

УДК 662.611

**Таймаров Михаил Александрович**

E-mail: [taimarovma@yandex.ru](mailto:taimarovma@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор

**Казанский государственный энергетический университет**

Адрес организации: 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

**Лавирко Юрий Васильевич**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [lav.yu55@gmail.com](mailto:lav.yu55@gmail.com)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Использование мазутного нефтешлама и древесных лесопильных отходов в малой энергетике**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* После промывки мазутных емкостей на тепловых электростанциях и на других объектах остается много мазутного нефтешлама и замазученных стоков, использовать которые в качестве вторичного топлива без применения топок особой конструкции не представляется возможным. На лесопильных и деревоперерабатывающих предприятиях скапливается много вторичных древесных материалов, перерабатывать которые в востребованные энергоресурсы возможно лишь при наличии соответствующих технологий. Целью исследования является проектирование универсального котла. Задача: комплексное использование нефтешлама и древесных отходов как топлива.

*Результаты.* Предлагается комплексное использование нефтешлама и древесных отходов как топлива для разработанного универсального котла, включающего в себя технические возможности псевдоожиженного, слоевого и факельного сжигания. Разработан универсальный котел с тремя топками для сжигания твердых нефтешламов в псевдоожиженном слое, жидких нефтешламов в камерной топке, древесных отходов в движущемся слое на цепной решетке. Твердый порошкообразный нефтешлам поступает через форкамеру в первую топку, работающую по принципу псевдоожиженного слоя. Высота псевдоожиженного слоя регулируется за счет количества кварцевого песка, загружаемого в первую топку. Вторая топка с помощью газохода соединена с первой топкой. Предварительный разогрев второй топки осуществляется с помощью плоскофакельных горелок, расположенных на двух стенах, за счет сжигания в них топливного природного газа. При этом пламя горелок нагревает огнеупорную футеровку стен второй топки, излучение которой воспламеняет слой древесных отходов на цепной решетке. Третья топка, работающая по принципу камерного сжигания жидких отходов нефтешлама, соединена газоходом со второй топкой. Из второй топки поступают продукты сгорания в третью топку. Газообразные продукты сгорания нефтешлама и продукты сгорания, поступившие из первой и второй топок, отдают теплоту экранным радиационным поверхностям нагрева и далее, конвективным поверхностям нагрева пароперегревателя, экономайзера и воздухоподогревателя. При тепловой мощности котла 30 МВт количество полученной электроэнергии составляет 12 МВт.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что разработан универсальный котел для одновременного сжигания твердого и жидкого нефтешлама и древесины с получением пара энергетических параметров, используемого для выработки электрической энергии. Предложены типы горелок для работы топок псевдоожиженного слоя, слоевого сжигания древесины и камерного сжигания жидкого нефтешлама.

**Ключевые слова:** мазутный нефтешлам, сжигание, форсунка, печь, кипящий слой, факел, тепловая энергия, древесные отходы, котел, цепная решетка, камерное сжигание.

### Введение

Жидкий мазутный нефтешлам имеет низшую теплоту сгорания около 40 МДж/кг и может использоваться в качестве топлива. Однако его высокая вязкость препятствует его сжиганию с применением обычных форсунок в котлах. После нефтеловушек нефтешлам может находиться в твердом состоянии и иметь низшую теплоту сгорания около 30 МДж/кг.

Древесные отходы лесопильных производств имеют теплоту сгорания около 24 МДж/кг. Многообразие типов древесных отходов: опилки, щепа, кора и т.д. требует разработки универсального типа котла, способного эффективно утилизировать эти отходы с получением высокопотенциальных энергоносителей [1-9]. В данной статье предлагается комплексное использование нефтешлама и древесных отходов как топлива для разработанного универсального котла, включающего в себя технические возможности псевдоожиженного, слоевого и факельного сжигания.

Жидкие нефтешламы являются горючими отходами, имеющими, по сравнению с древесными отходами, высокую теплоту сгорания. В универсальном котле часть этой теплоты может быть использована для повышения температурного уровня процесса горения древесных отходов с целью получения пара, пригодного для использования в паровой турбине. Применение псевдоожиженного слоя, состоящего из нагретых частиц кварцевого песка, позволяет ускорить процесс горения твердых частиц нефтешлама.

