

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВОЛН НА МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» ПРИ СОЗДАНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

А.Н. Сливин, Р.Н. Голых, А.Р. Барсуков

Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск

Предложенная модель формирования акустических капиллярных волн на межфазной границе раздела позволяет учесть влияние вязкости, поверхностного натяжения и инерции жидкости на возмущения межфазной границы. Эта модель основана на инициировании колебательного пространственно неоднородного гармонического возмущения давления среды. Исследования показали, что вязкость слабо влияет на резонансную длину волн. Это значит, что изменение вязкости жидкости не приводит к значительному изменению скорости физико-химических процессов, включая поглощение CO<sub>2</sub> из атмосферы. Однако при определенных значениях вязкости в диапазоне от 25 до 40 мПа·с резонанс пропадает, что может указывать на изменение условий поглощения CO<sub>2</sub>. Таким образом, предложенная модель может быть использована для оценки площади межфазной поверхности и, в конечном итоге, скорости физико-химических процессов, включая поглощение CO<sub>2</sub> из атмосферы. Это позволяет более точно определить скорость этих процессов и разработать эффективные методы и технологии для улавливания и снижения выбросов парниковых газов.

*Ключевые слова:* ультразвук, моделирование, межфазная граница «газ-жидкость».

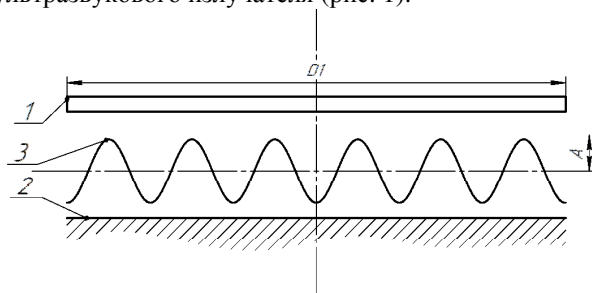
## ВВЕДЕНИЕ

Существующие на сегодняшний день устройства поглощения антропогенных выбросов обладают недостаточной эффективностью при том объеме выбрасываемых в атмосферу вредных примесей в единицу времени и той степени загрязнения атмосферы, которая имеется на сегодня. Один из перспективных способов повышения эффективности очистных устройств – применение ультразвуковых колебаний. Так, для повышения эффективности поглощения CO<sub>2</sub> и других газовых примесей (включая нанодисперсные примеси) в абсорбционной технологии очистки ультразвуковые колебания способны увеличить межфазную поверхность раздела «газ-жидкость» и тем самым повысить скорость поглощения, пропорциональную межфазной поверхности [1–4]. Поскольку изменение межфазной поверхности связано с нелинейными эффектами, которые имеют место быть под действием ультразвука [5–8], а объем антропогенных выбросов после начала индустриализации человечества и вплоть до сегодняшнего дня только возрастает, несмотря на многочисленные заявления о переходе к «зелёной энергетике», авторами предлагается воздействовать в резонансном промежутке, чтобы с помощью существующих излучателей создать экстремально высокие уровни звукового давления, на порядок усилить известные механизмы изменения межфазной поверхности.

Для предсказания амплитуды возмущений межфазной поверхности предложена модель, которая описана далее.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Согласно предлагаемой постановке задачи формирование волн происходит в тонкой плёнке жидкости, которая стекает по неподвижной поверхности, расположенной напротив ультразвукового излучателя (рис. 1).



1 – излучатель; 2 – стекающая плёнка жидкости;  
3 – форма (распределение) колебаний излучающей поверхности

Рис. 1. Схематичное изображение формирования колебаний в стекающей плёнке жидкости

Динамика поверхностных волн на стекающей плёнке жидкости описывается системой уравнений сохранения импульса, неразрывности в дифференциальной форме и граничными условиями для капиллярного скачка:

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0; \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} - \rho \mathbf{g} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix};$$

граничные условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} = 0 \text{ at } z = 0 \\ p + \sigma \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) - 2\eta \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} &= p_g \text{ at } z = 0 \\ u_z &= \frac{\partial h}{\partial t} \text{ at } z = 0, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{u}$  – скорость движения жидкой фазы, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкой фазы, Дж/м<sup>2</sup>;  $\mathbf{g}$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – изменение высоты свободной поверхности жидкости, м;  $p_g$  – давление на свободной поверхности жидкости со стороны газовой фазы, Па;  $p$  – давление в жидкой фазе, Па;  $\eta$  – вязкость сплошной жидкой фазы, Па·с.

