойствами

– в случае отражения от твердой плоской поверхности:

$$\operatorname{Im}\{\dot{\psi}\} = 0; \quad \operatorname{Re}\{\dot{\psi}\} = kl_{eq}, \quad (10)$$

– при отражении от нагрузки в виде акустической емкости:

$$\operatorname{Im}\{\dot{\psi}\} = 0; \quad \operatorname{Re}\{\dot{\psi}\} = k\left(\frac{\lambda}{4} - x_1\right). \quad (11)$$

В зависимости от преобладания той или иной реактивной составляющей, характер сопротивления нагрузки в виде СМ может носить либо индуктивный, либо емкостной характер. Привести формулу (8) к виду (9) путем аналитических преобразований не представляется возможным, поэтому для нахождения изменения фазы коэффициента отражения, при взаимодействии волны струйно-акустического сигнала с нагрузкой в виде СМ, воспользуемся графическим методом сложения векторов комплексных коэффициентов отражения от однородной твердой плоской поверхности ( $\dot{R}_s$ ) и от акустической емкости ( $\dot{R}_v$ ). С учетом фазовых изменений  $\dot{\psi}$ , согласно (10) и (11), комплексные коэффициенты отражения запишем в виде

$$\dot{R}_v = |\dot{R}_v| \exp\left(jk\left(\frac{\lambda}{4} - x_1\right)\right); \quad \dot{R}_s = |\dot{R}_s| \exp(jkl_{eq}).$$

Модули коэффициентов отражения  $|\dot{R}_v|$  и  $|\dot{R}_s|$  в приведенных выше уравнениях равны единице и в комплексной плоскости описывают окружность с центром в начале координат и радиусом, равным 1 (рис. 4, а).

Для определения фазового сдвига  $k\Delta x$  проведем параллельный перенос вектора  $\dot{R}_v$ , так чтобы его начало совпадало с концом вектора  $\dot{R}_s$  (рис. 4, б). В соответствии с правилом «треугольника» искомый вектор задается построением из начала вектора  $\dot{R}_s$ , при этом конец вектора суммы совпадает с концом вектора  $\dot{R}_v$ .

Получим равнобедренный треугольник с углами при основании  $k(l_{eq} - \Delta x)$  и углом, противолежащим основанию  $k\left(\frac{3\lambda}{4} - l_{eq} - x_1\right)$ . С учетом равенства их суммы  $180^\circ$ , для изменения фазы результирующего распределения имеем

$$k\Delta x = \frac{k\left(l_{eq} - x_1 + \frac{\lambda}{4}\right)}{2},$$

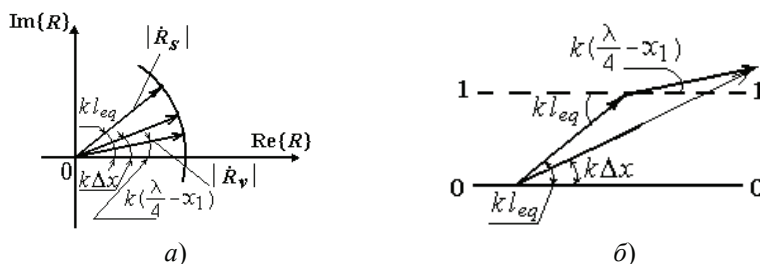


Рис. 4. Графическое определение фазового сдвига  $k\Delta x$ :

а – модули коэффициентов отражения в комплексной плоскости; б – сложение векторов

откуда

$$\Delta x = \frac{l_{eq} - x_1 + \frac{\lambda}{4}}{2}. \quad (12)$$

Величина  $\Delta x$  в формуле (12) – изменение длины струйно-акустической длинной линии, эквивалентное нагрузке в виде СМ, акустический импеданс твердой фазы которого эквивалентен сопротивлению отрезка длиной  $l_{eq}$ , а количество газовой фазы эквивалентно отрезку  $x_1$ .

