

УДК 622.001.5:621.313.12-752.

**Зберовский В.В.**, канд. техн. наук, ст.науч.сотр.,  
**Поляков Ю.Е.**, аспирант,  
**Наривский Р.Н.**, магистр  
 (ИГТМ НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА  
 УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ РАСКРЫТИЯ  
 ДИФFUЗОРА**

**Зберовський В.В.**, канд. техн. наук, ст.наук.співр.,  
**Поляков Ю.Є.**, аспірант,  
**Наривський Р.М.**, магістр  
 (ІГТМ НАН України)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА  
 ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ ПРИ РІЗНИХ КУТАХ РОЗКРИТТЯ ДИФFUЗОРА**

**Zberovskiy V.V.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**Polyakov Yu.E.**, Doctoral Student,  
**Narivskiy R.N.**, M. S. (Tech.)  
 (IGTM NAS of Ukraine)

**DYNAMIC PARAMETERS OF ELASTIC-VIBRATION GENERATOR  
 STUDIED AT DIFFERENT ANGLES  
 OF DIFFUSER DISCLOSURE**

**Аннотация.** В основу статьи положено моделирование процесса импульсного нагнетания жидкости и определение гидродинамических параметров генератора ГК-2,5 с различными углами раскрытия диффузора  $\beta=15^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$  для длины критического сечения  $l_{кр}=6$  мм и  $\beta=20^\circ$  для  $l_{кр}=3$  мм. При исследованиях гидродинамических параметров кавитационного течения жидкости рассматривались:  $\Delta P$  – размах автоколебаний;  $f$  – частота автоколебаний;  $\tau$  – параметр кавитации. В качестве режимных параметров рассматривались:  $P_{п}$ ,  $P_{п}$  и  $Q$  – давление нагнетания, подпора и расход жидкости. По экспериментальным данным моделирования гидроимпульсного воздействия установлены значения размаха  $\Delta P$  и частоты  $f$  автоколебаний в зависимости от параметра кавитации  $\tau$  и давления подпора  $P_{п}$  для различных режимов импульсного нагнетания жидкости в угольные пласты, залегающие на глубинах до 1300 м.

**Ключевые слова:** генератор упругих колебаний, размах автоколебаний, угол раскрытия диффузора, режим нагнетания, гидродинамические параметры.

Впервые научно обоснованные результаты исследований применения кавитационных генераторов импульсов давления (далее генератор) при увлажнении угольных пластов приведены в 1983 году в работе А.В. Родина «Обоснование параметров и разработка погружного кавитационного генератора импульсов давления, обеспечивающего повышение эффективности предварительного увлажнения угольных пластов». Здесь необходимо отметить, что в основу теоретического обоснования параметров кавитационного генератора, рассмот-

ренного в отмеченной работе, положены многолетние результаты исследований ученых Института технической механики НАН Украины (руководитель работ академик В.В. Пилипенко).

Исследование кавитационного течения жидкости, конструктивных и динамических параметров генераторов продолжилось при нагнетании жидкости в выбросоопасные угольные пласты [1-3] и в других направлениях горного дела [4]. Эти исследования позволили разработать новую конструкцию устройства гидроимпульсного воздействия [5]. В устройстве, диаметр критического сечения генератора упругих колебаний (далее ГК-2,5)  $d_{кр}=2,5$  мм принят из условия расхода жидкости серийных насосных установок до 90 л/мин, а угол раскрытия диффузора  $\beta=20^\circ$  по результатам исследований В.В. Пилипенко и А.В. Родина. Учитывая, что угол раскрытия диффузора  $\beta=20^\circ$  был установлен для кавитационных генераторов с  $d_{кр}$  от 4 до 16 мм и расходом жидкости более 300 л/мин, для ГК-2,5 с  $d_{кр}=2,5$  мм необходимо проведение дополнительных исследований на соответствие геометрических параметров генератора условиям нагнетания.

