

УДК 537.528

# О ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ОЧИСТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ФИЛЬТРОВ

А. М. АРТЕМЬЕВ, И. В. ВОВК, А. И. КРИВОНОГ, П. В. ЛУКЬЯНОВ

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

*Получено 01.11.2005*

Проведено теоретико-экспериментальное изучение влияния электрического разряда на удаление глинистых коагулянтов в фильтрующем элементе из волокнисто-пористого полиэтилена. Показано, что использование электрического разряда позволяет эффективно регенерировать фильтры такого типа.

Проведено теоретико-експериментальне вивчення впливу електричного розряду на видалення глинистих коагулянтів у фільтруючому елементі з волокнисто-пористого поліетилену. Показано, що використання електричного розряду дозволяє ефективно регенерувати фільтри такого типу.

An effect of electric discharge on removing kaolin coagulants from the filtering element made of a fiber-porous polyethylene is studied theoretically and experimentally. The use of electric discharge is shown to provide the efficient regeneration of such filters.

## ВВЕДЕНИЕ

Начало изучения механического воздействия электрического разряда в воде относится к работам Г. Лейна и Дж. Пристли [1]. Однако практическое применение этого эффекта началось в середине прошлого столетия в работах Г. И. Покровского и К. П. Станюковича [2]. Исследованию эффективности разряда посвящены работы Р. Фрюнгеля [3], а также серия изобретений Л. Я. Юткина [4–7]. Показано, что ударная волна, формируемая во время электрического разряда, в ряде случаев оказывает достаточно сильное механическое воздействие на окружающие объекты (вплоть до их разрушения).

Несколько позже был выполнен ряд экспериментальных и теоретических работ, позволивших глубже понять физику исследуемого явления [8, 9]. К тому времени электрический разряд нашел широкое применение в народном хозяйстве [10, 11], в частности, при интенсификации добычи нефти, очистке и перфорации нефтяных скважин и пр. [12, 13].

Различные аспекты проблемы генерации и распространения волн в жидкости под действием электрического разряда исследовались в работах [14–17].

Очевидно, что область использования ударных волн, создаваемых электрическим разрядом, может быть расширена. Например, известно, что любые фильтры в процессе эксплуатации постепенно теряют свою очистную способность по причине засорения их пор. Естественным образом возникает проблема технического обслуживания или регене-

рации (восстановления) их очистных характеристик.

Однако в связи с этим возникает вопрос о том, как связаны электрические характеристики (начальное напряжение разряда и его мощность, емкость и индуктивность разрядного контура, проводимость канала и др.) со скоростью расширения канала разряда, давления в окружающей среде и степенью воздействия на объекты, находящиеся вблизи. Для решения этой задачи авторским коллективом выполнена серия экспериментов по изучению влияния разряда на удаление засорения из пор фильтрующего слоя. Изложение полученных результатов вместе с соответствующими расчетными данными и составляет основу данной статьи.

## 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОСТИ

Физические характеристики электрогидравлического эффекта, позволяющие определить эффективность использования электроразряда в конкретных ситуациях, различны. Это обусловлено тем, что в разных ситуациях параметры электрического разряда далеко не всегда можно надежно предсказать [11]. Как показывают многочисленные эксперименты, форма и длина лидеров, а также время разряда могут существенно изменяться. Более того, при одних и тех же начальных электрических параметрах разрядной установки интенсивность разряда, а, следовательно, и гидродинамические параметры ударной волны, порой

существенно различаются из-за разного времени протекания разряда. Однако, как показали наши исследования генерируемых волн давления, качественное подобие структуры различных разрядов сохраняется при близости их начальных параметров.

Рассмотрим физическую природу исследуемого явления. Как известно, электрический высоковольтный разряд в жидкости может протекать по-разному [8]. Если параметры разрядного контура не согласованы должным образом, то быстрого и мощного разряда с образованием ударной волны в воде может и не произойти. В этом случае энергия, запасенная в конденсаторах, относительно медленно перейдет в тепловую, нагрев окружающую электроды жидкость. Однако если напряжение, индуктивность контура, расстояние между электродами подобраны так, чтобы соответствовать критическим значениям, то произойдет мощный быстрый электрический разряд. Вследствие него за короткий промежуток времени часть жидкости, находящейся в непосредственной близости от области разряда, превратится в парогазовую полость. Особенностью этого процесса является резкое формирование локальных областей высокого давления порядка сотен атмосфер. Это способствует сильному нагреванию парогазовой области и образованию плазмы.

