

Key words: *polymer composite materials, drillstring, well, washing liquid*

Література

1. Чернова М. Є. Вплив низькочастотних коливань на динаміку бурильної колони. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2013, – Вип. 16. – С.197-201.
2. Стадухин Я. В. Исследования и разработка технологии применения смазочных реагентов для бурения наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием. Технология бурения и освоения скважин. – Тюмень, 2006. – 114 с.
3. Кудрин А. Б. Деформации и напряжения в деталях из ПКМ. – М: Машиностроение, 1987. – 336 с.
4. Гришаева Н. Ю. Прямые и обратные задачи конструирования наполненных полимерных композиций с учетом влияния адгезии на эффективные деформационно-прочностные характеристики. – Томск, 2005. – 126 с.
5. Гудз Р., Петльований А. Комплексний метод граничних елементів при моделюванні фізичних процесів у тілах з композиційних матеріалів // Вісник Львів. ун-ту. Сер. прикл. матем. інформ. – 2003. – Вип. 7. – С. 148–155.

Надійшла 21.07.14

УДК 622.245

Я. В. Кунцяк, докт. техн. наук; **М. Є. Чернова**, канд. техн. наук; **М. Б. Бігун**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ КОЛИВНИХ ПРОЦЕСІВ У ГЕНЕРАТОРІ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ІМПУЛЬСІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ

Розглядається механізм утворення коливань гідродинамічних імпульсів в генераторах спрямованої дії, що можуть застосовуватися у компоновці низу бурильної колони під час буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин у нафтогазовій промисловості. Для вибору правильних конструктивних параметрів є необхідним розуміння фізичної суті процесу утворення гідродинамічних імпульсів у потоці рідини, який рухається у камері генератора. Це у свою чергу дає змогу правильно визначити геометричні параметри самої камери, зокрема радіус кривизни, довжину закручування потоку в камері, висоту відкритої частини сопла. Такий підхід до означеної задачі дасть можливість отримувати частоту коливань саме у тому діапазоні, в якому коливні процеси, викликані генератором гідродинамічних імпульсів забезпечать найвищий коефіцієнт корисної дії пристрою. Оскільки коливання можуть збуджуватися в низькочастотному чи у середньо частотному діапазоні, в залежності від поставленої мети, підбір параметрів генератора повинен відповідати тому напрямку застосування, для якого проведено розрахунок у поставленій задачі, адже одні і ті ж генератори гідроакустичних імпульсів, з однаковими геометричними параметрами не можуть експлуатуватися у різних геологічних умовах. Підбір параметрів генератора не може бути спонтанним без відповідних математичних розрахунків, оскільки це може призвести до небажаних наслідків та спричинити аварійну ситуацію у процесі будівництва свердловини і замість очікуваного підвищення ефективності буріння похило скерованої чи горизонтальної ділянки свердловини, сприяти негативним наслідкам. Тому у наведених таблицях подано основні характеристики конструктивних особливостей генератора гідроакустичних імпульсів, а графічні залежності дають можливість проаналізувати зміну

конструктивних характеристик та провести оптимізацію пристрою в залежності від поставленої задачі.

Ключові слова: генератор, гідроакустичні імпульси, свердловина, коливання.

На сьогоднішній день існує багато пристроїв, які сприяють підвищенню ефективності буріння свердловин, оскільки забезпечення держави енергоносіями, зокрема вуглеводневими, є першочерговим завданням на сучасному етапі зростання економіки України. У своїй різноманітності ці пристрої є такими, які в своїй основі використовують енергію коливань. До них належать гідромоніторні породоруйнівні інструменти, осцилятори-турбулізатори, гідроакустичні пристрої для буріння свердловин, свердловинні гідравлічні вібратори, пристрої гідродинамічного впливу на вибійну зону свердловини, пристрої для вібраційного буріння свердловини, гідравлічні пульсатори, гідрокавітаційні генератори, вібродолота, насадки для отримання пульсації самозбурюваних коливань струмини бурового розчину, гвинтові вибійні двигуни з пульсуючим впливом на вибій свердловини під час буріння свердловини і таке інше. Отже, інтенсифікуючий вплив коливних процесів і закручених потоків на енерготепломасоперенесення є досить значним. Хоча дослідження фізичних властивостей закручених потоків представляють собою неабиякий практичний інтерес, та все ж таки фізична природа розвитку в них коливних процесів ще до кінця не встановлена, так як існує ряд невирішених питань. Головним з них є фізичний механізм генерації коливань, оскільки розуміючи його, можна, заздалегідь розрахувавши параметри генераційних пристроїв, та врахувавши геологічні умови горизонтів, керувати процесом буріння свердловини, забезпечуючи безаварійність та підвищення швидкості будівництва свердловини.