Результаты исследований, приведенные в данной работе, являются составной частью процесса моделирования по определению гидродинамических параметров генератора упругих колебаний ГК-2,5, изложенных в методике экспериментальных исследований [6].

Выходными условиями для исследования динамических параметров генератора являются:

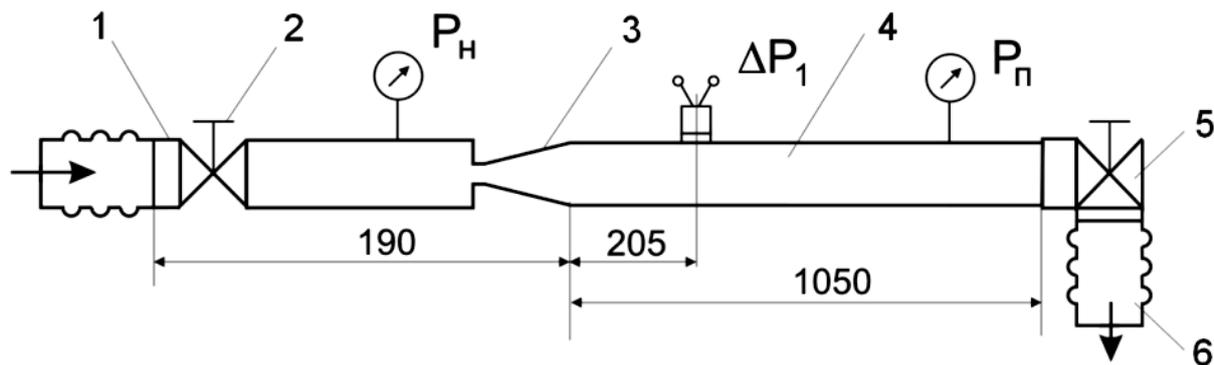
- длина критического сечения генератора  $l_{кр}=2,0 \dots 6,0$  мм;
- угол раскрытия диффузора  $\beta=15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$  с переменной длиной диффузора  $l_{диф}=28,5; 14; 11,3; 10,3$  и 9 мм соответственно;

Следует отметить, что впервые в комплексе лабораторных испытаний генераторов упругих колебаний при моделировании процесса исследовались, как гидродинамические параметры кавитационного течения жидкости при различных геометрических параметрах генератора, так и режимные параметры нагнетания жидкости в выбросоопасные угольные пласты.

В качестве исследуемых гидродинамических параметров кавитационного течения жидкости рассматривались:  $\Delta P$  – размах автоколебаний;  $f$  – частота автоколебаний;  $\tau$  – параметр кавитации,  $\tau=P_{п}/P_{н}$ . В качестве режимных параметров нагнетания жидкости:  $P_{н}$ ,  $P_{п}$  и  $Q$  – давление нагнетания, подпора и расход жидкости.

Исследования гидродинамических параметров ГК-2,5 проводились при моделировании импульсного нагнетания жидкости на гидравлическом стенде в последовательности, описанной в методике [6], по схеме, приведенной на рис 1.

По результатам каждого измерения в базе данных компьютера оформлялся электронный вариант протокола испытаний. В протоколе фиксировались параметры измерений, регистрируемые аппаратурой по которым проводился расчет динамических характеристик кавитационного течения жидкости. Значения динамических характеристик также внесены в протокол испытаний.



1 – входной трубопровод; 2 – регулируемый дроссель; 3 – генератор упругих колебаний; 4 – выходной трубопровод с датчиком давления и манометром; 5 – подпорный дроссель; 6 – сливной трубопровод стенда

Рисунок 1 – Схема автономных испытаний кавитационного генератора упругих колебаний давления жидкости

Результаты инструментальных измерений гидравлических параметров нагнетания жидкости и расчета динамических параметров генератора по каждому циклу испытаний оформлены в виде таблиц и графического поля экспериментальных данных.

