

УДК 621.9.044:537.58

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ФОКУСИРОВКЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ В ПОЛУЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАМЕРАХ

¹Потапенко Т.А., ¹Гребеник А.Г., ²Штифанов А.И.

¹ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова», Белгород, e-mail: tatiana.pot@mail.ru;

²ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
Белгород, e-mail: shtifanov@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы исследования краевых задач, связанных с математическим моделированием аппарата на основе электрогидравлического эффекта и с электродной системой-излучателем. Целью этих исследований является возможность интенсификации добычи нефти на основе фокусировки импульсных волн давления. Рассматриваются взаимосвязанные задачи: первая – электростатическая для определения особенностей расположения и вида электродов для излучателей, вторая – акустическая задача с возможностью нахождения поля давления от разрядов в двух камерах с учетом расположения электродных систем. Для первой задачи используется уравнение Лапласа, но относительно функции потока, для второй – линейное волновое уравнение. Для второй задачи схема моделирования включает две полузамкнутые цилиндрические камеры с установленными в них излучателями. Исследованы особенности электростатического поля относительно электродной системы одной из камер. Рассмотрены гидродинамические поля давления от двух камер в зависимости от расположения электродных систем. Представлены результаты численного решения задач и их анализ.

Ключевые слова: электрогидравлический эффект, электростатическое поле, уравнение Лапласа, акустическое поле, волновое уравнение, численное решение

COMPUTATIONAL EXPERIMENTS ON THE FOCUSING OF THE PRESSURE PULSE WAVES BY THE ELECTRIC DISCHARGE IN SEMI-CLOSED CYLINDRICAL CHAMBERS

¹Potapenko T.A., ¹Grebenik A.G., ²Shtifanov A.I.

¹Belgorod State Technology University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: tatiana.pot@mail.ru;

²Belgorod National Research University, Belgorod, e-mail: shtifanov@mail.ru

In this paper the study of boundary value problems related to the mathematical modeling of electro-hydraulic effect and to the emitter system of electrodes is considered. The research purpose is possible oil production intensification by means of the pressure pulse wave focusing. In this work the interrelated problems are taken into account: first, electrostatic one, to determine location characteristics of the electrodes, the second is an acoustic problem with the possibility of determining the pressure field of the discharges in two chambers, taking into account the electrode system placement. For the solution of the first problem the Laplace equation is applied (relatively the flow function), for the second one – the linear wave equation. The modeling scheme for the second problem is characterized by two semi-closed cylindrical chambers with installed emitters. The features of the electrostatic field with respect to the electrode system of one of the chambers are studied. Hydrodynamic pressure fields of two chambers, depending on the desired location of the electrode systems are considered. The results of the numerical solution and their analysis are presented.

Keywords: electrohydraulic effect, electrostatic field, Laplace equation, acoustic field, wave equation, numerical solution

Для интенсификации добычи нефти и мониторинга ее запасов созданы специализированные комплексы, например, компанией Progress Industrial Systems SA, (Швейцария) и в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины (г. Николаев). Известно, что компания Progress Industrial Systems SA создала два типа таких комплексов на базе применения:

- 1) ультразвуковой технологии;
- 2) технологии на основе электрогидравлического эффекта Юткина (запатентован в 1950 г.) [8] и с учетом патента США на

способ и устройство для электрогидравлического извлечения сырой нефти на основе воздействия ударной волны, образуемой электрическим разрядом в скважинной жидкости, на нефтеносный пласт [5].

По первому направлению применяется оборудование, состоящее из ультразвукового генератора, двух ультразвуковых излучателей разного диаметра, находящихся в погружаемом в скважину модуле, питание которых осуществляется через стандартный геофизический кабель, также служащий и для его перемещения.

Для использования технологии по второму направлению с применением так называемых скважных аппаратов, в основе которых электрогидравлический эффект, содержащих: конденсаторные батареи, газонаполненный разрядник, электродную систему-излучатель, находящихся в погружаемом в скважину модуле, питание которых также осуществляется через стандартный геофизический кабель, служащий и для перемещения модуля, а также имеется пульт управления с дополнительным питанием.

