

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АКУСТИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННОЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ С ОДНОРОДНОЙ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов, А. В. Фирсова, М. Д. Мордасов

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
mit@mail.nnn.tstu.ru*

Ключевые слова: акустическая модуляция; отражающая поверхность; плотность; стоячая волна; струйная акустика.

Аннотация: На основе теоретического и экспериментального изучения особенностей процессов взаимодействия акустически модулированной газовой струи с однородной плоской поверхностью установлено, что в пространстве распространения струи возникает режим стоячих волн. Проанализированы характерные особенности в распределении амплитуд звукового давления, выявлено влияние физических свойств поверхности на положение критических точек стоячей волны. В результате проведенных исследований установлено влияние плотности материала отражающей поверхности на происходящие процессы. Полученные теоретические и экспериментальные закономерности могут быть использованы при разработке принципиально новых бесконтактных методов контроля веществ в условиях потенциально-опасных производств.

Акустическая модуляция газовых струй находит применение в технике и технологиях. Струйно-акустические эффекты используются при создании логических элементов систем автоматического управления технологическими процессами [1], сенсоров промышленных роботов и манипуляторов [2], устройств контроля уровня [3], расхода [4], физических свойств веществ и материалов [5, 6]. Во многих решаемых задачах используют эффекты, проявляющиеся при взаимодействии акустически модулированного потока газа с какой-либо поверхностью, однако, влияние ее физических свойств на происходящие процессы изучено недостаточно.

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния физических свойств поверхности на распределение амплитуд звукового давления, изучены процессы, происходящие в струйно-акустической (СА) системе, состоящей из генератора, выполненного в виде сопла, формирующего турбулентную струю газа, которая, в свою очередь, инициирует возникновение звуковых колебаний, и отражающей плоской твердой или жидкой поверхности, выполняющей функцию нагрузки.

Физические свойства нагрузки определяют режим функционирования СА-системы (режим бегущих, стоячих или смешанных волн). В идеализированном представлении нагрузка может быть абсолютно жесткой (волновое сопротивление

стремится к бесконечности) и абсолютно мягкой (волновое сопротивление равно нулю). Абсолютно мягкая отражающая поверхность – газовое пространство, в котором распространяется акустически модулированная струя газа.

Теоретически и экспериментально [3] установлено, что при расстоянии между генератором и отражающей поверхностью, не превышающем длины волны λ генерируемых акустических колебаний, звуковая волна распространяется без потерь, что является необходимым условием формирования режима стоячих волн в СА-системе, возникающего в результате интерференции падающей и отраженной от нагрузки акустических волн. Комплексный коэффициент отражения при этом определяется как $\dot{R} = \dot{P}_{mr} / \dot{P}_{mi}$, где \dot{P}_{mi} , \dot{P}_{mr} – комплексные амплитуды давлений соответственно в падающей и отраженной волнах.

По аналогии с распространением сигнала в электрической цепи, учитывая, что расстояние между генератором и отражающей поверхностью не превышает длины волны λ , описанная выше СА-система может быть рассмотрена как отрезок длиной линии с нагрузкой, вдоль которого равномерно распределены активные и реактивные сопротивления [7].

При взаимодействии падающей звуковой волны, распространяющейся от генератора к нагрузке, с абсолютно жесткой поверхностью, расположенной при $x = 0$, согласно [8], распределение комплексной величины звукового давления

$$\dot{P}(x) = \dot{P}_{mi} \exp(jkx) + \dot{P}_{mr} \exp(-jkx), \quad (1)$$

где k – волновое число. Коэффициент отражения в этом случае является действительным числом и равен единице.

При взаимодействии СА-сигнала с однородной плоской поверхностью, волновое сопротивление которой $Z_s = \rho_s c_s$ (ρ_s , c_s – плотность вещества поверхности и скорость звука в нем) значительно превышает волновое сопротивление среды (воздуха) $Z_g = \rho c_g$ (ρ , c_g – плотность воздуха и скорость звука в нем), в которой распространяется звуковая волна, перенос энергии в нагрузку отсутствует и звуковая волна полностью отражается от нее. При этом модуль коэффициента отражения $|\dot{R}| = 1$, а фаза ψ определяется числом четвертей длины акустической волны λ , на которое смещается ближайший экстремум стоячей волны относительно его положения перед отражающей поверхностью в случае абсолютно жесткой нагрузки.