Соединение всех топок общим тепловоспринимающим водяным циркуляционным контуром позволяет устранить проблему с периодическими колебаниями температуры в топках при загрузке древесины и твердого нефтешлама.

### Объект исследования

На рис. 1 приведена схема предлагаемого универсального котла для сжигания нефтешлама и древесных отходов с выработкой пара энергетических параметров для получения электроэнергии.

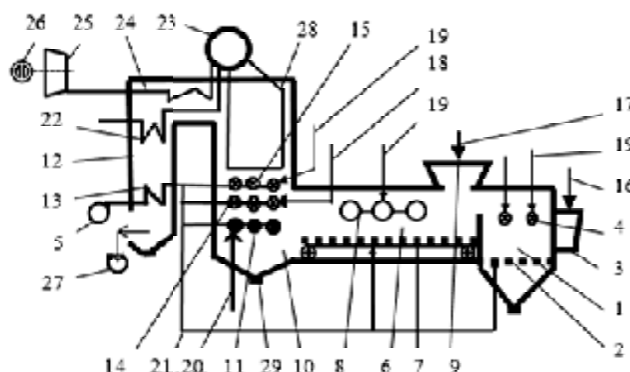


Рис. 1. Схема универсального котла для сжигания мазутного нефтешлама и древесных отходов:

- 1 – топка псевдоожиженного слоя; 2 – распределительная решетка; 3 – форкамера;
- 4 – прямоточные газовые горелки; 5 – дутьевой вентилятор; 6 – топка слоевого сжигания;
- 7 – цепная решетка; 8 – плоскофакельные газовые горелки; 9 – загрузочный бункер;
- 10 – топка камерного сжигания; 11 – форсунок для сжигания жидкого нефтешлама;
- 12 – конвективный газоход; 13 – воздухоподогреватель;
- 14 – горелки для сжигания газообразных нефтеотходов; 15 – вихревые газовые горелки;
- 16 – твердый нефтешлам; 17 – древесные отходы; 18 – сбросные нефтяные газы;
- 19 – топливный газ; 20 – жидкий нефтешлам; 21 – нагретый воздух; 22 – экономайзер;
- 23 – барабан; 24 – пароперегреватель; 25 – турбина; 26 – электрогенератор; 27 – дымосос;
- 28 – экранные трубы; 29 – затвор (иллюстрация авторов)

В схеме реализованы принципы псевдоожиженного – 1, слоевого – 6 и факельного – 10 сжигания в виде трех топок в составе одного универсального котла. Тепловоспринимающие поверхности котла, размещенные в топке – 10 и в конвективном газоходе – 12, вырабатывают перегретый пар, идущий на турбину – 25, соединенную с электрогенератором – 26.

Предлагаемый универсальный котел изготавливается из номенклатуры типовых изделий, выпускаемых промышленностью, для котлов камерного сжигания, котлов с цепной решеткой и печей кипящего слоя. Однако для функционирования универсального котла необходимо определенное долевое распределение тепловых потоков, получаемых в топках – 1, 6, 10 от сжигания нефтешлама и древесных отходов с различной теплотой сгорания. В противном случае теплотехнические параметры перегретого пара окажутся неприемлемыми для работы паровой турбины – 25.

Котел работает следующим образом. Твердый порошкообразный нефтешлам – 16 подается через форкамеру – 3 в топку псевдоожиженного слоя – 1, в которую через решетку – 2 подается нагретый воздух, нагнетаемый вентилятором – 5. Псевдоожиженный слой создается за счет кварцевого песка, загружаемого в топку – 1.

При первичном пуске через горелки – 4 поступает топливный природный газ – 19, который, после электроискрового поджига, сгорает с выделением теплоты и разогревает, взвешенные в потоке воздуха, частицы порошкообразного нефтешлама до их воспламенения и сгорания.