Из общей базы данных исследований гидродинамических параметров генератора ГК-2,5 с  $l_{кр}=6,0$  мм и  $\beta=15^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$  выберем результаты испытаний ГК-2,5 с углом раскрытия диффузора  $\beta=35^\circ$  и  $l_{кр}=6,0$  мм при  $P_n=15$  МПа и  $Q=35$  л/мин (табл. 1) и рассмотрим их в качестве примера.

Таблица 1 – Результаты измерений и расчета параметров при режиме нагнетания  $P_n=15$  МПа,  $Q=35$  л/мин

V, л	142										
t, мин	4,37										
Q, л/мин	35								32,5	30	
$P_n$ , МПа	15							17,5	18	19	20
$P_n$ , МПа	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15
$\Delta P$ , МПа	3,3	18,5	14,5	9,1	4,4	2,5	1,4	0,73	0,68	0,73	0,68
f	1251	1715	8666	6970	5456	40	40	40	40	40	40
$\tau$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,67	0,71	0,75

На рисунке 2 представлены установленные значения размаха  $\Delta P$  и частоты  $f$  автоколебаний (табл.1) в зависимости от параметра кавитации  $\tau$  для ГК-2,5 с  $\beta=35^\circ$  и  $l_{кр}=6,0$  мм при различных режимах нагнетания.

Анализ данных, приведенных в таблице 1 и на рис.2, показывает, что при включении насосной установки, при минимальных значениях давления подпора жидкости, за генератором реализуется периодически-срывное течение жидкости с  $\Delta P=3,3$  МПа и  $f=1251$  Гц. Эти значения размаха и частоты автоколебаний можно принять за начальный или холостой режим работы генератора. На этой

стадии процесса происходит зарождение явления кавитации и преобразования статического течения жидкости в импульсное. Затем, с увеличением давления подпора, наблюдается резкий рост динамических характеристик до их максимальных значений и последующее снижение. Этот диапазон при  $P_{\text{п}}$  от 0,5 МПа до 7,5 МПа является рабочим, в нем наблюдается устойчивый процесс кавитационного течения жидкости, который в диапазоне  $0,03 \leq \tau \leq 0,2$  реализуются в максимальных значениях гидродинамических параметров генератора. Следующий этап – затухание кавитационного течения жидкости. В этом диапазоне, в нашем примере при  $P_{\text{п}}$  более 9 МПа, генератор работает как простое гидравлическое сопротивление, когда с ростом давления подпора наблюдается рост давления нагнетания.