Для анализа формирования поверхностных волн предположено, что теория глубокой воды, согласно которой длина капиллярной волны значительно меньше толщины плёнки жидкости, является верной. Сила гравитационного притяжения и геометрия поверхности, покрытой плёнкой, определяют константную составляющую деформации поверхности и константную составляющую давления в жидкой фазе. Затем производится переход к комплексным амплитудам.

Далее проводится переход к комплексным амплитудам.

На границе:

$$2\eta \frac{\partial u_3}{\partial x_3} - p - \sigma \Delta h = -p_g$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_i} = 0$$

$$u_3 = -i\omega h$$

В объёме:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{u} &= 0 \\ -i\omega \rho \mathbf{u} &= -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} \end{aligned}$$

Решение данных уравнений для комплексных амплитуд ищется в следующем виде для возмущений скорости и давления:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \frac{\nabla p}{i\omega\rho} + \mathbf{v} \\ p &= P_0 e^{i(\mathbf{k}, \mathbf{r})} e^{kz} \\ \mathbf{v} &= \mathbf{V}(z) e^{i(\mathbf{k}, \mathbf{r})} \end{aligned}$$

С использованием указанного представления проводятся следующие преобразования.

В объёме:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0 \\ -i\omega \rho \mathbf{v} &= \eta \Delta \mathbf{v} \\ i(k_x V_x + k_y V_y) + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= 0 \\ (\eta k^2 - I\omega\rho) V_i &= \eta \left( \frac{\partial^2 V_i}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

$$V_i = V_{i,0} e^{\sqrt{k^2 - \frac{I\omega\rho}{\eta}} z}$$

$$I(k_x V_x + k_y V_y) + \sqrt{k^2 - \frac{I\omega\rho}{\eta}} V_{3,0} = 0$$

На границе:

$$2\eta \left( \frac{k^2 P_0}{i\omega\rho} + \left( \sqrt{k^2 - \frac{I\omega\rho}{\eta}} \right) V_{3,0} \right) - P_0 + k^2 \sigma H_0 = -P_{g,0}$$

$$\left( 2 \frac{I k k_i P_0}{I\omega\rho} + \sqrt{k^2 - \frac{I\omega\rho}{\eta}} V_{i,0} \right) + I k_i V_{3,0} = 0$$

$$\frac{k P_0}{I\omega\rho} + V_{3,0} = -I\omega H_0$$

В объёме:

$$I(k_x V_x + k_y V_y) = -\sqrt{k^2 - \frac{I\omega\rho}{\eta}} V_{3,0}$$

На границе:

$$\left( \frac{2\eta k^2}{i\omega\rho} - 1 \right) P_0 + 2\eta \left( \sqrt{k^2 - \frac{I\omega\rho}{\eta}} \right) V_{3,0} + k^2 \sigma H_0 = -P_{g,0}$$

$$\frac{k P_0}{I\omega\rho} + V_{3,0} + I\omega H_0 = 0$$

$$2 \frac{k^3 P_0}{I\omega\rho} + \left( 2k^2 - \frac{I\omega\rho}{\eta} \right) V_{3,0} = 0$$

В конечном итоге, комплексная амплитуда поверхностной волны НО в зависимости от амплитуды возмущений газа  $P_{g,0}$  определяется согласно следующему выражению:

$$H_0 = \frac{k P_{g,0}}{-\frac{4\eta^2 k^4}{\rho} + 4I\eta\omega k^2 + \rho\omega^2 + 4\eta^2 \left( \sqrt{k^2 - \frac{I\omega\rho}{\eta}} \right) \frac{k^3}{\rho} - \sigma k^3}$$

где  $k$  – волновое число капиллярной волны, м<sup>-1</sup>;  $\eta$  – вязкость жидкой фазы, Па·с;  $\rho$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – круговая частота ультразвуковых колебаний, с<sup>-1</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкой фазы, Н/м.

