

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 59, № 2

2016

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

Электроэнергетический совет СНГ,
Министерство образования Республики Беларусь,
Министерство образования и науки Российской Федерации

Журнал включен в базы данных
РИНЦ; Directory of Open Access Journals (DOAJ)

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Гашимов А. М., Гурбанов Э. Д.** Разработка высоковольтных импульсных установок и обеспечение мер безопасности при их эксплуатации 95
- Мустафаев Р. И., Гасанова Л. Г., Мусаев М. М.** Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами 106

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Хрусталева Б. М., Пехота А. Н.** Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива 122
- Доброго К. В.** Об устойчивости фронта вытеснения нефти в условиях термозонного воздействия на пласт 141
- Романюк В. Н., Муслина Д. Б.** К вопросу рационального построения теплоэнергетической системы текстильных и трикотажных предприятий 151
- Гусенцова Я. А., Гусенцова Е. С., Коваленко А. А.** Определение динамических характеристик промышленных объектов с помощью случайных воздействий 168

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Ивашечкин В. В.** Совершенствование конструкций водозаборных скважин и методов их капитального ремонта 175

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

*С. Н. АСАМБАЕВ (Алматы, Республика Казахстан),
В. ВУЙЦИК (Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволен, Словацкая Республика),
В. А. ДЖАНГИРОВ (Москва, Российская Федерация),
К. В. ДОБРЕГО (Минск, Республика Беларусь) (зам. главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Марцуполь, Республика Украина),
П. В. ЖУКОВСКИ (Люблин, Республика Польша),
А. А. КАЛИНИЧЕНКО (Минск, Республика Беларусь),
НГО ТУАН КИЕТ (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербург, Российская Федерация),
ЛУ ЧЖУН-У (Шэньян, Китайская Народная Республика),
Б. К. МАКСИМОВ (Москва, Российская Федерация),
А. С. МИХАЛЕВ (Минск, Республика Беларусь),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Минск, Республика Беларусь),
Е. С. МИШУК (Минск, Республика Беларусь),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Киев, Республика Украина),
Э. Н. САБУРОВ (Архангельск, Российская Федерация),
А. С. САУХАТАС (Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брест, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Минск, Республика Беларусь) (зам. главного редактора),
Б. С. СОРОКА (Киев, Республика Украина),
В. А. СТРОЕВ (Москва, Российская Федерация),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (Минск, Республика Беларусь),
Е. В. ТОРОПОВ (Челябинск, Российская Федерация),
Е. УШПУРАС (Каунас, Литовская Республика),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (Минск, Республика Беларусь),
Ю. ЭКМАНИС (Рига, Латвийская Республика)*

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 5 февраля 2010 г.
Регистрационный номер 1257**

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 30.03.2016. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз.
Дата выхода в свет 2016. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный
технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон +375 17 292-65-14.
e-mail: energy@bntu.by

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2016

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 59, No 2
2016

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

CIS Electric Power Council,
Ministry of Education of the Republic of Belarus,
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

The Journal is included in the following databases
RSCI; Directory of Open Access Journals (DOAJ)

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Hashimov A. M., Gurbanov E. J.** Elaboration of High-Voltage Pulse Installations and Providing their Operation Protective Measures 95
- Mustafayev R. I., Gasanova L. G., Musayev M. M.** Modeling and Study of Hydroelectric Generating Sets of Small Hydro Power Plants with Frequency-Controlled Permanent Magnet Synchronous Generators 106

HEAT POWER ENGINEERING

- Khroustalev B. M., Pekhota A. N.** Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel 122
- Dobrego K. V.** On Stability of the Oil Displacement Front under Conditions of Thermogas Impact on the Oil Bearing Layer 141
- Romaniuk V. N., Muslina D. B.** On the Issue of Rational Organization of the Textile and Knitwear Enterprises Heat and Power Supply System 151
- Gusentsova Ya. A., Gusentsova Ye. S., Kovalenko A. A.** Ascertainment of Dynamic Characteristics of the Industrial Facilities by Means of Stochastic Actions 168

HYDRAULIC POWER ENGINEERING

- Ivashechkin V. V.** Design Development of the Water Supply Wells and Methods of their Capital Repair 175

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

*S. N. ASAMBAEV (Almaty, Republic of Kazakhstan),
V. VUITSIK (Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Zvolen, Slovak Republic),
V. A. JANGIROV (Moscow, Russian Federation),
K. V. DOBREGO (Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
I. V. ZHEZHELENKO (Mariupol, Republic of Ukraine),
P. V. ZHUKOVSKY (Lublin, Republic of Poland),
A. S. KALINICHENKO (Minsk, Republic of Belarus),
NGO TUAN KIET (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
A. I. KIRILLOV (St. Petersburg, Russian Federation),
LU CHZHUN-U (Shenyang, People's Republic of China),
B. K. MAKSIMOV (Moscow, Russian Federation),
A. S. MIKHALEV (Minsk, Republic of Belarus),
A. A. MIKHALEVICH (Minsk, Republic of Belarus),
E. S. MISHUK (Minsk, Republic of Belarus),
O. G. PENYAZKOV (Minsk, Republic of Belarus),
E. N. PISMENNYI (Kyiv, Republic of Ukraine),
E. N. SABUROV (Arkhangelsk, Russian Federation),
A. S. SAUKHATAS (Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
B. S. SOROKA (Kyiv, Republic of Ukraine),
V. A. STROEV (Moscow, Russian Federation),
V. I. TIMOSHPOLSKY (Minsk, Republic of Belarus),
E. V. TOROPOV (Chelyabinsk, Russian Federation),
E. USHPURAS (Kaunas, Republic of Lithuania),
B. M. KHROUSTALEV (Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (Minsk, Republic of Belarus),
Yu. EKMANIS (Riga, Republic of Latvia)*

Executive Secretary of Editorial Staff V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5th
Reg. No 1257**

Typesetting and makeup are made in editorial office
of journals "Energetika" and "Science & Technique"

Passed for printing 30.03.2016. Dimension of paper 60×84¹/₈. Offset paper.
Printed on risograp. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 250 copies. Date of publishing 2016. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65 Nezavisimosty Ave.

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-95–105

УДК 621.374

Разработка высоковольтных импульсных установок и обеспечение мер безопасности при их эксплуатации

А. М. Гашимов¹⁾, Э. Д. Гурбанов²⁾

¹⁾Институт физики НАН Азербайджана (Баку, Азербайджанская Республика)

²⁾ОАО «Азерсу» (Баку, Азербайджанская Республика)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В статье представлены методы разработки высоковольтных импульсных установок технологического назначения по обеззараживанию питьевой и сточных вод, текучих пищевых продуктов при воздействии сильных импульсных электрических полей микро- и наносекундной длительности. Рассмотрены возможности проектирования основных элементов высоковольтной части и разрядной цепи установок с целью обеспечения наиболее эффективного приложения энергии источника на нагрузке и безопасной эксплуатации высоковольтного оборудования. Показано, что при обеззараживании питьевой и сточных вод целесообразно применение микросекундных импульсных воздействий, вызывающих в водной среде электрогидравлический эффект и сопутствующий ему комплекс физических процессов (ультрафиолетовое излучение, генерация озона и атомарного кислорода, механические волны сжатия и т. д.), губительно влияющих на жизнедеятельность микроорганизмов. В случае обеззараживания текучих пищевых продуктов рекомендовано применение наносекундных импульсных воздействий, непосредственно проникающих в ядро биологической клетки и инактивирующих ее. При этом сохраняются пищевая и биологическая ценность продуктов и улучшаются их органолептические свойства. Отмечено, что при разработке высокочастотных импульсных установок особое внимание должно уделяться вопросам соблюдения техники безопасности обслуживающим персоналом и обеспечения условий бесперебойной работы всей установки. С этой целью следует выполнять необходимые требования по экранированию высоко- и низковольтной частей установки от высокочастотных электромагнитных излучений, которые регистрируются специальными дифференциальными датчиками. Одновременно должны быть приняты меры по снижению уровня шумов при работе высоковольтного оборудования. Предложен метод для их снижения до допустимых пределов (менее 80 дБ·А) посредством покрытия внутренней поверхности экранирующего кожуха плотно стыкующимися между собой листами пористого электрозвукоизоляционного материала.

Ключевые слова: высоковольтная импульсная установка, импульсный разряд, фронт импульса, длительность импульсов, генератор пульсирующего напряжения, нагрузка, электромагнитное излучение, микро- и наносекундные импульсы, дезинфекция, экранирование, шум

Для цитирования: Гашимов, А. М. Разработка высоковольтных импульсных установок и обеспечение мер безопасности при их эксплуатации / А. М. Гашимов, Э. Д. Гурбанов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 95–105

Адрес для переписки

Гашимов Ариф Мамедович
Институт физики
НАН Азербайджана
просп. Г. Джавида, 33,
Az1141, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +99412 539-44-02
arif@physics.ab.az

Address for correspondence

Hashimov Arif M.
Physics Institute
of Azerbaijan National Academy of Sciences
33 H. Javid Ave.,
Az1141, Baku, the Azerbaijani Republic
Tel.: +99412 539-44-02
arif@physics.ab.az

Elaboration of High-Voltage Pulse Installations and Providing their Operation Protective Measures

A. M. Hashimov¹⁾, E. J. Gurbanov²⁾

¹⁾Physics Institute of Azerbaijan National Academy of Sciences (Baku, the Azerbaijani Republic)

²⁾Azersu OJSC (Baku, the Azerbaijani Republic)

Abstract. The article presents design engineering methods for the high-voltage pulse installations of technological purpose for disinfection of drinking water, sewage, and edible liquids by high-field micro- and nanosecond pulsing exposure. Designing potentialities are considered of the principal elements of the high-voltage part and the discharge circuit of the installations towards assuring the best efficient on-load utilization of the source energy and safe operation of the high-voltage equipment. The study shows that for disinfection of drinking water and sewage it is expedient to apply microsecond pulse actions causing the electrohydraulic effect in aqueous media with associated complex of physical processes (ultraviolet emission, generation of ozone and atomic oxygen, mechanical compression waves, etc.) having detrimental effect on life activity of the microorganisms. In case of disinfecting edible liquids it is recommended to use the nanosecond pulses capable of straight permeating the biological cell nucleus, inactivating it. Meanwhile, the nutritive and biological values of the foodstuffs are saved and their organoleptic properties are improved. It is noted that in elaboration process of high-frequency pulse installations special consideration should be given to issues of the operating personnel safety discipline and securing conditions for the entire installation uninterrupted performance. With this objective in view the necessary requirements should be fulfilled on shielding the high- and low-voltage installation parts against high-frequency electromagnetic emissions registered by special differential sensors. Simultaneously, the abatement measures should be applied on the high-voltage equipment operational noise level. The authors offer a technique for noise abatement to admissible levels (lower than 80 dB·A) by means of coating the inside surface with shielded enclosure of densely-packed abutting sheets of porous electro-acoustic insulating material.

Keywords: high-voltage pulse installation, pulsed discharge, front of pulse, pulse duration, generator of pulsed tensions, loading, electromagnetic emission, micro and nanosecond pulse, disinfecting, shielding, noise

For citation: Hashimov A. M., Gurbanov E. J. (2016) Elaboration of High-Voltage Pulse Installations and Providing their Operation Protective Measures. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 95–105 (in Russian)

Введение

Наблюдаемые в последние десятилетия природные катаклизмы, изменение климатических условий на планете, увеличение численности населения, развитие промышленных производств и другие вопросы требуют более грамотного подхода к использованию природных ресурсов и разработке энергоэффективных технологий, обеспечивающих экологическую безопасность. В этом контексте применение сильных электрических полей для решения многих экологических задач вызывает у ученых огромный интерес [1–3]. Методы электронной обработки в отличие от существующих механических, химических и температурных методов отличаются своей эффективностью, экологической безопасностью и максимальным приложением энергии источника в активационные процессы [4–7]. В этой связи можно отметить работы по исследованию воздействия сильных импульсных электрических полей на различные среды и разработке более энер-

гоэффективных технологий, обеспечивающих экологическую безопасность и направленных на максимальное приложение электромагнитной энергии на нагрузке. Работы по высокочастотной электроимпульсной очистке топочных газов вредных химических и металлургических производств, обеззараживанию питьевой и сточных вод, пищевых продуктов и т. д. демонстрируют эффективность применения данных технологий для решения различных экологических задач [8–12]. Для достижения более эффективного приложения энергии на нагрузке и соблюдения всех мер безопасности в работе оборудования требуются обязательное согласование и учет всех взаимовлияющих параметров высоковольтной установки.

Данная статья посвящена методам разработки высоковольтных импульсных установок различного назначения с соблюдением правил безопасности при их эксплуатации.

Методика экспериментов и обсуждение результатов

Важным элементом любой высоковольтной импульсной установки является генератор импульсных напряжений. В рассматриваемом случае разработаны микросекундный генератор с выходным напряжением 40 кВ для электронной обработки питьевой и сточных вод и наносекундный генератор на 100 кВ для обеззараживания текучих пищевых продуктов и продления сроков их хранения. В зависимости от назначения обрабатываемой среды и ее электрофизических параметров предложены различные варианты конструкций электродной системы «стержень – плоскость» и «плоскость – плоскость» для обеспечения необходимых условий обработки.

Для обеззараживания питьевой и сточных вод от содержащихся в них патогенных микроорганизмов выбрали электродную систему «стержень – плоскость», обеспечивающую резко неоднородное поле в межэлектродном промежутке. При разработке импульсного генератора учитывались геометрические размеры разрядной камеры, потенциального электрода, межэлектродного пространства, физические параметры разрядных процессов (время запаздывания, скорость распространения лидеров и т. д.) и электрофизические характеристики обрабатываемой среды с содержащимися в них микроорганизмами. В обрабатываемой среде при воздействии сильных электрических импульсных полей в зависимости от амплитуды напряжения при данной конструкции электродной системы протекают как тепловые, так и электрические процессы, сопровождающиеся вскипанием жидкости, образованием газовых включений и лидерных каналов высокой проводимости с электрогидравлическим эффектом. Ионизационные и фотоионизационные процессы в газовых включениях приводят к формированию ультрафиолетового излучения и активных продуктов разряда, расширению и схлопыванию газовых включений, механических волн сжатия, которые в совокупности губительно влияют на жизнедеятельность патогенных микроорганизмов, содержащихся в водной среде. Влияние полярности напряжения на физические процессы и характеризующие их

параметры (время запаздывания, скорость распространения лидеров и т. д.) сильно сказывается при малых амплитудах воздействующего напряжения (менее 25 кВ). Отметим, что при отрицательной полярности напряжения уменьшение времени запаздывания выражено более резко, чем при положительной полярности. С увеличением амплитуды напряжения (более 25 кВ) его полярность на потенциальном электроде практически не влияет на разрядные процессы в промежутке. Однако следует отметить, что в технологических установках для более эффективного приложения энергии источника на нагрузке целесообразно использовать положительную полярность напряжения на потенциальном электроде. При этом вследствие увеличения напряженности поля в промежутке при продвижении лидеров к противоположному электроду их скорость достигает максимальной величины $\sim 10^6$ см/с, в результате чего разрядный процесс завершается искровым пробоем промежутка и образованием мощных ударных волн.

Для обработки текучих пищевых продуктов предложена электродная система «плоскость – плоскость». Данная конструкция предотвращает формирование в межэлектродном пространстве искровых каналов, появление которых нежелательно при обеззараживании пищевых продуктов. В качестве источника энергии применялся разработанный авторами наносекундный генератор импульсов с максимальной амплитудой 100 кВ. Обработку продуктов можно вести в нескольких режимах: проточном и стационарном (в диэлектрических тарах). В последнем случае при разработке генератора должны также учитываться размеры и свойства диэлектрической тары. Электронная обработка пищевых продуктов приводит к улучшению их органолептических свойств при условии сохранения пищевой и биологической ценности. В качестве объектов исследований использовали образцы столовых и десертных вин, экстракты яблочного, сливового соков и молочнокислых изделий. В результате экспериментов выявлено, что с уменьшением размеров клеток микроорганизмов целесообразнее воздействовать на них импульсами с более коротким фронтом (наносекундного диапазона). Такое воздействие позволяет высокочастотным электромагнитным полям проникать непосредственно в ядро клетки и инактивировать ее дальнейшее воспроизводство.

При разработке высоковольтных установок технологического назначения немаловажную роль играет обеспечение мер безопасности при работе оборудования высокого напряжения. Возникающие во время генерации высоковольтных импульсов электромагнитные поля в окружающем пространстве создают значительные помехи и могут приводить к сбоям в работе радиоэлектронных устройств. Когда речь идет о технологической высоковольтной импульсной установке, требования по электромагнитной защите персонала и помехозащищенности различных устройств резко возрастают. Это обусловлено тем, что, во-первых, обслуживающий персонал, средства измерения, контроля и управления самой установки находятся в непосредственной близости от источника электромагнитных полей, резко

возрастает частота посылок импульсов, т. е. увеличивается средняя мощность излучений. Во-вторых, технологическая установка не должна оказывать влияния на работу других радиоэлектронных устройств, находящихся поблизости от нее. Поэтому при разработке технологической высоковольтной импульсной установки необходимо решить задачу защиты обслуживающего персонала и радиоэлектронных устройств от возникающих при их работе электромагнитных полей (рис. 1). Применительно к слаботочным низковольтным радиоэлектронным устройствам такую задачу решают с помощью медного экрана [13]. Причем экранировка будет полной, если выбрать соответствующую толщину стенок экрана, а сам экран запаять. Использование подобного экрана в рассматриваемом случае неудобно, так как экран должен быть разъемным для обеспечения доступа ко всем элементам установки в процессе эксплуатации, не слишком массивным при характерном линейном размере 1 м. Кроме того, применение меди приводит к удорожанию установки.

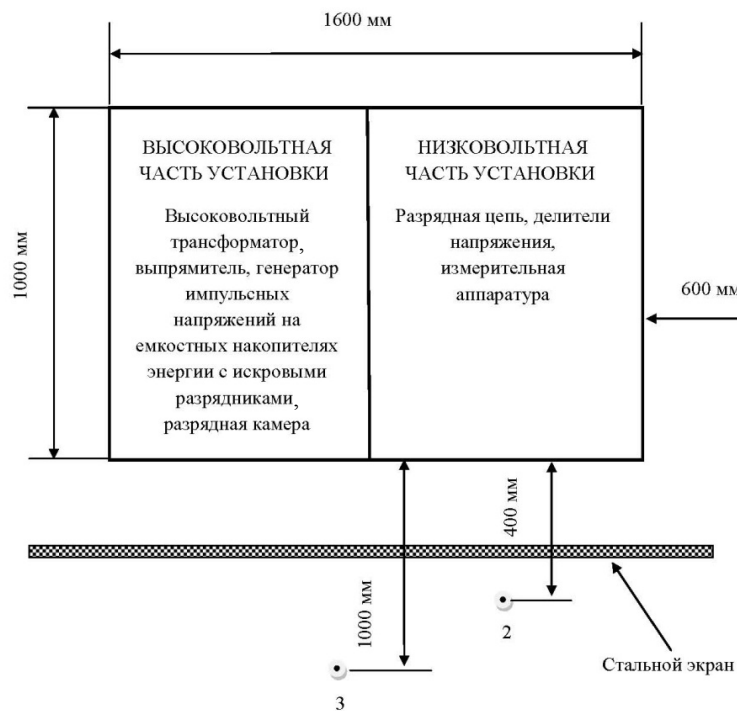


Рис. 1. Схематическое изображение высоковольтной импульсной установки технологического назначения с указанием электромагнитных помех на разных расстояниях от источника: 1–3 – точки замеров электромагнитных полей

Fig. 1. Diagrammatic representation of the high-voltage pulse installation of technological purpose with indication of electromagnetic interference at different distances from the source: 1–3 – measurement points of the electromagnetic fields

С учетом рекомендаций [14] для рассматриваемой установки разработали и выполнили разъемный сплошной (замкнутый гальванически) экран

из тонколистового луженого железа. Для уменьшения площади экрана и его габаритов, а также для улучшения эксплуатационных характеристик установка была перекомпонована [15]. «Линейный» вариант генератора импульсов, где конденсаторы, разрядники и нагрузка (рабочая камера) располагались друг за другом вдоль прямой линии – направления, по которому энергия передавалась от первого накопительного конденсатора в нагрузку, был преобразован в «этажерочный», где конденсаторы и разрядники расположены друг над другом. При этом в 1,5 раза уменьшился объем, занимаемый элементами генератора. Кроме того, облегчился доступ к искровым воздушным разрядникам для осмотра, обслуживания и перестройки, поскольку все разрядники сосредоточены с одной стороны генератора.

Основой изготовленного экрана служил сварной каркас из стального уголка 32×32 мм габаритами 1600×1400×1000 мм. Каркас обшит (кроме нижней плоскости) соединенными гальванически полосами луженого железа шириной 320 мм и толщиной 0,3 мм. Гальваническое соединение полос обеспечивалось отбортовкой и развальцовкой по краям полос. Полученный кожух одевали на каркас подставки установки и соединяли с ним винтами М5, размещенными по периметру каркаса с шагом 150 мм. Со стороны рабочей камеры (для удобства эксплуатации) в кожухе выполнена дверь (также обшита луженым железом) размерами 880×1000 мм. Дверь поворачивается на петлях с возможностью плотного прижатия до создания гальванического контакта по всему своему периметру к кожуху установки при помощи четырех зажимов с использованием резьбовых соединений «шпилька – гайка». Подставка установки, где размещена низковольтная силовая часть, также обшита луженым железом до пола по всему периметру каркаса. Высоковольтный вывод питающего трансформатора ТВО-140 тоже имеет выполненный из луженого железа замкнутый кожух, гальванически соединенный по периметру с крышкой трансформатора и с кожухом генератора. Низковольтные выводы трансформатора закрыты отдельным кожухом. Таким образом, все экранирующие и защитные кожухи установки соединены гальванически и заземлены. То есть высоковольтная импульсная установка стала полностью электробезопасной при меньшей занимаемой производственной площади, так как отпала необходимость в защитном ограждении.

Проведены измерения для оценки электромагнитного фона при работе установки без защитного экрана. Замеры уровня электромагнитных полей выполняли дифференциальным датчиком с чувствительностью 10 мВ/(кВ/м). Точки замеров электромагнитных полей выбирали на высоте 1,2 м от пола: 1 – на расстоянии 0,6 м напротив двери кожуха; 2 и 3 – 0,4 и 1,0 м от боковой стенки установки. Расстояния указаны от краев каркаса (из стальных уголков), на котором смонтированы узлы установки. Типичные осциллограммы импульсов напряженности в указанных точках приведены на рис. 2 (фиксировали вертикальную составляющую поля). Импульсы по форме напоминают аperiodические импульсы в рабочей камере установки.

Как видно из рис. 2, наибольшая напряженность поля наблюдается вблизи установки в месте расположения активной части высоковольтного генератора (высоковольтные конденсаторы и разрядники): кривая 2 – $E \approx 15$ кВ/м. Уровень поля сильно снижается при удалении от установки на 1,0 м: кривая 3 – $E \approx 4$ кВ/м. Размещение стального листа размерами 2×2 м толщиной 1,5 мм между боковой частью каркаса установки и точкой измерения приводит примерно к пятикратному уменьшению напряженности поля. Осциллограмма импульса напряженности в точке 2 для этого случая представлена на рис. 3, из которого следует, что помимо уменьшения амплитуды изменилась и форма импульса – помехи с аperiodической на колебательную с сильным затуханием.

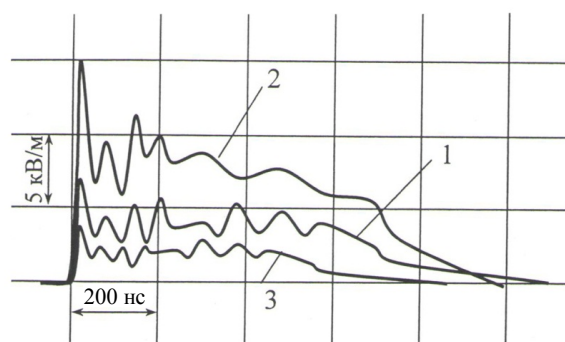


Рис. 2. Осциллограммы электромагнитных помех на различных расстояниях от высоковольтной установки

Fig. 2. Electromagnetic interference oscillogram at different distances from the high-voltage installation

В отсутствие защитного электромагнитного экрана вблизи установки в работе полупроводниковых электронных устройств, например регистрирующих электронных осциллографов, наблюдались срывы, сбои. Правда, по истечении некоторого времени функционирование устройств восстанавливалось. Так было при съемке работы установки видеокамерой. Произвести съемку без сбоев в работе видеокамеры удалось только через трубчатое окошко диаметром 35 мм передвижной стальной двухслойной измерительной кабины, удаленной на 15 м от установки.

Необходимо подчеркнуть важность влияния на стойкость электронных средств, в том числе и измерительных, к воздействию импульсных электромагнитных помех частоты следования последних. При возрастании частот следования до 500 Гц наблюдается явный кумулятивный эффект от помех, приводящий к резкому снижению стойкости электронных средств и также к повышению требований к качеству экранирования. При использовании рассматриваемого экранирующего защитного кожуха во время работы технологической импульсной установки с частотой следования импульсов 500 Гц не наблюдалось каких-либо сбоев или отказов в функционировании полупроводниковых средств управления и электронных измерительных средств. То есть изготовленный кожух в этом аспекте позволил решить поставленную задачу.

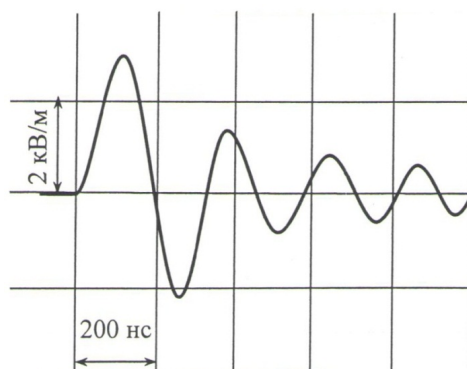


Рис. 3. Осциллограмма напряженности электромагнитного поля при наличии стального экрана

Fig. 3. Electromagnetic field strength oscillogram with presence of a steel shield

В разработанной установке в качестве коммутирующих элементов использовали воздушные искровые разрядники. Работа разрядников сопровождается значительным шумом, который несколько снижается благодаря наличию экранирующего кожуха. Для снижения шумов до допустимого уровня внутреннюю поверхность экранирующего кожуха выстлали плотно стыкующимися между собой листами пористого электрозвукоизоляционного материала (например, эластичным винипором марки Д) толщиной 50 мм. В нижней части и в крыше экранирующего кожуха выполняли вентиляционные отверстия в виде лабиринтов, внутренние поверхности которых были покрыты таким же электрозвукоизоляционным материалом. Эти отверстия служат для создания естественного воздушного потока через высоковольтную часть установки. При этом воздушный поток способствует охлаждению электродов искровых разрядников и выносу из зоны коммутации продуктов горения электрического разряда и озона. В промышленных условиях для интенсификации данных процессов возможно подсоединение нижнего вентиляционного отверстия к воздухоудвке, а верхнего — к вентиляционному ходу здания.

Проведено обследование акустических показателей установки. Согласно протоколу обследования, примененный на установке звукоизоляционный кожух снижает уровень звука со 110 дБ·А (при открытой двери) до 78 дБ·А, что меньше допустимого уровня звука (80 дБ·А) для производственных помещений [16]. Обшивка экранирующего кожуха изнутри электроизоляционным материалом заметной толщины (50 мм) с диэлектрической проницаемостью, существенно превышающей диэлектрическую проницаемость воздуха, приводит к дополнительному увеличению экранирующего эффекта [14].

Для оценки электромагнитных полей вокруг установки после применения защитного кожуха использовали оптоэлектронный измеритель напряженности электрического поля с чувствительностью 10 мВ/(В/м). Результаты измерений в точках 1 и 3 (рис. 1) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений электромагнитных полей

Results of measurements of electromagnetic fields

Точка измерения	Максимальное значение составляющей электрического поля, В/м		
	Вертикальная	Горизонтальная продольная	Горизонтальная поперечная
С открытой дверью:			
точка 1	450	300	340
точка 3	400	200	260
С закрытой дверью:			
точка 1	250	150	100
точка 3	100	50	75

Как видно из табл. 1, различия в уровнях помех при закрытой и открытой двери кожуха установки лежат в пределах 1,5–3,5 раза для различных составляющих напряженности поля. Такой разброс связан, вероятно, с суперпозицией полей, вызванной наличием различных металлических поверхностей в помещении, где размещена установка.

По результатам измерений при закрытой двери кожуха на расстоянии 2 м от корпуса-кожуха установки в любую сторону уровень помех по любой из трех составляющих не превышает 40 В/м, на расстоянии 4 м – 20 В/м, а на расстоянии 10 м от установки уровень полезного сигнала с датчика не превышает уровень шумов на экране осциллографа. Использование для кожуха в качестве материала тонколистового луженого железа позволяет за счет его высокой коррозионной стойкости и небольшой стоимости выполнить кожух технологичным, с малыми контактными сопротивлениями на долгий срок службы (не менее нескольких лет) и недорогим. При этом экранирующее действие кожуха уменьшает напряженность импульсных электромагнитных помех более чем в 100 раз. Таким образом, при работе установки с замкнутым металлическим кожухом – электромагнитным экраном – человек может находиться на удалении не менее 1 м от установки в течение всего рабочего дня (8 ч непрерывно) без опасности для своего здоровья.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены особенности разработки высоковольтных электроимпульсных установок технологического назначения для электронно-ионной обработки водосодержащих сред. Приведены варианты электродных систем и генераторов импульсных напряжений для обработки питьевой и сточных вод и текучих пищевых продуктов, описаны особенности воздействий сильных электрических импульсных полей на указанные среды и протекающих в них физических процессов.

2. Выявлено, что при обеззараживании воды целесообразнее применять импульсы микросекундного диапазона с частотой следования импульсов в десятки герц. Протекающие при таком воздействии физические процессы в целом эффективно влияют на инактивационные процессы в среде.

3. Показано, что текущие пищевые продукты лучше обрабатывать в системе электродов «плоскость – плоскость», обеспечивающей однородное распределение поля в межэлектродном промежутке и препятствующей возникновению искровых каналов. Определено, что для достижения более эффективной инактивации пищевых продуктов целесообразно воздействовать на них импульсами наносекундного диапазона с частотой следования импульсов в сотни герц для обеспечения проникновения высокочастотного поля непосредственно в ядро клетки микроорганизма и приостановления дальнейшего его воспроизводства.

4. Детально рассмотрены и описаны меры обеспечения безопасной работы высоковольтных импульсных установок промышленного назначения, методы их экранировки с целью погашения высокочастотных электромагнитных импульсных помех, неблагоприятно влияющих на обслуживающий персонал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов, В. Г. Исследование структуры наносекундного стримерного разряда методом электрографии / В. Г. Кузнецов, А. М. Гашимов, Э. Д. Курбанов // Техническая электродинамика. 2009. № 6. С. 17–22.
2. Курбанов, Э. Д. Комплексное исследование характеристик наносекундного стримерного разряда в резконеоднородном поле при наличии в промежутке диэлектрических пластин / Э. Д. Курбанов // Известия НАН Азербайджана. 2009. Т. 29, № 5. С. 78–93.
3. Gashimov, A. M. The Influence of High-Voltage Impulse Treatments on Biological Cells / A. M. Gashimov, E. D. Kurbanov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2009. Vol. 45, No 5. P. 411–414.
4. Mekhtizade, R. N. Analysis of the Activation Level of Compound Structures Surface / R. N. Mekhtizade, E. J. Qurbanov, G. M. Kerimov // Проблемы энергетики. 2004. № 4. С. 68–70.
5. Курбанов, Э. Д. Электроразрядная активация стекловолокон в барьерном разряде в воздухе / Э. Д. Курбанов, Ю. В. Горин, И. П. Кужекин // Физика диэлектриков (ICD-2008): материалы 11-й Междунар. конф. 2008. Т. 1. С. 318.
6. Курбанов, Э. Д. Модификация поверхности стекловолокон в барьерном электрическом разряде в процессе производства стеклопластиков / Э. Д. Курбанов // Электричество. 2009. № 2. С. 32–36.
7. Курбанов, Э. Д. Комбинированная обработка поверхности стекловолокон неравновесными электрическими разрядами в технологии производства стеклопластиков / Э. Д. Курбанов // Вестник МЭИ. 2009. № 3. С. 42–46.
8. Кужекин, И. П. Сильные электрические поля и импульсные разряды в воде / И. П. Кужекин, Э. Д. Курбанов // Вестник МЭИ. 2008. № 2. С. 33–36.
9. Gurbanov, E. J. Environmentally Clear Methods of Water Disinfection / E. J. Gurbanov // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). 2014. Vol. 6, No 1. P. 34–38.
10. Gurbanov, E. J. Thermal and Electric Breakdown of Water at Crown and Spark Discharges / E. J. Gurbanov // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). 2014. Vol. 6, No 2. P. 88–93.
11. Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields / G. V. Barbosa-Canovas [et al.]. Washington, San Diego: Academic Press, 1999. 200 p.
12. Sensoy, I. Inactivation Kinetics of Salmonella Dublin by Pulsed Electric Field / I. Sensoy, Q. H. Zhang, S. K. Sastry // J. Food Process. Eng. 1997. Vol. 20, No 5. P. 367–381.
13. Термен, Ф. Измерительная техника в электронике / Ф. Термен, Дж. Петтит; пер. с англ.; под ред. В. Т. Фролкина. М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. 604 с.

14. Шваб, А. Й. Электромагнитная совместимость / А. Й. Шваб; пер. с нем; под ред. И. П. Кужекина. М.: Энергоатомиздат, 1998. 480 с.
15. Правила безопасной эксплуатации электроустановок потребителей: ДНАОП 0.00-1.21-98. Введ. 20.02.1998. Киев: Основа, 1998. 384 с.
16. Методические указания по проведению измерений и гигиенической оценке шумов на рабочих местах. М.: Типография Мин-ва здравоохран. СССР, 1978. 18 с.