Таким образом, распределение амплитуд звукового давления в СА-линии с нагрузкой в виде однородной плоской поверхности будет определяться в соответствии с формулой (1) в виде

$$\dot{P}(x) = \dot{P}_{mi} \exp(jkx) + \dot{P}_{mi} |\dot{R}| \exp(j\psi) \exp(-jkx),$$

откуда с учетом $|\dot{R}| = 1$ и $\psi = 4\pi l_{eq} / \lambda$ получим

$$\dot{P}(x) = 2\dot{P}_{mi} \cos\left(kx - \frac{2\pi l_{eq}}{\lambda}\right) \exp\left(j\frac{2\pi l_{eq}}{\lambda}\right), \quad (2)$$

где l_{eq} – изменение длины СА-линии, эквивалентное внесенной нагрузке.

Распределение амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн согласно (2) примет вид

$$|\dot{P}_m(x)| = 2|\dot{P}_{mi}| \cos\left[k(x - l_{eq})\right].$$

С учетом $\dot{Z}_s = \dot{P}_{ms} / \dot{V}_{ms}$, где \dot{P}_{ms} и \dot{V}_{ms} – амплитуды давления и скорости частиц на нагрузке, а также того, что в режиме стоячих волн на отражающей поверхности скорость отстает по фазе от звукового давления на $\pi/2$, модуль акустического импеданса однородной поверхности запишем в виде

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

На рисунке 1 представлена зависимость длины отрезка l_{eq} от сопротивления нагрузки в виде однородной плоской поверхности. На рисунке 2 представлена экспериментальная зависимость, показывающая, какой длины эквивалентным отрезком воздушной линии может быть заменена нагрузка, представляющая собой то или иное вещество с определенным волновым сопротивлением.

В случае воздействия СА-сигнала на жидкость фазовые смещения лежат в диапазоне $l_{eq} \in [0, l_b]$, а для твердых поверхностей – $l_{eq} \in [l_b, \lambda/4]$, где l_b – длина отрезка СА-линии, эквивалентного импедансу вещества, лежащего на границе волновых сопротивлений жидкостей и твердых веществ.

Таким образом, в силу того, что жидкие или твердые вещества с плотностью ρ_s не являются идеальными нагрузками, происходит изменение фазы комплексного коэффициента отражения. Узел стоячей волны смещается на величину l_{eq} относительно своего положения в случае абсолютно жесткой нагрузки. Величина такого смещения определяется плотностью вещества и скоростью звука в нем c_s (см. рис. 2).

С учетом

$$|\dot{Z}_s| = \frac{\rho_s c_s}{S_n}, \quad |\dot{Z}_g| = \frac{\rho c_g}{S_c}, \quad k = \frac{2\pi f}{c_g},$$

зависимость (3) запишем в виде

$$\frac{\rho_s c_s}{S_n} = \frac{\rho c_g}{S_c} \operatorname{tg} \frac{2\pi f l_{eq}}{c_g},$$

откуда для плотности ρ_s имеем

$$\rho_s = \frac{S_n}{S_c} \frac{\rho c_g}{c_s} \operatorname{tg} \frac{2\pi f l_{eq}}{c_g}, \quad (4)$$

где $S_c = \pi(r + l \operatorname{tg} \beta)^2$ – площадь контакта струйно-акустического сигнала с отражающей поверхностью (сечение струйно-акустической длиной линии); S_n – нормирующая площадь; f – частота акустических колебаний; l – расстояние от генератора звуковых колебаний до отражающей поверхности; r – радиус звукообразующего отверстия; β – угол раскрытия турбулентной струи.