## 2. ДИНАМИКА РОСТА ПАРОГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ В ЖИДКОСТИ

Пусть  $l$  – длина разрядного промежутка,  $R_0$  – характерный радиус канала,  $\lambda$  – характерная длина волны,  $\tau$  – длительность разряда. Если  $\lambda \approx c_0 \tau$ , то скорость расширения канала мала по сравнению со скоростью звука  $c_0$ . Рассмотрим данный случай [8].

В настоящее время известны три модели расширения полости в жидкости. Если  $l \leq R_0 \leq \lambda$ , то считается, что форма канала близка к сферической. Если  $R_0 \leq l \leq \lambda$ , то для расчета гидродинамических величин вблизи разряда необходимо учитывать протяженность канала, хотя с акустической точки зрения источник можно считать точечным. В этом случае канал разряда близок к короткому, по сравнению с длиной волны, цилиндру. Если же  $R_0 \leq \lambda \leq l$ , то применима модель длинного, по отношению к волне, цилиндра.

В изучаемом процессе при сравнительно невысоких напряжениях (до 10 кВ) время разряда таково, что длина разрядного промежутка  $l$  всегда значительно меньше  $\lambda$ . Поэтому остановимся на простейшей сферической модели, выбрав ее для ис-

следования эволюции канала разряда внутри жидкости.

Пусть в начальный момент времени  $t = 0$  сферическая полость имеет радиус  $R_0$ . Затем сфера начинает расширяться по заданному закону  $R(t)$ . Поскольку скорость расширения сферы невелика, найдем давление на поверхность сферы в предположении, что жидкость считается несжимаемой ( $\rho = \rho_0 = \text{const}$ ). Тогда из уравнения непрерывности получается следующее выражение для скорости, удовлетворяющее граничному условию равенства скоростей на поверхности сферы:

$$v = \frac{R^2}{r^2} \dot{R}. \quad (1)$$

Здесь  $r$  – радиальная координата; точка означает дифференцирование по времени. Радиальное распределение потенциала скорости жидкости  $\phi$  легко получить из формулы (1):

$$\phi = -\frac{R^2}{r} \dot{R}. \quad (2)$$

Обобщенное уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$\frac{\rho}{\rho_0} + \frac{v^2}{2} + \frac{\partial \phi}{\partial t} = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\rho/\rho_0 \sim h$  – удельная энтальпия для несжимаемой жидкости. Подставив выражения для скорости и потенциала скорости в формулу (3) и определив входящую в это выражение константу из граничного условия на бесконечности, для давления получим

$$p - p_0 = \rho_0 \frac{R^2 \ddot{R} + 2\dot{R}^2 R}{r} - \rho_0 \frac{\dot{R}^2 R^4}{2 r^4}. \quad (4)$$

Это соотношение можно переписать в виде

$$p - p_0 = \rho_0 \frac{\ddot{V}}{4\pi r} - \rho_0 \frac{V^2}{(4\pi r^2)^2}, \quad V = \frac{4}{3}\pi R^3. \quad (5)$$

Если в формуле (4) положить  $r = R$ , то

$$p - p_0 = \rho_0 \left( \frac{3\ddot{R}^2}{2} + R\ddot{R} \right). \quad (6)$$

Считаем, что джоулево тепло  $E$  расходуется на увеличение внутренней энергии плазмы  $W$  и на работу над окружающей жидкостью  $A$ , выполняемую во время расширения канала:

$$W + A = E. \quad (7)$$

Внутренняя энергия плазмы приближенно может быть выражена обычной формулой для энергии идеального газа:

$$W = \frac{pV}{\gamma - 1}. \quad (8)$$

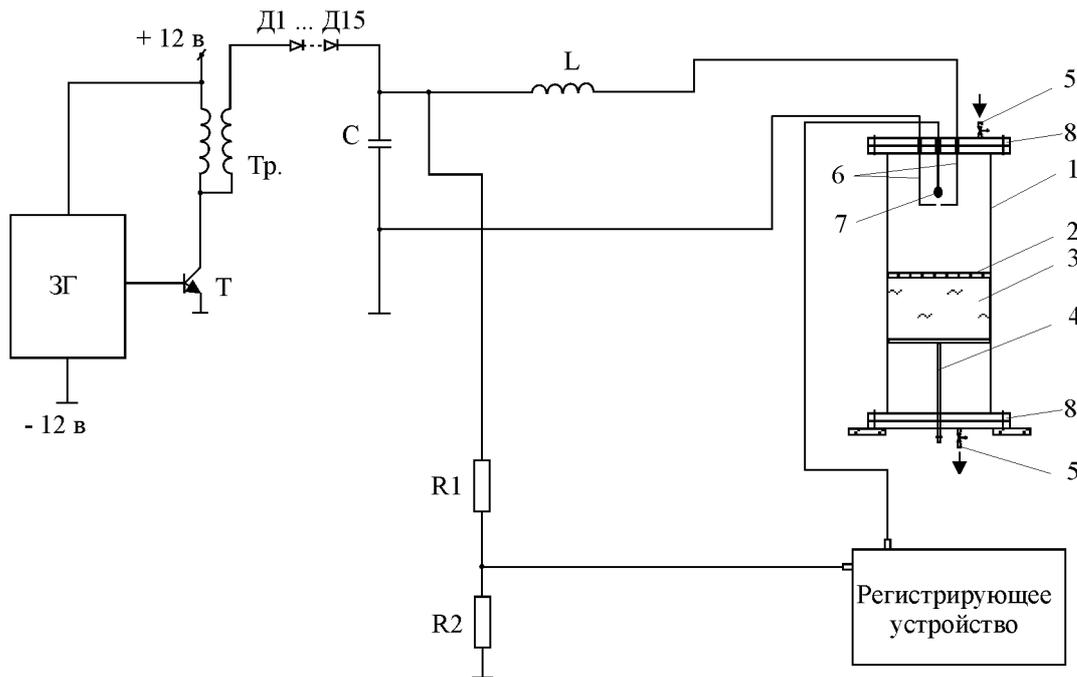


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – фильтрационный прибор, 2 – опорная сетка, 3 – фильтрующая загрузка, 4 – прижимное устройство, 5 – подводящий и отводящий патрубки с запорными клапанами, 6 – электроды, 7 – гидрофон, 8 – прижимные верхний и нижний фланцы

Здесь  $p$  – давление;  $V = 4\pi R^3/3$  – сферический объем радиуса  $R$ , занимаемый плазмой;  $\gamma$  – эффективное значение показателя адиабаты (в данном случае оно равно 1.26). Работа расширения будет

$$A = \int_{V_0}^V p dV. \quad (9)$$

Энергия  $E(t)$ , выделенная в канале, определяется по электрическим характеристикам разряда – току  $I$  и напряжению  $U$  на разрядном промежутке  $t$ :

$$E(t) = \int_0^t IU dt. \quad (10)$$

В выражении (6) давлением  $p_0$  в невозмущенной жидкости можно пренебречь, по сравнению с давлением в канале разряда. Подставив это соотношение в формулу (9) и положив  $\dot{V}(0) = 0$ , найдем работу расширения канала:

$$A = \rho_0 \frac{\dot{V}^2}{8\pi R}. \quad (11)$$

Работа  $A$  затрачивается на увеличение кинетиче-

ской энергии расширяющейся сферы:

$$A = \rho 4\pi R^3 \frac{\dot{R}^2}{2}. \quad (12)$$

Подставляя в соотношение (7) полученные выражения для  $W$ ,  $E$ ,  $A$  и пренебрегая слагаемым при  $\dot{V}^2$  в виду малости стоящего при нем коэффициента, получаем следующее уравнение:

$$\ddot{V} = \frac{\gamma - 1}{\rho} 4\pi R E(t). \quad (13)$$

Введем безразмерные переменные [8]

$$x = \frac{t}{\tau}, \quad f(x) = \frac{E(t)}{E}, \quad y = \frac{R}{R_0}, \quad (14)$$

где  $f(x)$  – безразмерная функция, характеризующая процесс выделения энергии в канале разряда во времени;  $E = E(\tau)$  – энергия, выделившаяся в канале разряда за время  $\tau$ . В результате получим уравнение

$$y^2 \frac{d}{dx} \left( y^2 \frac{dy}{dx} \right) = f(x). \quad (15)$$

Здесь коэффициент при  $f(x)$  приравнен к 1, что позволяет рассматривать обе части соотноше-

ния (15) как величины одного порядка. Это возможно при условии

$$R_0^5 = 0.0062\tau^2 E. \quad (16)$$

Начальные условия из физических соображений естественно выбрать в виде

$$x = 0, \quad y = y_0, \quad \dot{y} = 0, \quad (17)$$

где  $y_0 = R_{\text{стр}}/R_0$  – начальный радиус канала ( $R_{\text{стр}} \sim 0.01$  см).

