

PACS numbers: 52.80.Mg, 52.80.Qj, 52.80.Wq, 62.50.Ef, 81.05.Bx, 81.40.Pq, 83.80.Nb

## **Исследование износа металлической части электродной системы электрогидравлического бура**

К. Кусаиынов, Б. Р. Нусупбеков, С. Е. Сакипова,  
Н. Н. Шуюшбаева, А. К. Хасенов

*Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова,  
ул. Университетская, 28<sup>а</sup>,  
100026 Караганда, Казахстан*

В статье рассматриваются основные преимущества электрогидравлического способа бурения, при котором происходит износ металлической части электродов бура. В процессе исследования получены зависимости скорости изнашивания электрода от энергетических параметров и количества электрогидравлических импульсов. В результате анализа экспериментальных данных установлены оптимальные значения электрофизических параметров, обеспечиваемые металлической электродной системой, при которых происходит интенсивное разрушение твёрдых горных пород. На основании микроскопических снимков исследованы расплавленные участки поверхности электродов под воздействием подводного искрового разряда. Предлагаемый электрогидравлический бур позволяет более эффективно разрушать и измельчать твёрдые камни электрогидравлическим разрядом при бурении скважин.

У статті розглядаються основні переваги електрогидравлічного способу свердління, при якому відбувається знос металеві частини електрод свердла. У ході дослідження одержано залежності швидкості зносу електроди від енергетичних параметрів та кількості електрогидравлічних імпульсів. За результатами аналізу експериментальних даних встановлено оптимальні значення електрофізичних параметрів, що забезпечуються металевію електродною системою, за яких відбувається інтенсивне руйнування твердих гірських порід. На основі мікроскопічних знімків досліджено розтоплені ділянки поверхні електрод під дією підводного іскрового розряду. Запропоноване електрогидравлічне свердло дає можливість більш ефективно руйнувати та подрібнювати тверде каміння електрогидравлічним розрядом при свердлінні свердловин.

The article presents the main advantages of electric hydraulic drilling method. During the drilling, the wear of the metal parts of the drill electrodes takes place. In the course of the investigation, the authors determined the

dependences of the electrode wear rate on both the energy parameters and the number of electro-hydraulic pulses. Using the analysis of the experimental data, the optimal values of electrophysical parameters provided by the metal electrode system, for which an intensive destruction of solid rock takes place, are determined. Based on microscopic images, the areas of the electrode surface melted under the underwater spark discharge are investigated. The proposed electric hydraulic drill makes it possible to destroy and crush hard stones more efficiently by means of the electro-hydraulic discharge during well drilling.

**Ключевые слова:** износ металла электродов, электрический разряд, металлическая электродная система, электрогидравлический бур.

*(Получено 10 ноября 2014 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка научно-практических основ внедрения энергосберегающих теплонасосных технологий для тепло- и хладоснабжения жилых и производственных помещений на базе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в настоящее время является актуальной задачей современной теплотехники. Одним из решений данной задачи является использование тепла грунта и грунтовых вод, предполагающее установку трубных решёток теплового насоса в пробурённых скважинах на достаточно большой глубине.

В настоящее время известно много видов бурильных установок, которые широко используются на территории Казахстана. Но применяемые на практике технологии бурения скважин для установки теплообменников эффективны только в условиях мягкого грунта при отсутствии твёрдых пород и каменных плит. Бурение на глубину до 25 метров при диаметре скважины до полуметра при наличии вышеуказанных препятствий очень затруднительно или невозможно [1]. Здесь эффективным является электрогидравлический метод бурения, сущность которого заключается в разрушении твёрдых непроводящих и полупроводящих пород за счёт воздействия на них электрическими импульсными разрядами в жидкой среде.

## 2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

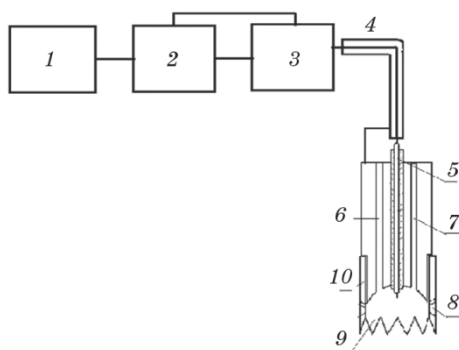
Настоящая работа посвящена методу электрогидравлического бурения скважин, в основе которого лежит уникальное явление — способ прямого преобразования электрической энергии в механическую энергию ударных волн, эффективно разрушающих горные породы в условиях ограниченного пространственного объёма в забое скважины.