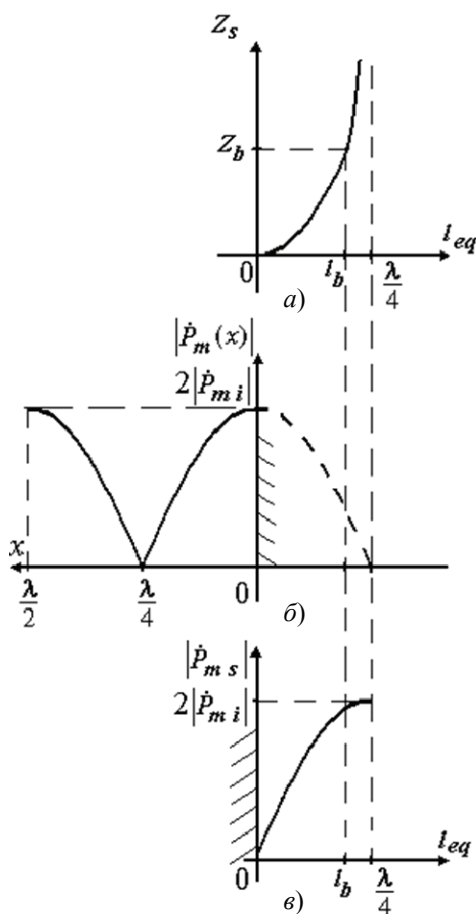


Рис. 1. Зависимость длины отрезка l_{eq} от сопротивления нагрузки в виде однородной плоской поверхности (а), распределение звукового давления в режиме стоячих волн (б) и амплитуда звукового давления на нагрузке (в)

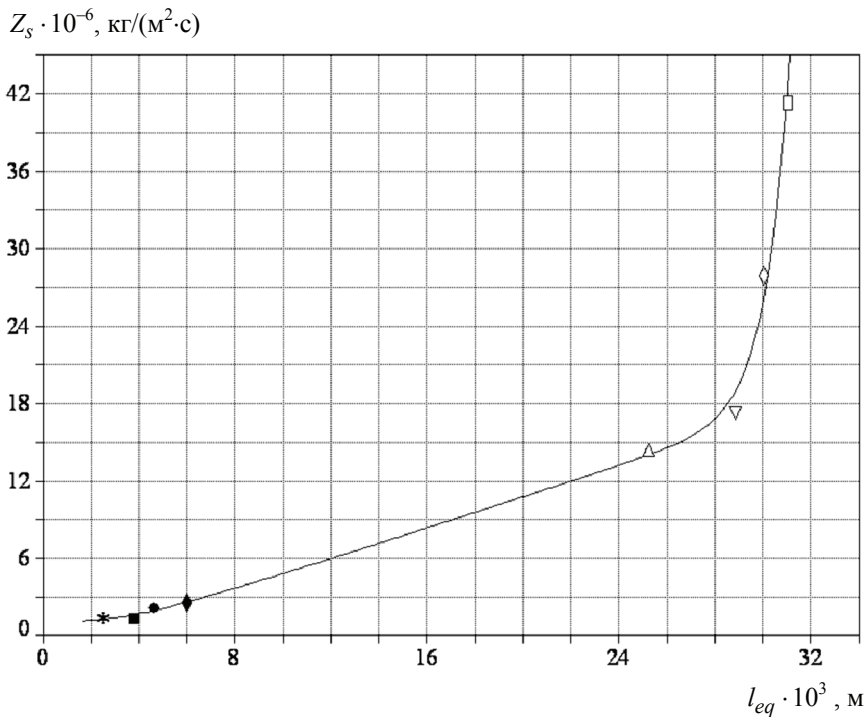


Рис. 2. Зависимость волновых сопротивлений жидких и твердых веществ от длины эквивалентного отрезка струйно-акустической линии:

□ – медь; ◇ – свинец, ▽ – алюминий; Δ – стекло; ◆ – глицерин; * – бензин;
 ● – масло М-8; ■ – масло КС-19; — — аппроксимирующая зависимость

С учетом $l_{eq} = l - \frac{\lambda}{4} = l - \frac{c_g}{4f}$ выражение (4) запишем в виде

$$\rho_s = \frac{S_n}{\pi(r + l \operatorname{tg} \beta)^2} \frac{\rho c_g}{c_s} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi f l}{c_g} - \frac{\pi}{2} \right). \quad (5)$$

Адекватность полученной зависимости процессам, протекающим при взаимодействии акустически модулированной газовой струи с однородной плоской поверхностью, оценивалась путем статистической проверки гипотезы о том, что результаты расчета по формуле (5) и экспериментально полученные результаты описывают происходящие физические эффекты с одинаковой точностью.

Результаты экспериментального исследования и расчета приведены в табл. 1.

