

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

А.Н. Холодилов¹, Ю.И. Виноградов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: kholodilov@mail.ru

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Одной из проблем обеспечения промышленной безопасности при ведении взрывных работ является снижение негативного воздействия воздушных ударных волн (ВУВ) на наземные объекты. Традиционно прогнозирование динамического воздействия ВУВ основывается на эмпирических закономерностях избыточного давления воздуха, на использовании известных программных комплексов инженерного анализа. Рассмотрена методика повышения точности прогноза динамического воздействия ВУВ путем экспериментального определения набора собственных колебательных мод охраняемого объекта. В основу методики положены дифференциальные уравнения затухающих колебаний под действием вынуждающей силы. Общее решение для колебательной скорости находится в виде линейной суперпозиции колебательных мод. После прекращения действия вынуждающей силы решение для колебательной моды аппроксимируется уравнением затухающих колебаний. Апробация методики проводилась путем исследования воздействия импульсов ВУВ от взрывных работ по утилизации боеприпасов на жилой дом. Для регистрации эпюр ВУВ и компонент колебательной скорости крыши здания использовалась сейсмическая станция Blastmate III. Проведено моделирование радиальной компоненты скорости колебаний для количества мод 1—9. Параметры колебаний зданий определялись путем достижения наилучшего согласия между модельной и экспериментальной кривыми колебательной скорости. Оценены ошибки определения амплитуды и частоты колебательных мод. Выделение свободных затухающих колебаний здания позволяет спрогнозировать максимальное значение пиковой колебательной скорости. Установлено, что при одномодовом представлении колебательной скорости значение коэффициента затухания колебаний в два раза больше аналогичного параметра в случае многомодового представления. С возрастанием пикового давления в ВУВ в наборе колебательных мод возрастает доминирование низкочастотных компонент. При малых пиковых избыточных давлениях в ВУВ частоты колебательных мод здания, в основном, подчиняются закону нормального распределения.

Ключевые слова: взрывные работы, воздушная ударная волна, избыточное давление воздуха, колебательная скорость, наземное сооружение, промышленная безопасность, прогнозирование динамического воздействия, утилизация боеприпасов.

Для цитирования: Холодилов А.Н., Виноградов Ю.И. Методика прогнозирования колебаний наземных объектов при импульсном воздействии воздушных ударных волн // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 55–63. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-55-63.

Method for forecasting of surface facilities vibrations reasoned by impulse action of air shock waves

A.N. Kholodilov¹, Yu.I. Vinogradov²

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: kholodilov@mail.ru

² Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: One of the safety concerns in blasting is the adverse effect of air shocks on surface facilities. The dynamic impact of air shocks is conventionally predicted using empirical laws of excessive air pressure and software systems of engineering analysis. This article considers the improved accuracy prediction procedure of dynamic impact of air shocks through experimental determination of a set of free vibrational modes of a guarded facility. The procedure uses the differential equations of damped oscillations under the action of disturbing force. The general solution for vibration velocity is found as a linear superposition of vibrational modes. After loss of effect of the disturbing force, the solution for the vibrational mode is approximated by the equation of damped oscillation. The procedure was trialed in the study of the effect exerted by air shocks from ammunition disposal by blasting on a dwelling house. The curves of air shocks and the house roof particle velocity were plotted using records of seismic station Blastmate III. Modeling of radial particle velocity is carried out for modes 1–9. Parameters of the building vibrations were determined from the best agreement between the modeling and experimental curves of particle velocity. The measuring errors of amplitude and frequency of vibrational modes are determined. The identified free damped oscillations of the building allow predicting maximum value of peak particle velocity. It is found that in the single-mode presentation of particle velocity, the value of the subsidence ratio is twice as large as the same parameter in the multi-mode presentation. As the peak pressure of air shocks increases, the low-frequency components dominate the set of vibrational modes. Under small peak excess pressure of air shocks, the frequencies of vibrational modes of the building mostly obey the normal distribution law.

Key words: blasting, air shock, excess air pressure, particle velocity, surface facility, production safety, dynamic impact prediction, ammunition disposal.

For citation: Kholodilov A. N., Vinogradov Yu. I. Method for forecasting of surface facilities vibrations reasoned by impulse action of air shock waves. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(2):55-63. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-55-63.