Электрогидравлическое бурение является принципиально новым способом и до сих пор не нашло промышленного применения. Основным преимуществом предлагаемой технологии является надёжность, обусловленная отсутствием трущихся и изнашивающихся частей установки, и простота в эксплуатации и обслуживании. Однако внедрение данной технологии и широкое использование на практике затруднено некоторыми нежелательными эффектами и последствиями. Процессы, происходящие на поверхностях электродов, подверженных эрозии и воздействию мощных подводных искровых разрядов, требуют дополнительного исследования. При электрогидравлическом бурении скважин происходит также износ кабеля электрода положительной полярности, он является расходным материалом. На поверхностях как положительного, так и отрицательного металлических электродов появляются расплавленные участки, влияние которых на прочность системы электродов полностью не изучено. В связи с этим, целью данной работы является экспериментальное изучение степени и скорости изнашивания электродов от энергетических параметров и количества электрогидравлических импульсов.

### **3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Основой разработанной электроимпульсной технологии является электрогидравлический эффект Юткина [2–4]. В лаборатории гидродинамики и теплообмена КазГТУ имени академика Е. А. Букетова разработана и собрана электрогидравлическая установка с рабочей ячейкой для выполнения испытаний и изучения различных процессов, сопровождающих электрогидравлическое бурение (рис. 1). Принцип работы электрогидравлического бура заключается в следующем: вначале импульсный конденсатор заряжается от высоковольтного генератора, регулируемого пультом управления. При достижении заданного напряжения происходит пробой в разряднике, и вся запасённая энергия в импульсном конденсаторе через кабель–электрод передаётся в рабочий промежуток. Происходит импульсный электрический разряд в жидкости, являющийся источником мощных механических ударных волн, которые отражаясь от коронки бура, сфокусировано воздействуют на обрабатываемую среду, тем самым разрушая её на мелкие куски [5–7].

В устройстве для бурения скважин в рабочей ячейке для центрального электрода используется оголённая жила кабеля марки РК-75-9-12, соединённая с положительным выходом источника импульсного тока, а его отрицательный выход соединён с коронкой электрогидравлического бура. Такую конструкцию электрода удобно использовать при бурении скважин для установки теплообмен-



**Рис. 1.** Схема установки электрогидравлического бура: 1 — пульт управления, 2 — высоковольтный генератор с разрядниками, 3 — накопитель энергии с системой защиты, 4 — коаксиальный кабель-электрод, 5 — центральный электрод, 6 и 7 — каналы для подачи промывочной жидкости, 8 — отверстие в коронке бура для выхода газов, 9 — зубцы коронки, 10 — коронка бура.

ных труб.

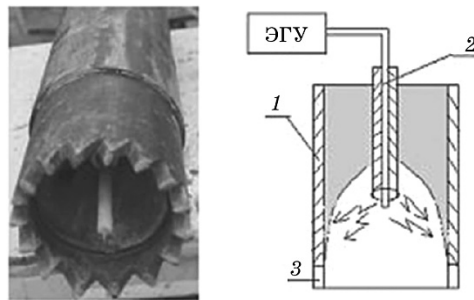
Возникающие при разряде силы за счёт гидроудара и гидродинамической силы, в результате перераспределения скоростей, способствуют самоцентровке кабеля-электрода. В процессе длительной работы центральная оголённая жила кабеля-электрода укорачивается за счёт эрозии, а изоляция торцевой части разрушается. Изоляция в основном прорезается вдоль центральной жилы, и электрогидравлический бур теряет эффективность работы. Поэтому после электрогидравлического разрушения твёрдых пород необходимо периодически обновлять рабочий конец кабеля-электрода, очищая его от изоляционного слоя.

Для изучения процесса износа электродов в процессе электрогидравлической обработки собран стенд, представляющий собой установку с возможностью закрепления и испытания различных металлических труб.

Внешний вид электрогидравлического бура и схема стенда для исследования процесса износа электрода показаны на рис. 2. Для осуществления электрогидравлического разряда полость бура заполняется технической водой. Разрушенные и раздробленные куски каменного грунта удаляются вместе с проточной водой.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе работы каждый разряд сопровождается эрозионным износом электродов, величина которого зависит от напряжения и энергии в импульсе, материала электрода и др. В процессе работы



**Рис. 2.** Общий вид и схема электрогидравлического бура: 1 — трубчатая наружная оболочка бура — отрицательный электрод, 2 — центральный положительный электрод, 3 — зубцы коронки бура.