Учитывая, что концентрация газовой фазы (порозность)  $\varepsilon_0$  в слое СМ

$$\varepsilon_0 = \frac{V_g}{V_{bm}} = \frac{Sx_1}{Sh_{bm}} = \frac{x_1}{h_{bm}},$$

где  $V_g$  – объем газовой фазы в слое СМ;  $V_{bm}$  – объем, занимаемый СМ. Приведенная высота  $x_1$ , при постоянстве сечения  $S$  акустической емкости, полностью заполненной СМ, будет равна

$$x_1 = \varepsilon_0 h_{bm}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (12) для  $\varepsilon_0$ , получим

$$\varepsilon_0 = \frac{l_{eq} + \frac{\lambda}{4} - 2\Delta x}{h_{bm}}. \quad (14)$$

С учетом того, что акустический импеданс твердой фазы СМ велик, чему соответствует  $l_{eq} \approx 0$ , зависимость (14) примет вид

$$\varepsilon_0 = \frac{\frac{\lambda}{4} - 2\Delta x}{h_{bm}}. \quad (15)$$

Уравнение (15) устанавливает зависимость изменения длины струйно-акустической длинной линии от свойств отражающей поверхности в виде слоя СМ. В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность полученной зависимости, полученные в соответствии со следующей методикой:

Таблица 1

**Результаты экспериментальной проверки влияния концентрации газовой фазы в слое СМ на положение узла стоячей акустической волны**

$d_p, 10^{-3}$ м	$\varepsilon_{0m}$	$\Delta x_i, 10^{-3}$ м	$\overline{\Delta x} \pm \Delta, 10^{-3}$ м	$\varepsilon_{0x}$	$\delta, \%$
2,3	0,421	9,9; 9,4; 9,6; 9,3; 10,0; 9,5; 9,8	$9,7 \pm 0,3$	0,408	3,1
3,5	0,517	8,0 7,9 8,4 8,3 8,5 8,4 7,8	$8,2 \pm 0,3$	0,500	3,3
4,2	0,561	7,5 7,4 7,3 7,7 7,5 7,7 7,3	$7,5 \pm 0,2$	0,542	3,4
5,3	0,617	6,8 6,7 6,8 6,5 6,4 6,5 6,9	$6,7 \pm 0,2$	0,591	4,2
6,0	0,697	5,5 5,3 5,4 5,7 5,3 5,7 5,6	$5,5 \pm 0,2$	0,664	4,8

Примечание:  $d_p$  – диаметр частиц СМ;  $\varepsilon_{0m}$  – концентрация газовой фазы, измеренная методом жидкостной волюмометрии;  $\Delta x_i$  – экспериментальные данные;  $\varepsilon_{0x}$  – концентрация газовой фазы, вычисленная с использованием экспериментальных данных по формуле (15);  $\overline{\Delta x}, \Delta$  – математическое ожидание и абсолютная погрешность измерения расстояния  $\Delta x$  соответственно;  $\delta = (|\varepsilon_{0m} - \varepsilon_{0x}| / \varepsilon_{0m}) 100 \%$  – относительная погрешность определения концентрации газовой фазы.

- емкость высотой  $h_{bm}$  заполняют сыпучим материалом;
- генератор струйно-акустических колебаний размещают над поверхностью СМ на расстоянии  $\lambda/2$  от нее;
- сжатый воздух с заданными параметрами подают на вход струйно-акустического генератора;
- изменяя расстояние до СМ перемещением струйно-акустического генератора, осуществляют поиск узла стоячей волны;
- в момент достижения нулевого значения в распределении амплитуд звукового давления в струйно-акустической длинной линии фиксируют положение струйно-акустического генератора, измеряют расстояние от генератора до поверхности сыпучего материала, по которому определяют величину  $\Delta x$  смещения узла стоячей волны относительно его положения в случае идеальной нагрузки (на расстоянии  $\lambda/4$ ).

При проведении экспериментальных исследований в качестве нагрузки струйно-акустической длинной линии использована свинцовая дробь разного диаметра, концентрация газовой фазы  $\varepsilon_{0m}$  измерялась методом жидкостной волнометрии [4]. Длина волны звуковых колебаний в ходе эксперимента составляла  $\lambda = (0,132 \pm 0,002)$  м, высота слоя СМ –  $h_{bm} = \lambda/4 = (33,0 \pm 0,5)$  мм.

Рассмотрим влияние на происходящие процессы высоты слоя СМ, гранулометрического состава и скорости перемещения СМ. При проникновении звуковой волны внутрь слоя СМ возможны фазовые изменения при отражении от материала, находящегося после него (в нашем случае от дна емкости). Влияние высоты слоя сыпучего материала на происходящие процессы рассмотрим с позиций проникновения волны через промежуточный слой [5].

