



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Том 18 № 2 (2017)

DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Научный журнал

Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Главный редактор

Дьяконов В.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой месторождений полезных ископаемых и их разведки РУДН

Заместитель главного редактора

Пономарев Н.К., кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета РУДН

Ответственный секретарь

Абрамов В.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры месторождений полезных ископаемых и их разведки РУДН

Члены редакционной коллегии

Алиев С.Б. — доктор технических наук, заместитель директора департамента развития предпринимательской деятельности Евразийской экономической комиссии

Воробьев А.Е. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нефтепромысловой геологии, горного и нефтегазового дела РУДН

Галишников В.В. — кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой строительных конструкций и сооружений инженерного факультета РУДН

Гусаков С.В. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей инженерного факультета РУДН

Дивеев А.И. — доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН

Кривошапко С.Н. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прочности материалов и конструкций инженерного факультета РУДН

Пилов П.И. — доктор технических наук, профессор, первый проректор Национального горного университета (Днепропетровск, Украина)

Рогов В.А. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий машиностроения, металлорежущих станков и инструментов инженерного факультета РУДН

Свищов А.П. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и строительства промышленных и гражданских сооружений РУДН

Сученко В.Н. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геодезии и маркшейдерского дела РУДН

Хаинц Шанделмейер де Оливейра — доктор философии (Ph.D, геология), научный сотрудник с долгосрочными проектами департамента геологоразведки Института прикладных исследований Технического университета Берлина (Германия)

Шкарупа И.Л. — кандидат технических наук, Ученый секретарь ФГУП ОНПП «Технология» (Обнинск)

Петер Ян Паль — доктор наук, профессор Берлинского Технического Университета (Германия) факультета планирования обустройства окружающей среды

ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ. СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2312-8151 (online); ISSN 2312-8143 (print)

4 выпуска в год.

Входит в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ.

Включен в каталог периодических изданий Ульрих (Ulrich's Periodicals Directory:
<http://www.ulrichsweb.com>).

Языки: русский, английский, французский, немецкий, испанский.

Материалы журнала размещаются на платформах РИНЦ Российской научной электронной библиотеки, Electronic Journals Library Cyberleninka.

Цель и тематика

Ежеквартальный научный рецензируемый журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» издается Российским университетом дружбы народов с 2000 года.

Цель журнала — публикация результатов исследований ученых Инженерной академии РУДН и их коллег по проблемам строительства, архитектуры, машиностроения, геологии, горного дела.

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам и студентам по соответствующим направлениям научных исследований.

Основные тематические разделы:

Инновационные программы инженерных исследований;
Машиностроение и энергомашиностроение;
Инновационное недропользование;
Актуальные вопросы технологий строительных процессов;
Кибернетика и мехатроника;
Рецензии.

Редактор: *М.П. Малахов*
Компьютерная верстка: *О.Г. Горюнова*

Адрес редакции:
ул. Орджоникидзе, д. 3, Москва, Россия, 115419
Тел.: (495) 955-07-16; e-mail: ipk@rudn.university

Адрес редакционной коллегии серии «Инженерные исследования»:
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419
Тел.: (495) 955-07-92; e-mail: engjournalrudn@rudn.university

Подписано в печать 15.06.2017. Выход в свет 30.06.2017. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «NewtonС».
Усл. печ. л. 10,64. Тираж 500 экз. Заказ № 587. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов» (РУДН)
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН
115419, Москва, Россия, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. (495) 952-04-41; e-mail: ipk@rudn.university



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

VOLUME 18 NUMBER 2 (2017)

DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA

EDITOR-IN-CHIEF

Diakonov V.V., doctor of geological-mineralogical sciences, professor, head of the department of mineral deposits and their exploration of them. Kreiter of PFU

ASSOCIATE EDITOR-IN-CHIEF

Ponomarev N.K., candidate of technical sciences, associated professor, dean of engineering faculty of PFU

ASSISTANT TO THE EDITOR-IN-CHIEF

Abramov V.Yu., candidate of geological-mineralogical sciences, associated professor of department of mineral deposits and their exploration of them. Kreiter of PFU