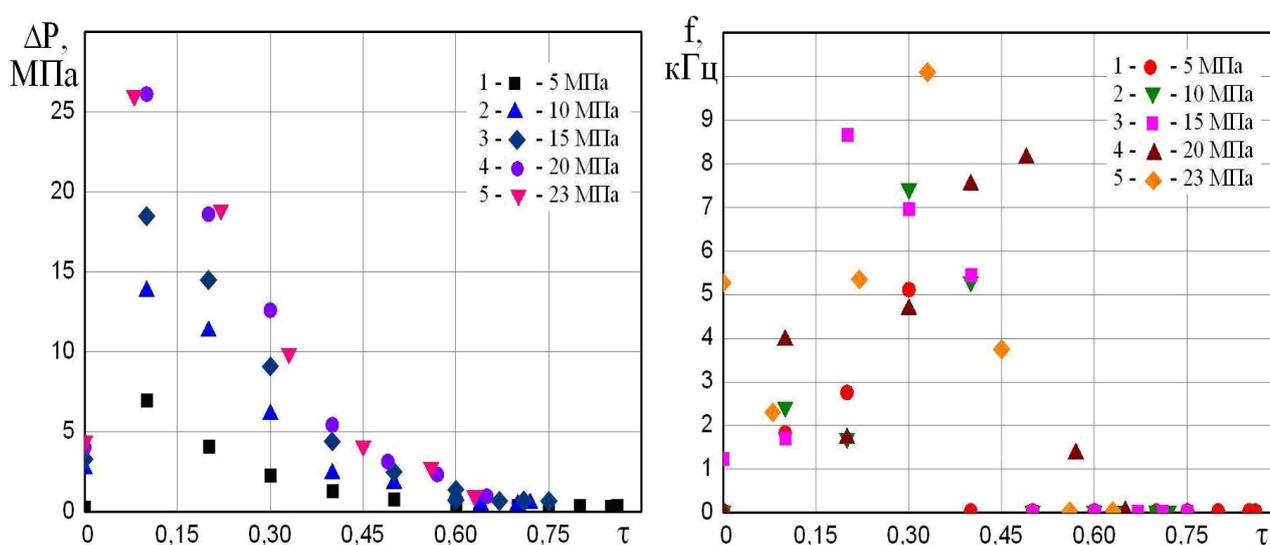


Рисунок 2 – Экспериментальные данные изменения размаха  $\Delta P$  и частоты  $f$  автоколебаний от параметра кавитации  $\tau$  для ГК-2,5 с  $\beta=35^\circ$ ,  $l_{\text{кр}}=6,0$  мм

Подобный характер изменения гидродинамических параметров генератора установлен при различных углах раскрытия диффузора генератора и режимных параметрах нагнетания. Данный вывод дает основание для сопоставления полученных результатов с целью установления угла раскрытия диффузора, которому соответствует наиболее эффективной диапазон размаха автоколебаний при заданном режиме импульсного нагнетания жидкости.

В качестве примера на рисунке 3 приведены зависимости изменения размаха и частоты автоколебаний от различных углов раскрытия диффузора при рассмотренном нами режиме импульсного нагнетания  $P_{\text{п}}=15$  МПа,  $Q=35$  л/мин.

Анализ результатов (рис.3) позволяет отметить, что при заданном режиме нагнетания  $P_{\text{п}}=15$  МПа,  $Q=35$  л/мин наибольшие значения размаха и частоты автоколебаний в рабочем диапазоне по параметру кавитации  $\tau$  наблюдаются при  $\beta=20^\circ$ .