При этом нагреваются также частицы кварцевого песка, создающие непосредственно псевдоожиженный слой.

После нагрева частиц кварцевого песка до температуры воспламенения нефтешлама сжигание топливного газа прекращается, и тепловыделение происходит только за счет горения нефтешлама.

Образующиеся продукты сгорания отсасываются дымососом – 27 через топку слоевого сжигания – 6, в которую через бункер – 9 на цепную решетку – 7 предварительно загружаются древесные отходы – 17.

Предварительный разогрев топки – 6 производится с помощью плоскофакельных горелок – 8 за счет сжигания в них топливного природного газа – 19.

Пламя горелок – 8 нагревает огнеупорную футеровку стен топки. Излучение огнеупорной футеровки стен топки – 6 нагревает слой древесных отходов до температуры воспламенения.

Нагретый воздух – 21, необходимый для горения древесных отходов, подается снизу через цепную решетку – 7. После разогрева футеровки горелки переводятся на сжигание топливного газа при малом его расходе.

Продукты сгорания древесины вместе с продуктами сгорания твердого нефтешлама отсасываются дымососом – 27 в топку камерного сжигания – 10, в которую через форсунки – 11 для сжигания подается жидкий нефтешлам – 20. Предварительный разогрев топки – 10 осуществляется путем сжигания топливного природного газа с помощью горелок – 15.

Сопутствующие сбросные нефтяные газы – 18 сжигаются в топке – 10 при помощи горелок – 14. Теплота продуктов сгорания в топке – 10 передается через экранные трубы – 28 пароводяной смеси, от которой в барабане – 23 отделяется пар, идущий в пароперегреватель – 24 и затем на турбину – 25, соединенную с электрогенератором – 26.

Продукты сгорания в конвективном газоходе – 12 при пониженной температуре отдают теплоту питательной воде в экономайзере – 22 и нагреваемому воздуху в воздухоподогревателе – 13 и затем через очистное устройство выбрасываются дымососом – 27 через дымовую трубу в атмосферу.

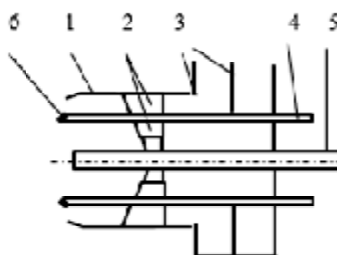


Рис. 2. Схема регулируемой горелки для розжига псевдоожиженного слоя:

- 1 – корпус; 2 – периферийные аксиальные поворотные лопасти; 3 – воздухоподающие каналы;  
4 – поворотные трубы газоподачи; 5 – форсуночная труба; 6 – газораздающие ниппели  
(иллюстрация авторов)

Для сжигания нефтешламов и древесных отходов в топках – 1, 6, 10 в данной статье разработаны специальные горелки и форсунки (рис. 2-4).

Предлагаемая горелка (рис. 2) для работы топки псевдоожиженного слоя позволяет регулировать длину и диаметр факела при первоначальном розжиге за счет поворота ниппелей – 6 и осевого перемещения труб газоподачи – 4. Поворотные аксиальные лопатки – 2 обеспечивают лучшее перемешивание сжигаемого газового топлива с воздухом и устраняют возможность появления локальных зон по длине факела с высокой температурой, которая способствует образованию вредных термических оксидов азота.

Плоскофакельная горелка (рис. 3) служит для сжигания топливного природного газа и разогрева футеровки – 2 за счет теплоты факела – 6. Излучение футеровки – 2 воспламеняет древесину, расположенную на движущейся цепной решетке – 7 (рис. 1). Образующаяся при сгорании зола цепной решеткой – 7 подается в холодную воронку и удаляется через затвор – 29 камерной топki (рис. 1).