Є достатньо теоретичних та експериментальних досліджень, в яких розглядається механізм вихрового збурення коливань. Зокрема автор [1], аналізуючи рівняння руху ідеальної стискуваної рідини для тривимірного випадку методом малих збурень довів, що за певних допущень форма збурень має несиметричний характер і лінійно залежить від частоти обертання при осьового вихору. В роботі [2] описано явище випромінення коливань закрученим потоком і встановлено, що частота коливань змінюється пропорційно до об'ємного розходу робочого тіла, а при осьовий вихор в зоні вихідної ділянки сопла відхиляється від геометричної осі генератора і виконує довкола неї колові прецесійні рухи. Також було встановлено, що частота регулярної прецесії вторинного вихору співпадає з частотою основного коливання і пов'язана з кутовою швидкістю обертання квазітвердого ядра потоку. Важливим є те, що вихровий генератор, як випромінювач коливань по суті є диполем, що обертається. Таким чином, явище нестійкості закрученого потоку – прецесію та її взаємозв'язок з частотою і напрямком випромінюваних коливань – можна вважати достовірним.

Для розуміння суті фізичного процесу роботи гідроакустичних пристроїв, що застосовуються при бурінні свердловин є важливим питання де саме, в якій області зароджуються коливання і як саме вони передаються навколишньому середовищу.

На прикладі розробленого нами генератора, в основі якого є тороїдальна камера закручування потоку[3], фізична суть процесу полягає у тому, що камера закручування характеризується радіусом закручування R_k , довжиною камери L_k , звуженою вихідною ділянкою L_c та вихідним радіусом R_c куди через тангенційні канали потрапляє робоча рідина. Рух рідини в камері супроводжується утворенням складної структури, що складається з двох обертово-поступальних потоків. По периферії камери рухається так званий первинний вихор, що має в поперечному перерізі форму кільця із зовнішнім радіусом R_k та внутрішнім – r_m . Центральну область займає вторинний вихор, що утворюється у наслідок залучення в рух первинним потоком рідини з навколишнього середовища. Тангенціальна складова швидкості вторинного вихору \mathcal{G} підпорядковується обертового руху твердого тіла:

$$\frac{\mathcal{G}}{r} = const \quad (1)$$

де r – поточний радіус вихору; поступальна ж складова на межі з первинним вихором має однаковий з ним напрям, а поблизу осі – протилежний.

У тому випадку, коли густина рідини у вторинному вихорі стає значно меншою ніж густина у первинному (наприклад витікання води в повітря), течія, як правило залишається стійкою. Затоплена ж струмина за певних умов втрачає свою стійкість: в камері закручування виникають інтенсивні періодичні пульсації швидкості і тиску, які розповсюджуються в навколишнє середовище у вигляді хвиль. Механізм цього явища полягає у тому, що коливання тиску δP зароджуються у порожнині вихрової камери генератора у наслідок періодичних пульсацій швидкості δv в первинному потоці. Це спричинюється регулярними змінами форми поперечного перерізу первинного потоку вторинним вихором, який одночасно з обертовим рухом навколо власної осі виконує прецесійний рух навколо осі камери закручування. Первинний вихор в якому швидкість і тиск є функціями часу і кута повороту потоку, що виходить з генератора, випромінює у навколишнє середовище коливання так само як це робило б дипольне джерело що обертається.

Розвиток прецесії вторинного вихору стає можливим лише тоді, коли розподіл в ньому обертової складової швидкості у тій чи іншій мірі відповідає закону обертання твердого тіла, тобто виконується рівняння (1). У цьому випадку кількість обертової енергії, що передається від первинного вихору до вторинного, стає настільки значною, що частина її перетворюється в енергію поперечних коливань.