Известно, что для решения прикладных задач в технике используются эффекты фокусировки, например, импульсных волн давления в жидкости с применением специализированных устройств в виде эллипсоидов, параболоидов и др. Например, такого типа устройства применяются для фокусировки ультразвуковых импульсов [4], что приводит к высокой концентрации энергии. Однако применение такого типа фокусирующих устройств в скважных аппаратах затруднено из-за относительно небольшого диаметра модуля. Следовательно, необходимы разработки и внедрение новых методов фокусировки для импульсных волн давления в жидкости, которые будут иметь относительно минимальные габариты для скважных аппаратов, так как увеличение энергии в конденсаторных батареях имеет предел.

Целью исследования является возможность интенсификации добычи нефти на основе фокусировки импульсных волн давления.

Постановка задачи

В [7] установлено, что применение электрогидравлического эффекта на базе многокамерных устройств при обработке материалов связано с возможной фокусировкой импульсных волн давления. При этом используются относительно небольшие полузамкнутые цилиндрические камеры (с внутренним диаметром порядка 80 мм) и при относительно небольшой их длине, соприкасающиеся друг с другом с образованием сотовых устройств. Численные исследования [9] показали, что эффект фокусировки импульсных волн давления при помощи этих камер связан с заданным расположением электродных систем.

Исследование процесса фокусировки импульсных волн давления при высоковольтных разрядах в этих камерах включает две взаимосвязанные задачи: электростатическую и акустическую.

1. Электростатическая задача, связана с определением особенностей расположения и вида электродов для исследуемых камер.

За основу вычислительных экспериментов принимается схема моделирования [9] с учетом одной полузамкнутой цилиндрической камеры с системой электродов. Исследуемый процесс распространения импульсных волн давления в жидкости зависит от исходного расположения каналов пробоя между электродами, поэтому определяются границы канала пробоя. Учитываются виды электродов (изолированный электрод и заземленный корпус камеры, два изолированных электрода относительно камеры и др.). За основу расчета электростатической задачи принимается, например, подход [10], заключающийся в определении поля функции потока μ из уравнения Лапласа относительно μ . При этом важно учитывать, что граничные условия для функции μ и электрического потенциала ψ существенно различаются.

Уравнение Лапласа относительно функции потока μ имеет вид

$$\Delta\mu = 0. \quad (1)$$

Граничные условия записываются относительно схемы моделирования для одной из полузамкнутых цилиндрических камер вида [9].

2. Акустическая задача, связана с нахождением гидродинамического поля давления от источников на границах каналов пробоя в двух камерах.

За основу вычислительных экспериментов принимается схема моделирования [9] с двумя полузамкнутыми камерами, погруженными в жидкость, с учетом границ каналов пробоя в этих камерах. Эти границы определяются из решения электростатической задачи.

Для этой задачи используется линейное волновое уравнение, но учитывая, что в исследуемых областях жидкости камер имеются по импульсному источнику, тогда на границах каналов пробоя необходимо использовать неоднородное волновое уравнение вида

$$\Delta\varphi - \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = f(t), \quad (2)$$

где φ – потенциал скорости; a_0 – скорость звука в жидкости; $f(t)$ – потенциальная функция, учитывающая изменения давления $P(t)$ в источниках на границах каналов пробоя. Считается, что исходные $P(t)$ равны и начальные условия $t = t_0$. В областях без источника используется линейное волновое уравнение вида (2), т.е.

$$\Delta\varphi = \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}, \quad (3)$$

Считается, что характер изменения $P(t)$ на границах каналов пробоя изменяется по колоколообразному закону [2] с величиной τ (постоянная времени) равной $10 \cdot 10^{-6}$ с. Тогда потенциал φ_{Gi} на этих границах находится через определенный интеграл от $P(t)$.

Граничные и начальные условия записываются относительно схемы моделирования [9].

Тогда гидродинамическое давление P_1 в исследуемом объеме жидкости находится из интеграла Коши – Лагранжа

$$P_1 = P_0 - \rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (4)$$

где P_0 , ρ_0 – соответственно давление и плотность исходной жидкости.