Построены графики, на которых показано, как

амплитуда возмущений межфазной поверхности зависит от длины волны возмущений давления, частоты гармонических колебаний давления и вязкости жидкости. Предполагается, что поверхностное натяжение остается постоянным и равным 0,072 Н/м.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости относительной величины амплитуды возмущений межфазной поверхности, которая определяется отношением амплитуды возмущений к амплитуде давления, от длины волны возмущений при различных частотах колебаний.

Представленные зависимости позволяют выявить резонансные длины волн при каждой вязкости сплошной жидкой фазы. Установлено снижение добротности системы «жидкость-газ» в диапазон вязкости от 15 до 30 мПа·с. При этом, если амплитуда возмущений давления в газе составляет более 2000 Па (при уровне звукового давления около 160 дБ в резонансном воздушном промежутке), то на частоте 22 кГц амплитуда поверхностных волн может достигать 10 мкм при их длине около 140 мкм. Это означает увеличение площади межфазной поверхности до 40%, что свидетельствует об эффективности высокочастотного акустического воздействия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Khan, N., and Y. Adewuyi, "Modeling the ultrasonic cavitation-enhanced removal of nitric oxide from flue gases in a bubble column

reactor," American Institute of Chemical Engineerings 2008 Annual Meeting, 2008.

2. Laugier, F., C. Andriantsiferana, A.M. Wilhelm, and H. Delmas, "Ultrasound in gas-liquid systems: effects on solubility and mass transfer," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 15, no. 6, pp. 965–972, 2008.

3. Owusu, S., and A. Adewuyi, "Sonochemical removal of nitric oxide from flue gases. Industrial & engineering chemistry research," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006.

4. Tay, W.H., K.K. Lau, and A.M. Shariff, "High frequency ultrasonic-assisted chemical absorption of CO<sub>2</sub> using monoethanolamine (MEA)," *Separation and Purification Technology*, vol. 183, no. 7, pp. 136–144, 2017.

5. Riera, E., González-Gomez, G. Rodriguez, and J.A. Gallego-Juarez, "Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications," *Separation and Purification Technology*, vol. 183, no. 7, pp. 1023-1058, 2015.

6. Ng, B.F., J.W. Xiong, and M.P. Wan, "Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems," *PLoS One*, vol. 12, no. 6, pp., 2017.

7. Chen, H., W. Liu, J. Li, X. Xun, X. Shen, "Experimental study on acoustic agglomeration of fine particles from coal combustion," *Proceedings - 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2010*, vol. 1, pp. 702-705, 2010.

8. Sheng, C., and X. Shen, "Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles," *Aerosol Science and Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 1-13, 2007.

Сливин Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлмГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: [san@bti.secna.ru](mailto:san@bti.secna.ru).

Голых Роман Николаевич – доктор технических наук, профессор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлмГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: [grn@bti.secna.ru](mailto:grn@bti.secna.ru).

Барсуков Александр Романович – преподаватель, аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлмГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: [barsukov.ar@bti.secna.ru](mailto:barsukov.ar@bti.secna.ru).