Якщо з якихось причин (до прикладу мале значення L_k) вторинний вихор не встигає в межах камери набути обертового руху по всьому поперечному перерізу, то прецесійний рух через мале значення збурюючи сил поперечного зміщення не зможе бути зреалізованим. Отже умови, які є необхідними для виникнення і передачі коливань зводяться до наступних:

- 1) однакова або близька за фізичною суттю природа робочого тіла (потоку в камері) і навколишнього середовища;
- 2) певна мінімальна довжина камери закручування L_k , достатня для формування вторинного вихору, який обертатиметься за законом обертового руху твердого тіла.

В даній роботі досліджувалися хвильові характеристики генератора з відкритим виходом в межах $R_c = R_k = 7 \div 15$ мм, та з прикритим виходом. Ступінь прикриття обчислюється співвідношенням

$$C = \frac{R_k}{R_c} = 2, \quad (2)$$

відносна довжина звуженої ділянки камери:

$$\bar{L}_c = \frac{L_c}{2R_c} = 1. \quad (3)$$

Конструкція генератора змінювалася методом математичного моделювання, описана в роботі [4]. Зміни стосувалися ступеня закручування потоку, який характеризується геометричним параметром A ($A = 2; 4; 8; 16...$) та відносної довжини камери закручування \bar{L}_k :

$$\bar{L}_k = \frac{L_k}{2R_k}. \quad (4)$$

Довжина камери закручування змінювалася в межах $L_k = 2 \div 5$. Величина параметру A визначалася співвідношенням:

$$A = \frac{RR_c}{nr_{ex}^2}, \quad (5)$$

де n – кількість вхідних тангенціальних каналів; r – їх радіус.

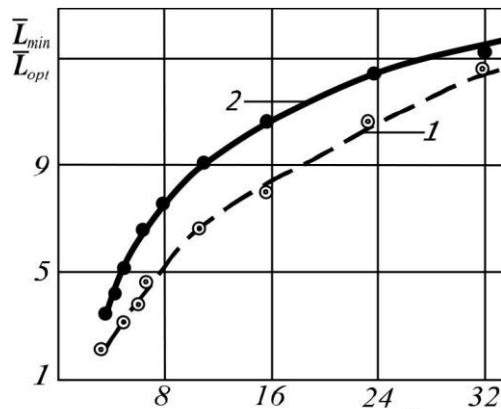


Рис. 1. Залежність мінімальної (1) та максимальної довжини камери закручування від довжини параметра A

Параметр A змінювався в межах $2 \div 25$. Величина \bar{L}_k змінювалася дуже плавно від 1 до 20, за цих умов $R_c \leq R_k$ до межі 9 мм.

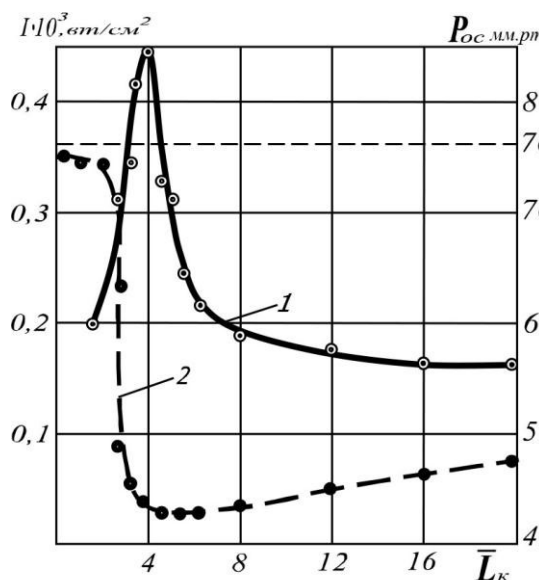


Рис. 2. Залежність інтенсивності коливань I (1) та тиску на осі камери P (2) від відносної довжини камери закручування

разі не знайшов достатньо переконливого фізичного пояснення. Хвильовий резонанс для такої конструкції є неможливим, оскільки величина \bar{L}_{opt} не залежить ні від швидкості потоку ні від швидкості поширення коливань в твердому тілі. Максимум випромінювання залежить від особливостей гідродинамічної взаємодії вихорів, інтенсивність випромінювання залежить від довжини камери і ступеню закручування первинного вихору. Це підтверджується однозначним взаємозв'язком ступеня розрідженості в при осьовій області генератора з інтенсивністю випромінювання. Як видно з рис. 2 в межах оптимальної генерації коливань спостерігається мінімум тиску на осі камери, який в першу чергу залежить від інтенсивності взаємодії вихорів.