Плоская волна, распространяющаяся в среде с сопротивлением  $\dot{Z}_g$ , падает по нормали на границу промежуточного слоя высотой  $h_{bm}$ , представляющего собой СМ с импедансом  $\dot{Z}_{bm}$ , за которым находится третий слой с импедансом  $\dot{Z}_3$  (рис. 5).

Запишем пространственно-временные распределения действующих в струйно-акустической системе давлений в волне (см. рис. 5):

- падающей от генератора на СМ

$$\dot{P}_i = |\dot{P}_{mi}| \exp(j(\omega t + kx));$$

- отраженной от нагрузки в виде СМ

$$\dot{P}_r = |\dot{P}_{mr}| \exp(j(\omega t - kx));$$

- прошедшей внутрь слоя СМ

$$\dot{P}'_i = |\dot{P}'_{mi}| \exp(j(\omega t - kx'));$$

- отраженной от границы раздела СМ и слоя с сопротивлением  $\dot{Z}_3$

$$\dot{P}'_r = |\dot{P}'_{mr}| \exp(j(\omega t + kx')),$$

где  $x$  и  $x'$  – текущие координаты, определяющие положение волнового фронта при распространении акустических колебаний в средах 1 и 2 соответственно.

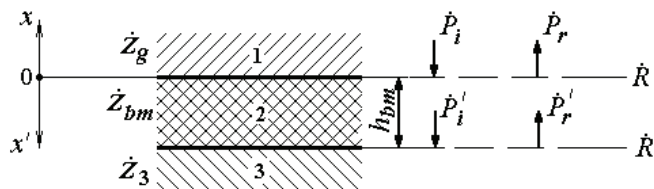


Рис. 5. Проникновение волны через промежуточный слой

Коэффициент отражения на границе раздела 1 и 2 слоев (см. рис. 5) определим в виде

$$\dot{R} = \frac{\dot{P}_r}{\dot{P}_i} = \left| \frac{\dot{P}_{mr}}{\dot{P}_{mi}} \right| \exp(-2jkx) = |\dot{R}| \exp(-2jkx), \quad (16)$$

на границе раздела 2 и 3 слоев

$$\dot{R}' = \frac{\dot{P}'_r}{\dot{P}'_i} = \left| \frac{\dot{P}'_{mr}}{\dot{P}'_{mi}} \right| \exp(2jkx') = |\dot{R}'| \exp(2jkx'). \quad (17)$$

Рассматриваемая струйно-акустическая длинная линия, в силу специфики происходящих физических процессов, является линией без потерь, поэтому модули коэффициентов отражения в уравнениях (16) и (17) равны единице.

При  $x' = h_{bm} = n \frac{\lambda}{4}$ , где  $n = 1, 2, \dots, N$ , фаза коэффициента отражения  $\dot{R}'$  равна нулю, то есть третий слой не оказывает влияние на фазовые изменения в волне, отраженной от поверхности СМ.

Сыпучие материалы часто бывают составлены из частиц различных размеров и разной формы. В отличие от слоя, состоящего из сферических частиц одинакового размера, сыпучий материал, составленный из различных частиц, может иметь разную величину концентрации газовой фазы в зависимости от его гранулометрического состава.

Для оценки влияния гранулометрического состава СМ на состояние струйно-акустической длинной линии проведены экспериментальные исследования материалов, состав которых приведен в табл. 2.

Сыпучий материал размещался в емкости, высота и диаметр которой составляли четверть длины волны акустического сигнала, генерируемого струйно-акустическим измерительным преобразователем. В таблице 3 приведены результаты экспериментальных исследований влияния гранулометрического состава СМ на величину смещения узла стоячей волны. Анализ результатов табл. 3 показывает, что СМ, различающиеся по гранулометрическому составу, но сходные по величине концентрации газовой фазы, ведут себя идентично в качестве нагрузок струйно-акустической длинной линии, при этом фазовые изменения близки по своему значению.

Влияние скорости перемещения СМ на состояние струйно-акустической длинной линии оценим с позиций геометрической акустики.