Экспериментальные исследования проводились на специально созданной установке в соответствии со следующей методикой:

- струйно-акустический блок размещают над контролируемой поверхностью на расстоянии $\lambda/2$ от нее;
- сжатый воздух с заданными параметрами подают на вход генератора акустически модулированного потока газа;
- изменяя расстояние до поверхности с известной плотностью, перемещением генератора осуществляют поиск узла стоячей волны;
- в момент достижения нулевого значения в распределении амплитуд звукового давления в СА-системе фиксируют положение генератора;
- измеряют расстояние l , соответствующее длине струйно-акустической длинной линии с нагрузкой в виде вещества с плотностью ρ_s .

Таблица 1

**Результаты проверки адекватности зависимости (5),
процессам, протекающим в струйно-акустической системе**

Жидкость	ρ_s , кг/м ³	$l_{pi} \cdot 10^3$, м	$l_i \cdot 10^3$, м	$\bar{l}_p \cdot 10^3$, м	$\bar{l} \cdot 10^3$, м	$S_{l_p} \cdot 10^6$, м ²	$S_l \cdot 10^6$, м ²	F
Масло ТП-22	871; 864; 868; 863; 865; 870; 867	64,4; 64,8; 64,5; 64,9; 64,8; 64,4; 64,6	65,1; 65,9; 65,6; 65,9; 64,9; 65,1; 65,7	64,6	65,5	0,042	0,174	4,14
Масло М – 8	887; 880; 885; 882; 881; 886; 883	64,1; 64,6; 64,2; 64,5; 64,4; 64,1; 64,3	65,3; 65,5; 64,7; 64,9; 65,2; 64,5; 65,3	64,3	65,1	0,038	0,133	3,50
Масло ТАП-15	928; 920; 925; 920; 923; 926; 923	63,3; 63,8; 63,5; 63,9; 63,6; 63,4; 63,6	64,3; 64,5; 63,8; 63,9; 64,4; 63,5; 64,3	63,6	64,1	0,045	0,133	2,96
Вода	995; 997; 1000; 1002; 997; 998; 996	62,5; 62,2; 62,0; 61,9; 62,2; 62,1; 62,4	61,5; 61,8; 62,3; 62,5; 61,8; 62,3; 62,1	62,2	62,0	0,045	0,125	2,78
Раствор NaCl	1016; 1009; 1018; 1016; 1014; 1020; 1010	61,7; 61,8; 61,7; 61,7; 61,8; 61,6; 61,9	61,7; 60,9; 61,4; 61,5; 61,4; 61,7; 61,2	61,7	61,4	0,025	0,083	3,32
	1047; 1043; 1040; 1050; 1044; 1047; 1049	61,3; 61,4; 61,5; 61,1; 61,4; 61,3; 61,1	60,7; 60,9; 61,2; 61,4; 60,9; 60,7; 61,2	61,3	61,0	0,023	0,075	3,26
	1090; 1087; 1087; 1078; 1085; 1083; 1080	60,9; 60,8; 60,8; 60,3; 60,7; 60,6; 60,4	60,7; 60,5; 60,1; 59,7; 59,8; 60,5; 60,8	60,6	60,3	0,050	0,191	3,82
	1159; 1167; 1166; 1165; 1165; 1158; 1158	59,4; 59,1; 59,1; 59,2; 59,2; 59,5; 59,5	59,8; 59,4; 59,4; 59,8; 59,0; 59,1; 59,6	59,3	59,4	0,031	0,099	3,19
	1174; 1176; 1172; 1168; 1172; 1174; 1169	58,9; 58,8; 59,0; 59,2; 59,0; 58,9; 59,1	58,7; 58,6; 59,0; 58,8; 58,6; 58,7; 59,2	59,0	58,8	0,018	0,050	2,78
	1191; 1189; 1193; 1191; 1189; 1187; 1189	58,6; 58,7; 58,5; 58,6; 58,7; 58,8; 58,7	58,5; 58,2; 58,3; 58,2; 58,4; 58,3; 58,3	58,7	58,3	0,01	0,012	1,20
	1194; 1201; 1198; 1200; 1196; 1198; 1198	58,8; 58,4; 58,6; 58,5; 58,7; 58,6; 58,6	57,8; 58,2; 58,3; 57,9; 58,1; 58,2; 58,2	58,6	58,1	0,017	0,033	1,94

Примечание: \bar{l} , \bar{l}_p – математические ожидания для рядов экспериментальных и расчетных данных соответственно; l_{pi} – расстояние, рассчитанное по формуле (5); l_i – экспериментальные данные; S_{l_p} , S_l – дисперсии результатов, полученных по формуле (5), и экспериментальных данных соответственно.