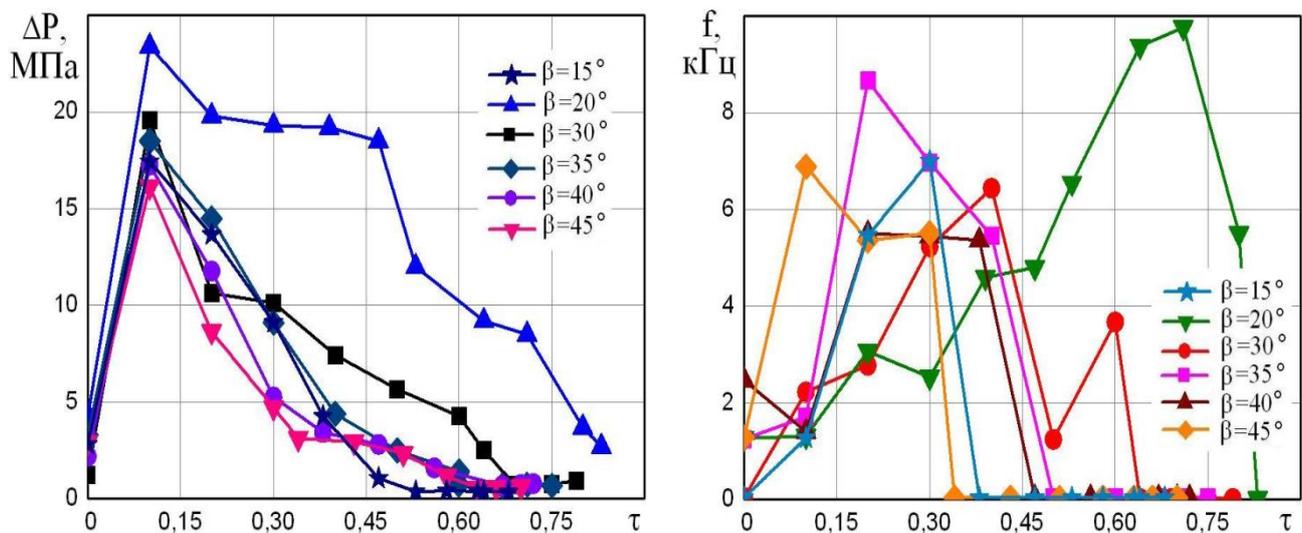


Рисунок 3 – Сопоставление экспериментальных данных размаха  $\Delta P$  и частоты  $f$  автоколебаний при различных углах раскрытия диффузора ГК-2,5 в режиме нагнетания  $P_n=15$  МПа,  $Q=35$  л/мин

Аналогичные результаты изменения гидродинамических параметров кавитационного течения жидкости получены и при остальных режимах импульсного нагнетания жидкости -  $P_n=5, 10, 20$  и  $25$  МПа.

Таким образом, на рассмотренном нами примере моделирования процесса импульсного нагнетания жидкости, установлено, что при различных углах раскрытия диффузора от  $15$  до  $45$  градусов за генератором возникает периодически-срывное течение жидкости. При различных углах раскрытия диффузора генератора и равных режимных параметрах нагнетания, прослеживаются устойчивые взаимозависимости частоты и размаха автоколебаний с параметром кавитации (давлением подпора), максимальные значения размаха и частоты автоколебаний соответствует  $\beta=20^\circ$ .

По результатам проведенных исследований сделаны следующие **выводы**.

1. Изменение угла раскрытия диффузора приводит к изменению значений размаха и частоты автоколебаний, однако характер и качественная картина их изменения остаются прежними.

2. Максимальные значения динамических характеристик кавитационного течения жидкости - размах и частота автоколебаний в рабочем диапазоне генератора ГК-2,5 по параметру кавитации  $\tau$  установлены при  $\beta=20^\circ$ , что подтвердило достоверность выбора его геометрических параметров.

3. Установлено, что процесс импульсного нагнетания в режиме периодически-срывного течения жидкости состоит из трех составляющих: стадии зарождения, устойчивого явления кавитации и его затухания. При включении насосной установки за генератором устанавливаются начальные (собственные) значения размаха и частоты автоколебаний, которые можно обозначить как нулевой или холостой режим его работы. При увеличении давления подпора жидкости до  $1...2$  МПа наблюдается резкий рост гидродинамических параметров с

пиковыми значениями размаха автоколебаний в диапазоне  $0,03 \leq \tau \leq 0,2$ .

Дальнейший рост давления подпора приводит сначала к снижению величины размаха, а затем при  $\tau \geq 0,6$  к значениям близким нулю.

4. Сложный характер изменения гидродинамических параметров кавитационного течения жидкости при импульсном нагнетании с целью обоснования рабочих режимов устройства гидроимпульсного воздействия требует более детального исследования динамических параметров генератора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генератор и герметизатор шпура для гидроимпульсного воздействия на угольный массив в технологическом процессе противовыбросных мероприятий / Л.М.Васильев, Ю.А.Жулай, Н.Я.Трохимец [и др.] // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск, 2005. - № 61. - С. 314-322.

2. Моисеенко, П.Ю. Обоснование параметров кавитационного генератора для гидрорыхления угольных пластов : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Моисеенко. П.Ю. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2009. – 205 с.

3. Гидроимпульсное воздействие на выбросоопасный угольный пласт / В.В. Зберовский Л.М. Васильев, Д.Л. Васильев [и др.] // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: НГУ, 2012. - № 37.– С. 47-54.

4. Zhulay, Yu. Hydrodynamic cavitation in energy-saving technological processes of mining sector / Yu. Zhulay, V. Zberovskiy, A. Angelovskiy, I. Chugunkov // Geomechanical processes during underground mining. – Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2012. – С. 51-56.

