

development of high-accuracy NLD-models, the velocity vector was chosen as the horizontal component of the velocity vector of the FNPF-model (fully nonlinear model of potential flows) on a certain surface located between the bottom and the free surface. Such models are characterized by a very cumbersome form of the obtained equations.

This study shows that the high-order NLD-models can also be obtained using the depth-averaged velocity. Based on the modification of the non-hydrostatic pressure component of the SGN-model (Serre – Green – Naghdi), the improved accuracy models with the fourth (mSGN) and sixth–eighth (mSGN4) orders of approximation of the FNPF-model dispersion relation are obtained. At the same time, the mSGN-model, like the SGN-model, has the second order of the long-wave approximation, while the mSGN4-model is the fourth. For the constructed models, which take into account the bottom mobility, the law of mass conservation and the balance of the total momentum are satisfied. The equations of the models are invariant with respect to the Galilean transformation and are written in a compact form. Under the assumption of a slight change in the shape of the bottom, we obtain the laws of change in the phase velocity, amplitude, length and steepness of surface waves during their movement from the deep-water part of a basin to the shallow water. The results of numerical calculations using the developed models confirm their higher accuracy compared to the results obtained within the framework of the SGN-model.

References

1. Favrie N., Gavriluk S. A rapid numerical method for solving Serre – Green – Naghdi equations describing long free surface gravity waves // *Nonlinearity*. 2017. Vol. 30, № 7. P. 2718–2736.
2. Khakimzyanov G., Dutykh D., Fedotova Z., Gusev O. *Dispersive Shallow Water Waves. Theory, Modeling, and Numerical Methods*. Birkhäuser, 2020.
3. Madsen P. A., Fuhrman D. R. High-order Boussinesq-type modelling of nonlinear wave phenomena in deep and shallow water // *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. 2010. Vol. 11. P. 245–285.

Khakimzyanov Gayaz Salimovich, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia. E-mail: khak@ict.nsc.ru

Fedotova Zinaida Ivanovna, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia. E-mail: zf@ict.nsc.ru

Gusev Oleg Igorevich, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia. E-mail: GusevOI@ict.sbras.ru

ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ КОАГУЛЯЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ В НЕЛИНЕЙНО-ИСКАЖЕННЫХ И ВИХРЕВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ

В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, Р. Н. Голых

Предложена трёхмерная численная модель пространственно неоднородной ультразвуковой коагуляции частиц в нелинейно-искажённых акустических полях. Мо-

дель позволяет выявить эффективность коагуляции и оптимальные режимы и условия воздействия для широкого диапазона размеров частиц от субмикронных до PM_{2,5}. Это достигается путём учёта комплекса влияющих факторов, каждый из которых проявляется в наибольшей степени для определённого диапазона размеров частиц в текущий момент времени. Так, в частности, в субмикронном диапазоне наибольшее влияние оказывает фактор, связанный с формированием периодических ударных волн при искажении колебаний. Во время как в микронном диапазоне основной фактор, обеспечивающий повышение эффективности ультразвуковой коагуляции – это вихревые акустические течения. Предложенная модель состоит из трёх частей:

1. Итерационная конечно-элементная модель расчёта нелинейно-искажённых пространственно неоднородных колебаний, использующая метод объёмных источников нелинейных искажений в трёхмерном пространстве.

2. Итерационная конечно-элементная модель формирования пространственно неоднородных вихревых акустических течений, позволяющая рассчитать трёхмерное распределение скоростей в озвучиваемом объёме.

3. Модель пространственно неоднородной эволюции концентраций частиц, основанная на представлении концентрации аэрозоля в виде функции от двух функций тока, времени и типоразмера частиц из дискретного набора. Данный подход позволяет сократить размерность задачи с 4 до 3, тем самым на порядок повысив скорость численного расчёта.

С помощью предложенной модели проведён численный расчёт эффективности коагуляции для различных конфигураций формируемых акустических полей (плоская акустическая волна; сфокусированные акустические колебания; резонансные нелинейно-искажённые колебания в слое, сформированные поршневым излучателем; резонансные нелинейно-искажённые колебания в слое, сформированные изгибно-колеблющимся излучателем).

Установлено, что наибольшую эффективность коагуляции обеспечивают колебания в слое, сформированные изгибно-колеблющимся излучателем, за счёт комплексного воздействия нелинейных эффектов на каждой стадии коагуляции – ударно-волновое воздействие на начальной стадии, которое способствует повышению вероятности укрупнения субмикронных частиц, и вихревые акустические течения, которые способствуют локальному увеличению концентрации сформированных агломератов микронного размера за счёт инерционности последних.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00121, <https://rscf.ru/project/19-19-00121/>

Хмельёв Владимир Николаевич, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия. E-mail: vnh@bti.secna.ru

Шалунов Андрей Викторович, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия. E-mail: shalunov@bti.secna.ru

Голых Роман Николаевич, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия. E-mail: grn@bti.secna.ru

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL OF AEROSOL COAGULATION IN NONLINEARLY DISTORTED AND VORTEX ULTRASONIC FIELDS

V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. N. Golykh

The three-dimensional numerical model of spatially inhomogeneous ultrasonic coagulation of particles in nonlinearly distorted acoustic fields was proposed. The model allows to calculate the efficiency of coagulation and the optimal modes and conditions of exposure for a wide range of particle sizes from submicron to PM_{2.5}. It was achieved by taking into account a complex of influencing factors, each of which manifests itself to the greatest extent for a certain range of particle sizes at the current time. So, in particular, in the submicron range, the factor associated with the formation of periodic shock waves during the distortion of oscillations has the greatest influence. While in the micron range, the main factor providing an increase in the efficiency of ultrasonic coagulation is vortex acoustic flows. The proposed model consists of three parts:

1. An iterative finite element model for calculating nonlinearly distorted spatially inhomogeneous oscillations using the method of volumetric sources of nonlinear distortions in three-dimensional space.

2. An iterative finite element model of the formation of spatially inhomogeneous vortex acoustic flows, which makes it possible to calculate the three-dimensional distribution of velocities in the sounded volume.

3. A model of the spatially inhomogeneous evolution of particle concentrations based on the representation of the aerosol concentration as a function of two functions of the current, time, and particle size from a discrete set. This approach allows us to reduce the dimension of the problem from 4 to 3, thereby increasing the speed of numerical calculation by an order of magnitude.

Using the proposed model, a numerical calculation of the coagulation efficiency for various configurations of generated acoustic fields (plane acoustic wave; focused acoustic oscillations; resonant nonlinearly distorted oscillations in the layer formed by a piston radiator; resonant nonlinearly distorted oscillations in the layer formed by a flexurally oscillating radiator) was carried out.

It has been established that the highest efficiency of coagulation is provided by oscillations in the layer formed by a flexural-oscillating emitter due to the complex effect of nonlinear effects at each stage of coagulation - a shock-wave effect at the initial stage, which increases the probability of enlargement of submicron particles, and vortex acoustic flows, which contribute to a local increase in the concentration of formed micron-sized agglomerates due to the inertia of the latter.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 19-19-00121, <https://rscf.ru/project/19-19-00121/>

Khmelev Vladimir Nikolaevich, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia. E-mail: vnh@bti.secna.ru

Shalunov Andrey Viktorovich, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia. E-mail: shalunov@bti.secna.ru

Golykh Roman Nikolaevich, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia. E-mail: grn@bti.secna.ru