кабель-электрод электрогидравлического бура характерно разрушается. Примеры характерных оплавлений и обгораний положительного электрода показаны на рис. 3.

Известно, что в процессе электрогидравлического бурения происходит электроэрозионная обработка (электроэрозия), заключающаяся в «вырывании» частиц с поверхности металла импульсом электрического разряда [8]. Если задано расстояние (напряжение) между электродами, погруженными в жидкую среду, то при сближении электродов (увеличении напряжения) происходит пробой и возникает электрический разряд, с образованием плазмы высокой температуры в канале разряда. Это свойство используется при электроэрозионной обработке материалов, которая, обычно выполняется электрическими импульсами длительностью не более 0,01 с, так чтобы выделяющееся тепло не распространялось вглубь материала. Кроме того, давление частиц плазмы при ударе об электрод, способствует эрозии (выбросу) не только расплавленного, но и разогретого вещества.

Электрический пробой всегда возникает по кратчайшему пути,



**Рис. 3.** Разрушение кабеля-электрода в процессе работы.

поэтому, в первую очередь, разрушаются наиболее близкие участки электродов. Характер изменений и качество поверхности после обработки зависит от параметров электроимпульсов (длительности, частоты, энергии). Как показывают исследования характерных изменений кабеля-электрода в процессе электрогидравлического бурения, эрозионный износ металлов происходит по-разному в зависимости от электрических параметров, частоты и длительности разрядов. Для расчёта массы металла, уносимого с электрода за один электрический разряд, в работах [9–10] предложена следующая формула:

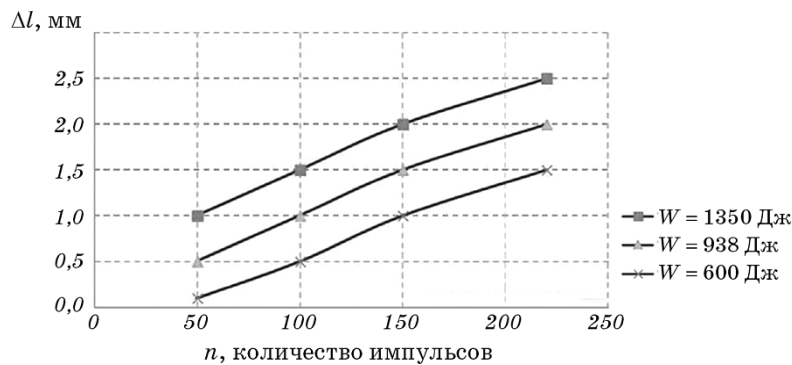
$$m_b = \frac{k_a u_s \alpha}{\frac{3c_p (T_{пл.} - T_0) - r_{пл.}}{k_b} + r_{исп.}}$$

Здесь  $k_a$  — коэффициент, учитывающий влияние диаметра токопроводящего стержня на эрозию,  $k_b$  — коэффициент выброса материала за разряд,  $u_s$  — эквивалентный энергетический потенциал,  $\alpha$  — интеграл от модуля разрядного тока,  $c_p$  — удельная теплоёмкость материала стержня электрода,  $T_{пл.}$  и  $T_0$  — температура плавления и начальная температура материала стержня электрода,  $r_{пл.}$  и  $r_{исп.}$  — удельные теплоты плавления и испарения материала электрода.

В выполненных авторами статьи экспериментах получено, что при напряжении 20 кВ выделяется импульс энергии в 600 Дж. Тогда первоначальная длина стержня положительного электрода из меди с диаметром 2 мм в результате 121 импульсного разряда укорачивается на  $\Delta l = 1$  мм, а после 178 импульсов — на  $\Delta l = 3$  мм. Экспериментально установлено, что при выделении данного количества энергии в иницируемом разрядном промежутке эрозия положительного электрода сопровождается уменьшением его объёма примерно на 3,14–9,42 мм<sup>3</sup>.

На рисунке 4 показана зависимость изнашивания длины рабочего электрода от числа импульсов при разных энергиях разряда (от 600 Дж до 1350 Дж). Как видно из графика, с увеличением энергии разряда длина рабочего электрода уменьшается быстрее при постоянном числе импульсов.