Введение

Одной из проблем обеспечения промышленной безопасности при ведении взрывных работ в различных отраслях народного хозяйства является снижение негативного воздействия воздушных ударных волн (ВУВ) на здания и наземные сооружения и шумового эффекта. Прогнозирование динамического воздействия ВУВ основывается на эмпирических закономерностях избыточного давления воздуха при различных усло-

виях взрывания зарядов взрывчатых веществ (ВВ) [1–2], газогенерирующих составов [3], на авторских программах [4], на использовании известных программных комплексов инженерного анализа ANSYS, LS-DYNA [5–6]. Совместное воздействие ВУВ и сейсмозврывных волн на социальную инфраструктуру при ведении взрывных работ исследовалось в [7]. В последнее время для прогноза негативного воздействия ВУВ широко используются искусственные нейрон-

ные сети, алгоритмы роевого интеллекта [8–10].

Весьма актуальной проблемой является раскочка здания, вызванная импульсами ВУВ, когда амплитуда колебаний верхней части здания может превышать в десятки раз амплитуду колебаний грунта в основании здания при проведении массовых взрывов на карьере [11]. На практике часты жалобы населения на повышенную вибрацию при утилизации боеприпасов путем уничтожения [12]. Следует отметить, что указанные явления реализуются при пиковых давлениях в ВУВ, как правило, менее 0,2 кПа.

Одним из путей повышения точности прогноза динамического воздействия ВУВ и управления этим воздействием является экспериментальное определение набора собственных колебательных мод охраняемого объекта. Это возможно путем анализа колебаний здания под воздействием одиночных импульсов ВУВ и последующим исключением составляющих колебаний, связанных непосредственно с ВУВ.

Теория вопроса

Набором колебательных мод объекта будет результат решений дифференциальных уравнений:

$$\frac{d^2 X_i}{dt^2} + 2\beta_i \frac{dX_i}{dt} + \omega_i^2 X_i = f_i(t), \quad (1)$$

где t — время; X_i — смещение; $dX_i/dt \equiv v_i(t)$ — колебательная скорость; $f_i(t)$ — приведенная к массе вынуждающая сила; β_i — коэффициент затухания и ω_i — круговая частота колебаний. Для всех параметров индекс « i » относится к i -й колебательной моде. Общее решение для колебательной скорости находится в виде линейной суперпозиции:

$$v(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t), \quad (2)$$

где n — количество колебательных мод, которое находится из условия наилуч-

шего согласия моделируемой и экспериментальной кривых. Из формулы (2) вытекает, что для нахождения колебательной скорости требуется решить n раз уравнение (1) в предположении независимости колебательных мод.

На практике определяется эпюра избыточного давления в ВУВ $\Delta P(t)$, через которую приведенная вынуждающая сила также представляется в виде линейной суперпозиции:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t) = k \cdot \sum_{i=1}^n C_i \cdot \Delta P(t), \quad (3)$$

где k — коэффициент перевода избыточного давления в приведенную вынуждающую силу; C_i — доля избыточного давления, приводящего к возбуждению i -й колебательной моды. Из выражения (3) вытекает условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^n C_i = 1. \quad (4)$$

После прекращения действия вынуждающей силы решение для i -й колебательной моды аппроксимируется уравнением затухающих колебаний:

$$v_{zi}(t) = A_i \cdot \exp(-\beta_i t) \cdot \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (5)$$

где A_i — амплитуда свободных колебаний; φ_i — начальная фаза. Параметры A_i и φ_i определяются как результат аппроксимации функции $v_i(t)$ функцией $v_{zi}(t)$.

Исследование воздействия ВУВ на жилой дом

Источником импульсов ВУВ служили взрывные работы по утилизации боеприпасов на территории военного полигона, расположенного вблизи поселения Семиозерье Выборгского района Ленинградской области. Исследования проводились Горным университетом в рамках экспертизы промышленной безопасности. Фактическим местом проведения исследований являлась крыша жилого панельного пятиэтажного дома,