Поступила 01.10.2015 Подписана в печать 27.11.2015 Опубликовано онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. Kuznetsov V. G., Gashimov A. M., Kurbanov E. D. (2009) Structure Investigation of Nano-second Streamer Discharge with Method of Electrography. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika* [Mechanical Electrodynamics], (6), 17–22 (in Russian).
2. Kurbanov E. D. (2009) Integrated Signature Analysis of Nanosecond Streamer Discharge in Sharply Nonhomogeneous Field in the Presence of Dielectric Plates in the Interim. *Izvestiya Natsionalnoi Akademii Nauk Azerbaidzhana* [Transactions Azerbaijan National Academy of Sciences], 29 (5), 78–93 (in Russian).
3. Gashimov A. M., Kurbanov E. D. (2009) The Influence of High-Voltage Impulse Treatments on Biological Cells. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 45 (5), 411–414. DOI: 10.3103/S1068375509050123.
4. Mekhtizade R. N., Qurbanov E. J., Kerimov G. M. (2004) Analysis of the Activation Level of Compound Structures Surface. *Problemy Energetiki* [Challenges of the Energetics], (4), 68–70.
5. Kurbanov E. D., Gorin, Yu. V., Kuzhekin I. P. (2008) Electrodisharge Activation of Glass Fibers in Barrier Discharge in the Air. *Dielectric Physics (ICD-2008). Proceedings of 11th International Conference*, Vol. 1, 318 (in Russian).
6. Kurbanov E. D. (2009) Fiberglass Surface Modification in Barrier Electrical Discharge in Production Process of the Glass-Fiber Laminates. *Elektrichestvo* [Electricity], (2), 32–36 (in Russian).
7. Kurbanov E. D. (2009) Combined Treatment of the Glass Fiber Surface with Unbalanced Electrical Discharges in the Production Method of Glass-Fiber Laminates. *Vestnik MEI* [MPEI Vestnik], (3), 42–46 (in Russian).
8. Kuzhekin I. P., Kurbanov E. D. (2008) Strong Electric Fields and Impulsive Discharges in the Water. *Vestnik MEI* [MPEI Vestnik], (2), 33–36 (in Russian).
9. Gurbanov E. J. (2014) Environmentally Clear Methods of Water Disinfection. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 6 (1), 34–38.
10. Gurbanov E. J. (2014) Thermal and Electric Breakdown of Water at Crown and Spark Discharges. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 6 (2), 88–93.
11. Barbosa-Canovas G. V., Pothakamury U. R., Gongora-Nieto M. M., Swanson B. G. (1999) *Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields*. Washington, San Diego: Academic Press. 200.
12. Sensoy I., Zhang Q. H., Sastry S. K. (1997) Inactivation Kinetics of Salmonella Dublin by Pulsed Electric Field. *Journal of Food Process Engineering*, 20 (5), 367–381.
13. Termen F., Pettit J. (1952) *Electronic Measurements*. New York, McGraw-Hill. (Russ. ed.: Termen F., Pettit J. (1955) *Izmeritel'naya Tekhnika v Elektronike*. Moscow, Publishing Outfit of Foreign Literature. 604).
14. Shvab A. Y. (1998) *Electromagnetic Compatibility*. Moscow, Energoatomizdat. 480 (in Russian).
15. ДНАОП 0.00-1.21-98. Operational Code for Electrical Installations. Kiev, Basis, 1998. 384. (in Russian).
16. Instructional Guidelines on Execution of Measurements and Hygienic Assessment of Noise at the Workplaces. Moscow, Printing office of the Min. of Health of the USSR, 1978. 18 (in Russian).

Received: 1 October 2015

Accepted: 27 November 2015

Published online: 30 March 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-106-121

УДК 621.311.21

Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами

Р. И. Мустафаев¹⁾, Л. Г. Гасанова¹⁾, М. М. Мусаев¹⁾

¹⁾Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики (Баку, Азербайджанская Республика)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В настоящее время в гидроагрегатах малых ГЭС, содержащих ковшовые гидротурбины, в качестве генераторов используются «классические» синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением. Из-за пульсирующего характера изменения вращающегося момента на валу системы, как правило, размещается дополнительный маховик, позволяющий сгладить эти пульсации. Мощность, развиваемая ковшовой турбиной, регулируется за счет изменения расхода воды в сопле при помощи иглы, выдвижение которой изменяет проходное сечение сопла, а в итоге и расход. Быстрое закрытие сопла для резкого уменьшения расхода воды может привести к гидравлическим ударам. Поэтому время полного хода иглы ограничивают 20–40 с. Для быстрого регулирования мощности применяют так называемые дефлекторы, назначение которых – отвод струи от лопастей ковшовой турбины. Поэтому для регулирования мощности механическим путем требуется согласование управления ходом иглы в соплах турбины и дефлектора. Предлагается в гидроагрегатах малых ГЭС, содержащих ковшовые турбины (турбины Пелтона), в качестве генераторов использовать частотно-управляемые синхронные машины с постоянными магнитами. На разработанной компьютерной модели выявлено, что при этом обеспечивается высокий уровень приспособляемости к быстроизменяющимся нагрузкам в сети. Кроме того, механическое регулирование выходной мощности с участием дорогостоящего привода дефлекторов и игл сопел турбины заменяется электрическим регулированием частоты вращения и выходной мощности посредством частотного преобразователя, расположенного в статорной цепи генератора. Управляемая синхронная машина позволяет с помощью частотного пуска обеспечить устойчивую работу гидроагрегата при весьма незначительных расходах воды (энергонесителя). Наконец, при полном отсутствии воды частотный пуск способствует переводу работы генератора в режим синхронного компенсатора. Это подтверждено на флюктограммах изменения режимных параметров системы, полученных при компьютерном моделировании.

Ключевые слова: гидроагрегат, ковшовая гидротурбина, частотно-управляемый синхронный генератор, постоянные магниты, регулирование частоты вращения, регулирование выходной мощности, частотный пуск, синхронный компенсатор

Для цитирования: Мустафаев, Р. И. Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами / Р. И. Мустафаев, Л. Г. Гасанова, М. М. Мусаев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 106–121

Адрес для переписки

Мустафаев Рауф Исмаилович
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики
просп. Г. Зардаби, 94
Аз1012, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +99412 432-80-76
mustafayevri@mail.ru

Address for correspondence

Mustafayev Rauf I.
Azerbaijan Scientific-Research
and Design-Prospecting Institute of Energetics
94 G. Zardabi Ave.,
Az1012, Baku, the Azerbaijani Republic
Tel.: +99412 432-80-76
mustafayevri@mail.ru

Modeling and Study of Hydroelectric Generating Sets of Small Hydro Power Plants with Frequency-Controlled Permanent Magnet Synchronous Generators

R. I. Mustafayev¹⁾, L. G. Gasanova¹⁾, M. M. Musayev¹⁾

¹⁾Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Institute of Energetics
(Baku, the Azerbaijani Republic)

Abstract. Currently, the hydroelectric generating sets of small HPPs with Pelton turbines employ as their generating units conventional synchronous generators with electromagnetic excitation. To deal with the torque pulsatile behaviour, they generally install a supplementary flywheel on the system shaft that levels the pulsations. The Pelton turbine power output is adjusted by the needle changing water flow in the nozzle, whose advancement modifies the nozzle area and eventually – the flow. They limit the needle full stroke time to 20–40 sec. since quick shutting the nozzle for swift water flow reduction may result in pressure surges. For quick power adjustment so-called deflectors are employed, whose task is retraction of water jets from the Pelton turbine buckets. Thus, the mechanical method of power output regulation requires agreement between the needle stroke inside the turbine nozzles and the deflector. The paper offers employing frequency-controlled synchronous machines with permanent magnets qua generating units for the hydroelectric generating sets of small HPPs with Pelton turbines. The developed computer model reveals that this provides a higher level of adjustability towards rapid-changing loads in the grid. Furthermore, this will replace the power output mechanical control involving the valuable deflector drive and the turbine nozzle needles with electrical revolution rate and power output regulation by a frequency converter located in the generator stator circuit. Via frequency start, the controllable synchronous machine ensures stable operation of the hydroelectric generating set with negligibly small amount of water (energy carrier). Finally, in complete absence of water, the frequency-relay start facilitates shifting the generator operation to the synchronous capacitor mode, which the system operating parameter fluctograms obtained through computer modeling prove.

Keywords: hydroelectric generating set, Pelton turbine, frequency-controlled synchronous generator, permanent magnets, revolution rate control, output power regulation, frequency start, synchronous capacitor

For citation: Mustafayev R. I., Gasanova L. G., Musayev M. M. (2016) Modeling and Study of Hydroelectric Generating Sets of Small Hydro Power Plants with Frequency-Controlled Permanent Magnet Synchronous Generators. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 106–121 (in Russian)

Малая гидроэнергетика, наряду с ветроэнергетикой, относится к наиболее развивающимся отраслям возобновляемых источников энергии, широкое внедрение которых является приоритетным и устойчивым направлением практически для всех стран мира, где есть соответствующие ресурсы. Это, несмотря на то, что малая гидроэнергетика имеет один существенный недостаток – высокие капитальные затраты (от 1000 до 8000 дол. США за 1 кВт установленной мощности, меньшая цифра относится к высоконапорным ГЭС, а большая – к низконапорным). Причиной этого является перенос технологии строительства, компоновки оборудования, функционирования больших ГЭС, хотя и в уменьшенных размерах, на малые ГЭС. Естественно, такая сложная технология ведет к дороговизне капитальных затрат.

Частично решить данную проблему поможет применение в малых ГЭС в качестве генераторов регулируемых электрических машин. В [1, 2] показано, что в малых ГЭС с гидротурбинами Френсиса (радиально-осевые)

применение в качестве генератора машины двойного питания позволяет посредством изменения частоты вращения вала гидроагрегата регулировать его выходную (отдаваемую в электросеть) мощность. Это фактически приводит к отказу от дорогостоящего управляемого привода направляющих аппаратов гидротурбин и обеспечивает высокий уровень приспособляемости к быстроизменяющимся нагрузкам в сети. Кстати это относится и к пропеллерным турбинам (турбины Каплана с жесткой установкой лопастей во втулке). К тому же необходимо помнить, что развитию малой энергетики способствуют децентрализованное, небольшое по объему электропотребление, наличие мелких отраслей промышленности и индивидуальных фермерских хозяйств и предприятий, преимущественно сельского населения [3]. Типичный график нагрузки такого рода потребителей представлен на рис. 1.

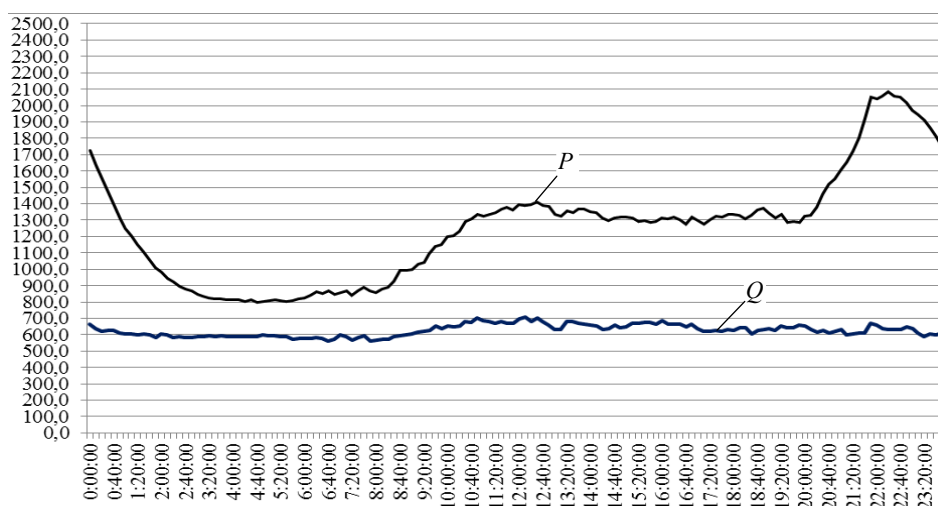


Рис. 1. Типичные графики изменения нагрузок (активной P и реактивной Q) для потребителей сельской местности Азербайджана

Fig. 1. Typical load curves (active P and reactive Q) of consumers in rural areas in Azerbaijan

График нагрузки (рис. 1) получен экспериментальным путем в сельском районе Азербайджана [4]. Как видно из графика, максимальное значение потребляемой активной мощности $P_{\max}$ составляет 2100 кВт, а минимальное $P_{\min} = 800$ кВт, т. е. активная мощность в течение суток изменяется почти в 2,6 раза. В перспективе в связи с увеличением доли механизированных фермерских хозяйств и мелких отраслей промышленности отношение между $P_{\max}$ и $P_{\min}$ ориентировочно составит не более двух.

Для обеспечения высокого уровня приспособляемости к быстроизменяющимся суточным графикам нагрузки сети необходимо использовать в качестве генераторов гидроагрегатов малых ГЭС частотно-управляемые электрические машины. В статье рассматривается система регулирования выходной мощности гидроагрегата, содержащего в качестве гидротурбины ковшовую турбину (турбину Пелтона), а в качестве гидрогенератора — ча-

стотно-управляемую синхронную машину с постоянными магнитами, которая находит широкое применение в ветроэнергетике в диапазоне мощностей от 600 до 5000 кВт.

Как известно, турбина Пелтона (ковшовая турбина) относится к классу активных турбин. Схема 21-лопастной двухсопловой ковшовой турбины представлена на рис. 2. Мощность ковшовой турбины регулируют за счет изменения расхода, корректируемого диаметром струи, которая в свою очередь определяется движением иглы в сопле.

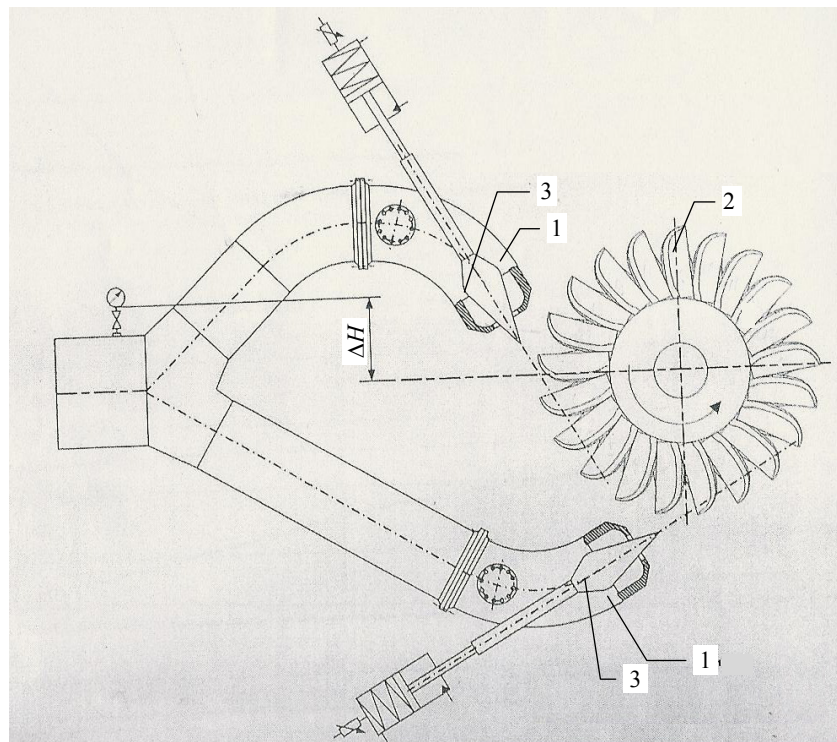


Рис. 2. Схема 21-лопастной двухсопловой ковшовой турбины:
1 – сопло; 2 – ковшовая турбина; 3 – игла

Fig. 2. 21-bucket double-nozzle Pelton turbine layout:
1 – nozzle; 2 – Pelton turbine; 3 – needle

Если игла вдвинута внутрь, то сопло открыто на полное сечение и расход наибольший. При движении иглы вперед проходное сечение сопла сокращается, вследствие этого уменьшается диаметр струи и соответственно расход [5]. Однако необходимо обратить внимание на одно обстоятельство: так как вода к ковшовым турбинам подводится по длинным напорным водоводам, то при быстром движении иглы на закрытие сопла и уменьшении расхода, как правило, возникает гидравлический удар. Для предотвращения этого в ковшовых турбинах временно можно снизить мощность без закрытия сопла с помощью применения так называемых дефлекторов [5], которые устанавливаются непосредственно за соплами и могут изменять направление части или всей струи, регулируя попадание ее на ковши тур-

бины. Дефлектор с помощью сервомотора относительно быстро (за 2–3 с) уменьшает мощность, но расход при этом сохраняется постоянным. Поэтому одновременно подается импульс на закрытие иглы, но она движется медленно (20–40 с), тем самым обеспечивая защиту от гидравлического удара и уменьшая расход. По мере закрытия иглы дефлектор выводится из-под струи и система приводится в нормальное положение. Данный алгоритм механического регулирования продолжает действовать во всем диапазоне изменения мощности гидроагрегата.

Необходимо отметить, что скорость струи воды, выбрасываемой из сопла, очень большая. Она определяется по формуле

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (1)$$

где φ – коэффициент скорости, $\varphi = 0,98–0,99$; H – напор, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Например, при $H = 650 \text{ м}$ скорость струи $v_c = 111 \text{ м/с}$. В связи с этим место, куда направляет отклоненную струю дефлектор, дополнительно укрепляют стальными щитами, чтобы бетон бассейна не разрушался [5, 6].

Описанное выше охватывает технологию функционирования ковшовых турбин широкого диапазона мощностей: от десятков киловатт до 150–200 МВт. Для малой гидроэнергетики (мощность до 10 МВт) с целью уменьшения капитальных затрат необходимо несколько упростить технологию функционирования турбинной части гидроагрегатов [7, 8] малых ГЭС с расширением области функционирования их генераторной части путем применения регулируемых электрических машин.

Рассмотрим процесс совместной работы ковшовой турбины, параметры которой приведены в Приложении А с частотно-управляемым синхронным генератором с постоянными магнитами. Главная универсальная характеристика рассматриваемой ковшовой турбины показана на рис. 3. Известно, что для всех ковшовых турбин оптимальная приведенная частота вращения сохраняет постоянное значение $n'_{\text{опт}} = 39–40 \text{ об/мин}$. Известно также, что мощность гидротурбин описывается выражением

$$P_T = 9,81QH\eta, \quad (2)$$

где P_T – мощность, кВт; Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; H – рабочий напор, м; η – КПД, о. е.

Если принять за базисную величину для турбины номинальную мощность $P_{\text{тн}}$, которой соответствуют $Q_{\text{н}}$, $H_{\text{н}}$ и $\eta_{\text{н}}$, то в относительных единицах выражение (2) предстанет в виде:

$$p_T^* = q^* h^* \eta^*, \quad (3)$$

где

$$p_T^* = \frac{P_T}{P_{\text{тн}}}; \quad q^* = \frac{Q}{Q_{\text{н}}}; \quad h^* = \frac{H}{H_{\text{н}}}; \quad \eta^* = \frac{\eta}{\eta_{\text{н}}}.$$

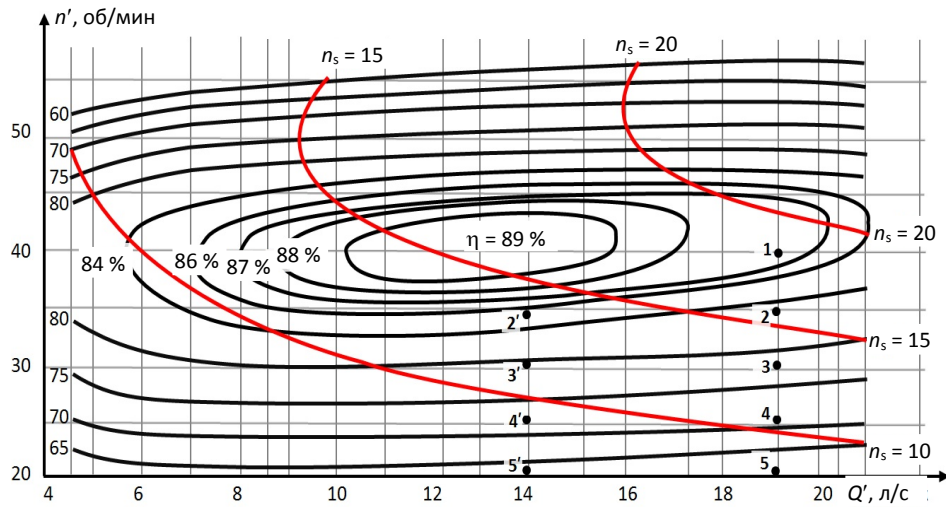


Рис. 3. Главная универсальная характеристика ковшовой гидротурбины

Fig. 3. Main hill diagram of the Pelton turbine

В (3) в соответствии с главной универсальной характеристикой от частоты вращения вала гидроагрегата не зависят ни напор h^* , ни расход q^* , а зависит только значение КПД η^* . В связи с этим мощность турбины будет изменяться в функции изменения только η^* . Абсолютные и относительные значения частоты вращения турбины и КПД, полученные из главной универсальной характеристики ковшовой турбины (точки 1–5, рис. 3), для значения номинального приведенного расхода $Q' = 19$ л/с представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость КПД турбины от частоты вращения ее вала

Turbine efficiency and its shaft revolution rate correlation

n'	об/мин	40 (ном.)	35	30	25	20
	о. е.	1,000	0,875	0,750	0,625	0,500
η	о. е.	0,875 (ном.)	0,840	0,780	0,710	0,600
	о. е. к ном.	1,000	0,960	0,890	0,810	0,680

Далее по выражению (3) и соотношению для момента гидротурбины, равного

$$m_t^* = \frac{p_t^*}{n^*}, \quad (4)$$

определяются значения мощности и момента турбины в зависимости от скорости вращения, которые приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при регулировании частоты вращения вала гидроагрегата на 50 % вниз от номинала мощность турбины только за счет уменьшения КПД снижается на 32 %, при этом приведенный расход сохраняется постоянным $Q' = 19$ л/с (в абсолютном выражении полный расход составляет $Q = 0,215$ м³/с).

Таблица 2

Зависимость относительных значений активной мощности и момента турбины от частоты вращения ее вала при постоянстве расхода

Correlation of the active power and torque relative values and the turbine shaft revolution rate at uniformity of flow

n^* , о. е.	1	0,875	0,750	0,625	0,500
p_t^* , о. е.	1	0,960	0,890	0,810	0,680
m_t^* , о. е.	1	1,097	1,180	1,290	1,360

Из табл. 2 также видно, что при уменьшении частоты вращения гидроагрегата на 50 % увеличивается величина момента гидротурбины на 36 %, что для длительных режимов работы недопустимо. Поэтому при достижении относительной частоты вращения значения 0,875 предлагается плавно изменить расход таким образом, чтобы в итоге значение момента при частоте вращения $n^* = 0,5$ о. е. не превышало $m_t^* \approx 1$. Расчеты показывают, что для этого достаточно изменить приведенный расход $Q' = 19$ л/с до $Q' = 14$ л/с, т. е. с $q_t^* \approx 1,00$ до $q_t^* \approx 0,74$ (на 26 %). При этом установившиеся значения момента практически не превышают $m^* \approx 1$. Параметры будут меняться в соответствии с главной универсальной характеристикой (точки 2'–5', рис. 3, при расходе $Q' = 14$ л/с). Расчеты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость режимных параметров турбины: расхода q^* , КПД η^* , мощности p_t^* и момента m_t^* при частичном регулировании расхода воды

Correlation of the turbine water-flow partial regulation operating parameters: flow rate q^* , efficiency η^* , power p_t^* and torque m_t^*

n^*	1	0,875	0,750	0,625	0,500
q^*	1	С 1,00 до 0,74 (регулируется)	0,740	0,740	0,740
η^*	1	С 0,96 до 0,98 (изменяется)	0,920	0,827	0,700
p_t^*	1	С 0,96 до 0,72 (изменяется)	0,680	0,610	0,510
m_t^*	1	С 1,097 до 0,820 (изменяется)	0,900	0,970	1,020

Из табл. 3 видно, что, регулируя расход с $q^* \approx 1,00$ до $q^* \approx 0,74$ (для гидротурбины, параметры которой приведены в Приложении А, в абсолютном значении с $Q = 0,215$ м³/с до $Q = 0,158$ м³/с) при частоте вращения $n = 0,875n_{\text{ном}}$, мощность турбины при этой частоте вращения достигает $p^* = 0,72$, а момент $m_t^* = 0,82$. И далее, при новом расходе значение момента гидротурбины практически равно номинальному, даже при частоте вращения турбины $n^* = 0,5$.

Необходимо отметить еще одно обстоятельство. Для рассматриваемой турбины снижение расхода на 26 % обеспечивается регулированием диаметра струи с $d_c = 35$ мм до $d_{c1} = 30$ мм, т. е. всего на 5 мм, или на 14 %. Если иметь в виду, что согласно [5] для полного закрытия сопла турбины иглой необходимо, с точки зрения исключения большого гидравлического удара в напорных водоводах, время 20–40 с, то время для уменьшения диаметра струи в вышеуказанных пределах составит не более 3–6 с. Таким образом, предложенный алгоритм управления позволяет при помощи регулирования частоты вращения гидроагрегата в пределах $(1,0 - 0,5)n_n$ регулировать в таких же пределах выходную мощность турбины. При этом требуется только один раз произвести корректировку расхода на 26 % в сторону уменьшения. Это позволяет отказаться от сложной системы механического регулирования с поочередным участием дефлекторов и игл сопел турбины Пелтона в предлагаемом диапазоне изменения мощности.

При предложенном способе обеспечивается быстрое действие в процессе регулирования выходной мощности турбины, поскольку систематическое регулирование расхода с помощью изменения хода иглы в сопле практически также исключается, кроме одного раза. При этом время на изменение расхода из-за малой величины хода иглы сопел минимальное, что позволяет избежать гидравлического удара в водоподводах.

Отметим еще некоторые преимущества применения в качестве генераторов гидроагрегатов малых ГЭС с ковшовыми турбинами частотно-управляемых синхронных машин с постоянными магнитами. Поскольку ковшовые турбины работают в импульсном режиме (их иногда называют импульсными), на всех гидроагрегатах с этими турбинами дополнительно на вал «сажают» маховики, которые демпфируют колебания частоты вращения агрегата. При этом, естественно, значительно увеличиваются маховые массы вращающихся частей гидроагрегата, что в свою очередь при значительных снижениях расхода воды (в летнее время, например) может привести к положению, когда энергия струи не позволит преодолеть момент трогания агрегата. Тогда наличие преобразователя частоты, установленного в цепи статора синхронного генератора, даст возможность осуществить частотный пуск агрегата, втягивание в синхронизм и дальнейшую работу агрегата при синхронной частоте вращения даже при существенно сниженных значениях расхода. И, наконец, при отсутствии вообще расхода воды (жаркое лето) осуществление частотного пуска позволяет использовать синхронный генератор малой ГЭС в качестве компенсатора.

Далее на разработанной математической модели проиллюстрированы все обозначенные выше режимы. Модель частотно-управляемого синхронного генератора с постоянными магнитами предложена в [9]. Уравнения синхронного генератора представляются в виде [9, 10]:

$$\left. \begin{aligned}
p\Psi_{ds} &= U_{ds} - \omega_r \Psi_{qs} - r_s i_{ds}; \\
p\Psi_{qs} &= U_{qs} + \omega_r \Psi_{ds} - r_s i_{qs}; \\
p\Psi_{dr} &= -\frac{r_{dr}}{x_{dr}} \Psi_{dr} + \frac{r_{dr} x_{ad}}{x_{dr}} i_{ds} + \frac{r_{dr}}{x_{dr}} M_f; \\
p\Psi_{qr} &= -\frac{r_{qr}}{x_{qr}} \Psi_{qr} + \frac{r_{qr} x_{aq}}{x_{qr}} i_{qs}; \\
p\omega_r &= \frac{1}{T_j} m_T - \frac{1}{T_j} m_{эм}; \\
p\alpha &= \omega_r; \\
U_{ds} &= 0,707 k_{us} \left[\cos(k_{fs} \tau) (\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \tau) (\cos \alpha + \sin \alpha) \right]; \\
U_{qs} &= 0,707 k_{us} \left[\cos(k_{fs} \tau) (\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \tau) (\cos \alpha - \sin \alpha) \right]; \\
i_{ds} &= \frac{x_{dr}}{x_{ds} x_{dr} - x_{ad}^2} \Psi_{ds} - \frac{x_{dr} x_{ad}}{x_{ds} x_{dr} - x_{ad}^2} M_f - \frac{x_{ad}}{x_{ds} x_{dr} - x_{ad}^2} \Psi_{dr}; \\
i_{qs} &= \frac{x_{qr}}{x_{qs} x_{qr} - x_{aq}^2} \Psi_{qs} - \frac{x_{aq}}{x_{qs} x_{qr} - x_{aq}^2} \Psi_{qr}; \\
m_{эм} &= \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}; \\
p_s &= U_{ds} i_{ds} + U_{qs} i_{qs}; \\
q_s &= U_{qs} i_{ds} - U_{ds} i_{qs}.
\end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь Ψ_{ds} , Ψ_{qs} , Ψ_{dr} , Ψ_{qr} – соответствующие составляющие статорного и роторного потокосцеплений по осям d , q ; i_{ds} , i_{qs} – составляющие тока статора по осям d , q ; ω_r – частота вращения ротора машины; α – угол сдвига между неподвижной осью координат и осью ротора; M_f – магнитодвижущая сила, характеризующая энергию постоянных магнитов машины, отнесенную к единице объема; m_T , $m_{эм}$, p_s , q_s – соответственно вращающий момент гидротурбины, электромагнитный момент синхронной машины, активная и реактивная мощности машины; T_j – инерционная постоянная системы, рад; k_{us} , k_{fs} – амплитуда статорного напряжения машины и его частота (регулируемые параметры, полученные с выхода преобразователя частоты, питающего статорную обмотку генератора).

Необходимо отметить, что система уравнений синхронного генератора (5) записана в относительных единицах, где за базисную мощность принята полная мощность машины:

$$S_{баз} = \frac{P_n}{\eta_{ген} \cos \varphi_{ген}}, \quad (6)$$

где P_n – номинальная мощность на валу генератора; $\eta_{ген}$ – КПД генератора; $\cos \varphi_{ген}$ – коэффициент мощности.

Исходя из этого, используя в (5) значения m_T , взятые из табл. 3, необходимо данные значения умножить на коэффициент, определяемый из соотношения (6).

Флуктограммы изменения режимных параметров генератора (параметры генератора и алгоритм приведены в Приложении Б) при изменении частоты вращения гидроагрегата в соответствии со значениями табл. 3 представлены на рис. 4.

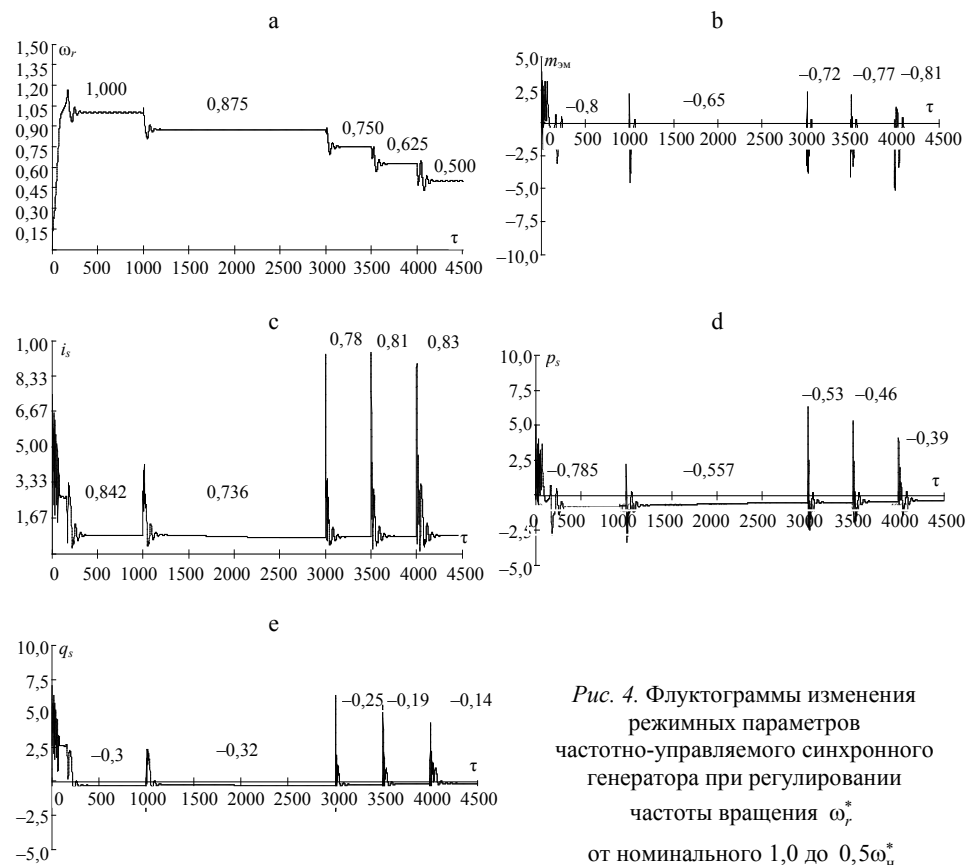


Рис. 4. Флуктограммы изменения режимных параметров частотно-управляемого синхронного генератора при регулировании частоты вращения ω_r^* от номинального 1,0 до $0,5\omega_H^*$

Fig. 4. Fluctograms of the frequency-controlled synchronous generator operating parameters alteration with the revolution rate change from the rated value $\omega_r^* = 1,0$ up to $0,5\omega_H^*$

При этом электромагнитный момент $m_{эм}$ (рис. 4b) изменяется в соответствии со значениями m_T^* , приведенными в табл. 3 (умноженными на коэффициент 0,8, определяемый из (6)). В диапазоне от 0 до 1000 рад частота $k_{fs} = 1$, установившиеся значение $m_{эм} = m_T^* = -0,8$ (знак минус указывает на генераторный режим). Далее на частоте $k_{us} = k_{fs} = 0,875$ в диапазоне от 1000 до 3000 рад с помощью изменения диаметра струи регулируется расход с номинального до $0,74q_H$. Момент гидротурбины, приведен-

ный к валу генератора, также изменяется до $m_{эм} = -0,65$. Далее при $k_{fs} = 0,75$ он равен $m_{эм} = -0,72$, при $k_{fs} = 0,625$ $m_{эм} = -0,77$ и, наконец, при $k_{fs} = 0,5$ величина момента $m_{эм} = -0,81$.