Уравнение (15) с граничными условиями (17) описывает процесс расширения канала, если известна функция  $f(x)$ . Анализ численного решения данной задачи приводится в следующем разделе.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

#### 3.1. Экспериментальная установка. Анализ результатов эксперимента

В наших исследованиях использовалась фильтрующая загрузка из волокнисто-пористого полиэтилена [18], которая состоит из множества тонких слоев и представляет собой высокопористую среду (с пористостью до 82 %), образованную хаотически расположенными элементарными волокнами цилиндрической формы с диаметрами  $0.08 \div 0.14$  мм, которые скреплены между собой в местах контакта. Толщина фильтра составляла 50 мм.

Экспериментальная установка (рис. 1) включает в себя фильтрационный прибор 1, выполненный из оргстекла в виде цилиндра с внутренним диаметром 100 мм и высотой рабочей части 400 мм, опорную сетку 2, фильтрующую загрузку 3 из волокнисто-пористого полиэтилена, прижимное устройство 4, подводящий и отводящий патрубки с запорными кранами 5. В надфильтровое пространство помещены электроды 6, а также датчик – гидрофон 7, подсоединенный к регистрирующему устройству.

Заиление загрузки проводилось по схеме безреагентного осветления при скорости фильтрации 1.5 м/ч и исходной мутности суспензии  $150 \div 200$  мг/л. В качестве замутнителя использовалась тяжелая белая глина, из которой методом отстаивания удалены частицы крупнее 10 мкм. Механический состав замутнителя, т. е. процентное содержание частиц разного размера, приведен на рис. 2.

Заиление проводилось до достижения предельного заиления загрузки, на которое указывало заметное увеличение мутности фильтрата. При этом концентрация загрязнений в порах составляла  $0.08 \div 0.09$  г/см<sup>3</sup>.

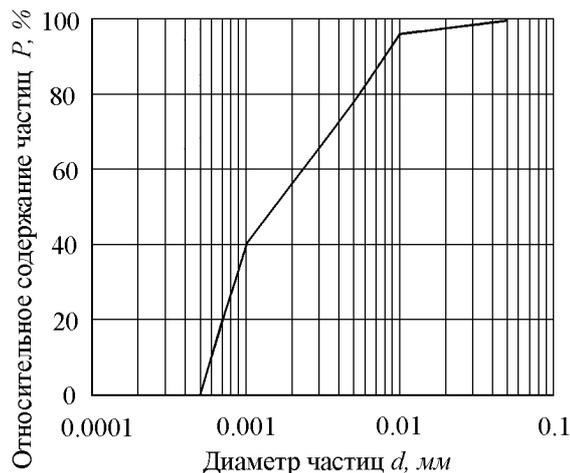


Рис. 2. Диаграмма механического состава замутнителя

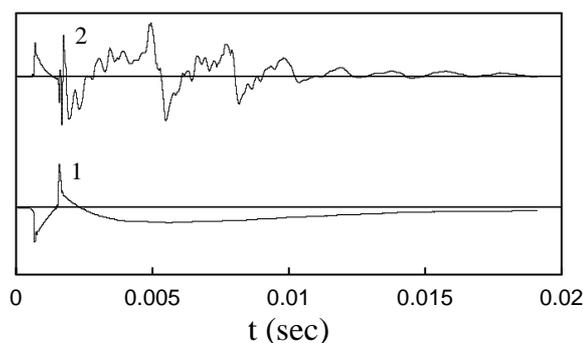


Рис. 3. Динамические характеристики при разряде ( $U=6$  кВ):

1 – напряжение на электродах,  
2 – сигнал с гидрофона

Экспериментальная часть исследований состояла из двух этапов. На первом из них визуально изучалось влияние ударной волны на очистку (регенерацию) фильтрующего элемента от глинистого коагулянта. Установлено, что после трех разрядов при умеренных электрических напряжениях ( $6 \div 10$  кВ) фильтрующий элемент практически полностью регенерируется, т. е. восстанавливает свою первоначальную очистную способность.