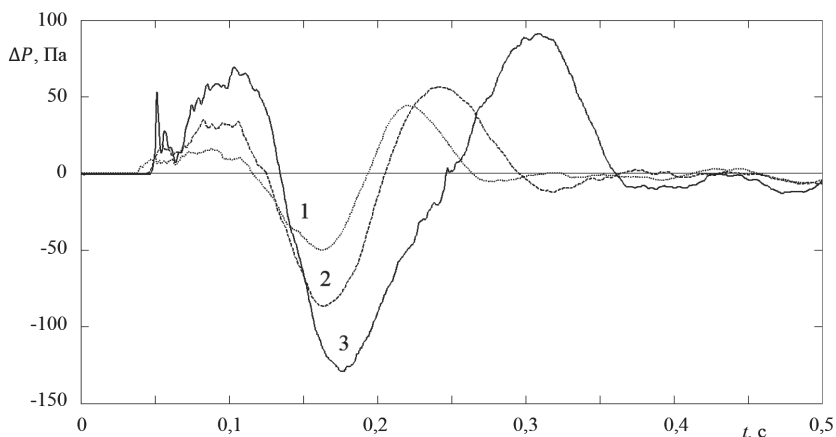


Рис. 1. Эпюры избыточного давления в ВУВ для пиковых давлений: 1 – 50,3 Па; 2 – 86,8 Па; 3 – 129 Па
 Fig. 1. Diagrams of overpressure in ASW for peak pressures: 1 – 50,3 Pa; 2 – 86,8 Pa; 3 – 129 Pa

расположенного по адресу: поселение Семиозерье, ул. Центральная, д. 53.

Измерения проводились с использованием сейсмической станции Blastmate III. С помощью микрофона регистрировались эпюры ВУВ, с помощью сейсмического датчика — компоненты колебательной скорости здания. Установка датчиков производилась на крыше около вентиляционной шахты. Микрофон и датчик радиальной компоненты колебательной скорости ориентировались по направлению на место проведения взрывных работ. Жесткость крепления сейсмического датчика обеспечивалась пригрузом в виде 2-х кирпичей. Запуск регистрации сигналов производился по превышению предустановленного порога давления в ВУВ (10 Па). Пиковое давление воздуха при порывах ветра не превышало 11 Па. На рис. 1 приведены эпюры ВУВ, из анализа которых следует, что пиковое значение давления достигается в фазе разряжения ВУВ.

При моделировании колебаний жилого дома по результатам воздействия на него импульсов ВУВ следует учитывать плохую обусловленность полученного решения задачи, заключающе-

гося с одной стороны в использовании зашумленных экспериментальных данных, с другой — в необходимости подгонки большого количества параметров для согласования модели с реальным поведением объекта. Ситуация заметно осложняется, если поведение объекта описывается осциллирующей функцией. Будем придерживаться следующих правил моделирования: модельная и экспериментальная кривые описываются одной огибающей; осцилляции кривых носят схожий характер. Наибольшую трудность вызывает выполнение последнего правила. Поэтому ограничимся количеством колебательных мод в интервале 1–9. Процедура моделирования поясняется на рис. 2. Модельная кривая 1 на рис. 2 получена для коэффициента затухания 1 с^{-1} , остальные — для коэффициента затухания $0,5 \text{ с}^{-1}$.

В предположении одномодового характера колебательной скорости получается удовлетворительное согласие модели и эксперимента относительно огибающей и очень хорошее согласие первых осцилляций. Однако эти согласия достигаются двукратным увеличением модельного коэффициента затухания. По мере увеличения количества колеба-