На рис. 4с–е приведены флюктограммы изменения общего тока генератора (рис. 4с), выходной активной мощности (рис. 4д) и выходной реактивной мощности (рис. 4е). Из них видно, что при таком регулировании общий ток не превышает номинальную величину (максимум $i_s = -0,842$), выходная мощность генератора изменяется ровно в два раза (от величины $p_s = -0,785$ до $p_s = -0,390$). Приблизительно во столько же раз изменяется и реактивная мощность.

Таким образом, флюктограммы, полученные на математической модели показывают, что предложенный алгоритм электрического регулирования выходной мощности гидроагрегата с ковшовой турбиной и частотно-управляемым синхронным генератором с постоянными магнитами вполне реализуем. Это позволяет в данных гидроагрегатах малых ГЭС отказаться от механического регулирования с участием дефлекторов в указанном диапазоне регулирования выходной мощности.

Кроме того, управляемая электрическая машина гидроагрегата дает возможность осуществить частотный пуск генератора как при наличии на валу незначительной мощности гидротурбины (при сезоне уменьшении расхода), так и при периодах отсутствия расхода воды. В первом случае частотный пуск позволяет включить в сеть гидроагрегат, имеющий значительный маховой момент из-за наличия маховика, и выдавать активную мощность, хоть и незначительную. Во втором случае (при отсутствии воды) он дает возможность использовать синхронный генератор в качестве синхронного компенсатора. Проиллюстрируем изложенное на математической модели.

Флюктограммы, демонстрирующие частотный пуск синхронного генератора с наличием движущего момента на валу генератора, представлены на рис. 5. Амплитуда напряжения и частота $k_{us} = k_{fs}$ изменяются по соотношению

$$k_{us} = k_{fs} = k_0 + k\tau. \quad (7)$$

Для гидрогенератора, параметры которого приведены в Приложении Б, $k_0 = 0,2$, $k = 0,0032$; τ – синхронное время, $\tau = 314t$; t , с; $m_\tau = -0,2$.

На рис. 5а представлена диаграмма изменения $k_{us} = k_{fs}$ в соответствии с (7), на рис. 5б–ф – соответственно электромагнитный момент $m_{эм}$, частота вращения ω_r , общий ток статора генератора i_s , активная p_s и реактивная q_s мощности генератора. Анализ флюктограмм показывает, что в про-

цессе частотного пуска средняя величина электромагнитного момента не превышает $m_{\text{ср.п}} \approx 0,6$, на 400-м радиане машина втягивается в синхронизм, средняя величина пускового тока $i_{\text{сн}} \approx 2,5$. Установившиеся значения выходной активной мощности генератора $p_{\text{с уст}} \approx -0,194$, а реактивной $q_{\text{с уст}} \approx -0,480$.

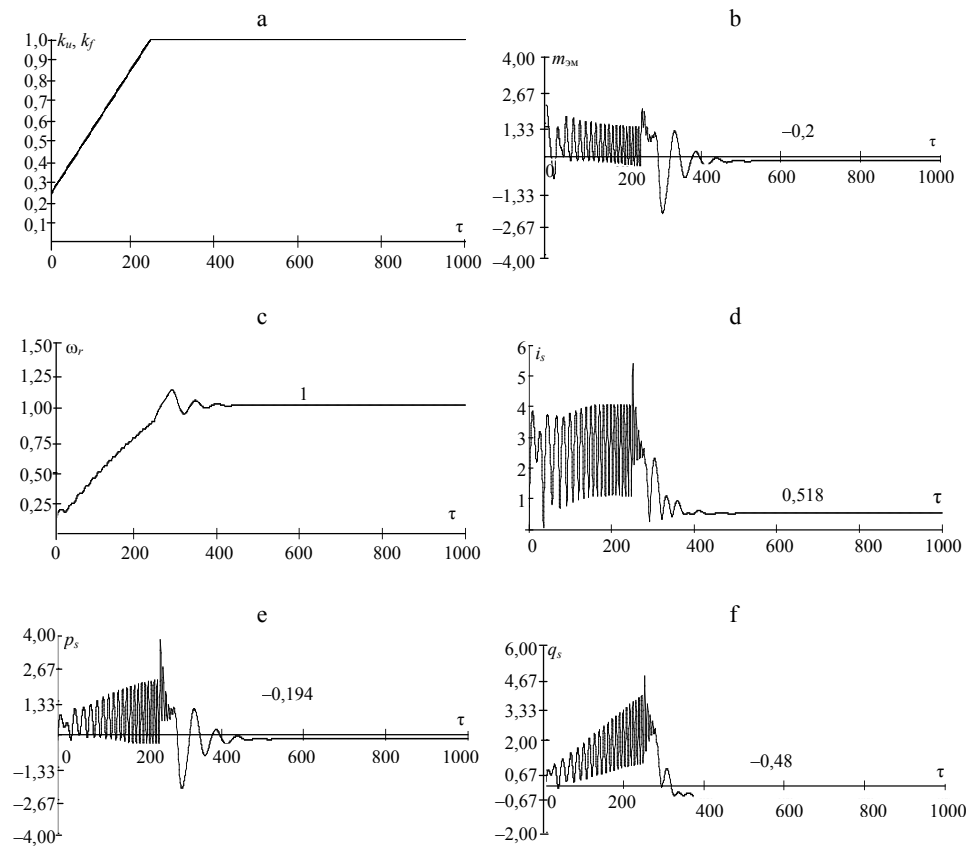


Рис. 5. Флюктограммы изменения режимных параметров генератора при частотном пуске по выражению $k_{us} = k_{fs} = 0,2 + 0,0032\tau$, где $\tau = 314t$, рад

Fig. 5. Fluctograms of the generator operating parameters alteration at frequency start in expression $k_{us} = k_{fs} = 0,2 + 0,0032\tau$, where time $\tau = 314t$, rad

Таким образом, частотный пуск гидроагрегата позволяет выйти на установившийся режим работы при малой величине мощности, развиваемой ковшовой турбиной (при малом расходе воды).

Флюктограммы частотного пуска гидрогенератора при расходе воды $q = 0$ представлены на рис. 6. В этом случае генератор работает в качестве компенсатора с выдачей реактивной мощности $q_s = -0,493$ (рис. 6f). В остальном процесс такой же, как и на рис. 5 при значении $k = 0,0028$ в уравнении (7).

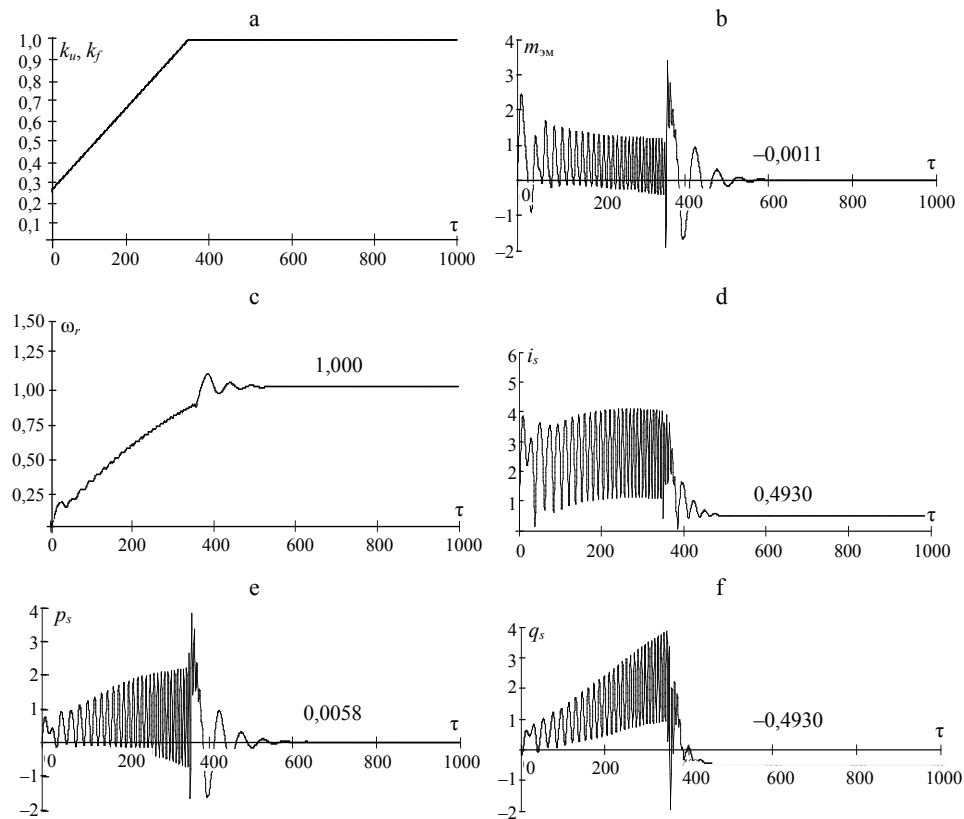


Рис. 6. Флуктограммы изменения режимных параметров генератора при частотном пуске по выражению $k_{us} = k_{fs} = 0,2 + 0,0028\tau$

Fig. 6. Fluctograms of the generator operating parameters alteration at frequency start in expression $k_{us} = k_{fs} = 0,2 + 0,0028\tau$

ВЫВОДЫ

1. Применение в качестве генераторов в гидроагрегатах с ковшовыми турбинами (турбина Пелтона) в малых ГЭС частотно-управляемых синхронных машин с постоянными магнитами позволяет:

- обеспечить высокий уровень приспособляемости к быстроизменяющимся нагрузкам в сети;
- отказаться от системы механического регулирования выходной мощности с участием дефлекторов в указанном диапазоне регулирования выходной мощности системы.

2. На разработанной математической модели гидроагрегата с управляемой синхронной машиной с постоянными магнитами отработан алгоритм функционирования гидроагрегата при регулировании частоты вращения с помощью современного полупроводникового преобразователя частоты на IGBT-транзисторах в диапазоне частот $(1,0-0,5)n_n$, который обеспечивает изменение выходной мощности в той же пропорции.

3. Частотно-управляемая синхронная машина при работе совместно с ковшовой турбиной позволяет осуществить работу и при весьма малых значениях расхода воды (энергоносителя) с помощью реализации частотного пуска системы, маховые массы которой значительны. Помимо этого, реализация частотного пуска дает возможность осуществить работу системы при полном отсутствии воды: в данном случае генератор будет работать в качестве синхронного компенсатора, что и продемонстрировано на математической модели.

Приложение А
Appendix A

Параметры ковшовой турбины (расчетные)
Pelton turbine parameters (analytical)

Мощность гидротурбины $P = 1200$ кВт	Диаметр струи $d_c = 35$ мм
Напор $H = 650$ м	Число сопел $Z_c = 2$
Расход воды $Q = 0,215$ м ³ /с	КПД $\eta_n = 0,875$
Диаметр рабочего колеса $D_1 = 663$ мм	

$n' = 40$ об/мин – оптимальная приведенная частота вращения гидротурбины (по главной универсальной характеристике рис. 3); $Q' = 19$ л/с – приведенный расход (номинальный), на частоте вращения $n^* = 0,875$ расход снижается за 6 с до значения $Q'_1 = 14$ л/с (ему соответствует $d_{c1} = 30$ мм).

Формулы для расчета:

- мощность гидротурбины

$$P_T = 9,81QH\eta_n;$$

- расход воды

$$Q = Z_c \frac{\pi d_c^2}{4} \varphi \sqrt{2gH};$$

- скорость струи, выбрасываемой из сопла: $v_c = \varphi \sqrt{2gH};$
- коэффициент скорости $\varphi = 0,98-0,99.$

Приложение Б
Appendix B

Параметры синхронного генератора
Synchronous generator parameters

Мощность	$P = 1500$ кВт.
Напряжение	$U_n = 400$ В.
Ток	$I_n = 2165$ А.
Частота	$f_n = 50$ Гц.
Частота вращения	$\omega = 500$ об/мин.
Число пар полюсов	$p = 6.$

Расчетные параметры, о. е.:

$$\begin{aligned} x_{ds} = 1,008; & \quad x_{dr} = 1,039; & \quad x_{ad} = 0,9135; & \quad 1/T_j = 0,005; & \quad r_{dr} = 0,08; \\ x_{qs} = 0,487; & \quad x_{qr} = 0,511; & \quad x_{aq} = 0,385; & \quad r_s = 0,02; & \quad r_{qr} = 0,07. \end{aligned}$$

Алгоритм решения уравнения частотно-управляемого синхронного генератора ВЭУ с постоянными магнитами:

$$D(\tau, Y) = \begin{bmatrix} 0,707k_u [\cos(k_f \tau)(\cos Y_6 - \sin Y_6)] - [\sin(k_f \tau)(\cos Y_6 + \sin Y_6)] - Y_2 Y_5 - \\ - 0,02(4,88Y_1 - 0,87 - 4,289Y_3); \\ 0,707k_u [\cos(k_f \tau)(\cos Y_6 + \sin Y_6)] + [\sin(k_f \tau)(\cos Y_6 - \sin Y_6)] + M_1 Y_5 - \\ - 0,02(5,22Y_2 - 3,906Y_4); \\ -0,077Y_3 + 0,0703(4,88Y_1 - 0,87 - 4,289Y_3) + 0,1155; \\ -0,137Y_4 + 0,052(5,22Y_2 - 3,906Y_4); \\ 0,005(-m_t) - 0,005[Y_1(5,22Y_2 - 3,906Y_4) - Y_2(4,88Y_1 - 0,87 - 4,289Y_3)]; \\ Y_5; \end{bmatrix}$$

$$Y_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $Y_1 = \psi_{ds}$; $Y_2 = \psi_{dr}$; $Y_3 = \psi_{dr}$; $Y_4 = \psi_{dr}$; $Y_5 = \omega$; $Y_6 = \alpha$;

$$\begin{aligned} i_{ds} &= 4,88Y_1 - 0,87 - 4,289Y_3; \\ i_{qs} &= 5,22Y_2 - 3,906Y_4. \end{aligned}$$

Значение m_t приведено к валу генератора и к системе его базовых величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазырин, М. В. Перспективы применения генераторных комплексов на основе машины двойного питания для малых ГЭС / М. В. Глазырин, Р. Х. Диеров // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. № 6. С. 78.
2. Моделирование и исследование режимов работы гидроагрегатов малых ГЭС с машинами двойного питания / Р. И. Мустафаев [и др.] // Изв. вузов. Электромеханика. 2015. № 4.

3. Режим доступа: www.rea.org.ru/dieret/Hydro/hydrohtml1/.
4. О результатах мониторинга потерь электрической энергии в распределительной электрической сети / А. Б. Баламетов [и др.] // Проблемы энергетики. 2007. № 3. С. 111–118.
5. Кривченко, Г. И. Гидравлические машины (турбины и насосы) / Г. И. Кривченко. М.: Энергия, 1978. 320 с.
6. Эдель, Ю. У. Ковшовые гидротурбины / Ю. У. Эдель. М.; Л.: Машгиз, 1968. 210 с.
7. Эпштейн, Р. М. Система регулирования гидроагрегатом / Р. М. Эпштейн, Б. Е. Митрофанов, М. Я. Руденский. М.: Энергия, 1968. 189 с.
8. Кривченко, Г. И. Автоматическое регулирование гидротурбин / Г. И. Кривченко. М.: Энергия, 1964. 286 с.
9. Мустафаев, Р. И. Моделирование и исследование режимов работы синхронных генераторов ветроэлектрических установок при частотном управлении / Р. И. Мустафаев, Л. Г. Гасанова. Электричество. 2010. № 7. С. 34–40.
10. Мустафаев, Р. И. Универсальная структура математической модели управляемых электрических машин переменного тока / Р. И. Мустафаев, Л. Г. Гасанова. Электричество. 2015. № 2. С. 40–48.

Поступила 31.08.2015 Подписана в печать 27.11.2015 Опубликовано онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. Glazyrin M. V., Dierov R. Kh. (2012) Perspectives of Implementation of Generating Complexes on the Double-Fed Machine Basis for Small HPPs. *Izv. Vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], (6), 78 (in Russian).
2. Mustafayev R. I., Gasanova L. G., Musayev M. M., Mamedov E. M., Nabiev Kh. I. (2015) Modeling and Research of Operating Regimes of the Hydroelectric Sets of Small HPPs with the Double-Fed Machines. *Izv. Vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], (6), 59–66. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-6-59-66.
3. Access mode: www.rea.org.ru/dieret/Hydro/hydrohtml1/.
4. Balametov A. B., Mamedov S. G., Aliev Kh. T., Khalilov E. D., Bakhyshov E. D. (2007) On the Results of Monitoring of the Electric Energy Losses in the Electrical Distribution Facilities. *Problemy Energetiki* [Challenges of the Energetics], (3), 111–118 (in Russian).
5. Krivchenko G. I. (1978) *Hydraulic Machines (Turbines and Pumps)*. Moscow, Energy. 320 (in Russian).
6. Edel Yu. U. (1968) *Pelton Turbine*. Moscow; Leningrad, Mashgiz. 210 (in Russian).
7. Epshtein R. M., Mitrofanov B. Ye., Rudenskiy M. Ya. (1968) *Regulating System of the Hydroelectric Set*. Moscow, Energy. 189 (in Russian).
8. Krivchenko G. I. (1964) *Automatic Regulation of Hydroturbines*. Moscow, Energy. 286 (in Russian).
9. Mustafayev R. I., Gasanova L. G. (2010) Simulation and Investigation of Operating Modes of Synchronous Generators of the Wind Power Plants at Variable-Frequency Control. *Elektrichestvo* [Electricity], (7), 34–40 (in Russian).
10. Mustafayev R. I., Gasanova L. G. (2015) Universal Structure of the Mathematical Model of the Controlled Alternating Current Machines. *Elektrichestvo* [Electricity], (2), 40–48 (in Russian).

Received: 31 August 2015 Accepted: 27 November 2015 Published online: 30 March 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-122–140

УДК 662.8.053.33

Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива

Б. М. Хрусталеv¹⁾, А. Н. Пехота¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассмотрены современные подходы к использованию углеводородсодержащих отходов в качестве энергоресурсов. Представлены исследования, статистические материалы, выполнен анализ образования углеводородсодержащих отходов в Республике Беларусь. Отмечены основные проблемы применения отходов в качестве топлива, приведены технологии их использования. Изложены основные результаты исследований и способ эффективного применения вязких углеводородсодержащих отходов в качестве энергонасыщенного компонента и связующего вещества при производстве твердого топлива. Представлены технологическая схема, опытно-промышленная установка и оборудование, необходимые для реализации способа получения твердого многокомпонентного топлива. Приведены модель технологического процесса с эффективной последовательностью технологических операций и параметры оптимального компонентного состава. Отражены основные факторы, оказывающие существенное структурообразующее влияние на создание структурной композиции твердого многокомпонентного топлива. Дано графическое представление принципа подбора частиц смеси различной крупности при формировании твердого топлива методом брикетирования с учетом в составе вязких углеводородсодержащих отходов. Представлена зависимость безразмерной концентрации выбросов в атмосферу при сжигании двухкомпонентного твердого топлива. Проанализировано влияние разработанной методики расчета концентрации выбросов твердых многокомпонентных топлив, показана возможность оптимизации компонентного состава по экологической функции цели и индивидуальным особенностям топливосжигающего оборудования. Рассмотрены особенности хранения и транспортировки, отражены преимущества и недостатки, даны сравнительные характеристики, отмечена практическая применимость разработанного твердого многокомпонентного топлива. Приведены практические результаты использования углеводородсодержащих отходов на оборудовании по производству твердого многокомпонентного топлива. Проанализированы данные экономической целесообразности использования твердого многокомпонентного топлива с высокими теплотехническими характеристиками на котельных, работающих на местных видах твердого топлива. Дана перспективная оценка, отмечены актуальность и практическая значимость решения проблемы по эффективному использованию углеводородсодержащих отходов в производстве твердого многокомпонентного топлива.

Ключевые слова: углеводородсодержащие отходы, многокомпонентное твердое топливо, особенности хранения, практическая применимость

Для цитирования: Хрусталеv, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 122–140

Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-77-52
rector@bntu.by

Address for correspondence

Khroustalev Boris M.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-77-52
rector@bntu.by

Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel

B. M. Khroustalev¹⁾, A. N. Pekhota¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers modern approaches to usage of hydrocarbon-containing waste as energy resources and presents description of investigations, statistic materials, analysis results on formation of hydrocarbon-containing waste in the Republic of Belarus. Main problems pertaining to usage of waste as a fuel and technologies for their application have been given in the paper. The paper describes main results of the investigations and a method for efficient application of viscous hydrocarbon-containing waste as an energy-packed component and a binding material while producing a solid fuel. A technological scheme, a prototype industrial unit which are necessary to realize a method for obtaining multi-component solid fuel are represented in the paper. A paper also provides a model of technological process with efficient sequence of technological operations and parameters of optimum component composition. Main factors exerting significant structure-formation influence in creation of structural composition of multi-component solid fuel have been presented in the paper. The paper gives a graphical representation of the principle for selection of mixture particles of various coarseness to form a solid fuel while using a briquetting method and comprising viscous hydrocarbon-containing waste. A dependence of dimensionless concentration g of emissions into atmosphere during burning of two-component solid fuel has been described in the paper. The paper analyzes an influence of the developed methodology for emission calculation of multi-component solid fuels and reveals a possibility to optimize the component composition in accordance with ecological function and individual peculiar features of fuel-burning equipment. Special features concerning storage and transportation, advantages and disadvantages, comparative characteristics, practical applicability of the developed multi-component solid fuel have been considered and presented in the paper. The paper cites practical results pertaining to usage of hydrocarbon-containing waste for the equipment applied for production of multi-component solid fuel. Data on economic expediency for usage of the multi-component solid fuel with high thermo-technical characteristics in the boiler-houses operating on local solid fuel have been analyzed in the paper. The paper shows a perspective evaluation, applicability and practical significance of the solution of the problem on efficient usage of hydrocarbon-containing waste while producing the multi-component solid fuel.

Keywords: hydrocarbon-containing waste, multi-component solid fuel, special features of storage, practical applicability

For citation: Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 122–140 (in Russian)

Введение

Изучение мировых тенденций потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) позволяет утверждать, что в будущем следует ожидать возрастания доли использования местных видов твердого топлива, газа, а также альтернативных, вторичных и нетрадиционных энергетических ресурсов [1]. Адекватно отвечать требованиям времени может только качественно новый топливно-энергетический комплекс – финансово устойчивый, экономически эффективный и динамично развивающийся, оснащенный передовыми технологиями, позволяющими реализовывать проекты, направленные на снижение энергоемкости продукции за счет широкого использования вторичных ресурсов, создания стабильной топливно-сырье-

вой базы на местных ТЭР, с приемлемым уровнем их получения и применения для окружающей среды.

В последние годы экономика Республики Беларусь претерпевает глубокие структурные изменения, которые связаны с повышением эффективности использования местных видов топлива из вторичных и имеющихся сырьевых ресурсов. Особый интерес представляет применение вторичных сырьевых ресурсов в качестве альтернативного топлива, что требует новых научных подходов, углубленных исследований в этой области и современных технических решений, направленных на создание экологически безопасных технологий и энергоресурсов, обеспечивающих внутренние потребности страны в местных видах топлива (МВТ).

Динамика образования и использования производственных отходов

Одной из важнейших проблем всех без исключения индустриально развитых стран является стремительный рост объемов промышленных отходов. Тема вовлечения различных отходов для повторного использования, в том числе в энергетических целях, не нова. Например, в странах Европейского союза и США она довольно распространена. Анализ экологической стратегии получения альтернативных твердых топлив в Европе и США позволяет выделить в качестве основных путей достижения результата использование различных биоресурсов и твердых бытовых отходов (ТБО). Основная цель производства альтернативного твердого топлива – выработка недорогих энергоресурсов с применением энергоэффективных, ресурсосберегающих технологий и различных отходов, а также сокращение объемов образования отходов. Направление деятельности и виды отходов могут различаться и иметь свои особенности, но, как правило, конечная цель – в получении твердого восстановленного топлива (англ. *refused derived fuel* – RDF). RDF представляет собой твердое топливо, получаемое путем измельчения и обезвоживания ТБО. Оно состоит в основном из горючих компонентов ТБО, таких как пластик и биоразлагаемые отходы.

Технология производства альтернативного топлива RDF в разных странах и регионах имеет различия. Использование такого топлива, как правило, предусмотрено на промышленных предприятиях. Теплотворная способность RDF в различных странах при разных технологиях составляет 13–23 МДж/кг. Существенное влияние на теплотворные характеристики оказывают такие факторы, как морфологический состав отходов, способ использования полученного топлива, экологические особенности, разный технологический подход к операциям преобразования ТБО и др. [2].

В Республике Беларусь, несмотря на применяемые меры, ежегодно увеличивается объем образования горючих промышленных отходов, использование которых в значительной мере затруднено ввиду отсутствия экономически выгодных и экологически безопасных технологий, обеспечивающих их переработку и рациональное использование. Проведенные исследования белорусских ученых объективно доказывают возможность получения значительного энергетического эффекта от применения нефтесодержащих,

древесных и иных горючих отходов, которые мало востребованы в уже применяемых в республике технологиях.

Анализ данных отчетов Национального статистического комитета Республики Беларусь за 2008–2013 гг. показывает уровень и динамику использования отходов производства в стране. Тенденция роста объемов образования отходов производства показана на рис. 1. Количество накапливаемых отходов постоянно растет, а ежегодный их прирост составляет в среднем 3 % [3].

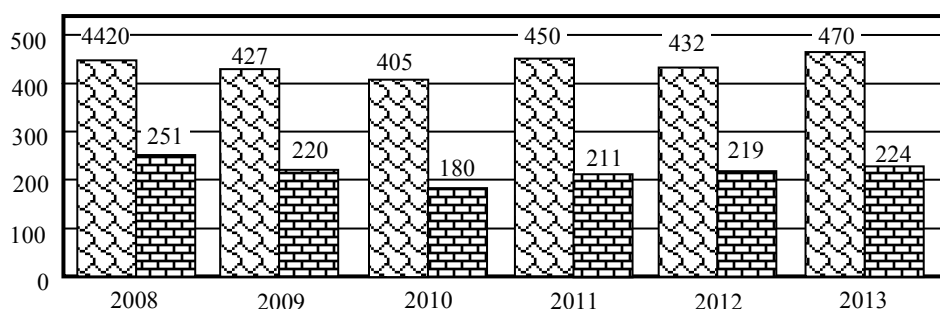


Рис. 1. Динамика объемов образования и использования отходов химического производства и производств, связанных с ними, на территории Беларуси с 2008 по 2013 г.:

▨ – объем образовавшихся отходов; ▤ – то же использованных отходов

Fig. 1. Dynamics in volumes of formation and usage of chemical industry and related productions on the territory of Belarus from 2008 till 2013:

▨ – volume of waste formation; ▤ – volume of used waste

Обработка данных в виде построения графиков линейной и кубической регрессий, определяемых как отношение объема использования отходов к объему их образования, с введением коэффициента использования отходов R показана на рис. 2.

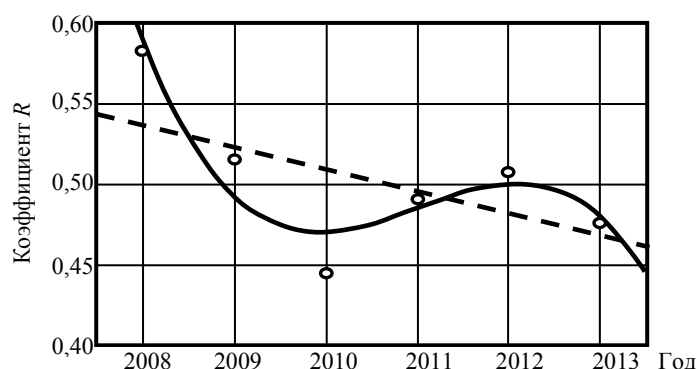


Рис. 2. Динамика отношения объема использования отходов химического производства и производств, связанных с ними, к объему их образования на территории Беларуси с 2008 по 2013 г.: ○ – статистические данные; — — — кубическая регрессия;

— — — — линейная регрессия

Fig. 2. Dynamics in ratio of volume pertaining to usage of waste of chemical industry and related productions to volume of their formation on the territory of Belarus from 2008 till 2013: ○ – statistic data; — — — cubic regression; — — — — linear regression

Из данных рис. 2 следует, что первые три года наблюдалась тенденция снижения коэффициента R . Далее использование отходов возросло, а в последний год снизилось, что связано с ростом объемов производства продукции переработки нефтехимическим комплексом и низким уровнем применяемых технологий, не позволяющих обеспечить использование вязких отходов. Характерно, что достигнутый уровень переработки в основном базируется за счет широкого внедрения доступных технологий и специализированного топливосжигающего оборудования, предназначенного для жидких горючих отходов без предварительной подготовки (отработанное масло, эмульсии, смеси и т. п.).

Необходимо отметить, что только в агропромышленном комплексе страны ежегодно накапливается до 700 тыс. т нефтесодержащих сточных вод, до 30 тыс. т отработанных масел, накоплено около 1 млн т отходов (мелкой крошки) торфа, угля и более 500 тыс. т нефтешламов [4]. Их переработка затруднена из-за многочисленности и географической разбросанности источников отходов, а также из-за высоких транспортных расходов.

Эффективное применение углеводородсодержащих отходов

Образование вязких нефтесодержащих (углеводородсодержащих – УВС) отходов происходит при добыче, переработке, производстве, хранении, транспортировке нефти и нефтепродуктов, а также в результате выполнения технологических операций при эксплуатации различных видов транспорта и промышленного оборудования. УВС-отходы – это отходы продуктов переработки нефти, а также отходы (шламы, остатки, смеси), содержащие или насыщенные нефтепродуктами. Данный вид отходов представляет собой вещества (или смеси веществ), образующиеся в результате производственной деятельности, и относится к отходам производства. Широкий диапазон значений показателей химического состава и физических свойств УВС-отходов, а также присутствие в них механических примесей, тяжелых металлов, серы, избыточного содержания воды требуют проведения детального анализа отходов и выполнения подготовительных мероприятий для использования их в качестве топлива [5]. К основным наиболее эффективным методам применения УВС-отходов относятся сжигание и регенерация. Однако переход энергетики на использование вторичных ресурсов в виде альтернативного топлива в энергоустановках многих пугает, так как это может оказаться экономически неприемлемым в силу значительных капитальных затрат на модернизацию оборудования.

Одним из решений вышеуказанных проблем по эффективному применению УВС-отходов является их использование при производстве твердого топлива. Сравнительный анализ существующих методов, технологий, оборудования, предназначенного для получения твердого топлива и переработки УВС-отходов, выявил ряд недостатков, к которым относятся: сложность и пожароопасность технологических решений, высокие энергетиче-

ские затраты при их реализации, жесткие требования к качественным показателям и составу используемых производственных отходов, дороговизна импортного технологического оборудования.

Также стоит отметить, что научно-исследовательские работы по переработке и применению нефтесодержащих отходов в большинстве своем проводятся с учетом потребности по снижению себестоимости продукции за счет экономии топливно-энергетических и сырьевых ресурсов крупных предприятий. Поэтому одним из недостатков научно-исследовательской деятельности является отсутствие доступных отечественных технологий и оборудования по переработке УВС-отходов, накопленных и образующихся повсеместно.

Цель исследования – разработать способ переработки вязких УВС-отходов путем их добавления к основному составу при брикетировании твердого топлива из древесных отходов, которое по своим теплотворным характеристикам может использоваться для сжигания в существующих огнетехнических установках без их переоборудования, при этом удовлетворяя критерии энергоэффективности и экологической безопасности.

Результаты исследования и их анализ

Исследования в обозначенных направлениях ведутся усилиями структурных подразделений Белорусского национального технического университета, в том числе кафедрами «Теплогазоснабжение и вентиляция» и «Промышленная теплоэнергетика». Одним из результатов исследования является разработанная в БНТУ технология производства топлива твердого многокомпонентного (ТТМ) (англ. multicomponent solid fuel – MSF), внедрение которой позволит получать твердое топливо с использованием образующихся на предприятиях вязких углеводородсодержащих и древесных отходов [6]. Полученное MSF-топливо обеспечивает полное сжигание присутствующих в нем горючих материалов с выделением заданных теплотехнических характеристик. При этом оно удовлетворяет требованиям транспортировки и хранения, обеспечивая сохранение свойств и качественных характеристик горючей массы.

Разработанная технология получения ТТМ позволяет использовать в качестве связующего компонента нефтешламы, насыщенные нефтепродуктами опилки, ветошь, сорбирующие материалы, эмульсии нефтепродуктов, отработанные смазки, отходы очистки мазутных и нефтяных резервуаров, отходы нефтеловушек очистных сооружений. Их процентное содержание в топливе, как отдельных компонентов, так и в парном соотношении, не превышает 30 %. Основными компонентами этого вида топлива являются отходы деревообработки, лесопиления и переработки древесины, не находящиеся по разным причинам технологического применения (механические примеси, повышенная влажность, разный морфологический состав, биохимические процессы, повлекшие изменения, и т. п.).

В основе исследований лежат изменение подходов и совершенствование технологических схем процессов производства твердого топлива методом

брикетирования. Реализуемая схема существующих процессов брикетирования (RDF-топлива, брикетов RUF, Pini-kay и т. п.), с технологической точки зрения, состоит из операций, представленных на рис. 3.