З підвищенням ступені закручування зростають відносні величини тангенціальних складових швидкості і поперечного розміру вторинного вихору. Тому для набуття квазітвердого обертового руху йому є необхідною більша довжина камери закручування.

Співрозміщення вихідного отвору вихрового генератора коливань (ВГК) і напрямку потужності випромінювання у двох взаємно перпендикулярних напрямках є осесиметричним і має дипольний характер випромінювання. Особливий інтерес представляють характеристики хвильового тиску в площині, перпендикулярній до осі випромінювача.

Встановлено, що повинна існувати деяка мінімальна довжина вихрової камери L_{min} , оскільки за умови $L_k < L_{min}$, вторинний вихор не зможе набутти квазітвердого обертового руху, а, відповідно, коливання не виникнуть. Варіації ступеня закручування потоку були у достатньо широкому діапазоні.

Як засвідчили дослідження та обчислення, проведені з допомогою програми «MathCAD» існує «мінімальна» довжина L_{min} , а її величина залежить від геометричного параметра A (рис. 1). Зі збільшенням величини L_k інтенсивність коливань зростає, досягаючи максимального значення за деякої довжини $L_k = L_{opt}$, після чого зменшується (рис. 2). Відносна величина

$$\bar{L}_{opt} = \frac{L_{opt}}{2R_k} \quad (6)$$

Визначається головним чином значенням геометричного параметру A (рис.1) і практично не залежить від об'ємного розходу камери.

Екстремальний характер залежності інтенсивності випромінювання від поздовжніх розмірів вихрової камери на

Ймовірно цим пояснюється неперервний ріст величин \bar{L}_{\min} та \bar{L}_{opt} зі збільшенням геометричного параметру A (рис. 2).

В табл. 1 та 2, наведено хвильові характеристики генератора з тороїдальною формою камери. Потужність хвильового випромінювання $W_{xв}$, частота випромінювання f , хвильовий коефіцієнт корисної дії $\eta_{xв}$, який визначався співвідношенням хвильової потужності і потужності адиабатичного стиску потоку в камері.

Таблиця 1. Вплив відносної довжини камери закручування на характеристики ВГК з відкритим соплом

\bar{L}_k	A = 4			A = 6			A = 10		
	W вт	f Гц	η %	W вт	f Гц	η %	W вт	f Гц	η %
4	70,2	4180	3,21	38,9	4100	4,35	–	–	–
8	62,35	4240	3	36,76	3960	4,11	19	3670	3,35
12	45,13	4200	2,31	34,48	3820	3,86	8,3	3500	1,65
16	43,68	4160	2,24	26,34	3710	2,95	4,1	3320	0,9

Таблиця 2. Характеристики ВГК зі звуженим вихідним каналом

$\Delta P \times 10^{-5}$ Н/м ²	A = 4; L = 2,4				A = 6; L = 3,25				A = 10; L = 4,7			
	Q л/с	W вт	f Гц	η %	Q л/с	W вт	f Гц	η %	Q л/с	W вт	f Гц	η %
0,242	10	0,69	5100	0,79	10	0,28	4650	0,47	10	0,033	2030	0,4
0,49	14	5,02	6380	1,92	14	2,48	5050	1,42	14	0,415	3550	0,75
0,735	24	3,74	8300	0,84	24	4,43	6300	1,36	24	2	4580	1,02
0,98	36	4,34	9200	0,51	36	4,95	7250	1,035	36	5,32	5430	2,37

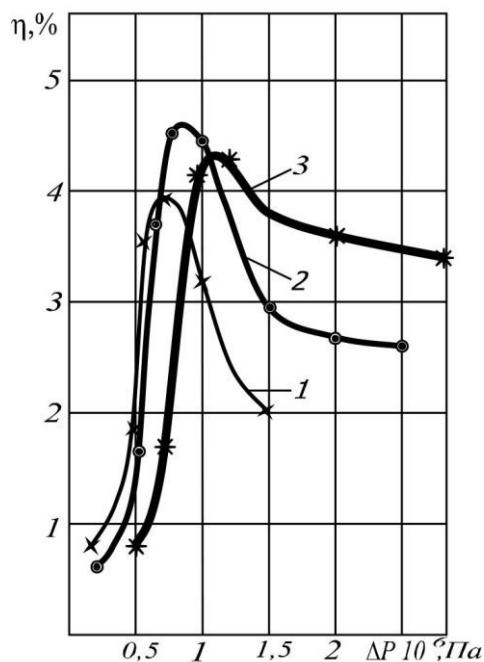


Рис. 3. Залежність коливального к.к.д. генератора від перепаду тиску за різних режимів роботи