Таблица 2

### Гранулометрический состав сыпучих материалов

Сыпучий материал: № смеси	Концентрация $C$ , %		
	$d_1 = 2,3$ мм	$d_2 = 4,2$ мм	$d_3 = 6,0$ мм
1	54,8	14,7	30,5
2	37,9	49,7	12,4
3	9,1	39,9	51,0
4	20,0	0	80,0
5	80,0	0	20,0

Примечание:  $C = \frac{m_{di}}{m_{bm}} 100\%$  – массовая концентрация частиц диаметра  $d_i$  в слое СМ;  $m_{di}$  – масса частиц диаметра  $d_i$ ;  $m_{bm}$  – масса СМ.



**Результаты экспериментальных исследований влияния  
гранулометрического состава СМ на величину смещения узла стоячей волны**

Сыпучий материал: № смеси (табл. 2)	$\varepsilon_{0m}$	$\overline{\Delta x} \pm \Delta, 10^{-3} \text{ м}$	$\varepsilon_{0x}$	$\delta, \%$
1	0,570	$7,3 \pm 0,3$	0,555	2,6
2	0,627	$6,5 \pm 0,3$	0,603	3,9
3	0,663	$5,8 \pm 0,2$	0,646	2,5
4	0,527	$7,9 \pm 0,4$	0,518	1,8
5	0,536	$7,8 \pm 0,3$	0,524	2,3

Импеданс движущейся среды зависит от скорости ее движения и определяется, согласно [6], выражением

$$\dot{Z}_V = \frac{\dot{Z}_0}{\sin \phi \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \phi \right)}, \quad (18)$$

где  $\dot{Z}_0$  – импеданс неподвижной среды;  $\phi$  – угол скольжения (угол между векторами скорости  $v$  движения среды и скорости  $c$  падающей звуковой волны).

Применительно к нагрузке в виде СМ выражение (18) запишем

$$\dot{Z}_V = \frac{\dot{Z}_{bm}}{\sin \phi \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \phi \right)}. \quad (19)$$

При движении СМ в направлении, перпендикулярном направлению распространения звуковой волны, угол  $\phi = 90^\circ$ , а выражение (19) преобразуется в равенство

$$\dot{Z}_V = \dot{Z}_{bm},$$

откуда видно, что импеданс движущегося СМ равен импедансу неподвижного, следовательно, скорость движения слоя СМ при нормальном воздействии на него струйно-акустическим сигналом не влияет на состояние струйно-акустической длинной линии.

Таким образом, в результате исследований показано, что взаимодействие струйно-акустического сигнала с СМ сопровождается полным его отражением с формированием в пространстве между генератором и нагрузкой режима стоячих волн. Происходит изменение положения экстремальных точек в распределении амплитуд звукового давления, которое определяется как положением вещества в пространстве, так и его свойствами, главным образом концентрацией газовой фазы в слое.

Результаты проведенных исследований могут быть положены в основу принципиально новых струйно-акустических методов и устройств контроля кажущейся плотности частиц СМ, тел неправильной формы, а также материалов, контакт с которыми нежелателен. Результаты исследований позволяют расширить знания в области взаимодействия низкочастотных акустических колебаний с гетерогенными материалами.

*Список литературы*

1. Мордасов, Д. М. Физические основы генерации струйно-акустических колебаний / Д. М. Мордасов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Т. 7, № 2. – С. 283 – 293.

2. Лапин, А. Д. Акустические длинные линии и волноводы : учеб. пособие / А. Д. Лапин. – М. : МИРЭА, 1979. – 108 с.
3. Скучик, Е. Основы акустики : пер. с англ. / Е. Скучик. – М. : Мир, 1976. – Т. 1. – 520 с.
4. Мордасов, Д. М. Технические измерения плотности сыпучих материалов : учеб. пособие / Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 80 с.
5. Тюлин, В. Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука / В. Н. Тюлин. – М. : Наука, 1976. – 254 с.
6. Осташев, В. Е. Распространение звука в движущихся средах / В. Е. Осташев. – М. : Наука, 1992. – 208 с.

---

## Interaction of Acoustically Modulated Gas Jet with Bulk Materials

D. M. Mordasov<sup>1</sup>, M. M. Mordasov<sup>2</sup>, A. V. Firsova<sup>1</sup>, M. D. Mordasov<sup>1</sup>

*Departments of Materials and Technology (1), Mechatronics and Technological  
Measurements (2), TSTU, Tambov, Russia; e-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru*

**Keywords:** acoustic modulation; bulk material; density; fractional void; jet acoustics; reflecting surface; standing wave.