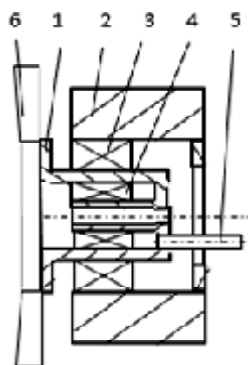


Рис. 3. Схема плоскофакельной горелки для слоевого сжигания древесины:  
1 – отражающий диск; 2 – излучающая футеровка; 3 – лопатка воздушозавихрителя;  
4 – лопатка газозавихрителя; 5 – газоподающая труба; 6 – плоский газовый факел  
(иллюстрация авторов)

Паромеханическая форсунка (рис. 4) служит для сжигания жидкого нефтешлама, подаваемого через штуцер – 7, с помощью водяного пара, подаваемого через штуцер – 6. При взаимодействии потоков мелкодисперсного нефтешлама и водяного пара, выходящих из сопел – 2 и 3, с последующим соударением получаемой эмульсии с диском – 1, образуется мелкодисперсный эмульсионный поток, который, после смешивания с воздухом, воспламеняется за счет теплоты излучения от горящего факела.

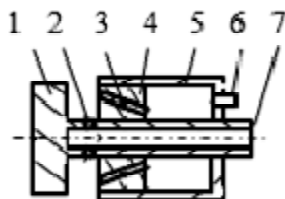


Рис. 4. Схема форсунки для камерного сжигания жидкого нефтешлама:  
1 – диск отбойный; 2 – сопло подачи нефтешлама; 3 – сопло подачи водяного пара; 4 – диафрагма;  
5 – корпус; 6 – паровой штуцер; 7 – нефтешламовый штуцер (иллюстрация авторов)

По сравнению с применяемыми на котлах форсунками, предлагаемая форсунка позволяет получать короткий мелкодисперсный факел с большим углом раскрытия до  $110^\circ$ .

### Обсуждение результатов исследования

Результаты произведенного расчета тепловыделений в топках – 1, 6, 10 для сжигания нефтешламов и древесины при номинальных режимах работы котлоагрегата с использованием рекомендаций [10] приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Тепловой баланс котла с тепловой мощностью 30 МВт  
при совместном сжигании твердых и жидких нефтешламов,  
сбросных нефтяных газов и древесных отходов**

| Приход теплоты     | Значение, МВт | Расход теплоты                    | Значение, МВт |
|--------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
| Твердый нефтешлам  | 7             | Выработка электроэнергии          | 12            |
| Древесные отходы   | 6             | Отпуск тепла потребителям         | 7             |
| Жидкий нефтешлам   | 10            | Водоподготовка                    | 3             |
| Сбросные нефтегазы | 3             | Подготовка нефтешлама и древесины | 3             |
| Растопочный газ    | 4             | Теплопотери                       | 5             |
| Итого              | 30            | Итого                             | 30            |

Теплопотери котла связаны с уходящими газами, с теплотой удаляемой золы, с наружным охлаждением котла, с химическим и механическим недожогом нефтешламов.

Потери тепла могут быть заметно уменьшены путем интенсификации процессов горения в топках – 1 и 6 при помощи усиления радиационного теплообмена за счет применения огнеупорных материалов из хромагнетита, обладающего высокой излучательной способностью.

Номинальные теплотехнические характеристики предлагаемого котла для сжигания нефтешлама и древесины приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Номинальные теплотехнические параметры предлагаемого котла  
для сжигания нефтешлама и древесины**

| Параметр                                                                                            | Значение |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Паропроизводительность, т/ч                                                                         | 50       |
| Давление перегретого пара, МПа                                                                      | 4        |
| Температура перегретого пара, °С                                                                    | 450      |
| Температура питательной воды, °С                                                                    | 150      |
| Давление питательной воды, МПа                                                                      | 7        |
| Концентрация оксидов азота NO <sub>x</sub> , приведенная к избытку воздуха α=1,4, мг/м <sup>3</sup> | 294      |
| КПД брутто, %                                                                                       | 83       |

Котел предназначен для работы с паровыми турбинами типа ПТ-12/13-3.4 с регулируемыми производственными и отопительными отборами пара. Применяемый тип турбины позволяет использовать достаточно широкий интервал изменения паропроизводительности котла.