З табл. 1 видно, що збільшення довжини камери закручування в двічі у порівнянні з оптимальною спричинює зниження сумарної хвильової потужності $W_{xв}$ в 1,5÷4 рази в залежності від параметра A . Зі збільшенням \bar{L}_k монотонно спадає частота коливань у наслідок збільшення втрат швидкості. До того ж швидкість зниження частоти є тим більшою, чим вищою стає степінь закручування потоку. Це пояснюється тим, що зі збільшення ступеня закручування потоку зростає шлях, на якому потік взаємодіє зі стінками камери, а отже, зростають втрати на тертя.

Хвильова потужність зростає пропорційно до об'ємного розходу рідини G , що проходить через генератор. Швидкість зростання потужності суттєво спадає за умови переходу перепаду тиску на ВГК ΔP через деяке надкритичне значення. З цієї ж причини хвильовий к.к.д. ($\eta_{xв}$) характеризується чітко вираженим максимумом саме в області критичного перепаду тиску (рис. 3).

У відповідності до моделі хвилеутворення частота випромінювання з підвищення ступеню закручування і об'ємних витрат рідини неперервно зростає через збільшення швидкості обертання первинного та прецесії вторинного вихорів. Відома з теорії лінійна залежність частоти від об'ємних витрат справедлива лише для

суттєво докритичних значень числа Маха (M) і нестискуваних рідин. Для інших випадків ця залежність стає нелінійною.

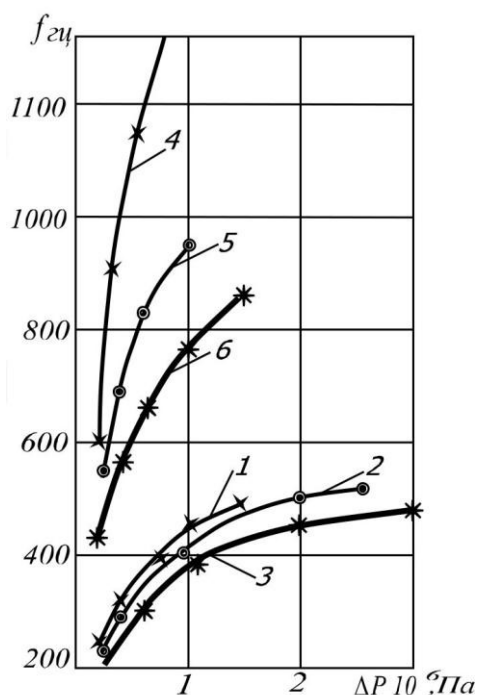


Рис. 4. Залежність частоти коливань від режиму роботи генератора

Генератори з суттєво звуженими вихідними каналами дають можливість підвищувати частоту випромінюваних коливань до 15 кГц і більше (рис. 4), але при цьому значно спадає хвильова потужність і к.к.д. ВГК (табл. 2). Підвищення частоти пояснюється тим, що за умови звуження вихідного каналу камери значно зростає тангенціальна складова швидкості в потенціальному первинному вихорі, а це у свою чергу збільшує швидкість прецесії вторинного вихору. У той же час підвищений рівень швидкості поряд зі збільшеним розміром пристінкового шару

$$\left(\delta = \frac{l}{\sqrt{Re}} - \text{під час переходу в пристінковому шарі}\right)$$

ламінарного режиму течії у турбулентний – різко зростає опір рухові) спричинює ріст втрат на тертя об стінки камери, через що спадає $\eta_{xв}$. Абсолютне ж значення $W_{xв}$, за умови звуження вихідного отвору камери, зменшується в основному через зменшення об'ємних витрат рідини, що проходить через генератор. Дослідження та розрахунки генераторів з прикритим виходом камери ($C = 2$)

свідчать, що зміна відносних довжин камери закручування і вихідного отвору в межах 1÷3 не суттєво впливає на величину $W_{xв}$, а частота коливань неперервно спадає з ростом L_k і \bar{L}_c .