Изменение плотности жидкости с учетом потенциала скорости φ определяется в виде

$$\rho = \rho_0 - \frac{\rho_0}{a_0^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t}. \quad (5)$$

Компоненты скорости жидкости определяются через градиент потенциала φ .

схема (безусловная устойчивость) и используется метод верхней релаксации или аналогичный метод Либмана с ускоряющим множителем для оптимизации итерационного процесса [1]. При решении электростатической задачи исследуются следующие виды систем электродов в цилиндрической камере:

1) изолированный электрод по центру камеры – заземленный корпус камеры (в виде второго электрода);

2) два изолированных электрода, один из них по центру камеры;

3) изолированный электрод по центру камеры – другой металлический расположен на корпусе камеры.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что наиболее рациональной схемой для излучателей является третья схема.

Результаты расчетов для этой схемы электродов с учетом двумерной задачи показаны на рис. 1 (для семейства эквипотенциальных кривых $\psi_i(x, y) = \text{const}$ (а), для линий функций потока $\mu_i(x, y) = \text{const}$ (б) и канала пробоя жидкости (в)).

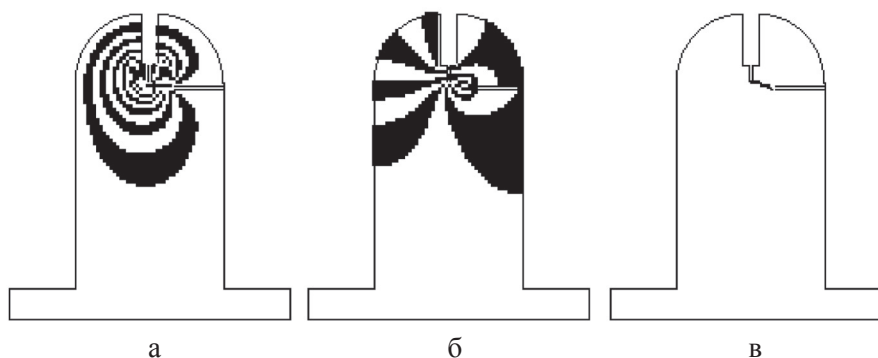


Рис. 1. Результаты расчета семейства кривых $\psi_i(x, y) = \text{const}$ (а), $\mu_i(x, y) = \text{const}$ (б) и канала пробоя в жидкости (в) при электроразряде в камере

Результаты вычислений

Для решения краевых задач применялся метод конечных разностей [6]. Исследуемые области представлялись в виде дискретных (сеточных). Уравнения в частных производных в исследуемых областях и на их границах заменялись разностными аналогами.

Для волнового уравнения при численных расчётах реализуется явная разностная схема [6] и учитывается обобщенное условие Куранта [3] с его возможным уточнением при расчетах. Для уравнения Лапласа реализуется неявная разностная

Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов, показанных на рис. 1, б, с данными расчета по первой схеме, показал следующее. Имеется асимметрия расположения линий функции потока μ внутри камеры относительно оси симметрии, проходящей через изолированный электрод (т.е. количество μ_k слева относительно оси симметрии больше количества μ_n справа). Для первой схемы общее количество μ_i от оси симметрии, как слева, так и справа равно между собой, т.е. асимметрия линий μ отсутствует.

При анализе расчетов установлено, что при высоковольтном разряде в камере

наблюдается асимметрия выделившейся энергии с учетом расчета расположения линий функций μ (рис. 1, б). Следовательно, при расположении канала пробоя с одной стороны оси симметрии камеры концентрация энергии разряда будет с противоположной стороны с соответствующим преобразованием электрической энергии в механическую (основа электрогидравлического эффекта [8]). По-видимому – это правило фокусировки импульсных волн давления при электрических разрядах в полузакнутых цилиндрических камерах с асимметричным расположением электродов-излучателей.

Для акустической задачи результаты вычислительных экспериментов в виде гидродинамического поля давления для двух рядом расположенных камер в жидкости с учетом расходящегося расположения излучателей относительно оси симметрии этих камер, показаны на рис. 2, а. Для аналогичных условий экспериментальные данные представлены в виде карт полей давлений (рис. 2, б), которые определялись с применением специализированного датчика давления, находящегося на преграде [7].