Количество вредных выбросов оксидов азота NO<sub>x</sub> зависит от доли по тепловыделению, сжигаемых в котле, жидкого и твердого нефтешлама и древесины. Значение, приведенное в табл. 2, получено для сжигания жидкого и твердого нефтешлама при малой доле древесины.

### **Заключение**

Разработан универсальный котел для одновременного сжигания твердого и жидкого нефтешлама и древесины с получением пара энергетических параметров, используемого для выработки электрической энергии.

Предложены типы горелок для работы топок псевдоожиженного слоя, слоевого сжигания древесины и камерного сжигания жидкого нефтешлама.

### **Список библиографических ссылок**

1. Таймаров М. А., Ахметова Р. В., Сунгатуллин Р. Г., Салтанаева Е. А., Хусаинов Д. Г. Исследование режимных параметров работы котлов при сжигании мазута с повышенным содержанием воды // Вестник КГЭУ. 2017. № 2 (34). С. 68–75.

2. Котел для сжигания промышленных и бытовых отходов : пат. 166214 Рос. Федерация. № 2016119703/03 ; заявл. 20.05.16 ; опубл. 20.11.16, Бюл. № 32. 8 с.
3. Форсунка : пат. 2449216 Рос. Федерация. № 2010145891/06 ; заявл. 10.11.10 ; опубл. 27.04.12, Бюл. № 12. 8 с.
4. Beckmann M., Klepmann F., Johannes J. E., Scholz R., Seifert H. Classification of waste incineration plants in terms of energy recovery // VGB PowerTech. 2007. № 10. P. 76–81.
5. Francios J., Abdelouahed L., Mauviel G., Feidt M., Rogaume C., Mirgaux O., Patisson F., Dufour A. Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus // Chemical engineering transactions. 2012. № 29. P. 769–774.
6. Shen Y., Yoshikawa K. Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. № 21. P. 371–392.
7. Uisung L., Elango B., Chung J.N. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications // Applied Energy. 2013. № 101. P. 699–708.
8. Тугов А. Н., Москвичев В. Ф. Технологии утилизации ТБО с отбором вторичного сырья и выработкой тепловой и электрической энергии // Новости теплоснабжения. 2011. № 7. С.13–15.
9. Тугов А. Н., Рябов Г. А. Современные ТЭС, сжигающие бытовые отходы в циркулирующем кипящем слое // Энергохозяйство за рубежом. 2008. № 5 (240). С. 12–20.
10. Батенин В. М., Ковбасюк В. И., Кретьова Л. Г., Медведев Ю. В. Термическая утилизация твердых бытовых отходов // Теплоэнергетика. 2011. № 3. С. 62–66.
11. Тимошин А. Ф., Николаев А. П., Нитяговский А. М., Ложкина Д. А. Анализ способов утилизации нефтесодержащих отходов и разработка нового комплексного способа утилизации нефтешламов резервуарного типа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 6-2. С. 209–213.
12. Садыков Р. А., Чайковский В. Г. Измерение температур и падающих потоков в топке котла ТГ-104 Сургутской ГРЭС-1 // Вестник машиностроения. 2016. № 2. С. 36–38.

**Taimarov Mikhail Alexandrovich**

doctor of technical sciences, professor

E-mail: [taimarovma@yandex.ru](mailto:taimarovma@yandex.ru)

**Kazan State Power Engineering University**

The organization address: 420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya st., 51

**Lavirko Yuri Vasilyevich**

candidate of technical sciences, associate professor

Email: [lav.yu55@gmail.com](mailto:lav.yu55@gmail.com)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Use of fuel oil sludge and wood sawmill waste in small-scale energy****Abstract**

*Problem statement.* After washing the fuel oil tanks at thermal power plants and other facilities, there are lots of oil sludge and oily effluents, which cannot be used as secondary fuel without the use of furnaces of a special design. At sawmills and wood processing enterprises, lots of secondary wood materials are accumulated, which can be processed into demanded energy resources only if appropriate technologies are available. The aim of the study is to design a universal boiler. Task: integrated use of oil sludge and wood waste as fuel.