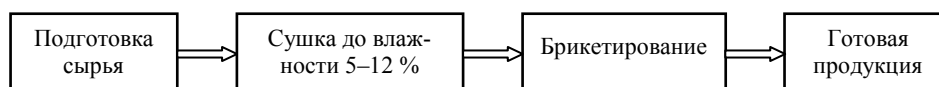


Рис. 3. Последовательность операций при традиционном способе брикетирования

Fig. 3. Sequence in operations while using conventional briquetting method

Недостатком данной схемы, ограничивающим ее применение при переработке нефтесодержащих отходов, является использование нагревательных элементов, поддерживающих температуру 220–260 °С, необходимую для спекания смолы и лигнина, выделяемых при брикетировании древесных опилок под создаваемым прессом давлением. С целью брикетирования нефтесодержащих и древесных отходов при производстве твердого MSF-топлива предложена схема последовательности операций, представленная на рис. 4.

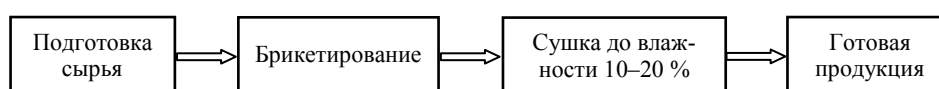


Рис. 4. Последовательность операций при предложенном способе брикетирования

Fig. 4. Sequence in operations while using the proposed briquetting method

Преимуществом такой схемы является исключение возможности самовоспламенения нефтесодержащих отходов при брикетировании топлива за счет отсутствия необходимости нагрева формуемой смеси. Сушку сформованного топлива производят в сушильных камерах, в теплое время года – при температуре наружного воздуха.

Для достижения цели исследования и научных результатов создана опытно-промышленная установка, на которой проведены эксперименты для решения задач описания общих закономерностей процесса, протекающего в установке при получении ТТМ, и оптимизации режима работы установки по производству этого топлива, позволяющего получать максимальное его количество заданного качества и формы в единицу времени. Для решения заданного алгоритма реализации этой научной задачи использовали теорию планирования эксперимента. При ее реализации достигнуты такие условия, при которых получена достоверная информация об объекте и протекающих процессах с количественной оценкой точности метода и регрессионного анализа. Физически реализованные схемы подбора компонентного состава с различной долей нефтесодержащих отходов при различной влажности прессуемой массы в установке для получения ТТМ показали, что на производительность P установки наибольшее влияние оказывают влажность смеси w и доля x нефтесодержащих веществ в фор-

муемой смеси при одинаковом давлении p прессования и температуре T подаваемого сырья.

В качестве иллюстрации на рис. 5 схематично приведена информация, дающая представление об основном комплексе технологического оборудования опытно-промышленной установки, которое позволяет обеспечивать технологический процесс получения ТТМ, включающий следующие этапы: подготовку отходов, измельчение (0,1–8,0 мм), дозирование компонентов и перемешивание, прессование массы, сушку в естественных условиях или сушильной камере.

Установка работает в следующей последовательности: из расходного бункера-смесителя предварительно подготовленная смесь поступает в шнековый пресс, где уплотняется, затем перемещается через коническую формующую насадку шнекового пресса при давлении 20 МПа с образованием внутреннего сквозного продольного отверстия в формируемом брикете.

Основные требования к исходному сырью: древесное сырье (опилки) – не менее 70 % (допускается наличие мелких древесных частиц, коры размером до 10 мм, объемом 20 %); связующее – вязкие нефтеотходы (нефешламы, отработанные нефтепродукты, донные отложения нефтяных мазутных резервуаров и т. п.) – не более 30 %. В нефтеотходах допускается содержание (добавление) ветоши и сорбентов (на основе торфа, мха, лигнина и т. п.), насыщенных нефтепродуктами, до 5 % от общей массы сырья.

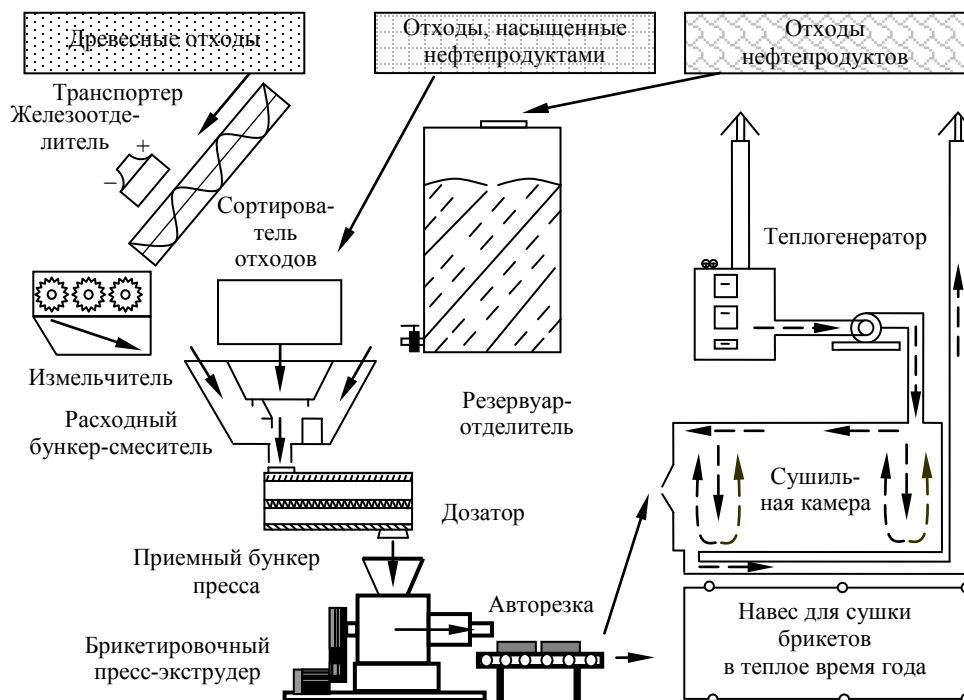


Рис. 5. Схема опытно-промышленной установки

Fig. 5. Scheme of prototype industrial unit

Дозирование компонентов, их перемешивание производится до образования однородной массы с помощью расходного бункера-смесителя, из которого подготовленная масса поступает через загрузочное окно пресса в формующую часть брикетировочного пресса-экструдера. В процессе непрерывного прессования (коническим шнеком) однородная масса уплотняется под воздействием внешней нагрузки, создаваемой модернизируемым шнековым прессом многокомпонентного топлива марки ПМТ-1 или ПМТ-0,3. Внешний вид изготовленных образцов ТТМ показан на рис. 6.

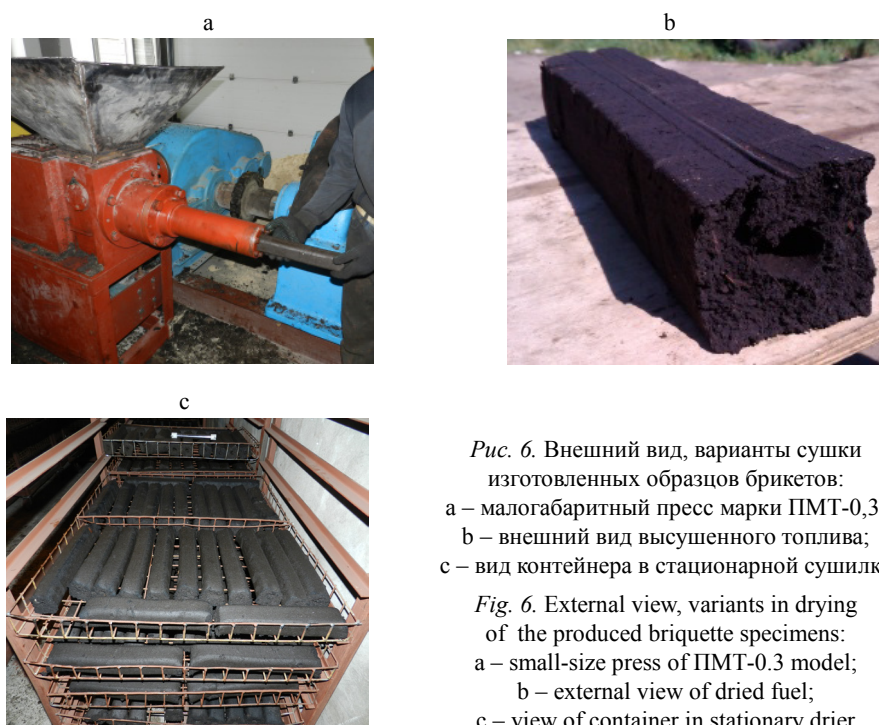


Рис. 6. Внешний вид, варианты сушки изготовленных образцов брикетов:
а – малогабаритный пресс марки ПМТ-0,3;
б – внешний вид высушенного топлива;
с – вид контейнера в стационарной сушилке

Fig. 6. External view, variants in drying of the produced briquette specimens:
a – small-size press of PMT-0.3 model;
b – external view of dried fuel;
c – view of container in stationary drier

Структура брикета образуется путем контактов частиц между собой и через прослойки связующих за счет создаваемых усилий прессования. Многообразие физико-химических и структурно-реологических процессов, которые протекают в период формования структурного каркаса брикета, обусловлено большим количеством необходимых для этого условий.

Среди основных факторов, оказывающих существенное структурообразующее действие, прежде всего следует учитывать гранулометрический состав, геометрический профиль поверхности, влажность и условия смешивания компонентов, давление и температуру прессования. Принцип подбора смеси частиц различной крупности заключается в создании структурной композиции, отвечающей наиболее плотной упаковке, представленной на рис. 7.

Четыре крупные частицы α условно рассматриваются как сферы, которые, касаясь друг друга в точках b , образуют фигуру в виде криволинейного ромба. Свободное пространство между частицами α заполняется зернами β . Далее пространство между частицами α и β заполняют зерна γ и т. д.

Как видно, начиная с зерна α , размеры которого должны быть заданы, существует оптимальная пропорция между размерами частиц β и γ и т. д., при которой достигается наиболее плотная их упаковка. Оптимальное соотношение связующего компонента с частицами гранулометрического состава формируемого топлива позволяет обеспечивать наиболее плотную упаковку частиц в прессуемой смеси ТТМ.

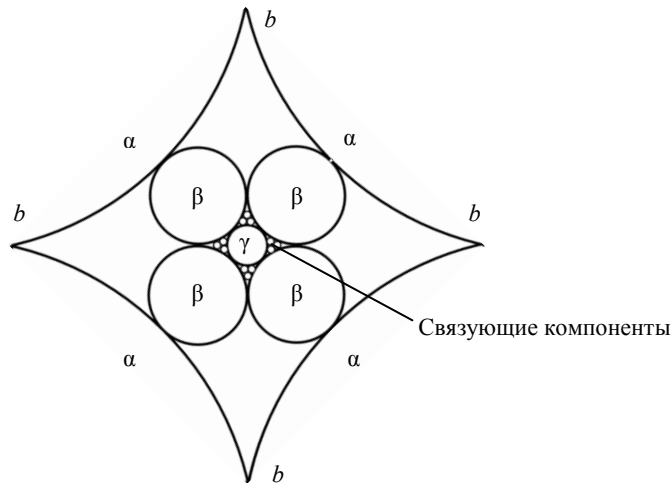


Рис. 7. Схема структуры с наиболее плотной (кубической) упаковкой частиц диаметрами α , β , γ и т. д. в смеси ТТМ

Fig. 7. Scheme of structure with the most density (cubic) packing of particles with diameter α , β , γ etc. in the mixture of multi-component solid fuel

В ходе проведения исследований определены: дисперсия выходных параметров, среднеквадратичные ошибки, доверительные интервалы, значение критерия Фишера F_p . Из результата сравнения F_p и табличного значения критерия Фишера F_t при 5%-м уровне значимости, числе степеней свободы $f = 4$ следует, что представленная модель адекватна изучаемому процессу.

В уравнении регрессии

$$P = b_0 + b_1 z_w + b_2 z_x + b_{12} z_w z_x + b_{21} z_w^2 + b_{22} z_x^2, \quad (1)$$

где b_0 , b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} и b_{22} – коэффициенты полинома при степенях z_w и z_x , произведена замена безразмерных факторов z_w и z_x исходными физическими величинами w и x . Преобразованное уравнение регрессии приобрело вид

$$I(w, x) = \beta_0 + \beta_1 w + \beta_2 x + \beta_{12} wx + \beta_{21} w^2 + \beta_{22} x^2, \quad (2)$$

где β_0 , β_1 , β_2 , β_{12} , β_{21} и β_{22} – коэффициенты полинома при степенях w и x ,

$$\beta_0 = b_0 - \frac{b_1 w_0}{\Delta w} - \frac{b_2 x_0}{\Delta x} + \frac{b_{12} w_0 x_0}{\Delta w \Delta x} + \frac{b_{21} w_0^2}{\Delta w^2} + \frac{b_{22} x_0^2}{\Delta x^2}; \quad \beta_1 = \frac{b_1}{\Delta w} - \frac{b_{12} x_0}{\Delta w \Delta x} - \frac{2b_{21} w_0}{\Delta w^2};$$

$$\beta_2 = \frac{b_2}{\Delta x} - \frac{b_{12}w_0}{\Delta w \Delta x} - \frac{2b_{22}x_0}{\Delta x^2}; \quad \beta_{12} = \frac{b_{12}}{\Delta w \Delta x}; \quad \beta_{21} = \frac{b_{21}}{\Delta w^2}; \quad \beta_{22} = \frac{b_{22}}{\Delta x^2}.$$

По результатам проведенного анализа качественных показателей и полученных данных эксперимента представлены графические зависимости для определения оптимального соотношения компонентов с учетом минимальной влажности при оптимальной производительности и доле содержания нефтешламов.

Зависимости производительности P установки, рассчитанной после сушки брикета до влажности $w = 0,1$, от доли x нефтешламов в прессуемой смеси показаны на рис. 8, а от влажности w прессуемой смеси – на рис. 9.

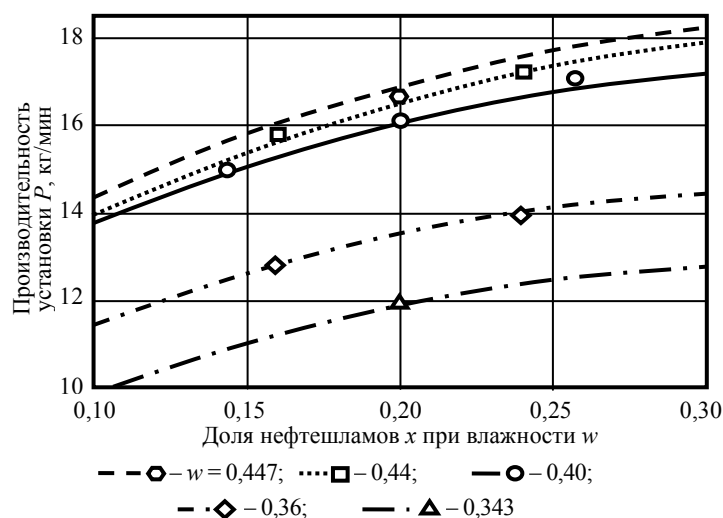


Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для зависимости производительности от доли нефтепродуктов: точки – эксперимент; линии – расчет по уравнению регрессии

Fig. 8. Comparison of calculated and experimental data for dependence of productivity on oil product proportion: dots – experiment; lines – calculation in accordance with regression equation

Согласно построенным зависимостям, с ростом доли x нефтешламов в прессуемой смеси производительность P установки увеличивается; с повышением влажности прессуемой смеси в диапазоне от $w = 0,30$ до $w = 0,43$ также возрастает, а от $w = 0,43$ до $w = 0,60$ – уменьшается.

На основе исследования опытно-промышленных партий ТТМ с различными компонентными составами получены данные по химическому составу, теплоте сгорания, атмосферным выбросам от сжигания, которые позволили определить дополнительные выходные параметры эксперимента и зависимости. Поскольку переход на альтернативное топливо котельных может оказаться нерациональным вследствие значительных капитальных вложений на модернизацию оборудования, в рамках научной работы с учетом полученных данных по химическому составу различных марок топлива, их теплоте сгорания и выбросам загрязняющих веществ при сжигании

разработана математическая модель, позволяющая осуществлять подбор оптимального, с экономической и экологической точек зрения, состава двухкомпонентного топлива (опилки и нефтешламы).

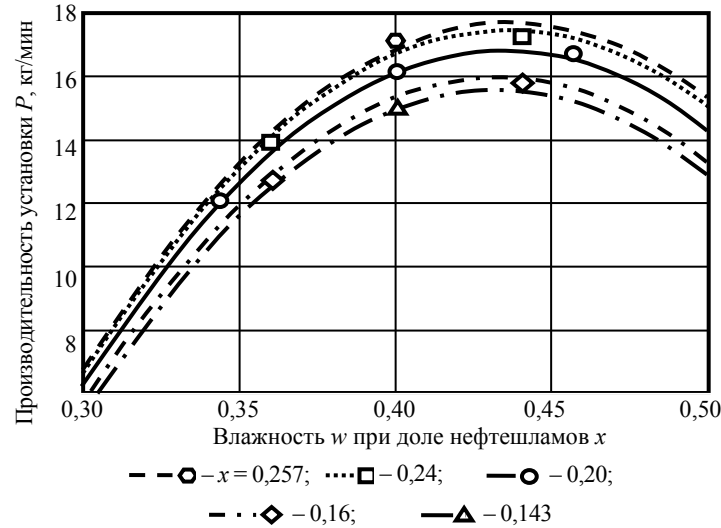


Рис. 9. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для зависимости производительности от влажности:

точки – эксперимент; линии – расчет по уравнению регрессии

Fig. 9. Comparison of calculated and experimental data for dependence of productivity on moisture:

dots – experiment; lines – calculation in accordance with regression equation

Зависимость для безразмерной концентрации q выбросов в атмосферу при сжигании двухкомпонентного твердого топлива получена в виде

$$q(x_1) = \frac{0,1AF_M n m \eta N}{H^2 \sqrt[3]{V \Delta T} [Q_1 x_1 + Q_2 (1 - x_1)] \eta_k} [q_{11}(x_1) + q_{12}(x_1) + q_2(x_1) + q_3(x_1) + q_4(x_1)], \quad (3)$$

где $q_{11}(x_1)$ и $q_{12}(x_1)$ – функции, учитывающие вклад в выбросы оксидов азота,

$$q_{11}(x_1) = \frac{\beta_p}{C_{uNO_2}} \left(1 - \frac{q_{41}}{100}\right) x_1 Q_1 \left[H_{1,T} K_{1,T} \alpha_T \sqrt{\left(1 - \frac{q_{41}}{100}\right) \frac{100N}{[Q_1 x_1 + Q_2 (1 - x_1)] \eta_k}} x_1 Q_1^3 \right];$$

$$q_{12}(x_1) = \frac{\beta_p}{C_{uNO_2}} (1 - x_1) Q_2 \left[H_{2,T} K_{2,T} \alpha_T \sqrt{\frac{100N}{[Q_1 x_1 + Q_2 (1 - x_1)] \eta_k}} (1 - x_1) Q_2^3 \right];$$

$q_2(x_1)$ – функция, учитывающая вклад в выбросы диоксидов серы (двуокиси серы),

$$q_2(x_1) = \frac{20000}{C_{uSO_2}} [x_1 S_{1,r} + (1 - x_1) S_{2,r}] (1 - \eta_{s_1}) (1 - \eta_{s_2}),$$

$q_3(x_1)$ – функция, учитывающая вклад в выбросы окиси углерода,

$$q_3(x_1) = \frac{x_1 C_{1,CO} + (1-x_1) C_{2,CO}}{C_{uCO}},$$

$q_4(x_1)$ – функция, учитывающая вклад в выбросы твердых частиц,

$$q_4(x_1) = \frac{10000}{C_{uPM}} \left[x_1 (1 - \eta_{1,c}) \left(\alpha_{1,ab} A_r + q_{1,ab} \frac{Q_1}{\tau} \right) \right] + \\ + \frac{10000}{C_{uPM}} \left[(1-x_1) (1 - \eta_{2,c}) \left(\alpha_{2,ab} A_r + q_{2,ab} \frac{Q_2}{\tau} \right) \right];$$

τ – безразмерная константа, $\tau = 32,68$.

По результатам расчета $q(x_1) = 0,909$.

Разработанная методика позволяет рассчитывать доли компонентного состава ТТМ, удовлетворяющие индивидуальным особенностям оборудования котельных и экологическим требованиям, предъявляемым к его работе. Полученные зависимости безразмерной концентрации q от доли первого компонента брикета представлены на рис. 10.

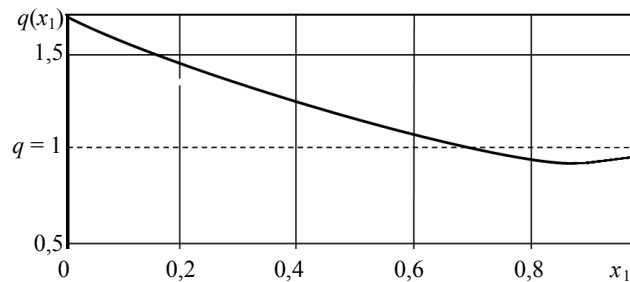


Рис. 10. Зависимость безразмерной концентрации g от доли компонента x_1 (опилки)

Fig. 10. Dependence of dimensionless concentration g on component portion x_1 (sawdust)

Определена доля компонента брикета (опилок), при которой безразмерная концентрация q минимальна. Например, доля отходов опилок x_1 в рабочей массе топлива относительно содержания второго компонента нефтешламов, при котором $q = 1$, составляет $x_1 = 0,676$. По мере уменьшения доли опилок в топливе и увеличения доли нефтешламов концентрация выбросов вредных веществ от сжигания будет превышать предельно допустимые концентрации $q(x_1)$.

Полученные зависимости безразмерной концентрации q вредных выбросов от доли нефтесодержащих отходов (нефтешламов) x в брикетах для различных значений мощности N котельных установок представлены на рис. 11.

Математическая модель и методика расчета выбросов при сжигании разработанного двухкомпонентного твердого топлива, построенная с учетом регла-

ментирующих требований, изложенных в ОНД-86 и ТКП 17.08-01–2006 [7–9], позволяют определить оптимальное соотношение долей компонент в топливе с учетом параметров энергоустановки (мощность, КПД, диаметр устья и высота трубы и т. п.), в том числе и котельной.

Математическая модель за счет суммации вредного воздействия от каждого компонента позволяет найти приведенную концентрацию q , которая определяется как сумма безразмерных приземных концентраций каждого вредного вещества. Такой подход помогает рассчитывать на этапе производства оптимальный, с энергетической и экологической точек зрения, подбор компонентного состава топлива. Это позволяет использовать ТТМ на энергоустановках без дополнительных экономических затрат.

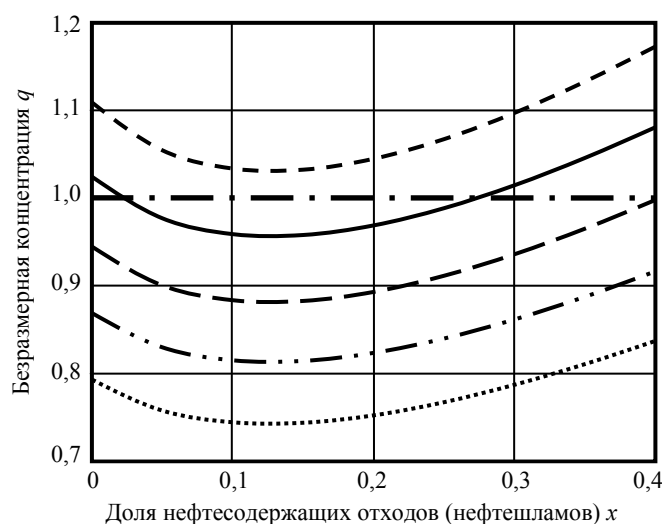


Рис. 11. Зависимость безразмерной концентрации q от доли компонента брикета x :

.... – $N = 14$ МВт; — · — – 15; — — – 16; — — – 17;
— — — – 18 МВт; — · — — – $q = 1,0$

Fig. 11. Dependence of dimensionless concentration q on component portion x (briquette):

.... – $N = 14$ MW; — · — – 15; — — – 16; — — – 17;
— — — – 18 MW; — · — — – $q = 1,0$

Таким образом, получены уравнения, описывающие концентрации выбросов в зависимости от состава предложенного ТТМ. На их основе оптимизирован состав по экологической функции цели, в том числе при сжигании топлива в котельных.

На основании полученных результатов теоретических и практических исследований и в соответствии с техническими нормативно-правовыми актами разработаны ТУ ВУ 490319372.001–2005, прошедшие согласование в установленном законодательством порядке. Изготовленные промышленные партии в соответствии с ТУ прошли испытания с участием представителей Гомельского областного управления по надзору за рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов, предприятий

КУП «Речицаводоканал» и ОДО «ТеплоБел» (г. Гомель) с целью оценки качественных показателей хранения, транспортировки, сжигания ТТМ. Элементные составы горючей массы различных видов топлива приведены в табл. 1.

Таблица 1

Элементные составы горючей массы различных видов топлива

Element compositions of various fuel types

Вид топлива	Рабочий состав топлива (по массе), %				
	Углерод С	Кислород O ₂	Водород H ₂	Азот N ₂	Сера SO ₂
ТТМ с содержанием нефтешламов 25 %*	61,42	31,05	6,43	0,33	0,77
ТТМ с содержанием смеси отработанных нефтепродуктов 30 %*	58,88	36,09	4,56	0,20	0,27
Дрова	51,00	42,30	6,10	0,60	—
Торф	58,00	33,60	6,00	2,10	0,30
RDF-топливо** (нижнее и верхнее значения)	44–51	29–36	5–7	0,9–1,6	0,38–1,46
* Данные получены в аналитической лаборатории РУП «Белгослес». Аттестат аккредитации 02.1.0.0417 № BY/112.					
** Данные по [2].					

Анализ зольности, влаги, теплоты сгорания, содержания серы в процессе проведения испытаний с целью определения и контроля статистически достоверных результатов проводили в специализированных лабораториях на образцах с применением идентичных методов. Теплота сгорания и цена различных видов топлива в Республике Беларусь по состоянию на конец 2015 г. представлены в табл. 2.

Таблица 2

Теплота сгорания и стоимость различных видов топлива (декабрь 2015 г.)

Heating value and cost of various fuel types (December, 2015)

Вид топлива	Теплота сгорания, ккал/кг	Цена, тыс. руб./т	Производитель (поставщик)
ТТМ «Марка-2», $W = 15\%$	4330	590	ОДО «ТеплоБел»
Дрова-поленья (кругляк), $W = 15\%$	2500	620	ЧПУП «Пинскстройлес»
Дрова колотые, $W = 15\%$	2500	950	ЧПУП «Пинскстройлес»
Торфобрикет, W не более 16 %	3600	895	ОАО ТБЗ «Усяж»
Топливный брикет RUF, $W = 12\%$	4100	1416	ОАО «Речицадрев»
Топливный брикет Pini-kay, $W = 9\%$	4890	2000	ООО «Древ-контакт»
Топливные гранулы, $W = 7,7\%$	4570	1900	ИП Бочкарев С.А.
Уголь бурый марки Б-2	4177	1350	ООО «Белкарботранс»
Уголь антрацит марки АМ	6200	2200	ООО «Белкарботранс»

Результаты испытаний показали, что транспортировка россыпью создает максимальную гибкость логистических операций при минимальных за-

тратах с использованием самосвальных транспортных средств, обеспечивающих быструю разгрузку и оборачиваемость транспорта. Места погрузки-выгрузки должны быть оборудованы навесами, препятствующими затеканию дождевых осадков.

Как показала практика, упаковка в контейнеры биг-бэг удобна при транспортировке, обеспечивает защиту топлива от внешних воздействий и позволяет использовать простые технические средства при погрузочно-разгрузочных работах (кран, кран-балка, автопогрузчик, манипулятор). Складирование контейнеров в штабель не должно превышать три ряда.

Возможность использования ТТМ для сжигания в топках, котлах и промышленных котельных согласована с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Сравнение удельных цен различных видов топлива приведено на рис. 12.

Разработаны составы ТТМ четырех марок, которые прошли государственную регистрацию в Государственном центре каталогизации продукции и допущены к реализации потребителям [10]. Разработанные марки топлива защищены патентами [11, 12].

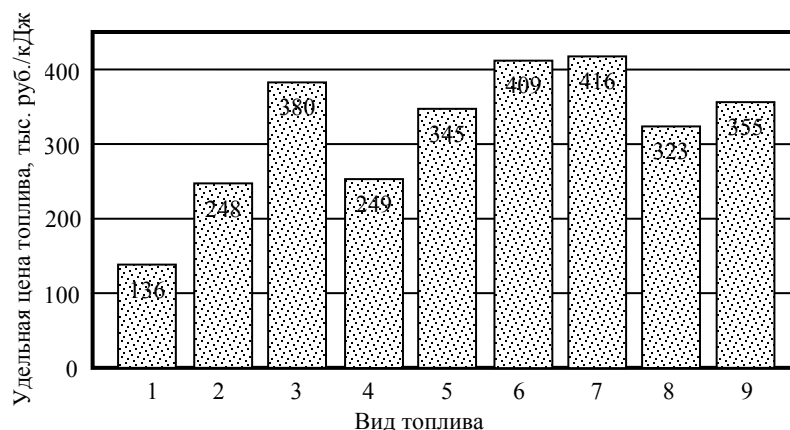


Рис. 12. Сравнение удельных цен различных видов топлива:
1 – ТТМ «Марка-2», $W = 15\%$; 2 – дрова-поленья (кругляк), $W = 15\%$;
3 – дрова колотые, $W = 15\%$; 4 – торфобрикет, W не более 16% ;
5 – топливный брикет RUF, $W = 12\%$; 6 – топливный брикет Pini-kay, $W = 9\%$;
7 – топливные гранулы, $W = 7,7\%$; 8 – уголь бурый марки Б-2;
9 – уголь антрацит марки АМ

Fig. 12. Comparison of unit price of various fuel types
1 – TTM Grade-2, $W = 15\%$; 2 – cordwood (round timber), $W = 15\%$;
3 – chop wood, $W = 15\%$; 4 – peat briquette, W not more than 16% ;
5 – fuel briquette RUF, $W = 12\%$; 6 – fuel briquette Piny-key, $W = 9\%$;
7 – fuel granules, $W = 7,7\%$; 8 – lignite, Grade Б-2;
9 – anthracitic coal, Grade АМ

Технологическая схема получения ТТМ на основе нефтешламов, смеси отработанных нефтепродуктов, донных отложений мазутных резервуаров и древесных отходов внедрена на предприятии ОДО «ТеплоБел». Разрабо-

танный способ позволил утилизировать производственные отходы, образующиеся на предприятиях и не нашедшие технологического применения, что дало возможность осуществить рециклинг более 60 т нефтесодержащих отходов на предприятиях ОАО «Гомельдрев» при строительстве завода по производству плиты МДФ/ХДФ, в значительно меньших объемах — на РДУП «Гомельский завод “Эталон”», в ОАО «Птицефабрика “Рассвет”», ОАО «Гомельский ДСК» и др.

Технологическое объединение насыщенных по химическому составу УВС-отходов позволило получить не только топливо с высокой калорийностью, но и высокий экономический эффект, а в качестве полезного результата иметь не только прибыль, но и экономию ресурсов. Экономический эффект от производства ТТМ заключается в сокращении объемов отходов и расходов на их хранение, а также в обеспечении тепловой энергией собственных потребностей предприятия. При этом стоит учитывать возможность получения дополнительной прибыли от реализации топливных брикетов сторонним промышленным предприятиям и населению. Выполненный экономический расчет ожидаемого экономического эффекта с учетом использования технических характеристик и стоимости оборудования, фактически необходимого соотношения различных используемых компонентов и других затрат, связанных с организацией производства топлива (без учета возведения здания), показал окупаемость создания таких производств в течение 28 месяцев при двухсменном режиме работы и производительности 6 т в смену.

Расчетная экономическая эффективность подтверждается результатами работы внедренной производственной установки в ОДО «ТеплоБел». При этом расчет учитывает, что УВС-отходы, поступающие на переработку, принимаются бесплатно. Однако при изменении структуры издержек в расчете себестоимость ТТМ может быть нулевой, так как в настоящее время на рынке переработки и утилизации отходов нефтепродуктов принципиально изменяются взаимоотношения с собственниками отходов путем компенсации ими затрат на их переработку. В этом случае прибыль предприятия, производящего ТТМ по разработанной технологии, зависит от возможности реализовать свою продукцию по конкурентоспособной цене и от объемов продаж.

Таким образом, внедрение разработанной технологии производства и составов топлива позволяет сократить энергозатраты предприятий, потребляющих твердое топливо, увеличить долю МВТ в энергетическом балансе регионах, а также улучшить экологическую обстановку за счет снижения объемов отходов производства и обеспечить экономию природных ресурсов. Серийное изготовление отечественных установок и их размещение в регионах Республики Беларусь создаст условия, при которых экономятся валютные средства, создаются дополнительные рабочие места, появляется дополнительная возможность экономии на энергоносителях. За счет этого уменьшается зависимость производства от их поставок, что приобретает особое значение в современных экономических условиях.

ВЫВОД

Новым аспектом в формировании представлений о перспективных направлениях эффективного использования вторичных сырьевых ресурсов является создание альтернативного твердого многокомпонентного топлива, позволяющего эффективно использовать вязкие углеводородсодержащие промышленные отходы. Разработанная технология и составы топлива дают возможность получать энергоэффективное топливо с необходимыми теплотехническими характеристиками. Это при системном подходе обеспечит экономию сырья, материалов и топливно-энергетических ресурсов, что является актуальной научно-технической задачей. Ее решение имеет важное практическое значение для увеличения доли местных топливно-энергетических ресурсов, создания стабильной сырьевой базы для энергетических установок, работающих на твердом топливе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мясникович, М. В. Энергетическая безопасность и устойчивое инновационное развитие – основа независимости Республики Беларусь / М. В. Мясникович // Экономика Беларуси. 2007. № 3. С. 22–26.
2. Бушихин, В. В. Альтернативные топлива из твердых отходов. Применение и легализация [Электронный ресурс] / В. В. Бушихин // Экологический вестник России. 2013. № 5. Режим доступа: <http://www.ecovestnik.ru/index.php/obrashchenie-s-otkhodami/1737-alternativnye-topliva-iz-tverdykh-otkhodov-primenenie-i-legalizatsiya>. Дата доступа: 11.08.2015.
3. Экологический бюллетень 2008–2013 гг. [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Режим доступа: <http://minpriroda.gov.by/ru/bulleten-ru>. Дата доступа: 11.08.2015.
4. Севернев, М. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии и местные виды топлива. Ресурсы и перспективы использования в Республике Беларусь / М. М. Севернев, В. В. Кузьмич // Белорусское сельское хозяйство. 2008. № 9 (77). С. 11–15.
5. Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Правила использования углеводородсодержащих отходов в качестве топлива: ТКП 17.11-01–2009. Введ. 01.04.2009. Минск: РУП «БелНИЦ «Экология», 2013. 28 с.
6. Способ получения топлива твердого многокомпонентного: пат. 18408 Респ. Беларусь, МПК С 10 L 5/48, С 10 L 5/06, С 10 L 5/36 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv; дата публ. 30.08.2014.
7. Инженерная экология и очистка выбросов промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов / Б. М. Хрусталеv [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: Вит-постер, 2014. 488 с.
8. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью до 25 МВт: ТКП 17.08-01–2006 (02120). Введ. 01.05.2006. Минск: Минприроды, 2006. 30 с.
9. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Введ. 01.01.1987. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 106 с.
10. Топлива твердые многокомпонентные. Технические условия: ТУ ВУ 490319372.001–2005. Введ. 01.05.2005. Гомель: Теплобел, 2005. 8 с.

11. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18463 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/04, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv; дата публ. 30.08.2014.
12. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18130 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/44, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv; дата публ. 30.04.2014.

Поступила 03.03.2016 Подписана в печать 20.03.2016 Опубликована онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. Myasnikov M. V. (2007) Independence of Belarus is Energy Security Coupled with Sustainable Innovation-Based Development. *Ekonomika Belarusi* [Economy of Belarus], (3), 22–26 (in Russian).
2. Bushikhin V. V. (2013) Alternative Refuse-Derived Fuels. Application and Legalization. *Ekologicheskii Vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia], (5). Available at: <http://www.eco-vestnik.ru/index.php/obrashchenie-s-otkhodami/1737-alternativnye-topliva-iz-tverdykh-otkhodov-primenenie-i-legalizatsiya> (Accessed 11 August 2015). (in Russian).
3. Ecological Bulletin of 2008–2013. *Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus*. Available at: <http://minpriroda.gov.by/ru/bulleten-ru>. (Accessed 11 August 2015). (in Russian).
4. Severnev M. M., Kuzmich V. V. (2008) Non-Conventional and Renewable Energy Sources and Local Fuel Types. Resources and Prospects on Usage in the Republic of Belarus. *Belorusskoye Selskoye Khozyaistvo* [Belarusian Agriculture], 77 (9), 11–15 (in Russian).
5. ТКР 17.11-01–2009. Environmental Protection and Nature Management. Waste. Rules and Regulations on Usage of Hydrocarbon-Containing Waste as Fuel. Minsk, RUE Belarusian Research Center “Ecology”, 2013. 28 (in Russian).
6. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) Method for Obtaining Multi-Component Solid Fuel. Patent Republic of Belarus, no 18408 (in Russian).
7. Khroustalev B. M., Sizov V. D., Brakovich I. S., Zolotareva I. M. (2014) *Engineering Ecology and Purification of Emissions From Industrial Enterprises*. Minsk, Publishing House “Vitpster”. 488 (in Russian).
8. ТКР 17.08-01–2006 (02120). Environmental Protection And Nature Management. Atmosphere. Emissions of Contaminants Into Open air. Procedure For Determination of Emissions During Fuel Burning in The Boilers with Heat Capacity Up to 25 MW. Minsk, Publishing House “Minpriroda”, 2006. 30 (in Russian).
9. OND-86. Methodology for calculation of Contaminant Concentrations in the Atmospheric Air Which are Contained in the Emissions of Industrial Enterprises. Leningrad, Publishing House “Hydrometeoizdat”, 1987. 106 (in Russian).
10. TU BY 490319372.001–2005. Multi-Component Solid Fuel. Technical Specifications. Gomel, Teplobel. 8 (in Russian Unpublished).
11. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) Composition of Multi-Component Fuel for Briquetting. Patent Republic of Belarus, No 18463 (in Russian).
12. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) Composition of Multi-Component Fuel for Briquetting. Patent Republic of Belarus, No 18130 (in Russian).

Received: 3 March 2016

Accepted: 20 March 2016

Published online: 30 March 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-141–150

УДК 622.01; 622.276.654

Об устойчивости фронта вытеснения нефти в условиях термогазового воздействия на пласт

К. В. Доброго¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Термогазовый метод воздействия на пласт является перспективным методом повышения нефтеотдачи и в настоящее время осваивается в Беларуси. Устойчивость температурного фронта и фронта вытеснения нефти – принципиальный вопрос данной технологии. В статье методом малых возмущений решается задача об устойчивости фронта вытеснения нефти при термогазовом воздействии на пласт. Показано, что инкремент роста возмущений отличается от случая фильтрационного горения газа и определяется волновым числом волны возмущения, разностью скоростей фильтрации дутья и фронта тепловыделения, отношением плотностей, коэффициентов фильтрации, сжимаемостей среды дутья и вытесняемой нефти и другими величинами. Проанализированы основные параметры, влияющие на устойчивость фронта. Даны рекомендации по методам и процедурам, повышающим устойчивость (компенсирующим неустойчивость) фронта вытеснения. Механизмами подавления или компенсации возмущений фронта являются: снижение вязкости нефтяной смеси и повышение вязкости дутья; увеличение сжимаемости дутья; увеличение толщины теплового фронта термогазового воздействия прежде всего за счет повышения его температуры и изменения химизма (использование низкотемпературных катализаторов); снижение скорости волны и/или соответственно подачи дутья. Применение воздушного или водовоздушного дутья, а также насыщение воды плохо растворимыми газами обеспечивают относительно большую устойчивость фронта по сравнению с использованием составов на основе воды. Результаты и рекомендации предлагается использовать в рамках общих методик и процедур управления процессом термогазового воздействия в условиях опытной и опытно-промышленной нефтедобычи. Дальнейшие исследования методов и механизмов компенсации неустойчивости фронта, в том числе его динамики на нелинейной стадии, могут быть проведены путем детального многомерного расчета системы.

Ключевые слова: термогазовый метод, нефтеотдача, устойчивость, фронт вытеснения

Для цитирования: Доброго, К. В. Об устойчивости фронта вытеснения нефти в условиях термогазового воздействия на пласт / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 141–150

On Stability of the Oil Displacement Front under Conditions of Thermogas Impact on the Oil Bearing Layer

K. V. Dobrego¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The method of thermogas impact on the oil bearing layer is a perspective one to improve oil recovery. It is now under experimental implementation in Belarus. Stability of

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

the thermal front and that of the oil displacement is a point of principle for the given technology. The article offers solution based on the method of small perturbations for the problem of the oil-displacement front stability under thermogas impact on the oil layer. The perturbation growth increment is shown to be quite different from that of the gas filtration combustion. Being determined by the perturbation wave number (or wave length), by difference in speed of the blowing filtration and that of the heat development front, by the ratios of densities, filtration coefficients, compressibility of the displacement agent and the displaced oil mass, and by other parameters. The author analyses the main parameters influencing the stability of the front. Recommendations are given on possible methods and procedures improving stability of the displacement front (neutralizing perturbation growth). The mechanisms of suppression or compensation of the front perturbation growth are as follows: the crude oil viscosity reduction and increase of that of the displacement agent, the displacement agent compressibility increase, increase of the thermogas impact heat-front width in the first instance at the expense of the temperature growth and alteration in the chemism (low temperature catalysts utilization, etc.), reduction in speed of the front propagation and/or correspondingly of the displacement agent feed. Utilization of the gas or water-gas displacement agent as well as the agent impregnation with hydrophobic gases provides a relatively better stability of the front as compared to that employing water based compounds. Analytical data and derived recommendations are offered for utilization within the framework of general techniques and procedures of the thermogas impact process management in the context of developmental and experimental-industrial oil extraction. Further research into methods and mechanisms of the displacement front perturbation compensation, including the front dynamics at nonlinear stage, might be conducted via detailed 2D and 3D numerical simulation of the system.

Keywords: thermogas method, oil recovery, stability, displacement front

For citation: Dobrego K. V. (2016) On Stability of the Oil Displacement Front under Conditions of Thermogas Impact on the Oil Bearing Layer. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 141–150 (in Russian)

Введение

Термогазовый метод (ТГМ) воздействия на пласт является перспективным методом повышения коэффициента извлечения вязких и трудноизвлекаемых нефтей. Устойчивость теплового фронта и фронта вытеснения – принципиальный вопрос реализации технологии. Несмотря на достаточно проработанную в литературе тему об устойчивости фронтов гидродинамического вытеснения в пористой среде, приложение этой задачи к процессу ТГМ и соответствующий анализ не сделаны. В данной статье на основе классического подхода линейной теории устойчивости выполнен анализ отмеченной задачи. Сделаны выводы о критериях устойчивости и методах ее повышения (компенсации возмущений).

Экспериментальные исследования, проведенные П. Г. Саффманом, Г. И. Тейлором, Р. Л. Чоуком [1–3] и другими, показали, что развитие возмущений плоского фронта вытеснения в пористой среде при нарушении устойчивости происходит в виде неограниченно разрастающихся языков вытесняющей жидкости. Эксперименты на насыпных пористых средах [4] свидетельствуют о том, что нарушение устойчивости происходит при отношении вязкости взаимодействующих жидкостей, превышающем критическое значение 10–15. В то же время при малых скоростях вытеснения возмущения затухают даже при отношениях вязкостей, больших критического значения. Математическая модель развития языков вытесняющей жидкости предложена Г. И. Баренблаттом [5]. Влиянию капиллярных сил на процесс двухфазной фильтрации посвящены работы В. И. Пеньковского [6, 7]. Влияние вибраций на устойчивость плоского фронта вытеснения в пористой среде рассмотрено Д. В. Любимовым [8]. Обобщение модели двух-

фазной фильтрации Рапопорта – Лиса на случай анизотропных пористых сред представлено в работе М. Н. Дмитриева [9]. При этом устойчивость фронтов вытеснения, распространяющихся совместно с тепловыми и концентрационными полями, исследована значительно хуже.

Устойчивость фронта вытеснения нефти при ТГМ может быть описана и исследована традиционными методами, апробированными в теории горения и гидродинамике. В данной статье воспользуемся методом малых возмущений аналогично исследованию устойчивости фронта при фильтрационном горении газов (ФГГ) [10], учитывая физические особенности, отличающие процесс вытеснения нефти при ТГМ.

Постановка и решение задачи

Рассмотрим плоский фронт вытеснения, сформированный равномерно подаваемым дутьем при квазистационарном горении внутри пласта (рис. 1).

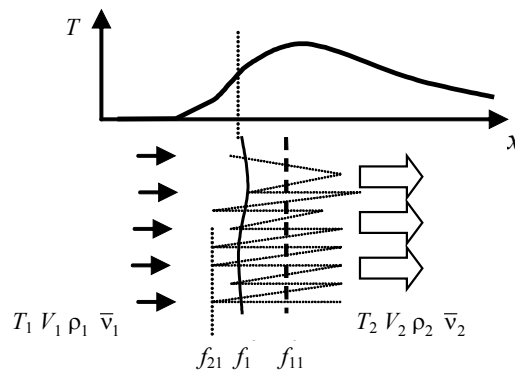


Рис. 1. Схема плоского фронта вытеснения нефти при ТГМ: f_1 – фронт тепловыделения; f_{11} – среднemasсовый фронт вытеснения нефтяной смеси; f_{21} – передний фронт соприкосновения остаточных углеводородов и дутья

Fig. 1. Diagram of the plane front of oil displacement at TGM: f_1 – emission of heat front; f_{11} – average weight displacement front of the crude oil; f_{21} – front contact edge of the residual hydrocarbons and the displacement agent

Ввиду того что закачиваемый газ при высоком давлении и температуре может находиться в сверхкритическом состоянии, не будем употреблять термин «газ», а используем термин «флюид», относя его как к дутью, так и к вытесняемой смеси – нефти с водой дутьем и продуктами горения. В отсутствие горения среднemasсовый фронт вытеснения будет распространяться со скоростью движения флюида дутья V_1 , выполняющего роль поршня, а сам фронт размываться со временем за счет как диффузии флюидов, так и механической дисперсии D_{dis} (задержание и перемешивание нефти в погранслоях и застойных областях пор). Скорость фронта соприкосновения f_{21} может быть связана со скоростью фильтрации дутья $u_{f21} = \text{const} \cdot V_1$.

При горении фронт тепловыделения будет распространяться медленнее вследствие потребления кислорода дутья и встречного теплового потока. При этом скорость фронта вытеснения нефти в общем случае не совпадает со скоростью распространения тепловой волны и определяется комплексом процессов тепло- и массообмена в области фронта, изменения плотности

среды, температуры и состава. Поэтому область гидродинамического и химического взаимодействия дутья и нефти в общем случае может расширяться, сужаться со временем, либо распространяться в квазистационарном состоянии. Собственно, область между f_1 и f_{11} и будем рассматривать как фронт термогазового воздействия на пласт, подлежащий анализу.

Оценка скорости фронта тепловыделения может быть сделана на основе решения системы уравнений баланса теплоты и массы реагентов и химической кинетики численными методами. Приняв гипотезу о том, что фронт тепловыделения движется со скоростью, определяемой скоростью доставки в нее горючего компонента, а нефтенасыщенность пласта обратно пропорциональна ширине области термогазового взаимодействия $L_{ТГМ}$, можно записать условие равенства потоков окислителя и нефти к фронту химического реагирования

$$\rho_1 C_{O_2} [V_1 - u_{f1}] = \rho_2 \xi_{ct} u_{f1} \frac{l_0}{L_{ТГМ}}, \quad (1)$$

где C_{O_2} – концентрация кислорода в дутье; ξ_{ct} – массовый стехиометрический коэффициент для горючего вещества; l_0 – характерный линейный масштаб дисперсии и диффузии, относительно которого оценивается уменьшение содержания нефти в слое вытеснения $l_0/L_{ТГМ}$.

Особенностью данной задачи является разделение фронта тепловыделения (области максимального тепловыделения или максимального градиента температурного фронта) и среднемассового фронта вытеснения. Для гидродинамической задачи границей раздела сред будем считать среднемассовый фронт вытеснения. Примем, что на границе имеет место резкое изменение параметров среды и фильтрации – фронты, разделяющие относительно однородные флюиды, узки по сравнению со всеми характерными размерами пласта. Слева и справа от границы раздела флюиды характеризуются скоростями движения V_1 и V_2 , плотностями ρ_1 и ρ_2 , температурами T_1 и T_2 , вязкостью $\bar{\nu}_1$ и $\bar{\nu}_2$, коэффициентами сжимаемости β_1 и β_2 (рис. 1). Рассматривается двумерная система, где вертикальная координата пласта не учитывается.

Рассмотрим плоский стационарный фронт вытеснения и тепловыделения, моделируемый скачком температуры и плотности флюида. Примем, что длина волны возмущения значительно превышает ширину области прогрева фронта горения. Направление фильтрации флюида совпадает с осью x , положение фронта соответствует нулю, ось y параллельна фронту. Исследуем динамику роста малых деформационных возмущений, длина волны которых значительно превышает ширину фронта. Для гидродинамической задачи исходными являются уравнения фильтрации, неразрывности и состояния для флюида в области фронта вытеснения:

$$u_g = -\kappa \nabla p; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u_g) = 0, \quad (3)$$

где κ – коэффициент фильтрации, $\kappa = k_0/(m\mu)$. Предполагается, что вязкость не зависит от давления.

В отличие от газа флюид обладает малой сжимаемостью, а уравнение состояния для флюида можно приближенно записать в виде

$$\rho = \rho_0(1 - p_0\beta) + \rho_0\beta p, \quad (4)$$

где ρ_0 , p_0 – плотность и давление при фиксированных (стандартных) условиях; $\beta = 1/\rho_0(\partial\rho/\partial p)$ – коэффициент сжимаемости.

Коэффициент сжимаемости нефти зависит от температуры, количества растворенного в нефти газа, фракционного состава. Для дегазированной нефти он колеблется от $4 \cdot 10^{-10}$ до $7 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, а для легких нефтей, в которых растворено значительное количество газа, достигает $140 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$. С повышением температуры сжимаемость растет. Для большинства месторождений нефти сжимаемость не выходит за пределы $(7-30) \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ [11] и для рассматриваемых оценок принята $\beta = 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$.

Подставляя (2) и (4) в (3) и принимая во внимание, что $\beta p_0 \ll 1$, приходим к уравнению нестационарной фильтрации

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\kappa}{\beta} \Delta(p). \quad (5)$$

Связь между деформацией фронта горения и возмущением поля фильтрации устанавливается исходя из известной зависимости между скоростью волны ФГГ и скоростью фильтрации флюида [10]

$$u_w = u_w(u_g). \quad (6)$$

В отличие от случая газовой фильтрации, уравнение (5) – линейное. Следовательно, суперпозиция его решений также является решением, и возмущение должно удовлетворять (5) независимо от вида основного невозмущенного решения. Для определенности считаем, что невозмущенное решение характеризуется скоростью движения фронта u_w , давлением $p = C_1 + xC_2$ (стационарное решение (5)), нормальной к фронту скоростью фильтрации V_1 в области перед фронтом и $V_2 = (\rho_1/\rho_2)V_1$ – за фронтом.

Найдем функцию возмущения давления, удовлетворяющую (5) и отвечающую требованиям обращения в нуль на бесконечности и периодичности по поперечной координате:

$$p \sim \exp(ik_y y \pm k_x x + \Omega t), \quad (7)$$

где Ω – временной инкремент роста возмущения $\Omega = (\kappa/\beta)(k_x^2 - k_y^2)$.

Согласно (7), для квазистационарных процессов $k_{x,1} \approx k_{y,1} = k_{y,2} \approx k_{x,2}$, что позволяет опустить индексы при k везде, где их различия несущественны; индексы 1 и 2 относятся к области исходной смеси дутья и продуктов вытеснения соответственно. Используя (7) и (2), условия обращения возмущения в нуль на бесконечности, а также тождественность поперечного масштаба возмущений давления и деформации фронта, ищем решение для величин возмущения давления, скорости и положения фронта в виде:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= A \exp(ik_y y + k_x x + \Omega t); \\
 v_1 &= -\kappa_1 k_x A \exp(ik_y y + k_x x + \Omega t); \\
 u_1 &= -i\kappa_1 k_y A \exp(ik_y y + k_x x + \Omega t); \\
 p_2 &= B \exp(ik_y y - k_x x + \Omega t); \\
 v_2 &= \kappa_2 k_x B \exp(ik_y y - k_x x + \Omega t); \\
 u_2 &= -i\kappa_2 k_y B \exp(ik_y y - k_x x + \Omega t); \\
 f &= C \exp(ik_y y + \Omega t),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где v , u – нормальная и касательная к начальному фронту составляющие возмущения скорости фильтрации; f – функция смещения (деформации) фронта вытеснения/горения.

Для определения постоянных A , B , C в (8) сформулируем граничные условия на разрыве (фронте). Условие равенства возмущений давлений не может быть использовано, поскольку в принятом виде решений (8) оно приводит к нарушению сохранения потока массы через границу. Действительно, если положить $A = B$, то, согласно (8), нормальные составляющие скорости на фронте имеют разные знаки ($v_1 = -(\kappa_1/\kappa_2)v_2$), что противоречит условию неразрывности. Поток импульса не сохраняется отдельно для флюида, так как при фильтрации принципиальное значение имеет взаимодействие флюида и пористой среды. Поэтому в качестве граничных условий используем уравнение сохранения потока массы, уравнение изменения тангенциальной составляющей скорости фильтрации и уравнение, связывающее скорость фильтрации и скорость движения фронта. Первые два условия, записанные для малых амплитуд деформации, дают:

$$\alpha(f'_t - v_1) = f'_t - v_2; \tag{9}$$

$$\left(\frac{\kappa_2 \beta_1}{\kappa_1 \beta_2}\right) u_1 + \left(\frac{\kappa_2 \beta_1}{\kappa_1 \beta_2}\right) (V_1 + v_1 - u_w) f'_y = u_2 + (\alpha(V_1 - u_w) + v_2) f'_y, \tag{10}$$

Для записи третьего условия используем уравнение (6) в предположении, что $v_1 \ll V_1$:

$$f'_t = \varepsilon v_1, \tag{11}$$

где $\alpha \equiv \rho_1/\rho_2$; u_w – скорость невозмущенного фронта волны термогазового воздействия; $\varepsilon \equiv \partial u_w / \partial u_g$ – отклик фронта горения на изменение скорости фильтрации (определяемый тепломассообменом во фронте горения).

Заметим, что уравнение (10) не следует из условия сохранения потока импульса или галилеевой инвариантности явления, подобно случаю свободного пламени, и не соответствует принятому в [12]. Его можно получить исходя из (2) и непрерывности давления при фильтрации. Действи-

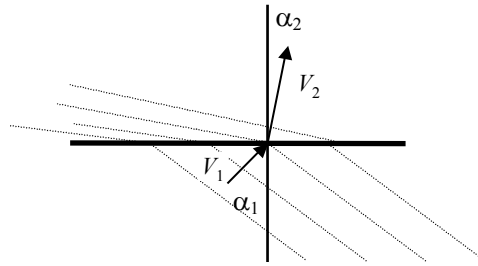
тельно, из непрерывности давления на границе фронта горения (непрерывность изобар на рис. 2) и из геометрических соображений следует $|\nabla p_1| \sin \alpha_1 = |\nabla p_2| \sin \alpha_2$. Тогда тангенциальная компонента скорости до разрыва $u_1 = (\kappa_1/\beta_1)|\nabla p_1| \sin \alpha_1$, а после разрыва $u_2 = (\kappa_2/\beta_2)|\nabla p_2| \sin \alpha_2 = (\kappa_2\beta_1/\kappa_1\beta_2)u_1$, т. е. сохраняется с точностью до множителя $\kappa_2\beta_1/\kappa_1\beta_2$. Это поясняет рис. 2.

Рис. 2. Пояснение к выводу (10):

$V_1, V_2, \alpha_1, \alpha_2$ – скорости и углы отклонения скорости фильтрации от нормали до фронта вытеснения и после него соответственно; штриховые линии – изобары

Fig. 2. Explanation for the conclusion (10):

$V_1, V_2, \alpha_1, \alpha_2$ – speeds and angles of the filtration speed deviation from the normal before the displacement front and after it respectively; dashed lines – isobar



Пренебрегая величинами возмущений скорости (но не скоростью движения фронта) по сравнению с v , а также учитывая, что при малых амплитудах деформации $\exp(k_x x) \approx 1$, подставляем (8) в уравнения (9)–(11):

$$\alpha \Omega C + \alpha \left(\frac{\kappa_1}{\beta_1} \right) kA = \Omega C - \left(\frac{\kappa_2}{\beta_2} \right) kB; \quad (12)$$

$$\left(\frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right) [V_1 - u_w] kC - \left(\frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right) \left(\frac{\kappa_1}{\beta_1} \right) kA = \alpha [V_1 - u_w] kC - \left(\frac{\kappa_2}{\beta_2} \right) kB; \quad (13)$$

$$\Omega C = -\varepsilon \left(\frac{\kappa_1}{\beta_1} \right) kA. \quad (14)$$

При выводе граничных условий и системы уравнений (12)–(14) использовано условие малости амплитуды деформации фронта, а малость амплитуды возмущения давления в явном виде не требовалась. После исключения неизвестных из (12)–(14) получим

$$\Omega = \varepsilon k [V_1 - u_w] \frac{\alpha - \left(\frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right)}{\alpha + \left(\frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right)}. \quad (15)$$

Для случаев ФГГ и ТГМ значения параметров в (15) существенно различаются. Если в первом варианте $\alpha = \rho_1/\rho_2 = T_2/T_1 \gg 1$, то во вто-

ром $\alpha = \rho_1/\rho_2 \sim 1$. Величина $\kappa_2/\kappa_1 \sim \sqrt{T_1/T_2} < 1$ в первом случае и также меньше единицы во втором из-за более высокой вязкости нефти. Таким образом, формула (15) приводит к различным выводам для упомянутых случаев – абсолютной неустойчивости фронта ФГГ с $\Omega \sim ku_w$ и условной неустойчивости фронта ТГМ при

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} - \frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} > 0 \text{ или } \rho_1\kappa_1\beta_2 > \rho_2\kappa_2\beta_1. \quad (16)$$

Учитывая определение коэффициента фильтрации $\kappa = k_0/(m\mu)$ и кинематической вязкости $\bar{\nu} = \mu/\rho$, условие неустойчивости (16) сведется к требованию $\bar{\nu}_2\beta_2 > \bar{\nu}_1\beta_1$. Таким образом, предпосылкой для неустойчивости фронта вытеснения при ТГМ являются высокая кинематическая вязкость и сжимаемость нефтяного флюида по сравнению с дутьем. Отсюда следует, что вытеснение несжимаемым водным раствором способствует неустойчивости, а использование газового или водогазового дутья – стабилизации фронта вытеснения. Из данного анализа следует, что при прогреве нефтяного флюида и образовании теплового фронта устойчивость фронта вытеснения повышается.

Для случая ФГГ [10] существенным фактором, оказывающим влияние на характер неустойчивости, является изменение теплового баланса области участка сечения за счет изменения кривизны фронта. Для ФГГ данный эффект приводит к появлению устойчивости малых по длине волны возмущений при неустойчивости длинноволновых возмущений. Количественной мерой этого влияния служит коэффициент γ

$$u_w = u_{w,0} + \gamma u_t f_x'' \quad (17)$$

Коэффициент γ оценивается через толщину теплового фронта Δx и безразмерную скорость его движения

$$\gamma = 2\Delta x \left(\frac{u_w}{u_t} \right).$$

В случае ТГМ [3] ширина фронта может составлять несколько метров в силу низкой максимальной температуры, а безразмерная скорость может примерно соответствовать скорости тепловой волны $u_w/u_t \sim 1$. Инкремент роста возмущения имеет вид

$$\Omega = \varepsilon k [V_1 - u_w] \frac{\alpha - \left(\frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right)}{\alpha + \left(\frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right)} - \gamma u_t k^2. \quad (18)$$

Оценивая порядок $\gamma u_t k^2$, можно показать, что неоднородности с характерными длинами волн около нескольких толщин фронта будут подавлять-

ся термическими механизмами. При скорости фронта, близкой к скорости фильтрации дутья, эффективность подавления неустойчивостей за счет теплового потока резко возрастает.

ВЫВОДЫ

1. Вопрос о гидродинамической устойчивости фронта вытеснения и связанного с ним температурного фронта термогазового взаимодействия рассмотрен аналитически в приближении малых возмущений. Показано, что отношение кинематических вязкостей флюида дутья и нефтяной смеси является основным критерием устойчивости.

2. Разогрев нефтяной смеси способствует повышению устойчивости фронта вследствие снижения вязкости нефтяной смеси за счет прогрева и насыщения продуктами окисления, а также тепловой компенсации искривления температурного фронта. Механизмами подавления или компенсации возмущений фронта являются: снижение вязкости нефтяной смеси и повышение вязкости дутья; увеличение толщины теплового фронта термогазового взаимодействия прежде всего за счет повышения его температуры и изменения химизма (использование низкотемпературных катализаторов); снижение скорости волны и/или соответственно подачи дутья.

3. Применение воздушного или водовоздушного дутья, а также насыщение воды плохо растворимыми газами обеспечивают относительно большую устойчивость фронта по сравнению с использованием составов на основе воды. В результате анализа можно предположить осуществление пульсирующих режимов термогазового взаимодействия, обусловленных снижением/прекращением химического тепловыделения при расширении области термогазового взаимодействия дутья и нефти и увеличением проницаемости пласта в области, подверженной локально избыточному тепловому воздействию и окислению вследствие неоднородности/искривления фронта. Для дальнейших исследований методов и механизмов компенсации неустойчивости фронта, в том числе его динамики на нелинейной стадии, следует провести детальный многомерный расчет системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Saffman, P. G. The Penetration of a Fluid Into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid / P. G. Saffman, G. I. Taylor // Proc. R. Soc. London, 1958. A245, P. 321–329.
2. Saffman, P. G. Viscous Fingering in Hele-Shaw Cells / P. G. Saffman // J. Fluid Mech. 1986. No 173. P. 73–94.
3. Chouke, R. L. Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media / R. L. Chouke, P. Meurs, C. Poel // Pet. Trans. AIME. 216. 1959. P. 188–194.
4. Рыжик, В. М. Исследование устойчивости движения раздела воды и нефти / В. М. Рыжик, Б. Е. Кисленко // ВНК. Физико-геологические факторы при разработке нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений. М.: Недра, 1969. С. 82–92.
5. Баренблатт, Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. М.: Недра, 1984. 207 с.

6. Разработка целиков нефти при воздействии на пласт химических реагентов / В. И. Пеньковский [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54, № 3. С. 87–94.
7. Остаточные нефтенасыщенные зоны продуктивных пластов и способы воздействия на них с целью вовлечения в разработку / В. И. Пеньковский [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 5. С. 41–51.
8. Любимов, Д. В. Влияние вибраций на устойчивость плоского фронта вытеснения в пористой среде / Д. В. Любимов, Г. А. Седелников // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. Т. 41, № 1. С. 6–14.
9. Дмитриев, М. Н. Модель двухфазной фильтрации Рапопорта – Лиса в анизотропных средах / М. Н. Дмитриев // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. Т. 46, № 2. С. 136–144.
10. Доброго, К. В. Физика фильтрационного горения газов / К. В. Доброго, С. А. Жданок. Минск: Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, 2002. 204 с.
11. Щелкачев, В. Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации / В. Н. Щелкачев. М.: Нефть и газ, 1995. 493 с.
12. Минаев, С. С. О неустойчивости фронта пламени при фильтрационном горении газов / С. С. Минаев, С. И. Потытняков, В. С. Бабакин // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 6. С. 49–54.

Поступила 11.01.2016 Подписана в печать 12.03.2016 Опубликовано онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. Saffman P. G., Taylor G. I. (1958) The Penetration of a Fluid Into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid. *Proceedings of the Royal Society of London*, A245, 321–329.
2. Saffman P. G. (1986) Viscous Fingering in Hele-Shaw Cells. *Journal of Fluid Mechanics*, 173, 73–94.
3. Chouke R. L., Meurs P., Poel C. (1959) Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media. *Trans. AIME*, 216, 188–194.
4. Ryzhik V. M., Kislenko B. Ye. (1969) Investigation of Dynamic Stability of Oil-Water Interface. *Physical-Geological Factors at Development of Oil and Oil-Gas Condensate Fields*. Moscow, Nedra, 82–92 (in Russian).
5. Barenblatt G. I., Yentov V. M., Ryzhik V. M. (1984) *Liquid and Gas Motion in Natural Formations*. Moscow, Nedra. 207 (in Russian).
6. Penkovskii V. I., Korsakova N. K., Altunina L. K., Kuvshinov V. A. (2013) Development of Unrecovered Oil Affecting the Formation by Chemical Reagents. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 54 (3), 415–422 DOI: 10.1134/S0021894413030103.
7. Penkovskii V. I., Korsakova N. K., Simonov B. F., Savchenko A. V. (2012) Residual Oil-Saturated Zones of Productive Strata and Methods of Affecting them Towards Involvement Into Development. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh* [Physicotechnical Challenges of Mining], (5), 41–51 (in Russian).
8. Lubimov D. V., Sedelnikov G. A. (2006) Effect of Vibration on the Stability of a Plane Displacement Front in a Porous Medium. *Fluid Dynamics*, 41 (1), 3–11. DOI: 10.1007/s10697-006-0016-0.
9. Dmitriev M. N. (2011) Rapoport – Leas Two-Phase Flow Model for Anisotropic Porous Media. *Fluid Dynamics*, 46 (2), 291–298. DOI: 10.1134/S0015462811020128.
10. Dobrego K. V., Zhdanok S. A. (2002) *Physics of Filtrational Combustion of Gases*. Minsk: Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus. 204 (in Russian).
11. Shchelkachev V. N. (1995) *Basis and Applications of the Unsteady Flow Theory*. Moscow, Neft i gaz. 493 (in Russian).
12. Minaev S. S., Potytnyakov S. I., Babakin V. S. (1994) On Instability of Flame Front During Filtrational Combustion of Gases. *Vizika Goreniya i Vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 30 (6), 761–763. DOI: 10.1007/BF00755247.

Received: 11 January 2016

Accepted: 12 March 2016

Published online: 30 March 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-151–167

УДК [67/68:658.264]:005.591.1

К вопросу рационального построения теплоэнергетической системы текстильных и трикотажных предприятий

В. Н. Романюк¹⁾, Д. Б. Муслина¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассматривается рациональное с позиции структуры и параметров потоков построение теплоэнергетической системы промышленного предприятия (ТЭСПП). Совершенствование ТЭСПП является одним из основных путей реализации энергосберегающего потенциала в объемах, которые отвечают требованиям времени по снижению энергетической составляющей себестоимости продукции. Это особенно актуально для предприятий легкой промышленности Беларуси. Для снижения сложности задачи привлекается иерархическое построение ТЭСПП. В отношении текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности показано несовершенство энергообеспечения, с одной стороны, и энергоиспользования – с другой. Отделочные производства указанных предприятий обеспечивают им статус теплотехнологических. Общеизвестно, что совершенные в энергетическом отношении теплотехнологические предприятия не должны потреблять электроэнергию, произведенную на конденсационных тепловых электростанциях. Им следует использовать ТЭЦ для обеспечения производств тепло- и электроэнергией. Вместе с тем паротурбинные ТЭЦ малой мощности и, как следствие, низких начальных параметров не могут обеспечить требуемое соотношение генерации потоков электрической и тепловой энергии. Указанное обстоятельство является одной из причин доминирования конденсационных тепловых электростанций в структуре электрогенерирующих мощностей, обеспечивающих работу предприятий легкой промышленности. Это и приводит к несовершенству их энергообеспечения. Переход на газовые ТЭЦ, характеризующиеся требуемой структурой генерации энергопотоков, прежде всего связан с созданием собственных генерирующих источников. Это, в свою очередь, ставит ряд задач по изменению схем тепловой обработки технологических потоков. Задача решается в комплексе с совершенствованием энергопотребления отделочного производства и предприятия в целом. Показана возможность применения наряду с паровым водяным теплоносителем. Это открывает путь к рекуперативному использованию энергии побочных низкотемпературных потоков производства, утилизации их энергии с помощью абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов. Подобное совершенствование энергоиспользования с позиций системного подхода в условиях Беларуси является задачей более высокого приоритета, чем переход к когенерационному энергообеспечению.