В электрогидравлическом буре помимо положительного электрода большое значение имеет и отрицательный электрод, так как на практике отрицательным электродом служит трубчатая оболочка бура из толстостенной трубы из прочной стали. Очевидно, что отрицательный электрод должен быть высокопрочным и коррозионно-устойчивым, и механически прочным, так как большая энергия разрядного удара в виде электрогидравлического воздействия приходится на отрицательный электрод, т.е. на поверхность трубчатой оболочки бура. Это связано с тем, что в результате почти мгновенно



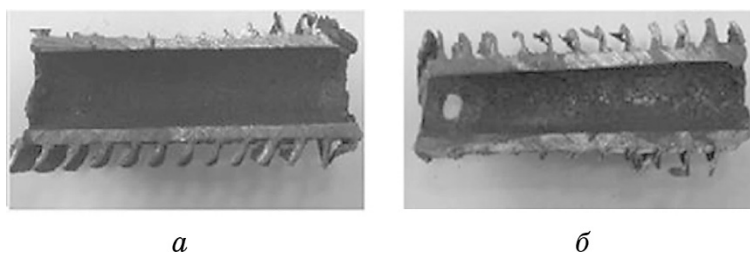
**Рис. 4.** Зависимость изнашивания длины электрода от числа импульсов.

происходит выброс огромной энергии, которая трансформируется в энергию давления ударной волны, амплитуда импульсного давления на фронте ударной волны достигает до  $10^9$  Па.

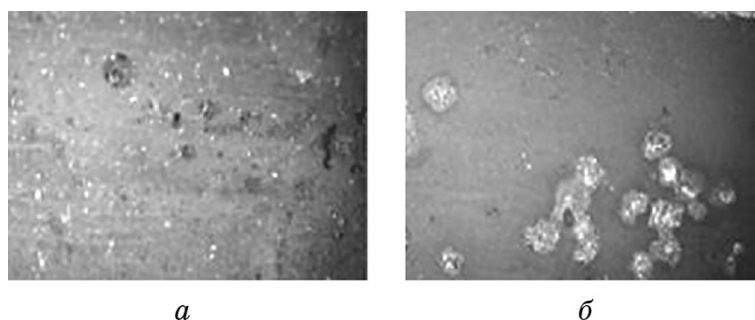
Для изучения влияния электрического разряда на внутреннюю поверхность оболочки бура в экспериментах использована толстостенная стальная труба. На рисунке 5 показаны фотографии срезов стальной коронки бура до и после электрогидравлической обработки. Электрогидравлическая обработка выполнялась в течение 2 минут. За это время имел место 121 электрогидравлический импульс при напряжении 20 кВ. Как видно из рис. 5, б, электроимпульсное воздействие не повреждает гладкую внутреннюю поверхность стальной коронки бура.

Также нами получены микроструктуры стальной коронки бура с помощью электронного микроскопа при различных увеличениях (рис. 6–8).

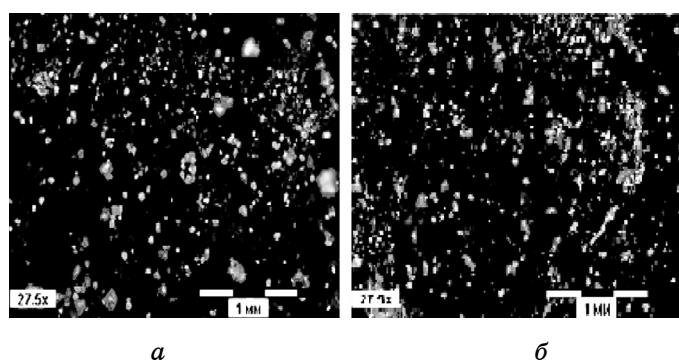
На обработанной металлической поверхности (рис. 8) стальной трубы наблюдается множество точечных прожогов в виде пятен диаметром 0,5–3,0 мм, а также имеются продолговатые прожоги в виде диаметрально расположенных полос шириной 0,3–1,0 мм



**Рис. 5.** Фотографии срезов стальной коронки бура: до (а) и после (б) электрогидравлической обработки.



**Рис. 6.** Фотографии внутренней поверхности стальной коронки бура с увеличением в 6,5 раз: до (а) и после (б) электрогидравлической обработки.