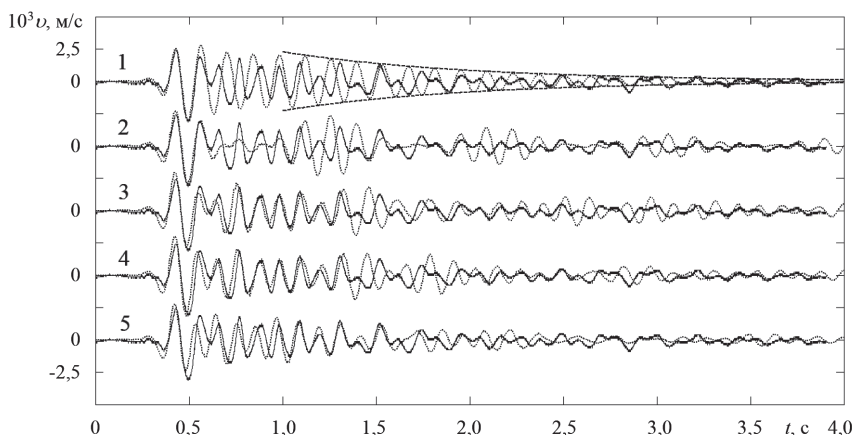


Рис. 2. Графики зависимостей моделируемых (точки) и экспериментальных (сплошные кривые) колебательных скоростей от времени (пиковое давление в ВУВ – 50,3 Па) при следующих количествах колебательных мод (n): 1 – $n = 1$; 2 – $n = 3$; 3 – $n = 5$; 4 – $n = 7$; 5 – $n = 9$. Огибающие кривых – пунктир
 Fig. 2. Graphs of the dependence of simulated (points) and experimental (continuous curves) vibration velocities on time (peak pressure in ASW – 50,3 Pa) for the following amounts of vibration modes (n): 1 – $n = 1$; 2 – $n = 3$; 3 – $n = 5$; 4 – $n = 7$; 5 – $n = 9$. Envelopes of curves – the dotted line

тельных мод, вводимых в модельную функцию колебательной скорости, улучшается согласие с экспериментом относительно осцилляций. При количестве колебательных мод, равном 7 или 9, качество согласия осцилляций и огибающих не изменяется, поэтому количество мод достаточно ограничить 9. В таблице приведены основные параметры колебательных мод и приняты

следующие обозначения: P_n – пиковое давление в ВУВ, $v_i = \omega_i / (2\pi)$ – частота i -й моды.

Как следует из таблицы, с возрастанием пикового давления в ВУВ состав колебательных мод претерпевает качественное изменение в сторону доминирования низкочастотных составляющих. Это изменение носит немонотонный характер. Так, в составе колебательных мод

Результаты определения параметров колебательных мод здания
Resultant parameters of vibrational modes of building

P_n , Па	Колебательные моды																	
	v_1 , Гц	C_1	v_2 , Гц	C_2	v_3 , Гц	C_3	v_4 , Гц	C_4	v_5 , Гц	C_5	v_6 , Гц	C_6	v_7 , Гц	C_7	v_8 , Гц	C_8	v_9 , Гц	C_9
50,3	7,2*	0,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	8,3	0,3	7,2	0,4	6,1	0,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	9,0	0,2	8,6	0,4	7,6	0,15	6,7	0,25	5,9	0,25	–	–	–	–	–	–	–	–
	8,9	0,15	8,7	0,25	8,6	0,2	8,0	0,2	7,5	0,1	6,7	0,2	5,9	0,2	–	–	–	–
	9,2	0,18	9,0	0,27	8,8	0,18	8,4	0,09	7,8	0,18	7,2	0,09	6,2	0,09	5,6	0,18	4,7	0,09
86,8	7,4	0,2	7,1	0,2	6,6	0,15	5,6	0,15	5,3	0,15	4,5	0,15	–	–	–	–	–	–
129	8,7	0,4	8,3	0,2	7,4	0,3	6,9	0,18	6,0	0,1	5,2	0,24	4,4	0,14	–	–	–	–
	9,1	0,12	8,9	0,24	8,7	0,12	6,7	0,12	6,3	0,24	5,9	0,12	5,7	0,12	5,2	0,24	4,5	0,12

Примечание: * – коэффициент затухания принимался $\beta = 1 \text{ с}^{-1}$, в остальных случаях – $\beta = 0,5 \text{ с}^{-1}$.