Ключевые слова: термодинамический анализ, модернизация, рекуперация, когенерация, абсорбционные бромисто-литиевые тепловые насосы, экономическая целесообразность, факторы риска

Для цитирования: Романюк, В. Н. К вопросу рационального построения теплоэнергетической системы текстильных и трикотажных предприятий / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 151–167

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

On the Issue of Rational Organization of the Textile and Knitwear Enterprises Heat and Power Supply System

V. N. Romaniuk¹⁾, D. B. Muslina¹⁾

Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers organization of the industrial enterprise heat and power supply system (HPSS), to be rational from the structure and flow parameter standpoint. Developing HPSS is one of the main lines of implementing energy-saving potential in volumes complying with dictates of the time on reducing the production cost energy component, which is especially vital for the light industry enterprises of Belarus. To reduce the complexity of the task the authors employ the hierarchical structure of HPSS. With regard to textile and knitwear enterprises, they show the irregularity of energy supply on the one hand, and of energy use on the other. The finishing departments of the specified enterprises ensure their thermo-technological status. It is proverbial that accomplished in terms of energy thermo-technological enterprises should not consume the electric energy produced in condensation electric power plants. Instead, for their production needs, they should use thermal energy and electricity generated in the CHP. At the same time, steam turbine CHPs of low power, and consequently of low initial parameters, cannot provide the required electrical and heat energy flow generation balance. The indicated circumstance among others accounts for prevalence of condensation electric power plants in the scheme of electrogenerating capacities that provide work for the light industry enterprises. And this leads to irregularity of their energy supply. Transition to gas CHPs with required scheme of the energy flow generation is associated primarily with creation of inherent generating sources, which in its turn poses a number of challenges on modification of the thermal treatment schemes of technological flows. The problem is solved in package with developing energy consumption of the finishing department as well as the entire enterprise. The study shows the capability of utilizing low pressure hot water alongside with steam, which paves the way to the recuperative use of the secondary low-temperature heat flows – utilizing their energy by engaging lithium-bromide absorption heat pumps. The congruous development of energy utilization from the position of systems approach in the context of Belarus is the task of a higher priority than transition to cogeneration energy supply.

Keywords: thermodynamic analysis, modernization, resource recovery, cogeneration, lithium-bromide absorption heat pumps, economic feasibility, risk factors

For citation: Romaniuk V. N., Muslina D. B. (2016) On the Issue of Rational Organization of the Textile and Knitwear Enterprises Heat and Power Supply System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 151–167 (in Russian)

Введение

В соответствии с методологией интенсивного энергосбережения для реализации максимального энергосберегающего потенциала производства необходим системный подход к решению задачи и максимальное расширение границ энергосберегающей базы. Традиционная методология энергосбережения при дискретном подходе к достижению цели в рамках отдельных агрегатов не может обеспечить решение задач по снижению энергетической составляющей производства [1–3]. Дальнейшее продвижение в рассматриваемом проблемном поле связано с построением теплоэнергетической системы промышленного предприятия (ТЭСПи) рациональной в целом структуры (рис. 1) – пути, который в большинстве случаев не используется, например в ходе традиционных энергоаудитов.

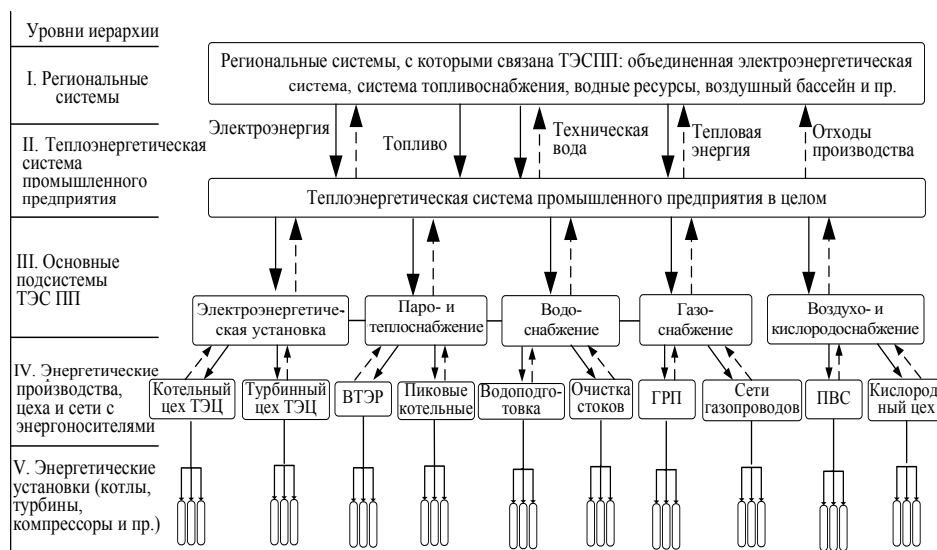


Рис. 1. Иерархическая структура теплоэнергетической системы промышленного предприятия [4]: I–V – иерархические уровни

Fig. 2. Hierarchic structure of the industrial enterprise heat and power system [4]: I–V – hierarchic levels

При реструктуризации имеющейся теплоэнергетической системы промышленного предприятия и ее совершенствовании удобно использовать иное иерархическое построение, отражающее взаимную значимость и функциональные назначения теплотехнологических и теплоэнергетических установок (рис. 2). В [5–7] рассмотрены варианты совершенствования отдельных подсистем отделочного производства. В данном случае приведены результаты, полученные при расширении энергосберегающей базы, для которой создается соответствующая теплоэнергетическая система на примере ОАО «Барановичское производственное хлопчатобумажное объединение» (ОАО «БПХО»).

Существующее положение. Энергетический анализ

ОАО «БПХО» находится в зоне теплоснабжения Барановичской ТЭЦ, энергетические возможности которой сравнительно невелики: удельная выработка электроэнергии составляет 114 кВт·ч/Гкал, электрический абсолютный КПД паровой турбины на потоке пара равен 12 %. КПД использования топлива 80 %. Этими относительно низкими показателями объясняется достаточно неожиданная структура источников энергообеспечения чисто теплотехнологического предприятия, находящегося в зоне ответственности ТЭЦ и не имеющего каких-либо собственных энергогенерирующих источников, для которого большая часть электроэнергии генерируется КЭС (рис. 3).

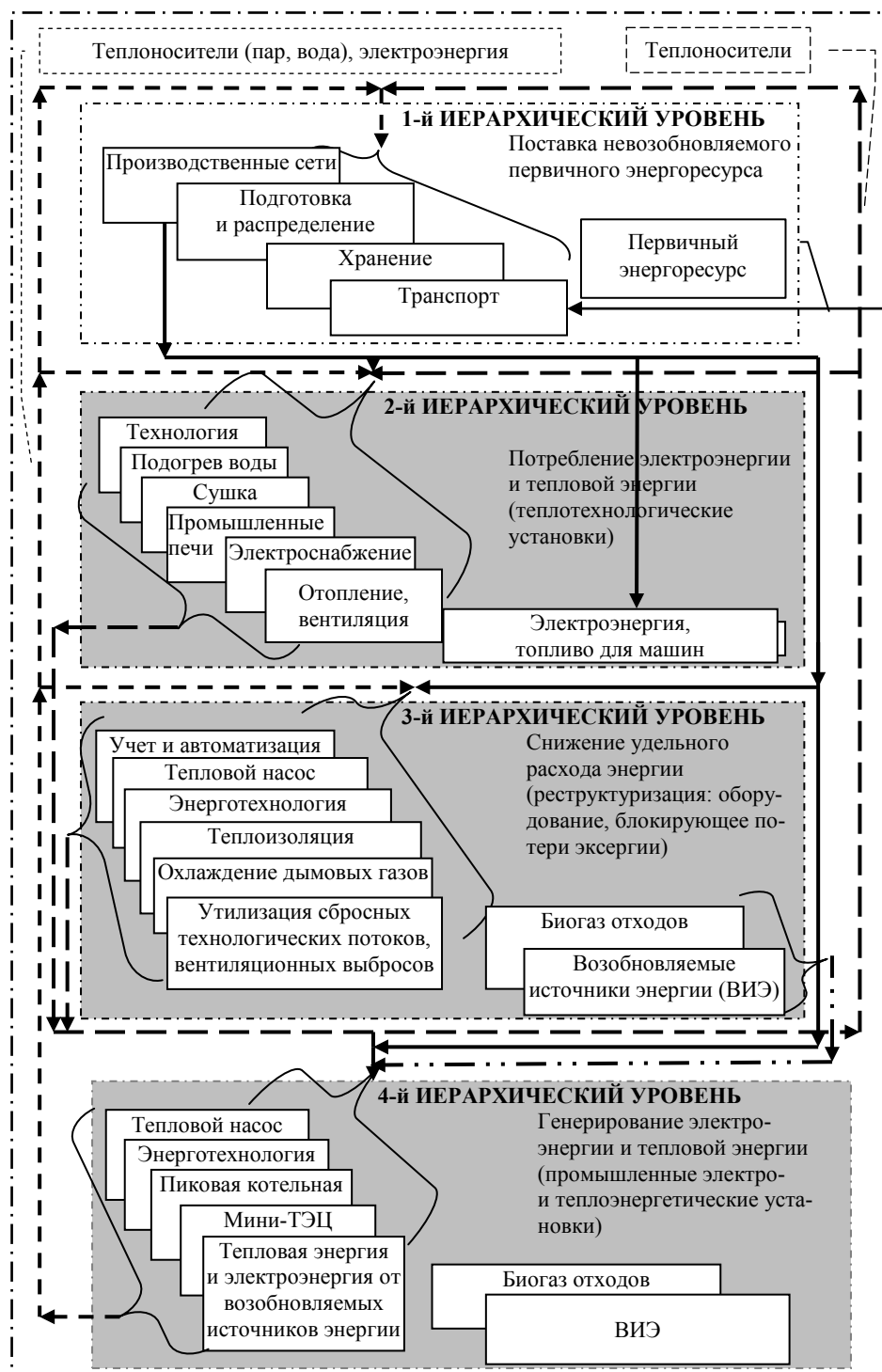


Рис. 2. Структурная схема теплоэнергетической системы с разнесением ее подсистем по иерархическим уровням [3]

Fig. 2. Block schematic diagram of the heat and power system with its subsystems hierarchic levels diversion [3]

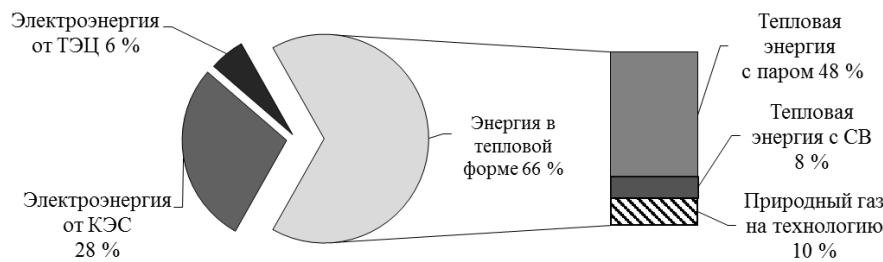


Рис. 3. Структура приходной части энергобаланса ОАО «БПХО»

Fig. 3. JSC 'BPKhO' energy-balance input scheme

Из анализа структуры приходной части энергобаланса ОАО «БПХО» следует:

1) предприятие теплотехнологическое, электрическая составляющая меньше тепловой в два раза и равна 34 %, что соответствует среднестатистической структуре энергопотребления промышленного сектора Беларуси [8];

2) большая часть электроэнергии (до 80 %) для предприятия генерируется не на Барановичской ТЭС по комбинированной технологии, а на конденсационных мощностях энергосистемы с потерями в ходе транспортирования и трансформации электроэнергии от КЭС до потребителя. Для такого теплотехнологического предприятия, каким является ОАО «БПХО», оказывается, что в структуре генерации на подобных паротурбинных ТЭС имеет место дефицит электроэнергии, для покрытия которого необходимы КЭС. Этот вывод важен для обоснования решений о необходимости совершенствования энергообеспечения предприятия, поскольку «в установке с совершенным энергетическим балансом не должна потребляться электроэнергия и не должен конденсироваться пар над холодной водой или в холодном воздухе» [9];

3) основное потребление теплоты (73 % энергии, потребляемой в тепловой форме) диктуется технологией и связано с паровым теплоносителем. Отопительная нагрузка и потребление природного газа на технологию имеют существенно меньший вес.

Для оценки эффективности существующего энергопотребления предприятия обратимся к абсолютным и относительным эксергетическим характеристикам [10], которые рассчитаны ранее в ходе термодинамического анализа на базе эксергетического метода для отдельных подсистем предприятия [5]. Для всей ТЭСПП ОАО «БПХО» результаты термодинамического анализа приведены в табл. 1, пояснения к которой показаны на рис. 4.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что энергопотребление ОАО «БПХО» в рассматриваемом периоде характеризуется крайне низкой термодинамической эффективностью, а системы энергообеспечения требуют принципиальной перестройки. Для улучшения ситуации следует блокировать потери эксергии – как внутренние D_i , так и внешние D_e . Результатом этого станет улучшение значений целевых функций: сниже-

ние абсолютного расхода энергии за счет совершенствования энергопотребления предприятием и уменьшение расходов на энергообеспечение производства за счет повышения эффективности использования первичного энергоресурса при генерации тепловой и электрической энергии.

Таблица 1

Основные энергетические и эксергетические характеристики работы ОАО «БПХО» в штатном режиме за рабочие сутки отопительного периода

JSC 'BPKhO' general energy and exergetic normal mode performance characteristics during a working day in the heating season

Наименование показателя	Обозначение	Значение (контрольная поверхность на границе)	
		предприятия*	энергосистемы*
Энергетический КПД _э , %	$\eta_{\text{э}}$	0,004	0,002
Степень термодинамического совершенства технической системы (ТС), %	ν	27,0	9,5
Термодинамический КПД _е , %	$\eta_{\text{е}}$	0,006	0,002
Степень технологического совершенства, %	β	73	90,5
Степень полного совершенства ТС, %	μ	0,0047	0,0019
Затраты энергии на тонну материала с учетом электроэнергии, ГДж/т	q	90,7	181,5
Затраты эксергии на тонну материала, ГДж/т	e	55,7	172,4
Потери эксергии по отношению к ее значению на входе, ГДж/т, в том числе	D	56,0	172,6
внешние	D_i	1,4	6,4
внутренние	D_e	54,6	166,2

* Пояснения на рис. 4.



Рис. 4. Структурная схема к расчету балансов энергии и эксергии для ОАО «БПХО» по результатам 2013 г.: ПТП – побочные тепловые потоки; ТВ – техническая вода; ОСВ – обратная сетевая вода; ПСВ – прямая сетевая вода; ПГ – природный газ; Q_{oc} – потери в отопительной сети

Fig. 4. Block schematic diagram to calculation of JSC 'BPKhO' energy and exergy balances on results of 2013: ПТП – secondary heat fluxes; ТВ – service water; ОСВ – return heating-system water; ПСВ – heating water; ПГ – natural gas; Q_{oc} – losses in heating system

На неблагоприятное положение с обеспечением преобразованных видов энергоресурсов указывает значительное ухудшение относительных характеристик (в 2–3 раза) при расширении контрольной поверхности анализируемой технической системы, когда в ее состав входят подсистемы преобразования топлива в требуемые для технологии энергоресурсы: тепловая энергия и электроэнергия (рис. 3, 4, табл. 1).

Реструктуризация теплоэнергетической системы предприятия

Для рационализации энергопотребления в состав существующей ТЭСПП дополнительно интегрированы подсистемы рекуперации, утилизации теплоты низкотемпературных побочных потоков с помощью абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов и абсорбционных холодильных машин, паровые и водяные тепловые аккумуляторы (рис. 5).

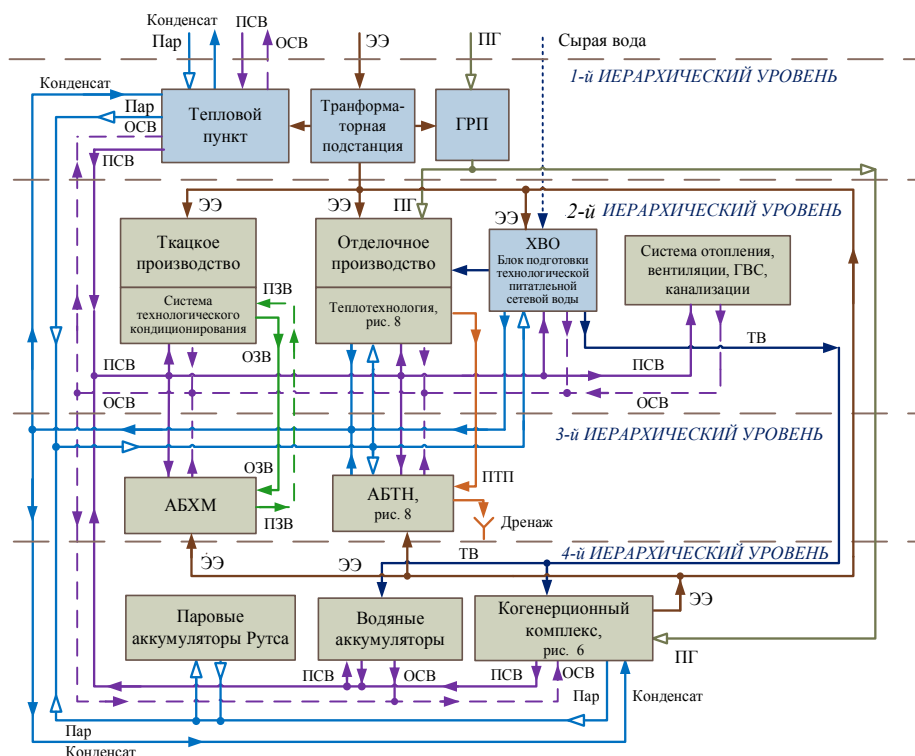


Рис. 5. Структурная схема ТЭСПП ОАО «БПХО» в соответствии с иерархическим уровнем составляющих подсистем: АБХМ – абсорбционная холодильная машина; АБТН – абсорбционный тепловой насос; ПЗВ, ОЗВ – прямая и обратная захлажденная вода

Fig. 5. Block schematic diagram of JSC 'BPKhO' HPSS as consistent with the hierarchy level of subcomponent systems: АБХМ – absorption refrigerating machine; АБТН – absorption heat pump; ПЗВ, ОЗВ – heating water and return cooled water

Для указанной системы, подвергнутой реструктуризации, определены показатели энергопотребления. Два альтернативных варианта модернизации – с переходом к собственной когенерационной выработке преобразованных энергопотоков и без нее – приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные энергетические и эксергетические характеристики работы ОАО «БПХО» после модернизации за рабочие сутки отопительного периода (значения приведены для случая, когда контрольная поверхность находится на границе энергосистемы*)

JSC 'BPKhO' general energy and exergetic performance characteristics after modernization during a working day in the heating season (the values are given for the case when the test surface is at the boundary of the energy system*)

Наименование показателя	Обо- значе- ние	Положение		
		существу- ющее	после модернизации	
			Вариант 1 (без собствен- ной генерации электро- энергии*)	Вариант 2 (с собствен- ным когенера- ционным комплексом*)
Энергетический КПД _э , %	$\eta_{\text{э}}$	0,002	0,0021	0,003
Степень термодинамического совершенства ТС, %	ν	9,5	10,0	11,6
Термодинамический КПД _е , %	$\eta_{\text{е}}$	0,002	0,002	0,003
Степень технологического совершенства, %	β	90,5	90,0	88,4
Степень полного совершенства ТС, %	μ	0,0019	0,0020	0,0023
Затраты энергии на тонну материала с учетом электроэнергии, ГДж/т	q	181,5	171,3	144,6
Затраты эксергии на тонну материала, ГДж/т	e	172,4	162,8	137,4
Потери эксергии по отношению к ее значению на входе, ГДж/т, в том числе	D	172,6	162,9	137,6
внешние	Di	6,4	5,8	5,0
внутренние	De	166,2	157,1	132,6
Годовая экономия условного топлива, тыс. т/год	ΔB	–	1,9	6,3
Простой срок возврата инвестиций, лет	τ	–	До 0,5	3,3
* Пояснения на рис. 4, 5.				

Очевидно улучшение термодинамических оценок энергопотребления и, как следствие, снижение потребности в энергоресурсах и затрат на их приобретение. Для лучшей иллюстрации изменений следует обратиться к схеме, разъясняющей подсистему энергообеспечения (рис. 6), и структуре генерации энергопотоков различными источниками (рис. 7). Снижение потребности импорта природного газа за счет использования высокоэффективного собственного когенерационного комплекса составит 4,4 тыс. т у. т. в год, за счет повышения качества энергоиспользования – 6,3 тыс. т у. т. в год. В относительных единицах когенерация обеспечивает улучшение основных показателей от 22 до 50 % по отношению к существующему положению.

нию. Удельное потребление энергии снижается на 36,9 МДж/т, или на 20 %, т. е. структура энергообеспечения улучшается. Отказ от полного замещения генерации электроэнергии сторонними источниками связан с безусловными ограничениями на выдачу избытков мощности внешним потребителям и нецелесообразностью работы собственной системы генерации энергопотоков в островном режиме.

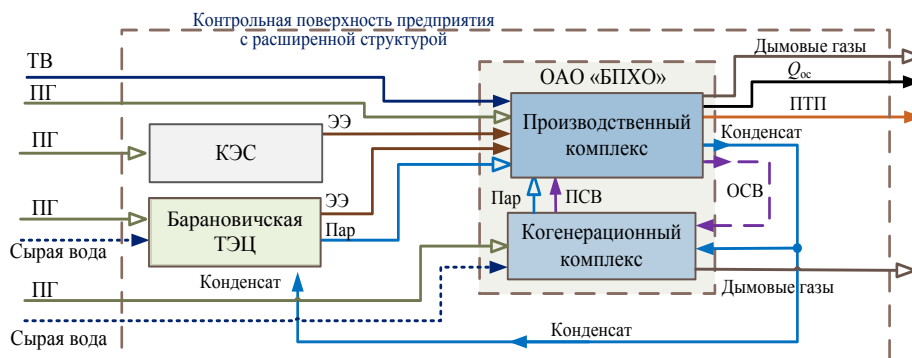


Рис. 6. Структура энергопотоков расширенной системы энергообеспечения предприятия на примере ОАО «БПХО» после ввода когенерационного комплекса (обозначения на рис. 4)

Fig. 6. Energy flows scheme of the augmented energy supply system as exemplified by JSC 'BPKhO' after introduction of the cogenerating complex (for notations see Fig. 4)

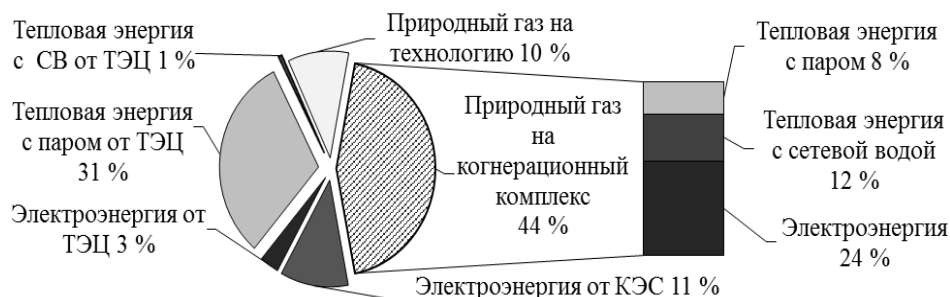


Рис. 7. Структура приходной части энергобаланса ОАО «БПХО» после модернизации теплоэнергетической системы предприятия

Fig. 7. JSC 'BPKhO' energy-balance input scheme after modernization of the enterprise heat and power system

Для иллюстрации путей достижения полученного эффекта на рис. 8 приведена принципиальная тепловая схема отделочного производства, являющегося основной теплотехнологией предприятия.

В итоге осуществлено изменение схемы тепловой подготовки технологических потоков с переходом к их двухступенчатому нагреву водяным и паровым теплоносителями, утилизации побочных потоков [11, 12], выполнено расширение энергосберегающей базы с выходом за рамки отделочного производства до границ предприятия в целом. Предусматриваются в первую очередь непосредственная рекуперация теплоты до 30,2 Гкал/сут.

и последующая утилизация теплоты с помощью АБТН низкотемпературных побочных потоков в количестве 12,4 Гкал/сут., при этом будет отпущено 30,2 Гкал/сут. теплоты с сетевой водой, из которых на системы теплоснабжения и ГВС приходится 4,9 Гкал/сут. В результате побочные потоки охлаждаются до температуры 15 °С, обеспечивая 42,6 Гкал/сут. экономии тепловой энергии, или 17 % теплотребления предприятия (1,9 тыс. т у. т. в год). На привод АБТН потребуется влажный пар давлением 0,2–0,4 МПа в количестве 17,8 Гкал/сут.

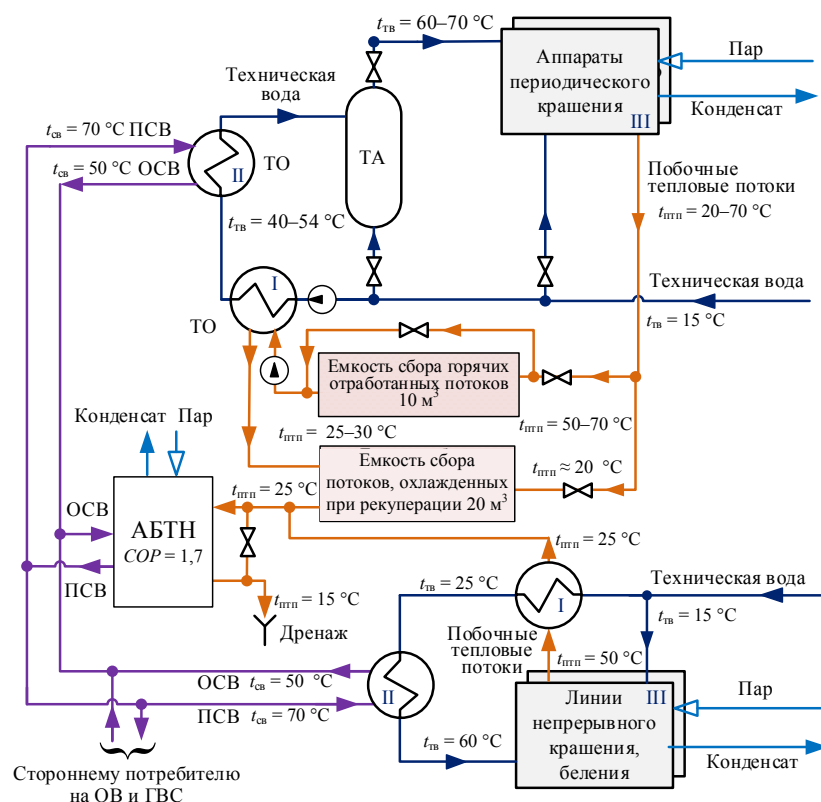


Рис. 8. Схема теплоэнергетической системы отделочного производства с утилизацией энергии побочных тепловых потоков путем интеграции в нее АБТН для внешнего энергоиспользования и двухступенчатой рекуперацией

Fig. 8. Diagram of the finishing production heat and power system with utilizing the secondary heat flow energy by means of АБТН integration for external use of energy and two-stage recovery

Следует отметить некорректность сравнения показателей энергоиспользования на рассматриваемых предприятиях республики и в Евросоюзе, поскольку в европейских показателях энергоемкости продукции не учитываются затраты топлива на генерацию вторичных энергоресурсов (тепло- и электроэнергии). В ЕС используются следующие показатели [13]:

- удельное энергопотребление SEC потребленной энергии в гигаджоулях на тонну продукции;

- энергоемкость продукции EI, отражающая количество потребленной энергии в мегаджоулях на производство готовой продукции на один евро;
- интенсивность выбросов диоксида углерода CEI в тоннах выбросов CO₂ на тонну продукции.

Для ОАО «БПХО» показатель энергоемкости SEC в варианте существующего положения равен 90,7 ГДж/т, в результате предложенной модернизации его значение снижается до 83,7 ГДж/т, что находится на уровне лучших показателей подобных немецких предприятий (80–90 ГДж/т), где имеются одинаковое технологическое оборудование и более низкие затраты на отопление в связи с иными, мягкими, климатическими условиями [13]. С учетом стоимости продукции показатель энергоемкости EI для отделочных производств Германии равен 7–8 МДж/EUR. Для ОАО «БПХО» в 2013 г. величина соответствующего показателя энергоемкости EI составила 15 МДж/EUR. При реализации рассматриваемой модернизации EI снижается до 13,7 МДж/EUR. Отмеченная разница связана с тем, что в Германии имеет место более высокая стоимость готовой продукции.

Если обратиться к повсеместно используемой в Евросоюзе такой характеристике эффективности энергоиспользования, как количество выбросов диоксида углерода на тонну произведенной продукции (CEI), получим для текстильных и трикотажных предприятий Германии 14–17 т CO₂/т продукции. Для ОАО «БПХО» в случае модернизации по варианту без когенерации CEI снизится с 4,9 до 4,5 т CO₂ на тонну продукции. Столь существенная разница обусловлена тем, что основным топливом в Германии служит уголь.

Оценка экономической целесообразности реализации мероприятий концепции интенсивного энергосбережения

Для оценки эффективности предложенных вариантов модернизации теплоэнергетической системы предприятия рассчитаны основные показатели экономической эффективности в соответствии с действующими методическими рекомендациями и нормативной документацией [14, 15]:

- динамический срок окупаемости проекта;
- чистый дисконтированный доход NPV;
- индекс рентабельности PI.

Расчеты основных показателей эффективности капитальных вложений основаны на движении чистых потоков наличности, базирующихся на экономии денежных средств за счет снижения производственных издержек на приобретение энергоресурсов со стороны. Полученные показатели эффективности инвестиций представлены на рис. 9–13. Горизонт расчета при определении технико-экономических показателей принят 15 лет.

Результаты расчета показывают, что предложенные варианты модернизации ТЭСПП ОАО «БПХО» отвечают всем требуемым критериям, предъявляемым к проектам при отборе их для финансирования:

- динамический срок окупаемости меньше срока службы оборудования;
- чистый дисконтированный доход превышает нулевое значение;
- индекс рентабельности инвестиций больше 1.

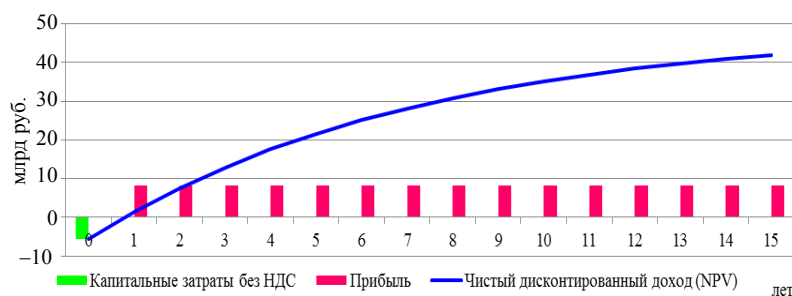


Рис. 9. Динамика изменения денежных потоков за период эксплуатации оборудования по варианту 1 при ставке дисконтирования 15 %

Fig. 9. Money flow time history for the period of the equipment operational life for Variant 1 at discount rate 15 %

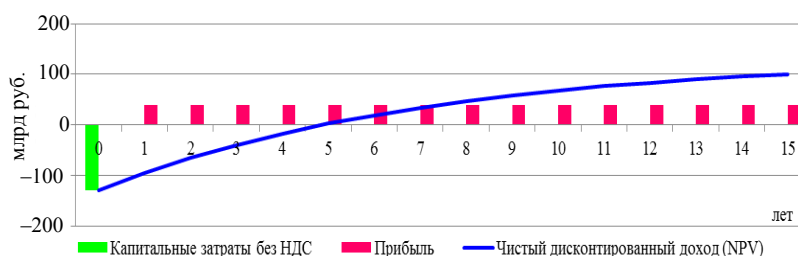


Рис. 10. Динамика изменения денежных потоков за период эксплуатации оборудования по варианту 2 при ставке дисконтирования 15 %

Fig. 10. Money flow time history for the period of the equipment operational life for Variant 2 at discount rate 15 %

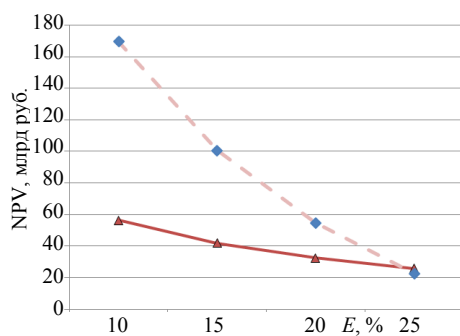


Рис. 11. Зависимость чистого дисконтированного дохода (NPV) от ставки дисконтирования (E) по вариантам модернизации: —■— — чистый дисконтированный доход (NPV), вариант 1; —◆— — то же, вариант 2

Fig. 11. Net present value (NPV) response on discount rate (E) for the modernization variants: —■— — net present value (NPV), Variant 1; —◆— — same for Variant 2

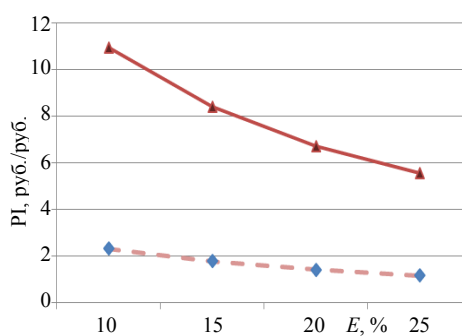


Рис. 12. Изменение индекса доходности инвестиционных затрат (PI) от ставки дисконтирования (E) по вариантам модернизации: —■— — индекс доходности инвестиционных затрат (PI), вариант 1; —◆— — то же, вариант 2

Fig. 12. Discounted profitability index alteration (PI) on discount rate (E) for the modernization variants: —■— — discounted profitability index of investment expenditures (PI), Variant 1; —◆— — same for Variant 2

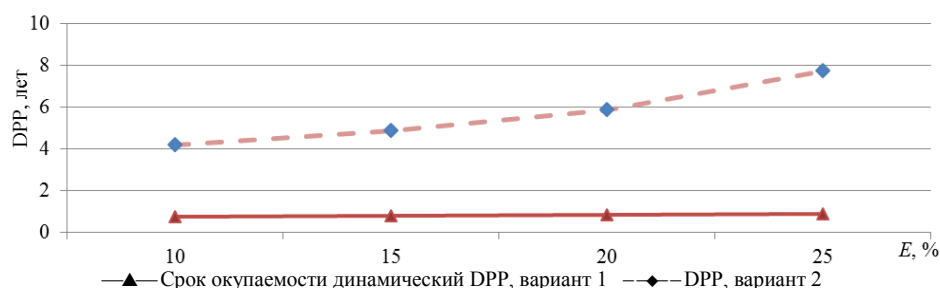


Рис. 13. Зависимость динамического срока окупаемости (DPP) от ставки дисконтирования (E) по вариантам модернизации

Fig. 13. Period of recoupment of dynamic (DPP) on discount rate (E) for the modernization variants

Оценка устойчивости экономической целесообразности

РАН ранжировала факторы риска реализации проектов совершенствования энергообеспечения [14, 15]. Эти риски сохраняются и в случае проектов модернизации энергопотребления промышленными предприятиями. Для проверки устойчивости предложенных вариантов модернизации ТЭСПи на примере ОАО «БПХО» к изменениям наиболее существенных факторов риска был произведен анализ чувствительности. Основными факторами риска снижения возврата инвестиций являются:

- повышение стоимости топлива;
- увеличение инвестиционных затрат.