Второй этап исследований заключался в изучении временных зависимостей напряжения на электродах в процессе разряда и давления в воде внутри фильтра. Для этого использовалась регистрирующая аппаратура фирмы Брюль & Кьер и гидрофон. На рис. 3 в качестве примера приведены типичные временные зависимости указанных физических характеристик. Видно, что электри-

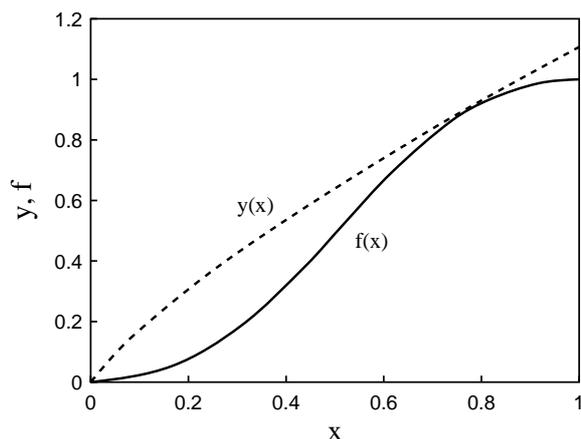


Рис. 4. Характеристики канала разряда:  
 $y(x)$  – зависимость роста радиуса канала от времени,  
 $f(x)$  – нормированная функция выделения  
 энергии в канал разряда

Таблица. Параметры электрических разрядов

№ п/п	$U$ , кВ	$\tau$ , мс	$C$ , мкФ	$R$ , см
1	6	1.0	1	6.45
2	6	0.8	1	5.90
3	6	0.5	1	4.89
4	8	0.8	1	6.61

ческое напряжение (кривая 1) имеет два мощных очень коротких разнополярных броска, следующих друг за другом, после чего напряжение сравнительно медленно выравнивается, приближаясь к нулю. Такое поведение достаточно характерно: оно определяется типом и параметрами выбранной электрической схемы, а также протеканием переходных процессов в ней и в зоне разряда. В отличие от электрического напряжения, броски давления в ударной волне (кривая 2) длятся значительно дольше, благодаря многократным переотражениям волны от стенок фильтра. При этом в колебаниях давления наблюдаются как низкочастотная, так и высокочастотная составляющие. По-видимому, они связаны с собственными продольными и радиальными частотами замкнутого цилиндрического объема фильтра.

### 3.2. О рациональном выборе межэлектродного расстояния

Как показано выше, динамика роста полости в жидкости после разряда описывается уравнением (15) при заданных граничных условиях (17).

Однако для расчетов уравнение (15) удобно представить в виде двух дифференциальных уравнений первого порядка посредством ввода новой дополнительной функции  $z(x)$ :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{f(x)}{y^2}, \quad \frac{dy}{dx} = \frac{z}{y^2}. \quad (18)$$

Система соотношений (17), (18) представляет собой задачу Коши, где  $x$  – безразмерное время. И уравнение (15) и эквивалентная ему система (18) нелинейны.

В правой части первого уравнения (18) стоит безразмерная функция выделения энергии в канале. Как указывалось выше, в режиме, близком к критическому, закон выделения энергии для всех разрядов примерно одинаков (наблюдаются лишь некоторые количественные расхождения, не влияющие на общую картину процесса). Эта зависимость аппроксимируется функцией  $f(x)$ , изображенной на рис. 4:

$$f(x) = \begin{cases} 2x^2, & 0 \leq x \leq \frac{1}{2}, \\ 4x - 2x^2 - 1, & \frac{1}{2} \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (19)$$

С учетом имеющегося распределения  $f(x)$  численно решим задачу Коши (17), (18) с помощью метода Рунге – Кутты. В результате получим кривую радиуса расширения канала разряда  $y(x)$ , которая в точности совпадает с результатами расчетов [8].