Анализ результатов на рис. 2 показывает, что исследуемый процесс имеет качественно подобный характер, а именно, расчетное максимальное P_{m1}^* значение давления $P_k^*(t)$ на преграде в вертикальном сечении относительно двух камер (рис. 2, а) совпа-

дает с максимальными P_{m2}^* значениями на карте полей давлений P_{m1}^* (в горизонтальной плоскости) относительно этих камер [7] (рис. 2, б). Необходимо отметить, что расчетное давление $P_k^*(t)$ имеет шпильеобразный экстремум P_{m1}^* , который находится на преграде, расположенной с зазором под этими сообщающимися камерами. При этом экстремумы P_{m1}^* (рис. 2, а) и P_{m2}^* (рис. 2, б) находятся в центральной части между этими камерами.

Экспериментальные исследования по фокусировке импульсных волн давления при электрических разрядах в полузакнутых цилиндрических камерах были впервые выполнены М.К. Князевым и, например, представлены в [7]. При исследованиях акцент был сделан на эксперименты, так как считалось, что с помощью теоретических расчетов невозможно получить не только количественные, но и качественные результаты. На основе экспериментальных исследований был разработан эмпирический метод расчета фокусировки импульсных волн давления на преграде для исследуемого диапазона величин [7]. Подход на базе вычислительных экспериментов для данных [7] был разработан и представлен А.И. Штифановым, например, в [9], однако считалось, что в основе фокусировки импульсных волн давления находятся только процессы гидродинамики.

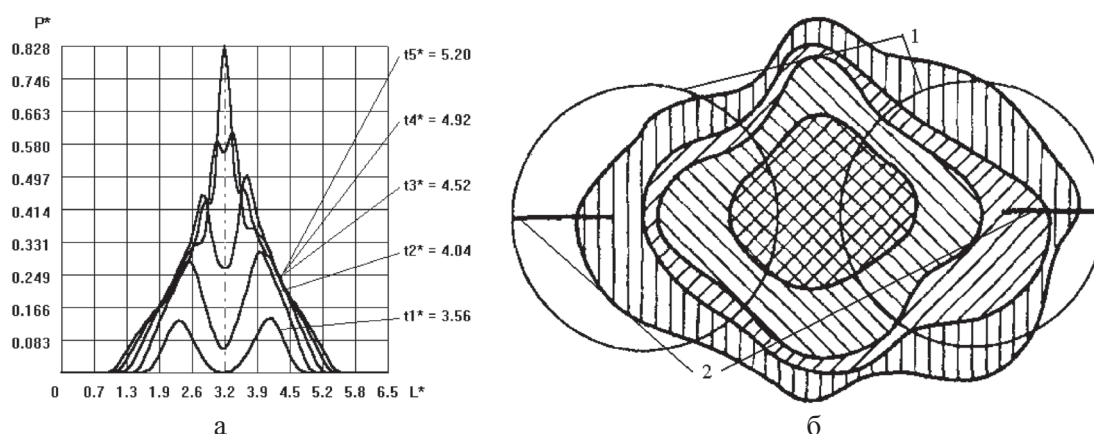


Рис. 2. Расчетная зависимость изменения $P_k^*(t)$ на преграде в вертикальном сечении относительно двух камер с заданным расположением каналов разряда (а) и аналогичные экспериментальные данные в виде карты полей давлений P_{m1}^* [7] (б) (1 – контуры цилиндрических камер на преграде; 2 – границы излучателей; условные обозначения относительного давления P_{m1}^* : \parallel – $0,1 < P^* < 0,5$; \diagup – $0,5 < P^* < 1,0$; \boxtimes – $1,0 < P^* < 2$; \dots – $2,0 < P^* < 2,85$)

Выводы

1. При вычислительных экспериментах на основе решения электростатической задачи установлено, что при возникновении канала пробоя с одной стороны оси симметрии камеры концентрация энергии разряда произойдет с противоположной стороны с преобразованием электрической энергии в механическую, т.е. это возможное правило фокусировки импульсных волн давления при электрических разрядах в полужамкнутых цилиндрических камерах с асимметрично расположенной системой электродов.