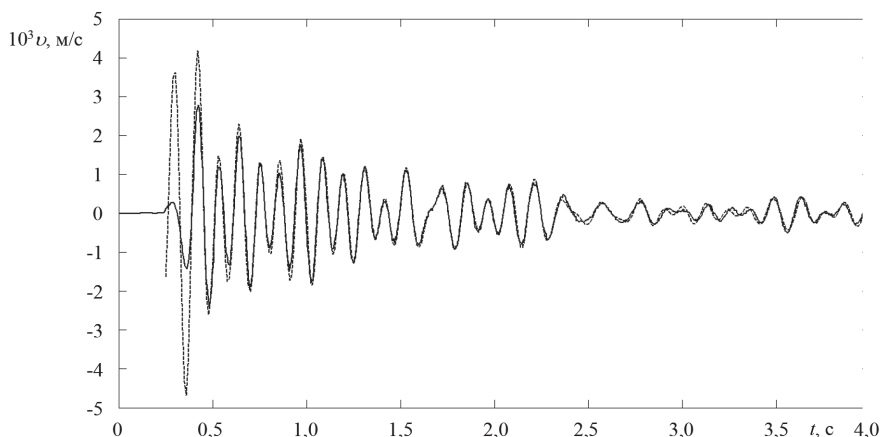


Рис. 3. Графики зависимостей модельных 9-модовых колебательных скоростей от времени при воздействии на здание ВУВ с $P_n = 50,3$ Па: сплошная кривая — решения уравнений (1)–(2), штриховая кривая — суперпозиция решений (5)

Fig. 3. Graphs of the dependence of the model nine modes vibration velocities on time when exposed to the building of ASW with $P_p = 50,3$ Pa: solid curve — solutions of equations (1)–(2), dashed curve — superposition of solutions (5)

здания в ВУВ с $P_n = 86,8$ Па не представлены моды $8,3 - 9,2$ Гц, которые вновь появляются в ВУВ с $P_n = 129$ Па. Из таблицы также следует, что сумма величин C_i может отличаться от единицы до 40%. Поэтому максимальную ошибку определения амплитуды колебательной моды для модельных колебаний, включающих 9 мод, оценим в 40%. При этом ошибка определения частоты моды не превышает $0,2 - 0,3$ Гц.

На рис. 3 показано, как исключить из колебательной скорости здания составляющую, связанную с импульсом ВУВ.

Из сравнения рис. 1 и рис. 3 следует, что интервал времени значительного расхождения вынужденных затухающих и свободных затухающих колебаний соответствует продолжительности импульса ВУВ. Выделение колебательной скорости свободных затухающих колебаний здания позволяет прогнозировать максимальное значение пиковой скорости при динамическом воздействии ВУВ ($4,6$ мм/с в случае, рассмотренном на рис. 3). Кроме того, при малых коэф-

фициентах затухания создаются предпосылки заметного возрастания амплитуды колебаний в интервалах времени, удаленных от моментов окончания динамического воздействия ВУВ.

В области прогнозирования немаловажный факт играет статистический характер параметров, на основе которых строится прогнозная модель. Выше отмечено, что частота колебательных мод является величиной, зависимой от уровня динамического воздействия на здание. В предположении нормального закона распределения частот на рис. 4 построены кумулятивные прямые частот колебательных мод.

Из анализа рис. 4 следует, что в области пиковых давлений $50,3$ и $86,8$ Па колебательные моды за исключением самых высокочастотных мод практически подчиняются закону нормального распределения. При пиковом давлении 129 Па частоты колебательных мод характеризуются большим разбросом относительно кумулятивных прямых нормального распределения частот колебательных мод.

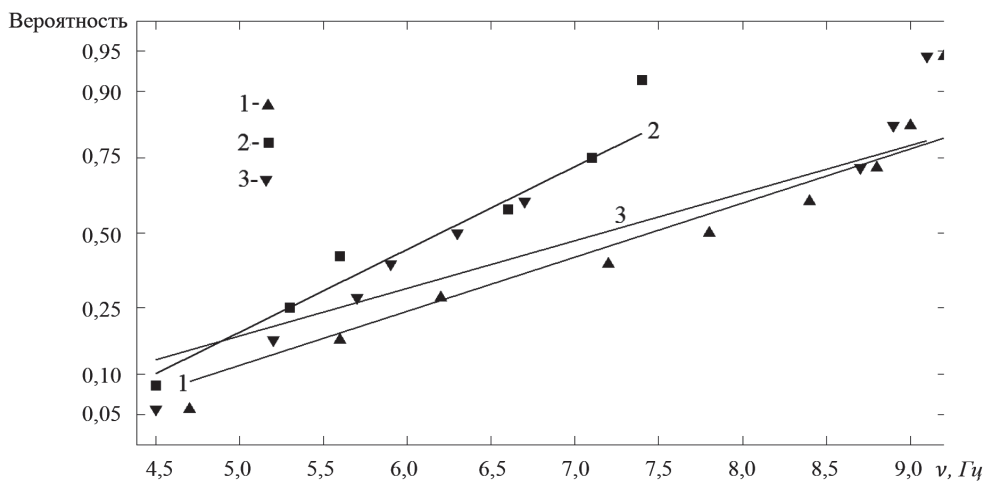


Рис. 4. Кумулятивные прямые нормального распределения частот колебательных мод для ВУВ: 1 – $P_n = 50,3$ Па; 2 – $P_n = 86,8$ Па; 3 – $P_n = 129$ Па