Проведена оценка влияния основных факторов на изменение технико-экономических показателей при увеличении капитальных вложений на 20 % и стоимости приобретения природного газа на 20 %. Результаты расчетов показывают устойчивость вариантов модернизации по всем требуемым критериям (табл. 3).

Таблица 3

Технико-экономические показатели по вариантам модернизации при одновременном увеличении инвестиционных затрат на 20 % и стоимости природного газа на 20 %

Technical and economic indexes for the modernization variants at simultaneous investment expenditures increase by 20 % and natural gas price increase by 20 %

Наименование показателя	Единица измерения	Вариант 1	Вариант 2
Годовая балансовая прибыль	млн руб.	13981	58497
Потребность в финансировании	млн руб.	8123	168397
Внутренняя норма доходности (IRR)	%	169,4	30,8
Срок окупаемости простой (PP)	лет	0,59	3,20
При ставке дисконтирования 10 %			
Чистый дисконтированный доход (NPV)	млн руб.	81646	238928
Индекс доходности инвестиционных затрат (PI)	руб./руб.	15,47	2,87
Срок окупаемости динамический (DPP)	лет	0,54	3,26

Окончание табл. 3

Наименование показателя	Единица измерения	Вариант 1	Вариант 2
При ставке дисконтирования 15 %			
Чистый дисконтированный доход (NPV)	млн руб.	61454	153873
Индекс доходности инвестиционных затрат (PI)	руб./руб.	11,89	2,20
Срок окупаемости динамический (DPP)	лет	0,57	3,67
При ставке дисконтирования 20 %			
Чистый дисконтированный доход (NPV)	млн руб.	48001	97237
Индекс доходности инвестиционных затрат (PI)	руб./руб.	9,51	1,76
Срок окупаемости динамический (DPP)	лет	0,59	4,19
При ставке дисконтирования 25 %			
Чистый дисконтированный доход (NPV)	млн руб.	38632	57818
Индекс доходности инвестиционных затрат (PI)	руб./руб.	7,85	1,45
Срок окупаемости динамический (DPP)	лет	0,62	4,92

Оценка энергосберегающего потенциала текстильной и трикотажной отраслей легкой промышленности

По оценкам авторов, опубликованным в [16, 17], потенциал собственной энерготехнологической комбинированной генерации энергопотоков в отрасли легкой промышленности может достигать 60 МВт, что позволит ежегодно экономить порядка 80–100 тыс. т у. т. При оценке потенциала утилизации побочных тепловых потоков текстильной и трикотажной отраслей легкой промышленности Беларуси проанализированы данные по стокам более 25 крупных и стольких же мелких предприятий [18, 19]. Суммарные объемы низкопотенциальных побочных тепловых потоков по предприятиям составляют порядка 7,2 млн м³/год. Нетрудно оценить энергосберегающий потенциал их утилизации: при охлаждении потоков с 45 до 20 °С (что не составляет проблем при использовании абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов) получаем безтопливный годовой поток теплоты 0,75 млн ГДж (180 тыс. Гкал), или 28 тыс. т у. т., который необходимо утилизировать прежде всего внутри предприятий. Этот потенциал возможно реализовать непосредственно при рекуперации теплоты для проведения технологических операций крашения и при использовании тепловых насосов для утилизации тепловых потоков с температурами, ниже 45 °С.

Таким образом, совокупный энергосберегающий потенциал текстильной и трикотажной отраслей легкой промышленности Беларуси составляет порядка 0,13 млн т у. т. в год.

ВЫВОДЫ

1. Предложены варианты рационализации схем теплоэнергетической системы предприятий легкой промышленности для различных внешних условий энергообеспечения, для чего:

- разработаны и обоснованы схемы проведения тепловой обработки отделочного производства с использованием водяного теплоносителя наряду с паровым;

- разработаны и обоснованы схемы рекуперации и утилизации тепловой энергии низкопотенциальных побочных потоков в отделочном производстве и оценена их термодинамическая и экономическая эффективность;

- разработаны схемы энергообеспечения предприятия от собственного генерирующего источника с выравниванием графиков теплового потребления отделочного производства, оценена их термодинамическая и экономическая эффективность.

2. Показана технико-экономическая стабильность проектов модернизации теплоэнергетической системы предприятия с учетом основных факторов риска. Предложенные варианты модернизации энергообеспечения в рамках реструктуризации и совершенствования теплоэнергетической системы промышленного предприятия:

- имеют высокую эффективность;
- устойчивы к изменению основных факторов риска;
- обеспечивают значительную экономию органического топлива (от 1,9 до 6,3 тыс. т у. т.) и повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, что признано одним из приоритетных направлений развития экономики Республики Беларусь на ближайшую перспективу;

- улучшают экологическую обстановку в стране за счет снижения величины вредных выбросов в атмосферу. Величина снижения выбросов CO₂ при осуществлении модернизации по варианту 1 составит 3,5 тыс. т, а по варианту 2 – порядка 11,5 тыс. т в год.

3. Дана оценка совокупного энергосберегающего потенциала для текстильных и трикотажных предприятий Беларуси – до 0,13 млн т у. т. в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключников, А. Д. Интенсивное энергосбережение: предпосылки, методы, следствия / А. Д. Ключников // Теплоэнергетика. 2000. № 11. С. 12–16.
2. Ключников, А. Д. Предпосылки радикального повышения эффективности работ в области энергосбережения / А. Д. Ключников // Промышленная энергетика. 2001. № 4. С. 12–17.
3. Романюк, В. Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов / В. Н. Романюк. Минск: БНТУ, 2010. 48 с.
4. Сазанов, Б. В. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий / Б. В. Сазанов, В. И. Ситас. М.: Энергоатомиздат, 1990. 304 с.
5. Романюк, В. Н. К вопросу о повышении эффективности энергообеспечения линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Энергия и Менеджмент. 2015. № 4–5. С. 4–13.
6. Романюк, В. Н. Развитие энергоиспользования линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 6. С. 40–53.
7. Романюк, В. Н. К вопросу о совершенствовании энергообеспечения аппаратов периодического крашения на предприятиях легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. № 1. С. 25–45.

8. Потенциал комбинированной выработки энергопотоков на базе промышленных тепло-технологий Беларуси / В. Н. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 3. С. 51–63.
9. Shinskey, F. G. Energy Conservation Through Control / F. G. Shinskey, G. Francis. New York: Academic Press, 1978. 336 p.
10. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 296 с.
11. Муслина, Д. Б. Сопряжение графиков потребления и генерации тепловой энергии технологическими когенерационными комплексами на примере предприятий легкой промышленности / Д. Б. Муслина, В. Н. Романюк // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. студ., магистр. и мол. ученых, Гомель, 25–26 апр. 2013 г. Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2013. С. 218.
12. Муслина, Д. Б. Энергосберегающий потенциал теплотехнологий легкой промышленности / Д. Б. Муслина // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. ученых с междунар. участием, Екатеринбург, 16–19 дек. 2014 г. Екатеринбург: Уральский федеральный ун-т имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), 2015. С. 174–176.
13. Pardo Martinez, C. I. Energy Use and Energy Efficiency Development in the German and Colombian Textile Industries / C. I. Pardo Martinez // Energy for Sustainable Development. 2010. Vol. 14, No 2. P. 94–103.
14. Рогалев, Н. Д. Экономика энергетики / Н. Д. Рогалев, А. Г. Зубков, И. В. Мастерова; под ред. Н. Д. Рогалева. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 288 с.
15. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: утв. М-вом экономики РФ, М-вом финансов РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 № ВК 477. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Экономика, 2000. 421 с.
16. Романюк, В. Н. Потребление энергии и потенциал энергосбережения предприятий легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 52–60.
17. Муслина, Д. Б. Комбинированное производство энергопотоков на предприятиях легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Перспективы развития энергетики в XXI в.: материалы II Республ. науч.-практ. конф., Минск, 11–13 мая 2011 г. Минск: БНТУ, 2012. С. 42–43.
18. Комплексная программа развития легкой промышленности Республики Беларусь на 2011–2015 гг. с перспективой до 2020 г. [Электронный ресурс] // БелЛегПром. Режим доступа: <http://www.belleprom.by/programs>. Дата доступа: 02.10.2013.
19. Концерн БелЛегПром [Электронный ресурс] // БелЛегПром. Режим доступа: <http://www.belleprom.by/about/concern>. Дата доступа: 20.10.2013.

Поступила 02.11.2015 Подписана в печать 15.01.2016 Опубликовано онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. Kluchnikov A. D. (2000) Intensive Energy Saving: Prerequisites, Methods, Consequences. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], (11), 12–16 (in Russian).
2. Kluchnikov A. D. (2001) Prerequisites for Work Efficiency Radical Increase in the Area of Energy Saving. *Promyshlennaiia Energetika* [Industrial Power Economy], (4), 12–17 (in Russian).
3. Romaniuk V. N. (2010) *Intensive Energy Saving in the Heat-Technological Systems of Industrial Production of Building Materials*. Minsk: BNTU. 48 p. (in Russian).
4. Sazanov B. V., Sitas V. I. (1990) *Heat and Power Systems of the Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat. 304 p. (in Russian).
5. Romaniuk V. N., Muslina D. B. (2015) On the Issue of Increasing Energy Supply Efficiency of the Lines of Continuous Dyeing in the Light Industry Enterprises. *Energiia i Menedzhment* [Energy and Management], (4–5), 4–13 (in Russian).
6. Romaniuk V. N., Muslina D. B. (2015) Energy Recovery for the Continuous Dyeing Process in the Textile Industry Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i*

- Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (6), 40–53 (in Russian).
7. Romaniuk V. N., Muslina D. B. (2016) On Improving the Energy Supply of Batch Dyeing Apparatuses in the Light Industry Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (1), 25–45 (in Russian).
 8. Romaniuk V. N., Muslina D. B., Bobich A. A., Kolomytskaia N. A., Romaniuk A. V. (2012) Potential of Energy Flows Cogeneration Based on Industrial Thermo-Technologies in Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (3), 51–63 (in Russian).
 9. Shinskey F. G., Francis G. (1978) *Energy Conservation Through Control*. New York, Academic Press. 336 p.
 10. Brodyanskiy V. M. (1973) *Exergy Method of the Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energiia. 296 p. (in Russian).
 11. Muslina D. B., Romaniuk V. N. (2013) Technological Cogenerating Complexes Heat Energy Consumption and Generation Graphs Conjugation as Exemplified by the Light Industry Enterprises. *Issledovaniia i Razrabotki v Oblasti Mashinostroeniia, Energetiki i Upravleniia: Materialy XIII Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov, Magistr. i Mol. Uchenykh, Gomel, 25–26 apr. 2013 g.* [Research and Development Works in the Area of Machine Building, Power Economy and Administration: Proceedings of XIII Scientific and Technical Conference of Students, Magistrands and Young Scientists, Gomel, April 25–26, 2013]. Gomel: Pavel Sukhoi State Technical University of Gomel, 218 (in Russian).
 12. Muslina D. B. (2015) Energy-Saving Potential of the Light Industry Thermo-Technologies. *Energo- i Resursosberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i Vozobnovliaemye Istochniki Energii: Materialy Vseros. Nauch.-Prakt. Konf. Studentov, Asp. i Mol. Uchenykh s Mezhdunar. Uchastiem, Ekaterinburg, 16–19 Dekabr. 2014g.* [Energy and Recourse-Saving. Energy Supply. Nonconventional and Renewable Energy Sources: Proceedings of Russian National Theoretical and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation, Yekaterinburg, Dec. 16–19, 2014]. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), 174–176 (in Russian).
 13. Pardo Martinez C. I. (2010) Energy Use and Energy Efficiency Development in the German and Colombian Textile Industries. *Energy for Sustainable Development*, 14 (2), 94–103. Doi: 10.1016/j.esd.2010.02.001.
 14. Rogalev N. D., Zubkova A. G., Masterova, I. V. (2005) *Energy Economy*. Moscow, Publish. MEI, 288 p. (in Russian).
 15. Ministry of Economics of the Russian Federation, Ministry of Finance of the Russian Federation, State Committee of the Russian Federation for Construction, Architectural and Housing Policy (2000) *Methodic Recommendations on Assessment of Investment Projects Efficiency № BK 477*. 2 ed. Moscow, Publishing House “Ekonomika”. 421 p. (in Russian).
 16. Romaniuk V. N., Muslina D. B. (2012) Energy Consumption and Energy Saving Potential of the Light Industry Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (1), 52–60 (in Russian).
 17. Muslina D. B., Romaniuk V. N. (2012) Cogeneration of Energy Flows in the Light Industry Enterprises. *Perspektivy Razvitiia Energetiki v XXI veke: Materialy II Respubl. Nauch.-Prakt. Konf., Minsk, 11–13 Maia 2011 g.* [Future Development of Power Economy in XXI Century: Proceedings of Theoretical and Practical Conference, Minsk, May 11–13 2011]. Minsk: BNTU, 42–43 (in Russian).
 18. Integrated Development Program of the Light Industry of the Republic of Belarus for 2011–2015 with Perspectives to 2020. *BelLegProm*. Available at: <http://www.bellegprom.by/programs>. (Accessed: 2 October 2013) (in Russian).
 19. BelLegProm Concern. *BelLegProm*. Available at: <http://www.bellegprom.by/about/concern>. (Accessed: 20 October 2013) (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-168–174

УДК 62.50

Определение динамических характеристик промышленных объектов с помощью случайных воздействий

Я. А. Гусенцова¹⁾, Е. С. Гусенцова²⁾, А. А. Коваленко²⁾

¹⁾Луганский национальный аграрный университет (Луганск, Республика Украина),

²⁾Луганский университет имени В. Даля (Луганск, Республика Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Выполнено сравнение различных методов идентификации динамических характеристик объектов, связанных с генерацией тепловой энергии или охлаждением теплоносителя в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены идентификация по реакции на стандартные воздействия – ступенчатое, импульсное и гармоническое. Показано, что в ряде случаев для рассматриваемого типа объектов их использование не приемлемо. Тогда целесообразно применять статистические характеристики сигналов на входе и выходе в процессе нормальной эксплуатации, т. е. использовать данные так называемого пассивного эксперимента. При этом задача состоит из двух этапов – определения статистических характеристик случайных сигналов на входе и выходе объекта и вычисления по ним динамических характеристик. Статистические характеристики случайных процессов на входе и выходе получены посредством осреднения по времени значений случайных величин, зависящих от ординат процессов. Поскольку случайные процессы, происходящие в рассматриваемых объектах, обладают свойством эргодичности, их средние значения являются постоянными. Вся необходимая информация для расчета характеристик линейных систем содержится в их корреляционной функции. Теплогенерирующие объекты и системы охлаждения двигателей внутреннего сгорания являются объектами, охваченными обратной связью через регулятор. Поэтому в этом случае для определения их динамических характеристик использованы взаимно коррелированные функции. Предложенный метод расчета динамических характеристик по случайным воздействиям дает хорошее совпадение с результатами активного эксперимента, приведенными в различных источниках. Это позволяет рекомендовать метод определения динамических характеристик для рассматриваемого типа объектов с помощью случайных сигналов.

Ключевые слова: динамические характеристики, теплогенерирующий объект, импульсная функция, переходная характеристика, случайный процесс, взаимно коррелированные функции

Для цитирования: Гусенцова, Я. А. Определение динамических характеристик промышленных объектов с помощью случайных воздействий / Я. А. Гусенцова, Е. С. Гусенцова, А. А. Коваленко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 168–174

Адрес для переписки

Гусенцова Яна Алимовна
Луганский национальный
аграрный университет
ул. Андрея Линёва, городок ЛНАУ,
91008, г. Луганск, Республика Украина
Тел.: (0642) 65-34-40
gusentsova@gmail.com

Address for correspondence

Gusentsova Yana A.
Lugansk National
Agrarian University
Andrey Linev str., LNAU student quarter,
91008, Lugansk, Republic of Ukraine
Tel.: (0642) 65-34-40
gusentsova@gmail.com

Ascertainment of Dynamic Characteristics of the Industrial Facilities by Means of Stochastic Actions

Ya. A. Gusentsova ¹⁾, Ye. S. Gusentsova ²⁾, A. A. Kovalenko ²⁾

¹⁾Lugansk National Agrarian University (Lugansk, Republic of Ukraine),

²⁾Lugansk University n. a. V. Dal (Lugansk, Republic of Ukraine)

Abstract. The paper presents comparison of different methods for identifying the dynamic characteristics of objects associated with thermal energy generation or the medium cooling in the cooling systems of internal-combustion engines. Reaction identification to the reference exposure is considered, videlicet – stepwise, impulse and harmonic. The study shows that on a number of occasions for the type of objects being involved their application is unacceptable. In those instances it is expedient to apply statistical characteristics of the input and output signals, i. a. to employ the data of so-called passive experiment. In which case the task is divisible into two stages – determination of statistical characteristics of the variates at the ins and outs of the object and calculation of the dynamic characteristics based on them. The statistical characteristics of the variates at the input and output are obtained through time averaging of values of the variates dependent on the ordinate of the processes. Inasmuch as stochastic processes occurring in the objects under examination possess ergodic property, their averaged values are constant. All the data required for calculating characteristics of the linear systems appears in their correlative functions. Heat generating objects as well as the cooling systems of internal-combustion engines are the objects fed back by the regulator. Therefore, in this instance cross-correlated functions are employed for determining their dynamic characteristics. The suggested random-input analytical method for dynamic characteristics constitutes a good match with the results of active experiments reported in a variety of sources. This allows recommending the random signals estimation method of dynamic characteristics for the involved type of objects.

Keywords: dynamic characteristics, heat-generating object, impulse function, step response, stochastic process, cross-correlated functions

For citation: Gusentsova Ya. A., Gusentsova Ye. S., Kovalenko A. A. (2016) Ascertainment of Dynamic Characteristics of the Industrial Facilities by Means of Stochastic Actions. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 168–174 (in Russian)

Введение

Повышение надежности и экономичности установок, тем или иным образом связанных с генерированием тепловой энергии, зависит от работы рационально спроектированной тепловой схемы, широкого внедрения энергосберегающих технологий и альтернативных источников энергии, экономии топлива, тепловой и электрической энергии. Энергосбережение и оптимизация систем производства и распределения тепловой энергии, корректировка энергетических и водных балансов позволяют улучшить перспективы развития теплоэнергетики и повысить технико-экономические показатели оборудования установок. Это относится как непосредственно к установкам, производящим теплоту [1], так и к другим, связанным с тепловой энергией системам, таким как системы охлаждения двигателей внутреннего сгорания [2, 3]. Рядом исследований установлено, что при оптимальном температурном режиме работы дизеля тепловоза достигаются повышение его эффективного использования, снижение расхода топлива на измеритель работы и износа деталей цилиндропоршневой группы. Такой температурный режим характеризуется температурой охлаждающей воды (85–95 °C) и масла (70–75 °C) [3].

Анализ влияния температуры воды и масла на технико-экономические показатели дизеля убедительно подтверждает необходимость поддержания их на оптимальном уровне. Чтобы поддерживать температуру охлаждающей воды и масла дизеля в допустимых пределах, на тепловозах применяют систему автоматического регулирования температуры в разнообразном техническом исполнении [3].

Во всех рассмотренных случаях экономичность установок зависит от правильного выбора регулятора температуры, его закона регулирования, а это в свою очередь зависит от динамических характеристик объекта регулирования – теплогенерирующего устройства или двигателя внутреннего сгорания [4].

Цель и методы исследования

Построение математических моделей объектов и определение их динамических характеристик выполняли аналитически или экспериментально. В первом случае уравнения динамики и статики составляли на основе анализа физико-химических процессов, происходящих в объекте, и применения законов сохранения энергии и вещества. Целью работы являлась идентификация объекта, т. е. определение коэффициентов уравнения динамики. Для этого требовалась постановка специальных лабораторных исследований [5].

Для экспериментальных методов нужны были минимальные сведения о сущности процессов, протекающих в исследуемых объектах. Однако они позволяли с приемлемой для практики точностью определять коэффициенты дифференциальных уравнений динамики. Эти методы просты в применении, и с их помощью сравнительно быстро получали математическое описание объекта. Вследствие этого они широко применялись при исследовании динамики объектов для целей автоматизации.

Основная часть

Переходные процессы в линейном объекте с сосредоточенными параметрами [6] однозначно описываются дифференциальным уравнением типа

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m y}{dt^m} + \dots + b_0 x(t), \quad (1)$$

или передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{\int_0^\infty y(t) \exp(-pt) dt}{\int_0^\infty x(t) \exp(-pt) dt} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_0}, \quad (2)$$

где $X(p)$, $Y(p)$ – преобразованные по Лапласу входная $x(t)$ и выходная $y(t)$ координаты; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_m, \dots, b_0$ – постоянные коэффициенты; $n < m$.

Определение коэффициентов уравнений (1) и (2) исследуемых объектов можно производить экспериментальным путем как реакцию исследуемого устройства на задающее воздействие. В реальных условиях работы задающее воздействие может быть любой функцией времени. Более того, она способна менять свой характер при переходе от одного режима работы системы к другому. Чтобы не решать каждый раз частную задачу исследования динамики элемента при конкретном входном сигнале, а получить довольно полное представление о динамических свойствах элемента в результате одного решения уравнения динамики, целесообразно ввести некоторое типовое задающее воздействие, которое отражает наиболее вероятный режим работы элементов.

В качестве типовых задающих воздействий используют [5, 6]:

- единичное ступенчатое воздействие $1(t)$ – функцию, неизменную по величине и равную единице для всех моментов времени $t > 0$, а при значениях $t < 0$ равную 0;
- дельта-функцию – функцию Дирака, которая представляет собой импульс бесконечно большой амплитуды с бесконечно малой длительностью;
- гармонический сигнал – гармонические колебания с постоянной амплитудой, равной единице. Этот сигнал может задаваться как в комплексной, так и в вещественной формах, в виде синусоидального или косинусоидального колебания.

Приведенные методы определения динамических характеристик объектов с помощью подачи на вход исследуемого канала испытательного воздействия не всегда применимы. На некоторых объектах крайне нежелательна подача специальных возмущений [7]. В этих случаях для определения динамических свойств могут быть использованы статистические характеристики сигналов на входе и выходе объекта, имеющих место в процессе его нормальной эксплуатации. При этом задача разбивается на два этапа:

- определение статистических характеристик случайных процессов, воздействующих на объект;
- вычисление по ним характеристики исследуемого объекта.

Как теплогенератор, так и система охлаждения двигателя [2, 5] являются системами, охваченными отрицательной обратной связью через регулятор. В данном случае входной случайный процесс, определяемый рядом возмущений, оказывается коррелированным через обратную связь с шумом (рис. 1). Поэтому импульсная функция исследуемого объекта имеет вид

$$R_{yx_1}(\tau) = \int_0^{\infty} R_{xx_1}(\tau - \theta) K(\theta) d\theta. \quad (3)$$

Затем решение проводят различными методами, например методом перебора коэффициентов импульсной функции с минимизацией среднеквадратичной ошибки аппроксимации.

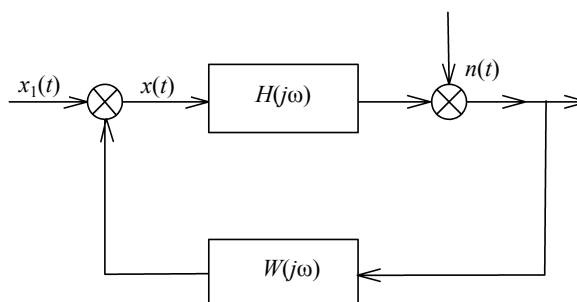


Рис. 1. Структурная схема объекта с обратной связью

Fig. 1. Structural diagram of an object with a feedback

Передаточную функцию теплогенераторов находили по формуле [1, 8]

$$W(p) = \frac{\bar{T}_t(p)}{\bar{\Theta}_r} = \frac{k_0 e^{-\tau p}}{(Tp + 1)^n}, \quad (4)$$

где k_0 – коэффициент усиления; τ – время транспортного запаздывания; T_t – постоянная времени; n – порядок дифференциального уравнения (1).

Такой вид передаточной функции вызван тем, что процесс теплоотдачи от газа к теплоносителю в котле происходит через достаточно толстую стенку, тепловую инерционность которой необходимо учитывать [9–10]. Ей соответствует уравнение кривой разгона

$$\bar{T}_r(t) = \left[1 - \left(1 + \sum_{n=1}^n \frac{t^n}{T^n n!} \right) e^{-\frac{t}{T}} \right] k_0,$$

которое связано с импульсной функцией

$$\delta(t) = [\bar{T}_s(t)]',$$

При экспериментах в качестве исходных данных использованы записи температуры теплоносителя на выходе объекта и расхода топлива на входе, которые осуществлялись стандартными приборами [7]. Динамические характеристики теплогенерирующих установок представлены в табл. 1. Через дробь приведены данные, полученные с помощью анализа переходной характеристики [7]. Переменные n и τ соответствуют формуле (4).

Таблица 1

Динамические характеристики теплогенерирующих установок
Dynamic characteristics of heat-generating facilities

Марка котла, параметры	КВ-ГМ-10	ТВГ-8М	КСВ	ДЕ-4-13ГМ
n	3	3	3	3
τ , с	40/37	35/34	30/29	35/37
Постоянная времени при нагрузке, с	73/70	72/72	82/89	79/83
Постоянная времени при разгрузке, с	88/85	80/81	96/92	90/91
Теплопроизводительность котла, ГВт (Гкал/ч)	42 (10,0)	35 (8,3)	15,1 (3,6)	25,2 (6,0)

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод определения передаточной функции с помощью случайных входных воздействий дает хорошее совпадение с результатами активного эксперимента, т. е. определение передаточной функции по реакции на ступенчатое воздействие.
2. Общий вид передаточной функции теплогенерирующих установок может быть представлен в виде статического звена третьего порядка и звена транспортного запаздывания.
3. Время транспортного запаздывания для всех испытанных котлов оказалось примерно одинаковым и равным ~ 35 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрийчук, Н. Д. Термодинамика для инженеров-строителей / Н. Д. Андрийчук, Е. А. Иващенко, А. А. Коваленко. Луганск: Изд-во СНУ имени В. Даля, 2005. 304 с.
2. Гогайзель, В. А. Регулирование температуры теплоносителя системы охлаждения автомобиля / В. А. Гогайзель, А. А. Коваленко. Луганск: Изд-во ВНУ имени В. Даля, 2011. 199 с.
3. Кулешова, Э. И. Динамическая статистика теплогенерирующих объектов / Э. И. Кулешова, А. А. Коваленко, Я. А. Гусенцова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2013. № 18 (207). С. 29–32.
4. Gusentsova, E. Influence of Aerodynamic Characteristics on the Heat Exchange in the Cooling Systems // ТЕКА. 2012. Vol. 12, No 3. P. 46–50.
5. Регуляторы в системах воздушного отопления и вентиляции / Е. А. Иващенко [и др.]. Луганськ: Вид-во СНУ імя В. Даля, 2006. 141 с.
6. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, О. А. Судник. М.: Колос, 2003. 344 с.
7. Гусенцова, Я. А. Идентификация динамических характеристик теплогенерирующих объектов по случайным входным сигналам / Я. А. Гусенцова, Э. И. Кулешова, А. А. Коваленко // Materiały IX Międzynarodowej Naukowej – Praktycznej Konferencji “Nauka: Teoria i Praktyka-2013”, 7–15 Sierpnia 2013 roku. Przemysł: Nauka i Studia. 2013. Vol. 10: Matematyka. Fizyka. Nowoczesne Informacyjne Technologie. Budownictwo i Architektura. Techniczne Nauki. Fizyczna Kultura i Sport. С. 55–57.
8. Landerheinecke, K. Thermodynamic für Ingenieure / K. Landerheinecke, P. Gany, E. Satter. Viewegs Fachbücher der Technik, 2003. 336 p.
9. Недопекин, Ф. В. Теория тепломассопереноса / Ф. В. Недопекин. Донецк: ДонГУ, 1991. 192 с.
10. Димніч, А. Х. Теплопровідність / А. Х. Димніч, О. А. Троянівський. Донецьк: Норд-Пресс, 2004. 370 с.

Поступила 31.08.2015 Подписана в печать 29.10.2015 Опубликовано онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. Andriychuk N. D., Ivaschenko Ye. A., Kovalenko A. A. (2005) *Thermodynamics for Civil Engineers*. Lugansk: Publishing East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 304 p. (in Russian).

2. Gogayzel V. A., Kovalenko A. A. (2011) *Automobile Coolant System Automatic Regulation*. Lugansk: Publishing East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 199 p. (in Russian).
3. Kuleshova E. I., Kovalenko A. A., Gusentsova Ya. A. (2013) Dynamical Statistics of the Heat-Generating Objects. *Visnik Skhidnoukraińskogo Natsionalnogo Universitetu imeni Volodimira Dalia* [Visnik of the Volodymyr Dal East Ukrainian National University], 18 (207), 29–32 (in Russian).
4. Gusentsova E. (2012) Influence of Aerodynamic Characteristics on the Heat Exchange in the Cooling Systems. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 12 (3), 46–50.
5. Ivashchenko E. A., Diadichev K. M., Gusentsova Ya. A., Kovalenko A. A., Sokolov V. I. (2006) *Controls in the Hot-Air Heating and Ventilation Systems*. Lugansk: Publishing East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 141 p. (in Russian).
6. Borodin I. F., Sudnik O. A. (2003) *Technological Processes Automation*. Moscow, Kolos. 344 p. (in Russian).
7. Gusentsova Ya. A., Kuleshova E. I., Kovalenko A. A. (2013) Random-Excitation Identification of Dynamical Characteristics of the Heat-Generating Objects. *Materiały IX Międzynarodowej Naukowi – Praktycznej Konferencji “Nauka: Teoria i Praktyka – 2013”, 7–15 Sierpnia 2013 roku. Vol. 10, Matematyka. Fizyka. Nowoczesne Informacyjne Technologie. Budownictwo i Architektura. Techniczne Nauki. Fizyczna Kultura i Sport. Przemysł, Nauka i Studia*, 55–57 (Article in Russian; title of the book in Czech).
8. Landerheinecke K., Gany P., Satter E. (2003) *Thermodynamik für Ingenieure*. Vieweg Fachverlag der Technik. 336 p. (German).
9. Nedopekina F. V. (1991) *Heat and Mass Transfer Theory*. Donetsk: Donetsk National University. 192 p. (in Russian).
10. Dymnich A. Kh., Troyanivskiy O. A. (2004) *Thermal Conductivity*. Donetsk: Nord-Press. 370 p. (in Ukrainian).

Received: 31 August 2015

Accepted: 29 October 2015

Published online: 30 March 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-175–186

УДК 628.112

Совершенствование конструкций водозаборных скважин и методов их капитального ремонта

В. В. Ивашечкин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Проведен анализ недостатков и преимуществ отдельных способов выполнения капитальных ремонтов вышедших из строя скважин типовых конструкций. Рассмотрена технология капитального ремонта скважины № 3Б водозабора «Северный» г. Жодино способом установки ремонтного фильтра меньшего диаметра внутрь вышедшего из строя с обсыпкой межтрубного пространства гравием. Показано, что такой ремонт может рассматриваться как временная мера, поскольку удельный дебит скважины и срок ее службы будут существенно снижены. Для продления срока службы ремонтируемых скважин предложено осуществлять предварительную регенерацию их фильтров. Показано, что капремонт скважин способом извлечения старого фильтра и замены его на новый может быть осложнен разрывом колонны по сварным швам, работающим на растяжение. Выполнена проверка прочности колонны, которая показала, что требуемое подъемное усилие может превышать допустимую растягивающую силу для сварных швов из-за значительных сил трения колонны о грунт. Получено выражение для расчета требуемого подъемного усилия для извлечения эксплуатационной колонны с фильтром только статической силой, в котором силу трения закольцованного фильтра о породу предложено определять по формулам расчета несущей способности буронабивной сваи, работающей на выдергивающие нагрузки. Для снижения подъемных усилий путем уменьшения сил трения закольцованного фильтра о породу предложена усовершенствованная конструкция скважины со смещаемым вниз фильтром, признанная изобретением. Такая конструкция скважины позволяет при выходе фильтра из строя сначала внешними ударными усилиями сместить вниз (сбить) всю фильтровую колонну внутрь специальной гильзы, размещенной ниже отстойника, а только потом извлечь фильтровую колонну из скважины сниженным тяговым усилием. Из уравнения энергетического баланса для вертикального смещения колонны труб скважины получено выражение для расчета веса ударной части молота и высоты ее падения при капремонте скважины усовершенствованной конструкции.