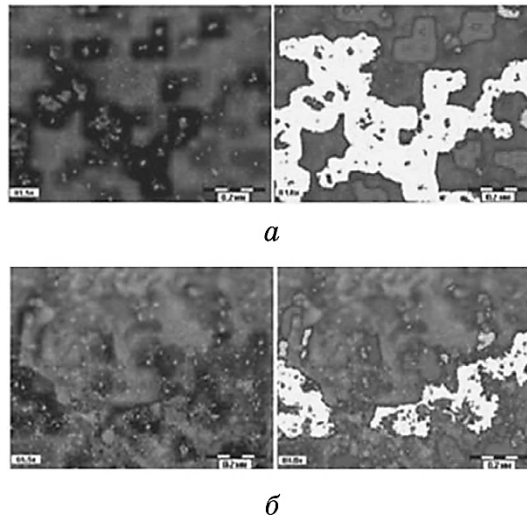
**Рис. 7.** Фотографии внутренней поверхности стальной коронки бура с увеличением в 27,5 раз: до (а) и после (б) электрогидравлической обработки.

длиной 6–15 мм. Поверхность металла в местах прожогов более шероховатая, чем исходная поверхность. Максимальная высота появившихся шероховатостей и микронеровностей в прожогах равна 0,086 мм. Концентрация точек прожогов колеблется примерно от 1 до 10 штук на  $1 \text{ см}^2$ , она зависит от положения рабочего кабеля электрода. В местах прожогов поверхность металла оплавилась, и видны вкрапления красной меди диаметром 0,032–0,055 мм, на один прожог приходится 30–80 вкраплений.

Таким образом, при обследовании поперечных и продольных шлифов под микроскопом при 82-кратном увеличении следов трещин в металле не обнаружено.

В ходе дальнейшего эксперимента нами определены оптимальные значения количества разрядов при разрушении камней и твёрдых горных пород электрическими разрядами в жидкости в процессе бурения скважин, обеспечиваемые оптимизированной электродной системой. По результатам выполненных экспериментов по-

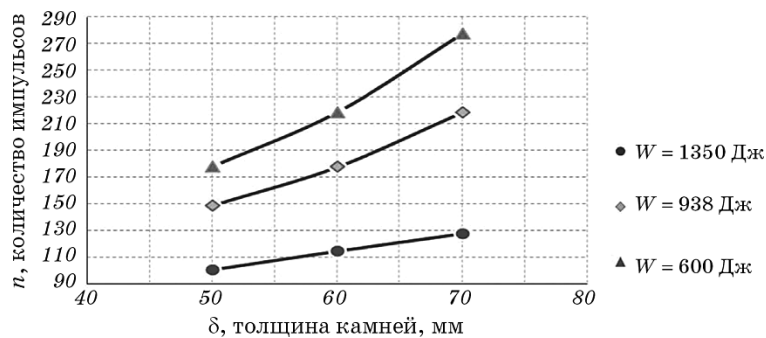




**Рис. 8.** Фотографии микроструктуры внутренней поверхности стальной трубы: до (а) и после (б) обработки.

строены графики зависимости количества разрядов от толщины камня при разных значениях энергии разрядов (рис. 9). Видно, что при энергии разряда порядка 600 Дж возможно разрушение камня толщиной  $\delta \cong (50-70)$  мм. Количество импульсных электрических разрядов ( $n$ ) при этом приблизительно равно 175–275. С увеличением энергии разряда толщина разрушаемых камней может быть увеличена, при этом количество импульсов, необходимых для разрушения, уменьшается. Например, при энергии разряда порядка 1350 Дж возможно разрушение камней толщиной более 70 мм, на что требуется около 130 импульсов.

Таким образом, определены электрические параметры разрядов,



**Рис. 9.** Зависимость процесса разрушения камня заданной толщины от количества электрогидравлических импульсов.

обеспечивающие эффективное разрушение камней и кусков твёрдого грунта разной толщины. Изучены характерные изменения кабеля электрода и поверхности трубчатой оболочки бура в процессе электрогидравлического бурения в зависимости от энергии, длительности и количества разрядов.

## 5. ВЫВОДЫ

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сформулировать следующие выводы.

В ходе выполнения экспериментов исследованы процессы эрозии металлической части электродной системы электрогидравлического бура. Исследованы расплавленные участки поверхности. На основе анализа микроструктурных изменений поверхности стальной трубы до и после электрогидравлического воздействия при различных параметрах электрических разрядов установлено, что внутренняя поверхность трубчатой оболочки электрогидравлического бура, служащего отрицательным электродом, не разрывается и не подвергается механическому износу. Существенный износ происходит только в центральном кабеле-электроде, который обгорает и оплавляется, являясь расходным материалом.