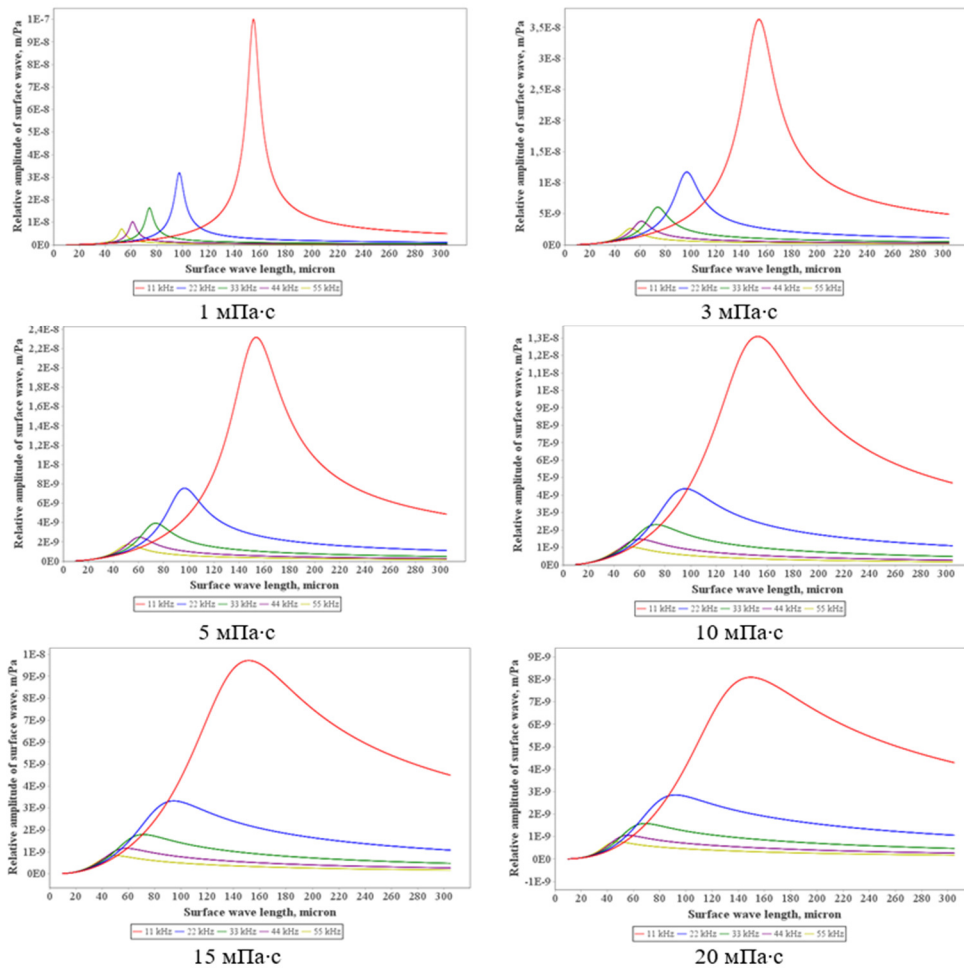


Рис. 2. Зависимости относительной амплитуды возмущений межфазной поверхности от длины волны возмущений (в диапазоне вязкости от 1 до 20 мПа·с)