Ключевые слова: скважина, капитальный ремонт, фильтровая колонна, гильза, молот, тяговое усилие

Для цитирования: Ивашечкин, В. В. Совершенствование конструкций водозаборных скважин и методов их капитального ремонта / В. В. Ивашечкин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 175–186

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 268-84-50
gts@bntu.by

Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 268-84-50
gts@bntu.by

Design Development of the Water Supply Wells and Methods of their Capital Repair

V. V. Ivashechkin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents analysis of shortcomings and benefits of individual techniques for the capital repair of out-of-commission water wells of standard designs. The author considers the capital repair procedure of water well No 3B of Zhodino 'Severniy' water supply point by means of installing a repair filter of smaller diameter inside the failed one, cushioning the tubular annulus with gravel. It is shown that this kind of repair can be considered a temporary arrangement inasmuch as the water well specific yield and service life period will reduce significantly. For prolongation of the useful life of the water wells, the paper suggests performing preliminary unloading of their filters. The study reveals that the well capital repair by means of extracting the old filter and exchanging it with a new one can be complicated by the column burst along the welding joints working in tension. The performed column strength test demonstrated the fact that the required heave might exceed the welding joint tolerant tensile force owing to considerable friction of the column against the ground. The author arrives at a design equation of the heave required for extracting the production column with the filter applying only the static force. In which they offer to determine frictional force of the mudded filter against the formation from calculating formulae of the supporting power of an augered pile working with pulling loads. For decreasing the heaves via reducing frictional loads of the mudded filter against the formation, an improved design of the water well has been introduced recognized as an invention with the filter capable of downward biasing. Such water well design allows at the filter mud fill in the first instance the entire filtering column to be biased (knocked) down inside a special sleeve placed lower the settler by applying external buffing force, and then only extracting the filtering column out of the well by decreased traction pull. The energy balance equation for vertical displacement of the water well pipe column results in the computation expression for the hammer striking part weight and its drop height during the capital repair of the water well of improved design.

Keywords: water well, capital repair, filtering column, sleeve, hammer, traction pull

For citation: Ivashechkin V. V. (2016) Design Development of the Water Supply Wells and Methods of their Capital Repair. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 175–186 (in Russian)

Введение

Одной из главных причин выхода водозаборных скважин из строя в процессе эксплуатации является пескование, которое может быть вызвано: суффозией пластового песка через фильтр при неправильном подборе гравийной обсыпки; выносом песка при выходе из строя сальника (фильтр установлен «впотай»); коррозионным и абразивным износом водоприемной поверхности, а также ее разрушением в результате импульсной декольматации [1]. В практике можно выделить три основных метода капремонта: 1) устройство защитной гравийной пробки в нижней пескующей части фильтра; 2) установку ремонтного фильтра меньшего диаметра внутрь пескующего фильтра; 3) извлечение вышедшего из строя фильтра и замену его новым [2, 3].

Первый метод самый простой и не требует применения спецтехники. Однако здесь необходима точная информация о том, что приток песка в скважину происходит только через нижнюю часть фильтра. Капитальный

ремонт скважины сводится к засыпке пескующей нижней части фильтра щебенкой или крупным гравием.

Метод установки нового фильтра внутрь применяют, если старый разрушен или вышел из строя сальник, а фильтр имеет достаточно большой диаметр (≥ 200 мм). Новый фильтр меньшего диаметра опускают на штангах, обсыпают гравием, штанги удаляют. Недостаток данной технологии заключается в отсутствии операции предварительной декольматации внешнего гравийного фильтра. Поэтому быстро растет кольматаж, снижаются дебит и срок службы скважины.

Третий способ капремонта заключается в подъеме фильтра на поверхность и замене его новым. На практике извлечь фильтр удастся не всегда из-за больших сил сцепления фильтра с породой и разрыва секций по сварным швам, работающим на растяжение. Это обусловлено тем, что в прилегающем к фильтру слое гравия образуется природный цемент обрастания, прочность которого может достигать 2 МПа.

В связи с изложенным выше целью работы являлись совершенствование методов капитального ремонта скважин типовых конструкций, создание скважин новых конструкций с заменяемыми фильтрами и разработка методики расчета усилий для их извлечения.

Капитальный ремонт скважины типовой конструкции

Отработку технологии капитального ремонта типовых скважин производили на артезианской скважине № 3Б (128290/96) водозабора «Северный» г. Жодино глубиной 94 м. Скважина пробурена 01.06.1996, оснащена проволочным фильтром диаметром 325 мм (12") в интервале от 73 до 93 м. Обследование показало, что с 1996 по 2002 г. скважина существенно (в 2,3 раза) снизила удельный дебит от 7,0 до 3,1 м²/ч. Данные замеров представлены в табл. 1.

Таблица 1

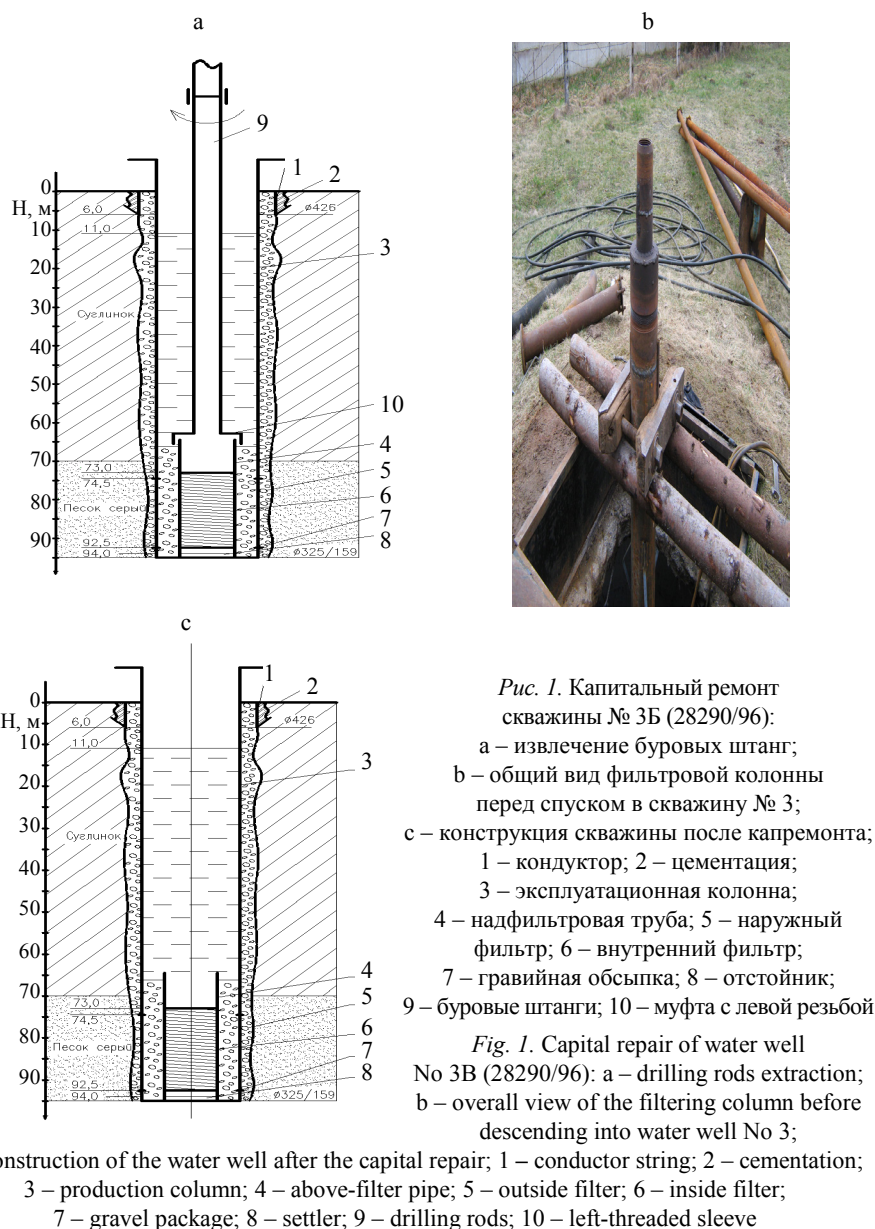
Гидравлические характеристики скважины № 3Б
Hydraulic properties of water well No 3B

Дата замера	Статический уровень, м	Понижение уровня, м	Дебит, м ³ /ч	Удельный дебит, м ² /ч
После бурения (01.06.1996)	11	10	70	7,0
До текущего ремонта (19.09.2002)	11	13	40	3,1
После текущего ремонта (20.09.2002)	11	3	40	13,3

20 сентября 2002 г. при участии автора произведен текущий ремонт скважины, который представлял собой работы по декольматации фильтра газоимпульсным методом на основе взрыва газовой смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ в полости фильтра и эрлифтные прокачки до и после обработки. Взрывы осуществлялись в полузамкнутой камере с запасаемой энергией 56–60 кДж. Всего произведена одна серия импульсов по всему фильтру с интервалом 0,15 м. Данные по результатам обработки приведены в табл. 1.

В результате обработки фильтра достигнуто увеличение удельного дебита в 4,3 раза по отношению к удельному дебиту до обработки, что соответствует 190 % от начального при бурении и указывает на плохое освоение скважины при сдаче ее в эксплуатацию буровой организацией.

12 мая 2010 г. произведен капитальный ремонт (рис. 1) скважины № 3Б.



Состав работ: повторная обработка фильтра подводными взрывами смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ с целью удаления отложений; откачка скважины эрлифтом; установка внутрь скважины новой фильтровой колонны диаметром 159 мм, имеющей отстойник длиной 1,5 м, проволочный фильтр длиной 18 м

с намоткой из нержавеющей стальной проволоки трапецеидального сечения высотой 2 мм с шагом 1 мм на трубчатый каркас, надфильтровую трубу длиной 10 м; засыпка гравия в межтрубное пространство (рис. 1).

Спуск новой фильтровой колонны осуществляли автокраном на буровых штангах, закрепленных к ее верхней части с помощью муфты с левой резьбой (рис. 1b). После установки фильтровой колонны на дно скважины ее обсыпали гравием и, вращая буровые штанги вправо, откручивали муфту с левой резьбой и поднимали штанги на поверхность.

Результаты испытаний скважины представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты гидравлических испытаний скважины № 3Б

Water well No 3B hydraulic test results

Вид откачки	Динамический уровень, м	Понижение уровня, м	Дебит, м ³ /ч	Удельный дебит, м ² /ч
До газоимпульсной обработки	25,0	4,0	24,0	6,0
После обработки	12,3	1,3	16,0	12,0
После капитального ремонта	12,2	1,2	14,0	11,5

Испытания показали, что посредством газоимпульсной обработки удельный дебит скважины перед капитальным ремонтом удалось увеличить в два раза (от 6 до 12 м²/ч), что позволило частично удалить кольматирующие отложения из фильтра и гравийной обсыпки. Эта операция необходима, так как после установки ремонтного фильтра она неэффективна. В настоящее время скважина № 3Б используется периодически для розлива воды.

Отсюда следует, что капремонту скважины должна предшествовать импульсная или реагентная обработка. Такой тип ремонта оправдан, если заказчика устраивают интенсивное старение и низкий дебит скважины, поскольку подобный ремонт снижает ее срок службы из-за интенсивного кольматации двойного фильтра.

Усовершенствованная конструкция скважины и ее капитальный ремонт

Для повышения ремонтпригодности в части выполнения капитального ремонта предложена конструкция скважины со смещаемым вниз фильтром (рис. 2) [4]. В предлагаемой скважине (рис. 2а) под фильтром искусственно создана полость, в которую перед извлечением можно посредством удара или статического нагружения сместить фильтр, а затем с меньшими подъемными усилиями извлечь его на поверхность. Конструктивно роль полости играет гильза, внутри которой с помощью срезаемых шпилек закреплен отстойник фильтровой колонны, снабженный захватной скобой.

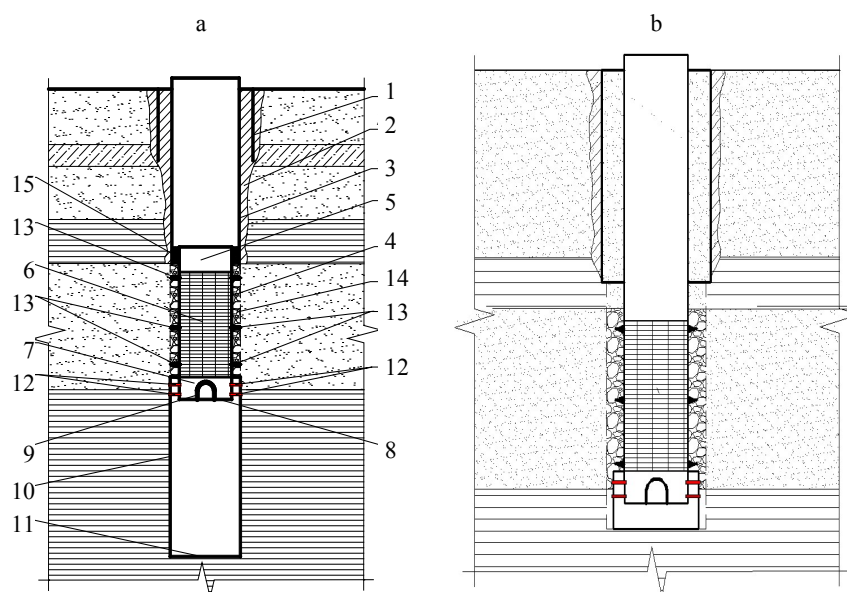


Рис. 2. Конструкции водозаборных скважин со смещаемыми вниз фильтрами, установленными: а – «впотай» с длинной гильзой; б – на «основной колонне» с короткой гильзой; 1 – кондуктор; 2 – затрубная цементация; 3 – эксплуатационная колонна; 4 – фильтровая колонна; 5 – надфильтровая труба; 6 – фильтр; 7 – отстойник; 8 – днище; 9 – захватная скоба; 10 – гильза; 11 – днище; 12 – шпильки; 13 – зубья; 14 – обсыпка; 15 – сальник

Fig. 2. Designs of the water wells with filters capable of downward biasing, installed: а – 'flush' with long sleeve; б – on 'the main column' with short sleeve; 1 – conductor string; 2 – annular cementation; 3 – production column; 4 – filtering column; 5 – above-filter pipe; 6 – filter; 7 – settler; 8 – bottom; 9 – clevis; 10 – sleeve; 11 – bottom plate; 12 – drift pins; 13 – teeth; 14 – cushioning layer; 15 – gasket

При капремонте в ствол скважины с помощью лебедки бурового ударно-канатного станка (УКС) опускают буровые штанги до упора в торец надфильтровой трубы. Верхний конец буровых штанг выводят на устье скважины так, чтобы он возвышался над оголовком, снабжают ударником и сбрасывают на него с помощью лебедки бурового станка груз значительной массы. Ударное усилие через буровые штанги передается на фильтровую колонну. Если масса груза подобрана правильно, то под действием ударной нагрузки происходит срез материала шпилек и перемещение вниз фильтровой колонны внутри гильзы. Фильтровая колонна смещается вниз, преодолевая силы трения и сцепления с гравийной обсыпкой. Материал фильтровой колонны и сварных швов работает на сжатие, что исключает его разрушение. По мере смещения вдоль грунта зубья, выполненные из твердосплавного материала, разрыхляют гравийную обсыпку, что облегчает последующее извлечение фильтровой колонны наверх. Затем буровые штанги достают, в скважину опускают грузовой крюк, который вводят в зацепление с захватной скобой, и посредством лебедки бурового станка извлекают фильтровую колонну наверх.

При невозможности извлечения фильтровой колонны ее оставляют внутри «длинной» гильзы, соизмеримой с длиной фильтровой колонны (рис. 2b). Гравийную обсыпку выбуривают долотом, устанавливают новую фильтровую колонну и обсыпают ее новой гравийной обсыпкой.

Если надфильтровая колонна выведена на устье скважины (скважина с фильтром на «основной колонне»), то удары грузом значительной массы наносят по надфильтровой трубе, снабдив ее специальным наголовником, чтобы предотвратить смятие края трубы (рис. 2b). Скважина этой конструкции для экономии средств должна быть снабжена «короткой» гильзой.

Наличие гильзы в нижней части скважины обеспечивает возможность движения фильтровой колонны вниз при работе материала сварных швов на сжатие, что обеспечивает надежный срез цементирующих связей на контакте колонны и гравийной обсыпки и сохранение целостности колонны. Проверим, возможен ли разрыв шва. Определим для него допустимую величину растягивающей силы $P_{\text{ш}}$ и сравним ее с подъемным усилием $P_{\text{п}}$, необходимым для извлечения эксплуатационной колонны с фильтром только статической силой. В [5] рассмотрены основные подходы к определению подъемного усилия $P_{\text{п}}$ лишь статической нагрузкой при капитальном ремонте водозаборной скважины.

Условие прочности сварного шва встык на растяжение при извлечении колонны можно определить по формуле [6]

$$\sigma_p = \frac{P}{F} \leq [\sigma_p^3], \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения трубы наружным диаметром $d_{\text{кол}}$ и толщиной δ в месте сварки, $F = \pi d_{\text{кол}} \delta$; $[\sigma_p^3]$ – допустимое напряжение для электросварных швов.

Тогда допустимая нагрузка на шов

$$P_{\text{ш}} \leq \pi d_{\text{кол}} \delta [\sigma_p^3]. \quad (2)$$

Допустимые напряжения для электросварочных швов, выполненных вручную толстопокрытыми электродами, равны $[\sigma_p^3] = 0,8[\sigma_p]$, где $[\sigma_p]$ – допустимое напряжение основного металла. Если металл шва Ст3, то $[\sigma_p] = 160$ МПа [6].

По формуле (2) находим допустимую силу для шва при извлечении трубы ($d_{\text{кол}} = 0,273$ м; $\delta = 7$ мм = 0,007 м; металл шва Ст3; $[\sigma_p] = 160$ МПа):

$$P = 0,8 \pi d_{\text{кол}} \delta [\sigma_p] = 0,8 \cdot 3,14 \cdot 0,273 \cdot 0,007 \cdot 160 \cdot 10^6 = 770 \text{ (кН)}. \quad (3)$$

Расчет сделан для шва встык, выполненного равномерно по всей площади торца трубы. Однако на практике такой шов не обеспечивается,

поскольку трубы имеют фаски под углом 45° , их сваривают в вертикальном положении, поставив одну трубу на другую. В данном случае шов разрушается по плоскости, имеющей площадь $F' = \pi d_{\text{кол}} \delta \cos 45^\circ = 0,7F$. Поэтому допустимая сила при извлечении будет на 30 % меньше, т. е.

$$P' = 0,7P = 0,7 \cdot 770 = 540 \text{ (кН)}. \quad (4)$$

В то же время в [3, с. 294] указывается, что при нагрузках до 950–1000 кН фильтры, как правило, не извлекаются. Это значит, что при таких нагрузках произойдет разрыв сварного шва.

Подъемное усилие $P_{\text{п}}$ при извлечении эксплуатационной колонны с фильтром только статической силой находим по формуле согласно [5]

$$P_{\text{п}} = G + F_{\text{тр.к}} + F_{\text{тр.ф}} = g(q_{\text{кол}} l_{\text{кол}} + q_{\text{ф}} l_{\text{ф}}) + Nf + F_{\text{тр.ф}}, \quad (5)$$

где G – общий вес извлекаемой эксплуатационной колонны и фильтра; $F_{\text{тр.к}}$, f – сила и коэффициент трения эксплуатационной колонны о породу; $q_{\text{кол}}$, $q_{\text{ф}}$ – соответственно масса 1 м пог. колонны и фильтра, имеющих длины $l_{\text{кол}}$ и $l_{\text{ф}}$; N – горизонтальная составляющая бокового давления породы на колонну; $F_{\text{тр.ф}}$ – сила трения фильтра с «кольматационной коркой» о породу.

Силу N можно определить по методике расчета сил давления на подпорные стенки [7]. Найдем N (при допущении о треугольной эпюре распределения горизонтальных напряжений от горного давления по глубине) как объем эпюры давления, действующего на колонну длиной $l_{\text{кол}}$ и наружным диаметром $d_{\text{кол}}$:

$$N = 0,5 l_{\text{кол}} (\sigma_{\text{в}} + \sigma_{\text{н}}) \pi d_{\text{кол}} = 0,5 l_{\text{кол}} \left[\sum K_{ai} \gamma_i h_i + \left(\sum K_{ai} \gamma_i h_i + K_{an} \gamma_{\text{п}} l_{\text{кол}} \right) \right] \pi d_{\text{кол}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{н}}$ – напряжение на верхней и нижней отметках колонны; K_{ai} – коэффициент активного давления i -го слоя грунта толщиной h_i и удельным весом γ_i ; K_{an} , $\gamma_{\text{п}}$ – то же водонасыщенного грунта; $K_a = \text{tg}^2(45^\circ - 0,5\varphi)$; φ – угол внутреннего трения грунта; $\gamma_{\text{п}} = g\rho_{\text{с}}(\rho_{\text{п}} - 1000)/\rho_{\text{п}}$; $\rho_{\text{с}}$, $\rho_{\text{п}}$ – плотность скелета и грунта водоносного пласта.

Силу трения фильтра о породу определим по [8] как несущую способность буронабивной сваи, работающей на выдергивающие нагрузки:

$$F_{\text{тр.ф}} = \gamma_{\text{с}} \sum u \gamma_{\text{сф}} R_{\text{ф}} h_i, \quad (7)$$

где $\gamma_{\text{с}}$ – коэффициент условий работы, $\gamma_{\text{с}} \approx 0,8$; u – осредненный периметр поперечного сечения фильтра с «кольматационной коркой», состоящей из частиц гравийной обсыпки, скрепленной цементом обрастания, в i -м слое водоносного пласта, м; $\gamma_{\text{сф}}$ – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности «кольматационной корки», зависящий от прочности от-

ложений, $\gamma_{cf} = 0,6-0,8$; R_{fi} – расчетное сопротивление трению грунта в пределах i -го слоя водоносного пласта толщиной h_i .

Теперь рассмотрим задачу о нахождении потребной энергии удара для преодоления бокового сопротивления грунта по всей длине колонны труб и лобового сопротивления грунта для смещения ее на заданное расстояние в скважине и обеспечения срезки шпилек гильзы. Используем энергетический подход, применяемый для прогнозирования погружения свай в грунте [9].

Уравнение энергетического баланса для вертикального смещения колонны труб скважины имеет вид: полезная работа удара при погружении колонны труб скважины в грунте на заданное расстояние равна сумме работ сил бокового сопротивления грунта по всей боковой поверхности колонны и сил лобового сопротивления, плюс работа сил сопротивления материала шпилек при их срезке. Расчетные схемы для определения энергии удара для различных конструкций нижней части скважины представлены на рис. 3.

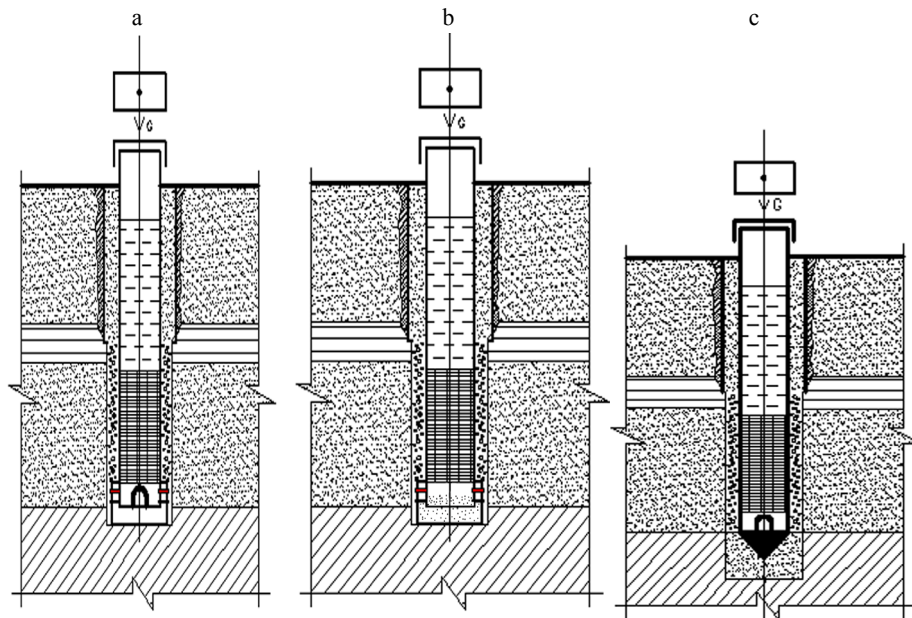


Рис. 3. Расчетные схемы определения энергии удара:

а – шпильки рассчитаны на вес всей колонны; б – шпильки рассчитаны только на вес гильзы; в – отстойник имеет внедряемый в грунт наконечник

Fig. 3. Design models for the blow energy determination:

а – drift pins designed for the entire column weight; б – drift pins designed only for the sleeve weight; в – settler has an end bit embedding into the ground

Для анализа системы «молот – колонна – грунт» используем наиболее простую пластическую модель, построенную с учетом следующих допущений: скважина представляет собой абсолютно твердый трубчатый стержень; окружающий скважину грунт неподвижен; силы трения между боковыми поверхностями элементов конструкции скважины и грунтом не зависят от скорости движения (кулоновское сухое трение).

Для общего случая уравнение энергетического баланса имеет вид

$$aE = (R_{\phi} + R_k + R_{\text{лоб}})e + [\tau_{\text{ср}}]\omega\delta n / 2, \quad (8)$$

где a – поправочный коэффициент; E – энергия удара; R_{ϕ} , R_k – силы трения боковых поверхностей соответственно фильтра и эксплуатационной (надфильтровой) колонны о грунт; $R_{\text{лоб}}$ – лобовое сопротивление конструкции; e – перемещение конструкции вследствие удара; $[\tau_{\text{ср}}]$ – прочность материала шпилек на срез; ω – площадь поперечного сечения шпильки; δ – перемещение конструкции при срезе шпильки, равное диаметру шпильки; n – количество шпилек.

Величину энергии, идущей непосредственно на погружение конструкции, в случае молота свободного падения определим из [10]

$$E = 0,9GH\eta, \quad (9)$$

где G , H – вес ударной части молота и высота ее падения; η – КПД передачи энергии от молота погружаемой конструкции при ударе.

КПД удара η может быть приближенно вычислен из условия соударения двух свободных тел в рамках классической теории удара

$$\eta = \frac{1 + m\varepsilon^2}{1 + m}, \quad (10)$$

где m – отношение массы конструктивных элементов скважины M_c к массе молота M_m ; ε – коэффициент восстановления при ударе через наголовник с прокладкой, $\varepsilon = 0,45\text{--}0,55$ [9].

Известно, что результативность удара тем выше, чем больше масса молота при одной и той же энергии удара. Поэтому поправочный коэффициент a отражает изменение эффективности удара в зависимости от отношения массы молота к массе погружаемой конструкции. На основании сопоставлений фактических и расчетных кривых погружения свай (более 600 свай) предложена зависимость [9]

$$a = k \sqrt{\frac{M_m}{M_c}}, \quad (11)$$

где k – коэффициент, характеризующий степень совершенства модели, т. е. соответствие фактическим данным, для подвешного молота рекомендуется $k = 0,5\text{--}0,7$ [9].

Силы трения боковых поверхностей R_k , R_{ϕ} эксплуатационной и фильтровой колонн о грунт при ударе определим по общей формуле

$$R_i = u_i f_i l_i, \quad (12)$$

где u – периметр поперечного сечения колонны; f – расчетное сопротивление грунта [11]; l – длина колонны.

Лобовое сопротивление $R_{\text{лоб}}$ нижней части конструкции при внедрении в грунт найдем из выражениям

$$R_{\text{лоб}} = R_{\text{д}} F, \quad (13)$$

где $R_{\text{д}}$ – лобовое сопротивление грунта [11]; F – площадь поперечного сечения отстойника.

Предложенная методика расчета позволяет определить необходимые усилия для смещения вниз и извлечения фильтровой колонны при выполнении капитального ремонта скважин новой конструкции.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены недостатки и преимущества отдельных видов капитальных ремонтов вышедших из строя скважин. На примере капитального ремонта типовой скважины № 3Б (128290/96) водозабора «Северный» г. Жодино глубиной 94 м показано, что перед установкой ремонтного фильтра внутрь вышедшего из строя необходимо проведение декольматации. Посредством газоимпульсной обработки удельный дебит скважины удалось увеличить в два раза (с 6 до 12 м³/ч). Эта операция необходима, так как после капремонта у скважины с двойным фильтром она неэффективна. Показано, что такой капитальный ремонт возможен только в фильтрах с внутренними диаметрами ≥ 200 мм и является временной мерой, поскольку дебит скважины и срок ее службы будут существенно снижены.

2. Проверка прочности на разрыв колонны при извлечении фильтра показала, что требуемое подъемное усилие может превышать допустимую растягивающую силу для сварных швов из-за высоких сил трения колонны о грунт. В этой связи предложена усовершенствованная конструкция скважины со смещаемым вниз фильтром, признанная изобретением. Такая конструкция скважины позволяет при выходе фильтра из строя внешними ударными усилиями сместить вниз всю фильтровую колонну внутрь гильзы и далее при возможности извлечь ее из скважины тяговым усилием.

3. Из уравнения энергетического баланса для вертикального смещения колонны труб получено выражение для расчета веса ударной части молота и высоты ее падения при капремонте скважины усовершенствованной конструкции. Предложены формулы для определения величины тягового усилия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башкатов, А. Д. Предупреждение пескования скважин / А. Д. Башкатов. М.: Недра, 1991. 176 с.
2. Волоховский, Г. А. Эксплуатация и ремонт систем сельскохозяйственного водоснабжения / Г. А. Волоховский. М.: Россельхозиздат, 1982. 224 с.
3. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. 3-е изд. М.: Недра, 1976. 345 с.

4. Водозаборная скважина: пат. 19304 Респ. Беларусь: МПК Е 21В 43/00 / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, П. А. Автушко; дата публ.: 30.06.2015.
5. Ивашечкин, В. В. Сооружение и ремонт водозаборной скважины с системой циркуляционной регенерации / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко // *Энергетика...* (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). 2011. № 4. С. 64–73.
6. Кочетов, В. Т. Сопротивление материалов / В. Т. Кочетов, А. Д. Павленко, М. В. Кочетов. Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. 366 с.
7. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Подпорные стены и крепления котлованов. Правила проектирования и устройства: ТКП 45-5.01-237–2011 (02250). Введ. 01.07.2011 (с отменой П 17-02 к СНБ 5.01.01–99). Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2011. 100 с.
8. Проектирование и устройство буронабивных свай: П 13-01 к СНБ 5.01.01–99. Введ. 01.01.2002. Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2002. 43 с.
9. Новожилов, Г. Ф. Бездефектное погружение свай в талых и вечномёрзлых грунтах. Л.: Стройиздат, 1987. 112 с.
10. Васенин, В. А. Оценка параметров колебаний грунта при ударном погружении свай. Основные следствия / В. А. Васенин // *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2003. № 7. С. 210–224.
11. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-5.01-254–2012 (02250). Введ. 01.07.2012 (с отменой СНБ 5.01.01–99). Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2012. 102 с.

Поступила 06.04.2015 Подписана в печать 03.06.2015 Опубликовано онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. Bashkatov A. D. (1991) *Admonishment of the Water Well Sand Addition*. Moscow, Nedra. 176 p. (in Russian).
2. Volokhovskiy G. A. (1982) *Operation and Maintenance of the Agricultural Water Supply Systems*. Moscow, Rosselkhozizdat. 224 p. (in Russian).
3. Gavrilko V. M., Alekseev V. S. (1976) *Screens for the Drilled Holes*. 3^d ed. Moscow, Nedra. 345 p. (in Russian).
4. Ivashechkin V. V., Sheyko A. M., Avtushko P. A. (2015) *Water Source Well*. Patent Republic of Belarus no 19304 (in Russian).
5. Ivashechkin V. V., Avtushko P. A. (2011) *Construction and Maintenance of a Water Source Well with Circulatory Regeneration System*. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (4), 64–73 (in Russian).
6. Kochetov V. T., Pavlenko A. D., Kochetov M. V. (2001) *Theory of Strength of Materials*. Rostov-on-Don, Phoenix. 366 p. (in Russian).
7. ТКП 45-5.01-237–2011 (02250). Basements and Foundations of Buildings and Structures. Retaining Walls and Foundation Pit Shorings. Design and Installation Codes. Introduced 01.07.2011 (with Cancellation of P 17-02 to SNB 5.01.01–99). Minsk: Minstroyarchitecture of the Republic of Belarus, 2011. 100 p. (in Russian).
8. P 13–01 to SNB 5.01.01–99. Project Engineering and Arrangement of Augered Piles Introduced 01.01.2002. Minsk: Minstroyarchitecture, 2002. 43 p. (in Russian).
9. Novozhilov G. F. (1987) *Free from Defects Pile Sinking in Thawed and Permanently Frozen Soils*. Leningrad, Stroyizdat. 112 p. (in Russian).
10. Vasenin V. A. (2003) *Ground Vibration Parameter Estimation at Hammering of Piles. Major Effects*. *Rekonstruktsiia Gorodov i Geotekhnicheskoe Stroitelstvo* [Urban Redevelopment and Geotechnical Construction], (7), 210–224 (in Russian).
11. ТКП 45-5.01-254–2012 (02250). Foundations of Buildings and Structures. Main Provisions. Construction Design Standards. Introduced 01.07.2012 (with Cancellation of SNB 5.01.01–99). Minsk: Minstroyarchitecture of the Republic of Belarus, 2012. 102 p. (in Russian).

Received: 6 April 2015

Accepted: 3 June 2015

Published online: 30 March 2016