*Results.* Complex use of wood waste and sludge as fuel for boiler developed, including the technical capabilities of the fluidized bed, grate and flaring. A universal boiler with three furnaces for burning solid oil sludge in a fluidized bed, liquid oil sludge in a chamber furnace, wood waste in a moving layer on a chain lattice was developed. Solid powdered oil sludge

enters through the pre-chamber into the first furnace, working on the principle of a fluidized bed. The height of the fluidized bed is adjusted by the amount of quartz sand loaded into the first furnace. The second furnace with a flue connected to the first furnace. Preheating of the second furnace is carried out with the help of flat-panel burners located on two walls by burning fuel natural gas in them. At the same time, the flame of the burners heats the refractory lining of the walls of the second furnace, the radiation of which ignites the layer of wood waste on the chain lattice. The third furnace, which operates on the principle of chamber combustion of liquid waste oil sludge, is connected by a gas duct to the second furnace. Of the second furnace receives the products of combustion in a third furnace. The gaseous products of combustion of the sludge and the products of combustion received from the first and second inserts, give the heat radiation of the display surfaces, and further, the convection heating surfaces of the superheater, economizer and air heater. With the thermal power of the boiler 30 MW, the amount of electricity generated is 12 MW.

**Conclusions.** The significance of the results for the construction industry is that a universal boiler has been developed for the simultaneous combustion of solid and liquid oil sludge and wood to produce a pair of energy parameters used to generate electricity. The types of burners for fluidized bed furnaces, layer combustion of wood and chamber combustion of liquid oil sludge are proposed.

**Keywords:** fuel oil sludge, combustion, nozzle, furnace, fluidized bed, torch, heat energy, wood waste, boiler, chain grate, chamber combustion.

### References

1. Taymarov M. A., Akhmetova R. V., Sungatullin R. G., Saltanayeva Ye. A., Khusainov D. G. Study of operating parameters of boilers during combustion of fuel oil with high water content // Vestnik KGEU. 2017. № 2 (34). P. 68–75.
2. The boiler for the combustion of industrial and domestic waste : patent 166214 of the Rus. Federation. № 2016119703/03 ; ded. 20.05.16 ; publ. 20.11.16, Bull. № 32. 8 p.
3. Nozzle : patent 2449216 of the Rus. Federation. № 2010145891/06 ; ded. 10.11.10 ; publ. 27.04.12, Bull. № 12. 8 p.
4. Beckmann M., Klepmann F., Johannes J. E., Scholz R., Seifert H. Classification of waste incineration plants in terms of energy recovery // VGB PowerTech. 2007. № 10. P. 76–81.
5. Francios J., Abdelouahed L., Mauviel G., Feidt M., Rogaume C., Mirgaux O., Patisson F., Dufour A. Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus // Chemical engineering transactions. 2012. № 29. P. 769–774.
6. Shen Y., Yoshikawa K. Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. № 21. P. 371–392.
7. Uisung L., Elango B., Chung J. N. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications // Applied Energy. 2013. № 101. P. 699–708.
8. Tugov A. H., Moskvichev V. F. Technology of solid waste disposal with the selection of secondary raw materials and the production of thermal and electric energy // Novosti teplosnabzheniya. 2011. № 7. P. 13–15.
9. Tugov A. N., Ryabov G. A. Modern thermal power plants burning household waste in a circulating fluidized bed // Energokhozyaystvo za rubezhom. 2008. № 5 (240). P. 12–20.
10. Batenin V. M., Kovbasyuk V. I., Kretova L. G., Medvedev Yu. V. Thermal disposal of municipal solid waste // Teploenergetika. 2011. № 3. P. 62–66.
11. Timoshin A. F., Nikolayev A. P., Nityagovskiy A. M., Lozhkina D. A. Analysis of methods of disposal of oily waste and development of a new integrated method of disposal of tank-type oil sludge // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2016. № 6-2. P. 209–213.
12. Sadykov R. A., Chaykovskiy V. G. Measurement of temperatures and falling flows in the boiler furnace TG-104 Surgut GRES-1 // Vestnik mashinostroyeniya. 2016. № 2. P. 36–38.