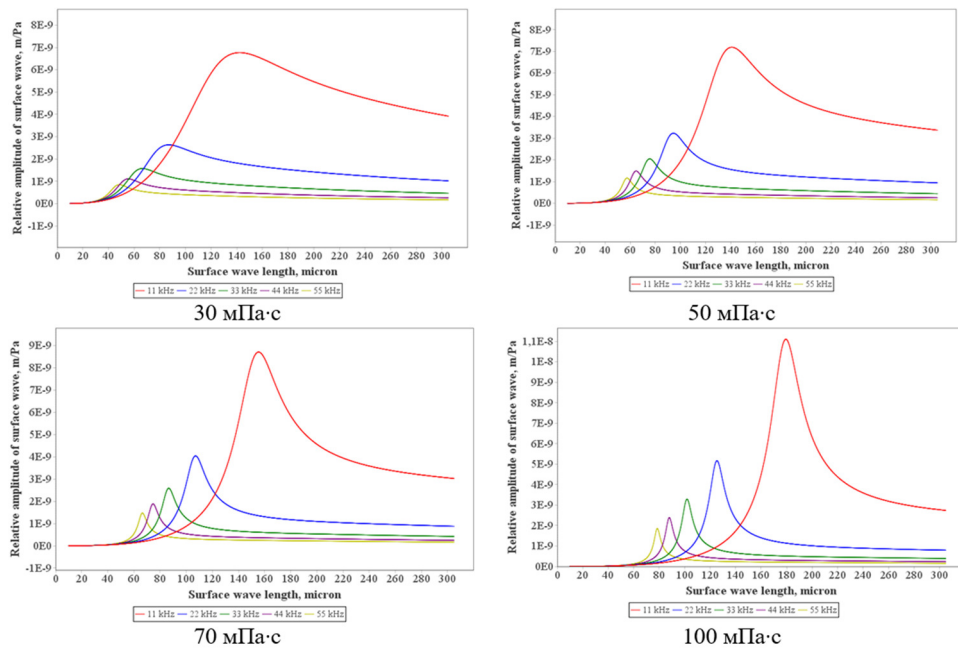


Рис. 3. Зависимости относительной амплитуды возмущений межфазной поверхности от длины волны возмущений (в диапазоне вязкости от 30 до 100 мПа·с)

# MODELING THE PROCESS OF WAVES ARISING AT THE GAS-LIQUID INTERPHASE BOUNDARY WHEN CREATE ACOUSTIC PRESSURE DISTURBANCES IN THE GAS PHASE

A.N. Slivin, R.N. Golykh, A.R. Barsukov

*Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk*

The proposed model for the formation of acoustic capillary waves at the interface allows us to take into account the influence of viscosity, surface tension and inertia of the liquid on the disturbances of the interface. This model is based on the initiation of an oscillatory spatially inhomogeneous harmonic disturbance of the medium pressure. Studies have shown that viscosity has little effect on the resonant wavelength. This means that a change in the viscosity of the liquid does not lead to a significant change in the rate of physicochemical processes, including the absorption of CO<sub>2</sub> from the atmosphere. However, at certain viscosity values in the range from 25 to 40 mPa·s, the resonance disappears, which may indicate a change in the conditions for CO<sub>2</sub> absorption. Thus, the proposed model can be used to estimate the interfacial surface area and, ultimately, the rate of physicochemical processes, including the absorption of CO<sub>2</sub> from the atmosphere. This allows us to more accurately determine the rate of these processes and develop effective methods and technologies to capture and reduce greenhouse gas emissions.

Index terms: ultrasonic, modeling, gas-liquid interface.

## REFERENCES

1. Khan, N., and Y. Adewuyi, "Modeling the ultrasonic cavitation-enhanced removal of nitric oxide from flue gases in a bubble column reactor," American Institute of Chemical Engineers 2008 Annual Meeting, 2008.
2. Laugier, F., C. Andriantsiferana, A.M. Wilhelm, and H. Delmas, "Ultrasound in gas-liquid systems: effects on solubility and mass transfer," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 15, no. 6, pp. 965–972, 2008.
3. Owusu, S., and A. Adewuyi, "Sonochemical removal of nitric oxide from flue gases. Industrial & engineering chemistry research," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006.
4. Tay, W.H., K.K. Lau, and A.M. Shariff, "High frequency ultrasonic-assisted chemical absorption of CO<sub>2</sub> using monoethanolamine (MEA)," *Separation and Purification Technology*, vol. 183, no. 7, pp. 136–144, 2017.
5. Riera, E., González-Gomez, G. Rodríguez, and J.A. Gallego-Juarez, "Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications," *Separation and Purification Technology*, vol. 183, no. 7, pp. 1023-1058, 2015.
6. Ng, B.F., J.W. Xiong, and M.P. Wan, "Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems," *PLoS One*, vol. 12, no. 6, pp., 2017.
7. Chen, H., W. Liu, J. Li, X. Xun, X. Shen, "Experimental study on acoustic agglomeration of fine particles from coal combustion," *Proceedings - 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2010*, vol. 1, pp. 702-705, 2010.
8. Sheng, C., and X. Shen, "Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles," *Aerosol Science and Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 1-13, 2007.

*Slivin Aleksei Nikolaevich – PhD in Technology, Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: [san@bti.secna.ru](mailto:san@bti.secna.ru).*

*Golykh Roman Nikolaevich – doctor in Technology, Professor, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: [grn@bti.secna.ru](mailto:grn@bti.secna.ru).*

*Barsukov Aleksandr Romanovich – teacher, graduate student, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: [barsukov.ar@bti.secna.ru](mailto:barsukov.ar@bti.secna.ru).*