Fig. 4. Cumulative straight lines of normal frequency distribution of vibrational modes for ASW: 1 – $P_p = 50,3$ Pa; 2 – $P_p = 86,8$ Pa; 3 – $P_p = 129$ Pa

Заключение

Разработана методика прогнозирования колебаний наземных объектов при импульсном воздействии ВУВ, позволяющая находить параметры колебательных мод охраняемых объектов (амплитуда, частота, коэффициент затухания) из анализа экспериментальных зависимостей скоростей колебаний от времени.

Проведено моделирование зависимости радиальной компоненты скорости колебаний для количества колебательных мод 1–9 и установлено, что при одномодовом анализе требуется значение коэффициента затухания колебаний в два раза больше аналогично-

го параметра в случае многомодового анализа. Максимальное значение колебательных мод ограничено ошибкой согласования модельных и экспериментальных кривых колебательной скорости.

Показано, что с возрастанием пикового давления в ВУВ набор колебательных мод, необходимый для получения кривой колебательной скорости, претерпевает изменение в сторону доминирования низкочастотных составляющих.

Установлено, что для малых пиковых избыточных давлений в ВУВ частоты колебательных моды здания, в основном, подчиняются закону нормального распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганопольский М. И. Результаты экспериментальных исследований ударных воздушных волн при взрывах на земной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S2-3. – С. 5–37.

2. Dharma Rao V., Srinivas Kumar A., Venkateswara Rao K., Krishna Prasad V.S.R. Theoretical and experimental studies on blast wave propagation in air // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2015. Vol. 40. No 1. Pp. 138–143. DOI: 10.1002/prep.201400042.

3. Ненахов И. А., Фоменкова В. Е., Кириллов С. С., Ганопольский М. И. Прогнозирование величины давления акустических воздушных волн при разрыхлении скального

грунта зарядами ГДШ // Евразийский союз ученых. — 2015. — № 12–5 (21). — С. 83–86.

4. Потапов В. П., Счастливцев Е. Л., Харлампенков И. Е. Оценка шумового воздействия массовых взрывов при ведении горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — СВ 23. — С. 574–579. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-574-579.

5. Вальгер С. А., Данилов М. Н., Федорова Н. Н., Федоров А. В. Сравнение данных моделирования ударно-волнового воздействия на сооружения с использованием AUTODYN и LS-DYNA // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2014. — № 11. — С. 77–92.

6. Мкртычев О. В., Савенков А. Ю. Численное моделирование фронта воздушной ударной волны при взрыве в воздухе и над землей в программном комплексе LS-DYNA // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2018. — Т. 14. — № 6. — С. 467–474. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-467-474.

7. Aloui M., Bleuzen Y., Essefi E., Abbes C. Ground vibrations and air blast effects induced by blasting in open pit mines: case of Metlaoui mining basin, Southwestern Tunisia // Journal of Geology & Geophysics. 2016. Vol. 5. No 3. Pp. 1–8. DOI: 10.4172/2381-8719.1000247.

8. Bui X.-N., Nguyen H., Le H.-A., Bui H.-B., Do N.-H. Prediction of blast-induced air overpressure in open-pit mine: assessment of different artificial intelligence techniques // Natural Resources Research. 2020. Vol. 21. Pp. 571–591. DOI: 10.1007/s11053-019-09461-0.

9. Alel M. N. A., Upom M. R. A., Abdullah R. A., Mohd Hazreek Zainal Abidin. Optimizing blasting's air overpressure prediction model using swarm intelligence // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 995. DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012046.

10. Hajhassani M., Armaghani D. J., Sohaei H., Mohamad E. T., Marto A. Prediction of airblast-overpressure induced by blasting using a hybrid artificial neural network and particle swarm optimization // Applied Acoustics. 2014. Vol. 80. Pp. 57–67. DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.01.005.

11. Артемов В. А., Виноградов Ю. И., Парамонов Г. П., Холодилов А. Н. Оценка влияния взрывных работ на людей, находящихся в наземных сооружениях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — № S5. — С. 410–414.