Однако нам важно знать расстояние, на которое необходимо удалить электроды, чтобы выделившаяся энергия импульса давления максимально использовалась для удаления глинистых коагулянтов из фильтра. Для этого вычислим характерное расстояние  $R_0$ , на которое распространится основное возмущение за характерное время разряда  $\tau$ . Расчет показал, что для проведенных разрядов  $4.89 \leq R_0 \leq 6.61$  (см. таблицу). Таким образом, не останавливаясь подробно на причинах затухания, можно сказать, что электроды для выбранных параметров системы следует располагать на расстоянии порядка  $5.5 \div 6$  см.

Принимая во внимание диаметр исследуемого фильтра, можно заключить, что такое расстояние позволит волне давления оказать ударное воздействие на всю его поверхность. После первого разряда, когда верхний слой очистного элемента будет подвергнут действию ударной волны, часть глины выйдет из фильтра, а часть осядет в нем несколько ниже. Поэтому для полной очистки фильтра целесообразно проводить не один, а несколько

разрядов. Кроме того, уменьшение расстояния от канала разряда до фильтра позволит более эффективно воздействовать на внутреннее загрязнение.

## ВЫВОДЫ

1. Создана установка для изучения влияния ударной волны, инициируемой электрическим разрядом, на очистку полимерных фильтров от глинистых коагулянтов. Проведена серия соответствующих экспериментов.
2. Результаты исследований показали, что использование электрического разряда позволяет эффективно восстанавливать работоспособность фильтров из волокнисто-пористого полиэтилена.

1. Priestley, J. The history and present state of electricity with original experiments.– London: J. Dodsley, 1769.
2. Покровский Г. И. Взрыв.– М.: Недра, 1967.– 171 с.
3. Фрюнгель Р. Импульсная техника.– М.-Л.: Энергия, 1965.– 448 с.
4. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект.– М.: Машгиз, 1955.– 51 с.
5. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и некоторые возможности его применения.– Л.: ЛДНТП, 1959.– 16 с.
6. Юткин Л. А. Электрогидравлическое дробление. Часть 1.– Л.: ЛДНТП, 1959.– 35 с.
7. Юткин Л. А. Электрогидравлическое дробление. Часть 2.– Л.: ЛДНТП, 1959.– 35 с.
8. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде.– М.: Наука, 1971.– 155 с.
9. Арсентьев В. В. К теории развития канала импульсного электрического разряда в жидкой среде // Сб. докл. IV Межвуз. конф. по пробое диэлектриков и проводников (Томск, февраль 1963).– М.: Энергия, 1964.– С. 199–206.
10. Использование взрыва в народном хозяйстве. Тр. VIII сессии науч. совета по народнохозяйственному использованию взрыва (Днепропетровск, май 1969).– Киев.– 1970.– Части 1–2.
11. Шамарин Ю. Е., Лейко А. Г., Шамарин А. Ю., Ткаченко В. П. Подводная электроакустическая аппаратура и устройства.– К.: КНИИГП, 2001.– 256 с.
12. Сизоненко О. Н., Швец И. С., Кучернюк А. В. Применение электроразрядного воздействия для обработки добывающих и нагнетающих скважин // Нефт. хоз.– 12.– 2000.– С. 133–135.
13. Сизоненко О. Н., Швец И. С. О возможности использования электрического разряда для интенсификации притока нефти в скважину.– Геотехн. мех: 25, 2001.– 79–85 с.
14. Косенков В. М., Каменская Л. А. Расчет расширения канала электрического разряда в жидкости, описываемой в потенциальном приближении // Акуст. вісн.– 2001.– 4, N 2.– С. 47–52.
15. Вовченко А. И., Ковалев В. Г., Поздеев В. А. Гидродинамические характеристики разряда в жидкости при вводе энергии в канал в виде повторяющихся импульсов // Прикл. гидромех.– 2001.– 3(75), N 3.– С. 19–25.
16. Вовченко А. И., Шамко В. В., Шишов А. М. Особенности волнового цуга, излучаемого при высоковольтном электрическом разряде в воде // Акуст. вісн.– 2003.– 6, N 3.– С. 26–28.
17. Барбашова Г. А., Вовченко А. И., Каменская Л. А., Шамко В. В. Управление гидродинамическими процессами при электровзрывном программируемом многоимпульсном вводе энергии // Акуст. вісн.– 2004.– 7, N 4.– С. 3–9.
18. Фильтр для очищения воды.– Патент Украины N 41609 // Бюл. N 8.– 17.09.2001.