5. Пат № 87038 U, МПК E21F 5/02 (2006.01). Пристрій для гідроімпульсного впливу на вугільний пласт / Л.М. Васильєв, Ю.О.Жулай, В.В.Зберовський, П.Ю.Моїсеєнко, М.Я.Трохимец; заявник и патентовласник ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України. – а2007 10209; заявл. 13.09.2007; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.- 4 с.: іл.

6. Методика моделювання процесу імпульсного нагнетання жидкости / Л.М. Васильєв, В.В. Зберовський, Ю.Е. Поляков [и др.]. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2014. – 13 с.

#### REFERENCES

1. Vasilyev, L.M., Zhulay, Yu. A., Trohimets, N.Y., Zberovskiy, V.V. and Moiseenko, P. Yu. (2005), "Generator and a hole for the dock hydroimpulse impact on coal mass in the process blowout events", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 61, pp. 314-322.

2. Moiseenko, P. Yu. (2009), "Substantiation of the parameters of cavitation generator for hydro breaking of coal layers", Ph.D. Thesis, Underground mining, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

3. Zberovskiy, V.V., Vasilyev, L.M., Vasilyev, D.L. and Polyakov, Yu.E. (2012), "Hydroimpulsive influence on outburst coal layer", *Zbirnyk naukovykh prats NGU*, no. 37, pp. 47-54.

4. Zhulay, Yu., Zberovskiy, V., Angelovskiy, A. and Chugunkov, I. (2012), "Hydrodynamic cavitation in energy-saving technological processes of mining sector", *Geomechanical processes during underground mining*, Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, pp. 51-56.

5. Vasilyev, L.M., Zberovskiy, V.V., Moiseenko, P. Yu. and Trohimets, N.Y., M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2009), *Ustroystvo dlya gidroimpulsnogo vozdeystviy na ugolnyu plast* [The device for hydroimpulsive influence on coal layer], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 87038.

6. Vasilyev, L.M., Zberovskiy, V.V., Polyakov, Yu.E. & others (2014), *Metodika modelirovaniy protsesa impulsnogo nagnetaniya zhydkosti* [The methodology of modeling process of impulsive fluid injection], M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine Dnepropetrovsk, Ukraine.

#### Об авторах

**Зберовский Василий Владиславович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [avalansh@ua.fm](mailto:avalansh@ua.fm).

**Поляков Юрій Євгенєвич**, аспірант, ведучий інженер в відділі Проблем руйнування горних порід, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Днепропетровск, Україна, [ZoRTFA@mail.ru](mailto:ZoRTFA@mail.ru).

**Наривський Роман Николаєвич**, магістр, молодший науковий співробітник в відділі Проблем руйнування горних порід, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Днепропетровск, Україна, [avalansh@ua.fm](mailto:avalansh@ua.fm).

#### About the author

**Zberovskiy Vasily Vladislavovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [avalansh@ua.fm](mailto:avalansh@ua.fm).

**Polyakov Yuriy Evgenevich**, Doctoral Student, principal engineer in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [ZoRTFA@mail.ru](mailto:ZoRTFA@mail.ru).

**Narivskiy Roman Nikolaevich**, Master of Science, Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [avalansh@ua.fm](mailto:avalansh@ua.fm).

**Анотація.** До основи статті покладено моделювання процесу імпульсного нагнітання рідини та визначення гідродинамічних параметрів генератора ГК-2,5 з різними кутами розкриття дифузора  $\beta=15^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$  для довжини критичного перерізу  $l_{кр}=6$  мм і  $\beta=20^\circ$  для  $l_{кр}=3$  мм і  $l_{кр}=30$  мм. При дослідженнях гідродинамічних параметрів кавітаційного течії рідини розглядались:  $\Delta P$  – розмах автоколивань;  $f$  – частота автоколивань;  $\tau$  – параметр кавітації. У якості режимних параметрів розглядались:  $P_{н}$ ,  $P_{п}$  і  $Q$  – тиск нагнітання, та розхід рідини. За експериментальними даними моделювання гідроімпульсної дії установлені значення розмаху  $\Delta P$  й частоти  $f$  автоколивань у зв'язку від параметра кавітації  $\tau$  та тиску підпору  $P_{п}$ , для різних режимів імпульсного нагнітання рідини у вугільні пласти, що залягають на глибинах до 1300 м.