Изучены зависимости, характеризующие процесс разрушения кусков твёрдой породы разной толщины в зависимости от количества импульсов и энергии разрядов.

Таким образом, электрогидравлическая технология бурения по способу её реализации может быть использована при создании скважин для теплообменников теплового насоса.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Васильев, *Теплоэнергетика*, № 2: 31 (1994).
2. Л. А. Юткин, *Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности* (Ленинград: Машиностроение: 1986).
3. П. П. Малюшевский, *Основы разрядно-импульсной технологии* (Киев: Наукова думка: 1983).
4. К. Кусаиынов, Б. Р. Нусупбеков, *Разрушение материалов подводным электрическим взрывом* (Караганда: Изд-во ТОО «Издатсервис»: 2010).
5. К. Кусаиынов, С. Е. Сакипова, Б. Р. Нусупбеков, К. М. Турдыбеков, Ж. А. Кужуханова, *Промышленная теплотехника. Международный научно-прикладной журнал*, 34, № 7: 32 (2012).
6. К. Кусаиынов, К. М. Турдыбеков, Ж. А. Кужуханова, Н. Н. Шуюшбаева, *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*, № 2 (13): 420 (2013).
7. K. Kusaıynov, N. N. Shuyushbaeva, J. A. Kuzhuhanova, and B. A. Ahmadiev, *Proc. of the Fifth International Scientific Conference FMNS-2013 (12–16 June, 2013)* (Blagoevgrad, Bulgaria: 2013), vol. 3, p. 51.

8. [http://www.roburbaltia.lv/theoretical\\_library\\_rus.html](http://www.roburbaltia.lv/theoretical_library_rus.html).
9. Г. А. Гулый, *Оборудование и технические процессы с использованием электрогидравлического эффекта* (Москва: Машиностроение: 1977).
10. Б. Я. Мазуровский, А. Н. Сизев, *Электрогидравлический эффект в листовой штамповке* (Киев: Наукова думка: 1983).

## REFERENCES

1. G. P. Vasil'ev, *Teploenergetika*, No. 2: 31 (1994) (in Russian).
2. L. A. Yutkin, *Elektrogidravlicheskiy Effekt i Ego Primenenie v Promyshlennosti* (Leningrad: Mashinostroenie: 1986) (in Russian).
3. P. P. Malyshevskiy, *Osnovy Razryadno-Impul'snoy Tekhnologii* (Kiev: Naukova Dumka: 1983).
4. K. Kusaiynov and B. R. Nusupbekov, *Razrushenie Materialov Podvodnym Elektricheskim Vzryvom* (Karaganda: Izd-vo TOO 'Izdatservis': 2010) (in Russian).
5. K. Kusaiynov, S. E. Sakipova, B. R. Nusupbekov, K. M. Turdybekov, and Zh. A. Kuzhukhanova, *Promyshlennaya Teplotekhnika. Mezhdunarodnyy Nauchno-Prikladnyy Zhurnal*, **34**, No. 7: 32 (2012) (in Russian).
6. K. Kusaiynov, K. M. Turdybekov, Zh. A. Kuzhukhanova, and N. N. Shuyushbaeva, *Sovremennaya Nauka: Issledovaniya, Idei, Rezul'taty, Tekhnologii*, No. 2 (13): 420 (2013) (in Russian).
7. K. Kusaiynov, N. N. Shuyushbaeva, J. A. Kuzhuhanova, and B. A. Ahmadiev, *Proc. of the Fifth International Scientific Conference FMNS-2013 (12–16 June, 2013)* (Blagoevgrad, Bulgaria: 2013), vol. 3, p. 51.
8. [http://www.roburbaltia.lv/theoretical\\_library\\_rus.html](http://www.roburbaltia.lv/theoretical_library_rus.html).
9. G. A. Gulyy, *Oborudovanie i Tekhnicheskie Protsessy s Ispol'zovaniem Elektrogidravlicheskogo Effekta* (Moscow: Mashinostroenie: 1977) (in Russian).
10. B. Ya. Mazurovskiy and A. N. Sizev, *Elektrogidravlicheskiy Effekt v Listovoy Shtampovke* (Kiev: Naukova Dumka: 1983) (in Russian).