**Abstract:** The physics of interaction processes of an acoustically modulated gas jet with bulk materials has been studied. It is shown that the interaction of a jet-acoustic signal with a bulk material is accompanied by its full reflection with the formation of a standing wave regime in the space between the generator and the load. A mathematical description of the physical effects is given, mechanisms of the influence of the height of the layer of bulk material, its granulometric composition and the speed of movement on the occurring processes are revealed. The results of experimental studies that make it possible to expand knowledge in the field of interaction of low-frequency acoustic oscillations with heterogeneous materials have been presented. They can be used as the basis for fundamentally new methods and devices for monitoring their physical-mechanical properties.

### *References*

1. Mordasov, D. M. [Physical Grounds of Stream Acoustic Vibrations Generation], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2001, vol. 7, no. 2, pp. 283-293. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Lapin A.D. *Akusticheskie dlinnye linii i volnovody : ucheb. posobie* [Acoustic Long Lines and Waveguides: A Tutorial], Moscow: MIREA, 1979, 108 p. (In Russ.)
3. Skuchik E. *Osnovy akustiki : per. s angl.* [Basics of acoustics], Moscow: Mir, 1976, vol. 1, 520 p. (In Russ.)
4. Mordasov D.M., Mordasov M.M. *Tekhnicheskie izmereniya plotnosti sybuchikh materialov : ucheb. Posobie* [Technical measurements of the density of bulk materials: a tutorial], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2004, 80 p. (In Russ.)
5. Tyulin V.N. *Vvedenie v teoriyu izlucheniya i rasseyaniya zvuka* [Introduction to the theory of radiation and scattering of sound], Moscow: Nauka, 1976, 254 p. (In Russ.)
6. Ostashev V.E. *Rasprostranenie zvuka v dvizhushchikhsya sredakh* [Propagation of sound in moving media], Moscow: Nauka, 1992, 208 p. (In Russ.)

## **Wechselwirkung des akustisch modulierten Stromes des Gases mit den Schüttstoffen**

**Zusammenfassung:** Es ist die Physik der Prozesse der Wechselwirkung des akustisch modulierten Stromes des Gases mit den Schüttstoffen erlernt. Es ist gezeigt, dass die Wechselwirkung der stromakustischen Signale mit dem Schüttstoff von seiner vollen Reflexion mit der Bildung der im Raum zwischen dem Generator und der Belastung des Regimes stehenden Wellen begleitet wird. Es ist die mathematische Beschreibung der physikalischen Effekte angeführt, es sind die Mechanismen des Einflusses der Höhe der Schicht des Schüttstoffes, seiner granulometrischen Bestandteile und der Geschwindigkeit der Umstellung auf die geschehenden Prozesse gezeigt. Es sind die Ergebnisse der experimentellen Forschungen dargelegt, die die Kenntnisse auf dem Gebiet der Wechselwirkung der akustischen Niederfrequenzschwingungen mit den heterogenen Materialien erweitern lassen und zugrunde den prinzipiell neuen Methoden und den Geräten der Kontrolle ihrer physikalisch-mechanischen Eigenschaften gelegt sein können.

---

## **Interaction du jet de gaz acoustique modulé avec les substances en vrac**

**Résumé:** Est étudiée la physique des processus de l'interaction du jet de gaz acoustique modulé avec les substances en vrac. Est montré que l'interaction du signal de jet acoustique avec un matériau pulvérulent est accompagnée d'un reflet complet avec la formation dans l'espace entre le générateur et la charge du régime des ondes stationnaires. Est donnée la description mathématique des effets physiques; sont déduits les mécanismes de l'influence de la hauteur de la couche de la matière en vrac, de sa composition granulométrique et de la vitesse du déplacement sur les processus qui se passent. Sont présentés les résultats des études expérimentales permettant d'élargir les connaissances dans le domaine de l'interaction des oscillations de basse fréquence acoustiques avec des matériaux hétérogènes. Ces résultats peuvent servir de base à de nouveaux méthodes et dispositifs de contrôle des propriétés physiques et mécaniques.

---

**Авторы:** *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология»; *Мордасов Михаил Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Фирсова Александра Владимировна* – магистрант; *Мордасов Михаил Денисович* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Червяков Виктор Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---