Гипотеза проверялась сравнением дисперсии результатов, полученных по формуле (5) при $r = (1,25 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$ м; $\rho = 1,29$ кг/м³; $c_g = 331$ м/с; $f = (1950 \pm 2)$ Гц; $\beta = 8^\circ$ и плотности вещества (жидкости) ρ_s , измеренной ареометром с погрешностью, не превышающей 0,01 %, с дисперсией данных, полученных в ходе эксперимента.

Состоятельность сформулированной выше гипотезы проверялась путем сравнения квантиля F -распределения, рассчитанного по экспериментальным данным (максимальное – составляет 4,14), с квантилем, найденным по справочным таблицам (для значения степеней свободы $I = 6$ и уровня значимости 0,05 значение квантиля F -распределения составляет $F_t = 4,28$).

Результаты экспериментального исследования и расчета, приведенные в табл. 1, позволяют сделать вывод о том, что проверяемая гипотеза не опровергается, так как $F < F_t$, следовательно, расчетная математическая зависимость адекватно описывает физические процессы, протекающие при взаимодействии акустически модулированной газовой струи с плоской поверхностью.

В результате проведенных экспериментальных исследований в соответствии с разработанной методикой на специально созданной установке подтверждена гипотеза, что в газовом пространстве между генератором акустических колебаний и нагрузкой формируется стоячая волна. Аналитически и экспериментально доказано, что на изменение положения узла стоячей волны в распределении амплитуд звукового давления существенное влияние оказывают плотность и положение в пространстве материала нагрузки.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке принципиально новых струйно-акустических неразрушающих бесконтактных методов контроля веществ в условиях потенциально-опасных производств.

Список литературы

1. А. с. 821777 Российская Федерация, F15C 1/16. Струйно-акустический логический элемент / Пиминов А. С., Барышников В. М. – № 2706156/18-24 ; заявл. 04.01.1979 ; опубл. 15.04.1981, Бюл. № 14.
2. Пат. 2032183 Российская Федерация, G01S 1/72. Струйно-акустический способ измерения расстояний / Давиденко В. Ф., Епишин С. М. – № 5006316/09 ; заявл. 23.10.1991 ; опубл. 27.03.1995, Бюл. № 10.
3. Мордасов, Д. М. Бесконтактное аэродинамическое измерение уровня / Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-т. – 2000. – Т. 6, № 1. – С. 41 – 45.
4. Савицкий, В. К. Пневмоакустический массовый микрорасходомер газа / В. К. Савицкий // Пневмоавтоматика : XV всесоюз. совещ., Львов, 1 – 30 сент. 1985 г. : сб. тез. / Ин-т проблем управления здравоохранением. – М., 1985. – Ч. 2. – С. 97 – 98.
5. Мордасов, Д. М. Струйно-акустический контроль концентрации газовой фазы в слое сыпучего материала / Д. М. Мордасов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-т. – 2005. – Т. 11, № 1. – С. 88 – 93.
6. Farmer, T. Structural Studies of Liquids and Glasses Using Aerodynamic Levitation / T. Farmer. – [Б. м.] : Springer International Publishing, 2015. – XIV, 113 p. doi: 10.1007/978-3-319-06575-5.
7. Лапин, А. Д. Акустические длинные линии и волноводы / А. Д. Лапин. – М. : МИРЭА, 1979. – 108 с.
8. Skudrzyk, E. The Foundations of Acoustics / E. Skudrzyk. – New York : Springer Verlag, 1971. – 790 p.

Interaction of Acoustically Modulated Gas Jet with Homogeneous Plane Surface

D. M. Mordasov, M. M. Mordasov, A. V. Firsova, M. D. Mordasov

Department "Materials and Technology", TSTU, Tambov, Russia;
mit@mail.nnn.tstu.ru

Keywords: acoustic modulation; density; jet acoustics; reflecting surface; standing wave.