2. На базе вычислительных экспериментов разработана методика расчета процесса фокусировки импульсных волн давления на основе решения взаимосвязанных задач: электростатической и акустической с учетом граничных и начальных условий при переходе от одной задачи к другой.

Список литературы

1. Бинс К. Анализ и расчёт электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. – М.: Энергия, 1970. – 370 с.
2. Богуславский Л.З. Моделирование электрического разряда в жидкости при параметрическом изменении элементов в контуре / Л.З. Богуславский, Е.В. Кривицкий, В.В. Ромакин // Техническая электродинамика. – 1990. – № 2. – С. 3–7.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
4. Козлова А.И. Моделирование фокусировки фемтосекундного импульса эллипсоидом, параболоидом, сферой и полусферой / Е.С. Козлова, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 31–37.
5. Патент США № 4.345.650, МПК Е 21 В 43/25, 1982.
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
7. Чебанов Ю.И. Формирование поля давления на заготовке при штамповке на электрогидравлических установках / Ю.И. Чебанов, В.К. Борисевич, М.К. Князев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 4. – С. 15–18.
8. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 253 с.
9. Chtifanov A.I. Features of Controlling the Concentration of Electrical Discharge Energy in a Liquid for Compacting Powders / A.I. Chtifanov, A.N. Potapenko, M.K. Knyasev // Powder Compaction; Sintering; Post-sintering; Hot Isostatic Pressing; Microstructure. – Granada, Spain, 1998. – Vol. 2. – P. 193–199.
10. Potapenko, T.A. Features of estimating of lightning protection and grounding electrode based on the family of lines of force in electric field / T.A. Potapenko, A.I. Shtifanov, A.N. Potapenko // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Shanghai, China. 2014. IEEE. – P. 1786–1792.

References

1. Bins K. Analiz i raschjot jelektricheskikh i magnitnyh polej / K. Bins, P. Laurenson. M.: Jenergija, 1970. 370 p.
2. Boguslavskij L.Z. Modelirovanie jelektricheskogo razrjada v zhidkosti pri parametricheskom izmenenii jelementov v konture / L.Z. Boguslavskij, E.V. Krivickij, V.V. Romakin // Tehnicheskaja jelektrodinamika. 1990. no. 2. pp. 3–7.
3. Kalitkin N.N. Chislennye metody. M.: Nauka, 1978. 512 p.
4. Kozlova A.I. Modelirovanie fokusirovki femtosekundnogo impul'sa jellipsoidom, paraboloidom, sferoj i polusferoj / E.S. Kozlova, V.V. Kotljar // Komp'juternaja optika. 2013. T. 37, no. 1. pp. 31–37.
5. Patent SSHA no. 4.345.650, MPK E 21 B 43/25, 1982.
6. Samarskij A.A. Teorija raznostnyh shem. M.: Nauka, 1977. 656 p.
7. Chebanov Ju.I. Formirovanie polja davlenija na zagotvke pri shtampovke na jelektrogidravliche skih ustanovkah / Ju.I. Chebanov, V.K. Borisevich, M.K. Knjazev // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. 1996. no. 4. pp. 15–18.
8. Jutkin L.A. Jelektrogidravlicheskij jeffekt i ego primenenie v promyshlennosti. L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1986. 253 p.
9. Chtifanov A.I. Features of Controlling the Concentration of Electrical Discharge Energy in a Liquid for Compacting Powders / A.I. Chtifanov, A.N. Potapenko, M.K. Knyasev // Powder Compaction; Sintering; Post-sintering; Hot Isostatic Pressing; Microstructure. Granada, Spain, 1998. Vol. 2. pp. 193–199.
10. Potapenko, T.A. Features of estimating of lightning protection and grounding electrode based on the family of lines of force in electric field / T.A. Potapenko, A.I. Shtifanov, A.N. Potapenko // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China. 2014. IEEE. pp. 1786–1792.