**Ключові слова:** генератор пружних коливань, розмах автоколивань, кут розкриття дифузора, режим нагнітання, гідродинамічні параметри.

**Abstract.** The article focuses on simulation of a pulsed liquid injection process and determination of hydrodynamic parameters of the generator GK-2.5 at different angles of the diffuser opening:  $\beta=15^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$  for  $l_{kr}=6$  mm and  $\beta=20^\circ$  for  $l_{kr}=3$  mm and  $l_k=30$  mm. The research included the following hydrodynamic parameters of the fluid cavity flow:  $\Delta P$  – amplitude of self-oscillations;  $f$  – self-oscillation frequency;  $\tau$  – parameter of cavitations. The following regime parameters were considered:  $P_n$ ,  $P_p$  and  $Q$  – injection pressure, backwater pressure and rate of fluid flow. Basing on the experimental results of hydroimpulsive effects simulation, values of amplitude  $\Delta P$  and frequency  $f$  of self-oscillations have been specified depending on parameter of cavitation  $\tau$  and backwater pressure  $P_p$ , for various modes of liquid pulsed injection into the coal seams occurred at depth up to 1300 m.

**Keywords:** generator of elastic vibrations, amplitude of self-oscillation, angle of diffuser opening, mode of injection, hydrodynamic parameters.

*Стаття поступила в редакцію 03.10.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Л.М. Васильевым*

УДК 662.210.587.621.572

**Шевелёва А.М.**, аспирант  
(ИТМ НАН Украины и ГКА Украины),  
**Тынына С.В.**, магистр  
(ИГТМ НАН Украины)

**ПЛОСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ  
ЗАЩИТЫ СТенок РАЗГОННОЙ ТРУБКИ СТРУЙНОГО  
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ОТ ИЗНОСА**

**Шевельова Г.М.**, аспірант  
(ИТМ НАН України і ДКА України),  
**Тинина С.В.**, магістр  
(ИГТМ НАН України)

**ПЛОСКА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАХИСТУ  
СТІНОК РОЗГІННОЇ ТРУБКИ СТРУМИННОГО ПОДРІБНЮВАЧА  
ВІД ЗНОСУ**

**Shevelyova A.M.**, Doctoral Student  
(ITM NAS of Ukraine & SSA of Ukraine),  
**Tynyna S.V.**, M.S. (Tech)  
(IGTM NAS of Ukraine)

**TWO-DIMENSIONAL MODEL FOR THE RESEARCH OF PROTECTION  
POSSIBILITY OF JET MILL ACCELERATING TUBE WALLS FROM  
WEAR**

**Аннотация.** Разработана плоская модель эжекторного узла газоструйного измельчителя, основанная на классической схеме эжектора. Принципиальным отличием от классической схемы является наличие канала подвода дополнительного энергоносителя. Подвод дополнительного газа осуществляется по периферии канала через щелевые отверстия в стенке. В модели предусмотрена возможность изменения конструктивных параметров элементов для исследования степени и характера влияния геометрических параметров потока на характер течения основного потока.

Разработаны этапы проведения исследований на плоской модели для определения характера износа стенок разгонной трубки, а также исследования методов его устранения.

Представлена схема и описание модели. Описанная модель позволит исследовать возможность защиты стенок разгонной трубки измельчителя от износа за счет подвода дополнительного энергоносителя.

**Ключевые слова:** плоская модель, износ, эжекторный узел, дополнительный подвод энергоносителя, отверстия подвода.

**Введение.** Струйные измельчители являются одним из наиболее перспективных видов помольных агрегатов, применяющихся в различных отраслях промышленности для тонкого и сверхтонкого измельчения материалов с различными физическими свойствами. Надежность конструкции, высокая удельная производительность, малый уровень шума при работе