Abstract: Theoretical and experimental studies of the specifics of interaction of acoustically modulated gas jet with a homogeneous plane surface showed that the mode of standing waves arises in the area of jet penetration. Having analyzed the characteristics in the distribution of sound pressure amplitudes, we found the influence of physical properties of a surface on the location of critical points of a standing wave. For the first time it was confirmed theoretically and experimentally that the material density of the reflecting surface affects the occurring processes. Theoretical and experimental patterns can be used in the development of new contactless methods of materials control in conditions of potentially hazardous industries.

References

1. Piminov A.S., Baryshnikov V.M. *Struino-akusticheskii logicheskii element* [Jet-acoustic logic element], Russian Federation, 1981, Certificate of authorship 821777. (In Russ.)
2. Davidenko V.F., Epishin S.M. *Struino-akusticheskii sposob izmereniya rasstoyanii* [Jet-acoustic method for measuring distances], Russian Federation, 1995, Pat. 2032183. (In Russ.)
3. Mordasov D.M., Mordasov M.M. [Contactless Level Aerodynamical Measurement], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2000, vol. 6, no. 1, pp. 41-45. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Savitskii V.K. [Pneumatic-acoustic mass gas micro flowmeter], *Pnevmoavtomatika: XV vsesoyuznoe soveshchanie* [Pneumatic automation: XV All-Union Conference], abstracts at the conference, L'vov, 1-30 September, 1985, part 2 of 2, Moscow, 1985, pp. 97-98. (In Russ.)
5. Mordasov D.M. [Stream-Acoustic Control over Gas Phase Concentration in the Particulate Material Layer], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2005, vol. 11, no. 1, pp. 88-93. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Farmer T. *Structural Studies of Liquids and Glasses Using Aerodynamic Levitation*, Springer International Publishing, 2015, XIV, 113 p., doi: 10.1007/978-3-319-06575-5.
7. Lapin A.D. *Akusticheskie dlinnye linii i volnovody* [Acoustic long lines and waveguides], Moscow: MIREA, 1979, 108 c. (In Russ.)
8. Skudrzyk E. *The Foundations of Acoustics*, New York : Springer Verlag, 1971, 790 p.

Über die Wechselwirkung des akustischmodulierten Gasstrahles mit der gleichartigen flachen Oberfläche

Zusammenfassung: Aufgrund des theoretischen und experimentalen Erlernens der Besonderheiten der Prozesse der Wechselwirkung des akustischmodulierten Gasstrahles mit der gleichartigen flachen Oberfläche ist es bestimmt, dass im Raum des

Vertriebes des Strahles das Regime der stehenden Wellen entsteht. Es sind die Charakterbesonderheiten in der Verteilung der Amplituden des lautlichen Drucks analysiert, es ist der Einfluss der physischen Eigenschaften der Oberfläche auf die Lage der kritischen Punkte der stehenden Welle enthüllt. Infolge der durchgeführten Forschungen ist der Einfluss der Dichte des Materials der widerspiegelnden Oberfläche auf die geschehenden Prozesse bestimmt. Die bekommenen theoretischen und experimentalen Gesetzmäßigkeiten können bei der Entwicklung der grundsätzlich neuen kontaktlosen Methoden der Kontrolle der Stoffe unter den Bedingungen der potentiellgefährlichen Produktionen verwendet sein.

À propos de l'interaction du jet gazeux modulé de la manière acoustique avec une surface plane homogène

Résumé: A la base de l'étude théorique et expérimentale des caractéristiques des processus de l'interaction du jet gazeux modulé de la manière acoustique avec une surface plane homogène est établi que dans l'espace de la propagation du jet se produit le mode des ondes stationnaires. Sont analysées les particularités caractéristiques dans la distribution des amplitudes de la pression acoustique, est révélée l'influence des propriétés physiques de la surface sur la position des points critiques de l'onde stationnaire. A l'issue des études est montrée l'influence de la densité du matériau de la surface de réflexion sur les processus. Sont reçues des régularités théoriques et expérimentales qui peuvent être utilisées lors de l'élaboration de nouvelles méthodes sans contact pour le contrôle des substances dans les conditions des productions potentiellement dangereuses.

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* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