Висновки

1. Під час проектування генератора гідродинамічних коливань спрямованої дії для досягнення максимальної потужності рекомендується збільшення його розмірів і пропускної здатності до найбільш оптимальних ($R_c = R_k$) та підбір оптимальної довжини камери закручування $\bar{L}_k = \bar{L}_{opt}$;

2. Для отримання найкращого економічного ефекту слід проводити підбір частоти з врахуванням числа Маха (M) для даної рідини;

3. Для отримання максимально високих частот слід зменшити розмір вихідного отвору камери;

4. Оптимальний варіант форми камери для буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин у довільних геологічних умовах є тороїдальний, розроблений нами і захищений патентом України № 63187.

Рассматривается механизм образования колебаний гидродинамических импульсов в генераторах направленного действия, которые могут применяться в компоновке низа бурильной колонны при бурении наклонных и горизонтальных скважин в нефтяной промышленности. Для подбора соответственных конструктивных параметров необходимо понимание физической сути самого процесса образования гидродинамических импульсов в потоке, движущемся в камере генератора. Это в свою очередь обеспечивает возможность достаточного точного определения геометрических параметров самой камеры, таких как радиус кривизны, длину закручивания потока в камере, высоту открытой части сопла. Такой подход к вышеупомянутой задаче даст возможность получить частоту колебаний именно в том диапазоне, в котором колебательные процессы, вызванные генератором

гидроакустических импульсов, обеспечат наивысший коэффициент полезного действия конструкции. Ввиду того, что возбуждаемые колебания могут находиться в низкочастотном и среднечастотном диапазоне, в зависимости от обеспечиваемой цели, подбор параметров генератора должен соответствовать поставленной задаче, так как одни и те же генераторы акустических импульсов, с одинаковыми геометрическими параметрами не могут быть использованы в различных геологических условиях. Выбор параметров генератора не может быть спонтанным без соответствующих математических расчетов, поскольку это может вызвать нежелательные последствия, повлечь за собой возникновение аварийной ситуации при бурении скважины, и, вместо ожидаемого положительного эффекта в бурении наклонной или горизонтальной части скважины спровоцировать нежелательные последствия. Поэтому, в таблицах приведены основные характеристики конструктивных особенностей генератора гидроакустических импульсов, а графические зависимости позволяют проанализировать изменение конструктивных характеристик и оптимизировать приспособление в зависимости от поставленной задачи.

Ключевые слова: генератор, гидроакустические импульсы, скважина, колебания.

We consider the mechanism of formation of oscillations of hydrodynamic impulses in directional generators that may be used in the bottom-hole assembly during drilling of directional and horizontal wells in petroleum industry. It is necessary to understand the physical essence of the process of formation of hydrodynamic impulses in the liquid flow moving in generator's compartment for further choice of correct constructive parameters. This, in turn, enables the correct determination of geometrical parameters of compartment itself, in particular, the radius of the curvature, length of flow swirl in the compartment, level of the exposed part of the nozzle.

Such an approach to the set forth task will enable obtaining of frequency of oscillations generator of the particular range caused by hydrodynamic impulse which will ensure the highest efficiency coefficient of the device. Since the oscillations can be induced in low or medium frequency range depending on the set forth task, the selection of generator's parameters should comply with the particular application for which calculation was done as the same hydroacoustic generators cannot be exploited in different geological environments.

The selection of generator's parameters cannot be spontaneous and without mathematical calculations as it can lead to unwanted consequences and cause emergency situation in the process of well construction and instead of the expected increase of efficiency of drilling of directional or horizontal part of the well cause negative consequences. Therefore, in the tables we presented the main characteristics of the constructive peculiarities of hydroacoustic impulse generator, and graphic dependencies that enable analysis of changes of the constructive characteristics and carry out optimization of the device depending on the set forth task.

Key words: generator, hydroacoustic impulses, well, oscillations

Література

- Викторов И. А. Физические основы применения волн Релея и Лэмба в технике. – М.: Наука, 1999. – 198 с.
- V. Vonnegut. A vortex whistle // J. Acoust. Soc. America. – 1987. – 26. – N 1. – P. 18–22.
- Пат України № 63187 Е21В 28/00 Генератор гідроакустичних імпульсів // Б. О. Чернов, М. С. Чернова, І. М. Ільків, М. М. Западнюк. – Опубл. 26.09. 11, Бюл. № 18.
- Абрамович Г. Н. Прикладная жидкостная динамика. – М.: ОГИЗ, 1979.

Надійшла 22.07.14