12. Хусаинова Р. З., Чуйков Ю. С. Проблемы экологической безопасности и безопасности персонала и населения при утилизации непригодных к использованию боеприпасов // Астраханский вестник экологического образования. — 2013. — № 2 (24). — С. 156–169. **ИЗДА**

REFERENCES

1. Ganopolskiy M. I. Results of experimental studies of air shock waves during explosions on the earth's surface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no S2-3, pp. 5–37. [In Russ].

2. Dharma Rao V., Srinivas Kumar A., Venkateswara Rao K., Krishna Prasad V. S. R. Theoretical and experimental studies on blast wave propagation in air. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2015. Vol. 40. No 1. Pp. 138–143. DOI: 10.1002/prop.201400042.

3. Nenakhov I. A., Fomenkova V. E., Kirillov S. S., Ganopol'skiy M. I. Forecasting the magnitude of the acoustic air pressure when loosening of the rock mass charges GPB. *Eurasian Union of Scientists*. 2015, no 12–5 (21), pp. 83–86. [In Russ].

4. Potapov V. P., Schastlivtsev E. L., Kharlampenkov I. E. Assessment of the noise impact of bulk blasts during mining operations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017. Special edition 23, pp. 574–579. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-574-579.

5. Val'ger S. A., Danilov M. N., Fedorova N. N., Fedorov A. V. The comparison of results of simulation of shock wave action on structures using ANSYS and AUTODYN and LS-DYNA software. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2014, no 11, pp. 77–92. [In Russ].

6. Mkrtychev O. V., Savenkov A. Yu. Numerical simulation of the front of an air shock wave in a ground and air explosion in the software package LS-DYNA. *Structural Mechanics and*

Analysis of Constructions. 2018, vol. 14, no 6, pp. 467 – 474. [In Russ]. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-467-474.

7. Aloui M., Bleuzen Y., Essefi E., Abbes C. Ground vibrations and air blast effects induced by blasting in open pit mines: case of Metlaoui mining basin, Southwestern Tunisia. *Journal of Geology & Geophysics*. 2016. Vol. 5. No 3. Pp. 1 – 8. DOI: 10.4172/2381-8719.1000247.

8. Bui X.-N., Nguyen H., Le H.-A., Bui H.-B., Do N.-H. Prediction of blast-induced air over-pressure in open-pit mine: assessment of different artificial intelligence techniques. *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 21. Pp. 571 – 591. DOI: 10.1007/s11053-019-09461-0.

9. Alel M. N. A., Upom M. R. A., Abdullah R. A., Mohd Hazreek Zainal Abidin. Optimizing blasting's air overpressure prediction model using swarm intelligence. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 995. DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012046.

10. Hajihassani M., Armaghani D.J., Sohaei H., Mohamad E.T., Marto A. Prediction of airblast-overpressure induced by blasting using a hybrid artificial neural network and particle swarm optimization. *Applied Acoustics*. 2014. Vol. 80. Pp. 57 – 67. DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.01.005.

11. Artemov V.A., Vinogradov Yu.I., Paramonov G.P., Kholodilov A.N. Otsenka vliyaniya vzyryvnykh rabot na lyudey, nakhodyashchikhsya v nazemnykh sooruzheniyakh. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007, no S5, pp. 410 – 414. [In Russ].

12. Khusainova R. Z., Chuykov Yu. S. Problems of environmental safety and security of personnel and the public when disposing of an unserviceable ammunition. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2013, no 2 (24), pp. 156 – 169. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Холодиллов Андрей Николаевич – канд. физ.-мат. наук,
доцент, e-mail: kholodilov@mail.ru,

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,

Виноградов Юрий Иванович – канд. техн. наук, доцент,
Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Холодиллов А.Н., e-mail: kholodilov@mail.ru,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.N. Kholodilov, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Assistant Professor, e-mail: kholodilov@mail.ru,
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
190000, Saint-Petersburg, Russia,

Yu.I. Vinogradov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A.N. Kholodilov, e-mail: kholodilov@mail.ru,

Получена редакцией 26.12.2019; получена после рецензии 06.07.2020; принята к печати 10.01.2021.

Received by the editors 26.12.2019; received after the review 06.07.2020; accepted for printing 10.01.2021.