EDITORIAL BOARD

Aliev S.B. — doctor of technical sciences, the deputy director of the department of business development, Eurasian economic commission

Vorobiev A.E. — doctor of technical sciences, head of the department of oilfield geology, mining and petroleum engineering of PFU

Galishnikova V.V. — doctor of technical sciences, head of the department of building structures and facilities of PFU

Gusakov S.V. — doctor of technical sciences, head of the department of themotechnics and heat engines of PFU

Diveev A.I. — doctor of technical sciences, head of the sector of problems of cybernetics of computer center name Dorodnitsyn RSA

Krivoshapko S.N. — doctor of technical sciences, head of the department of strength of materials and structures of PFU

Pilov P.I. — doctor of technical sciences, professor, first vice-rector national mining university (Dnepropetrovsk, Ukraine)

Rogov V.A. — doctor of technical sciences, head of the department of engineering technology, metal-cutting machines and tools of PFU

Svintsov A.P. — doctor of technical sciences, head of the department of design and construction of industrial and civil constructions of PFU

Suthenko V.N. — doctor of technical sciences, head of the department of geodesy and mine surveying of PFU

Heinz Schandelmeier de Oliveira — Ph.D., geology, researcher with long-term projects of department of geological prospecting. Institute of applied research. Technical university of Berlin (Germany)

Shkarupa I.L. — candidate of technical sciences. Scientific secretary of FSU "NFS "Technology"

Peter Jan Pal — doctor of sciences, professor of technical university of Berlin (Germany). Faculty of environmental planning

RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES.
Published by the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

ISSN 2312-8151 (online); ISSN 2312-8143 (print)

4 issues per year.

Languages: Russian, English, French, German, Spanish.

Indexed in Ulrich's Periodicals Directory: <http://www.ulrichsweb.com>

Aim and Scope

The quarterly scientific reviewed journal RUDN Journal of Engineering Researches Is published by the Peoples' Friendship University of Russia since 2000.

The purpose of the journal — is the publication of research results of scientists of the Engineering academy of RUDN University, and their colleagues on the problems of civil engineering, architecture, mechanical engineering, geology, mining engineering.

The journal is addressed to scientists, engineers, graduate students and students on corresponding directions of scientific research.

Main thematic sections:

Innovative software engineering research;
Mechanical engineering and power-plant;
Innovative use of mineral resources;
Actual technology of construction processes;
Cybernetics and mechatronics;
Reviews.

Editor *M.P. Malakhov*

Computer design: *O.G. Gorunova*

Address of the editorial board:

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Ph. +7 (495) 955-07-16; e-mail: ipk@rudn.university

Address of the editorial board Series "Engineering researches":

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Ph. +7 (495) 955-07-92;

e-mail: engjournalrudn@rudn.university

Printing run 500 copies. Open price.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"Peoples' Friendship University of Russia"

6 Miklukho-Maklaya str., 117198 Moscow, Russia

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze str., 115419 Moscow, Russia,

Ph. +7 (495) 952-04-41; e-mail: ipk@rudn.university

СОДЕРЖАНИЕ

ИННОВАЦИОННОЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Иофис М.А., Есина Е.Н.** Развитие методов геомеханического обеспечения разработки свит газоносных угольных пластов..... 167
- Серебряков А.Н., Мотузов И.С.** Коррозия нефтепромыслового оборудования и мероприятия по противокоррозионной защите на нефтяном месторождении Каракудук (Западный Казахстан)..... 174

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

- Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ионов Д.Н., Грицук И.И., Джумагулова Н.Т.** Лабораторное исследование влияния потока на протаивание подводного склона и темпы береговой эрозии в условиях криолитозоны 182
- Кампос Седеньо Антонио Фермин, Синиченко Е.К., Грицук И.И.** Оценка потенциальной водной эрозии гидрографической демаркации Манаби (Эквадор)..... 192
- Имомназаров Т.С., Тупикова Е.М.** Использование композитных материалов при благоустройстве городских территорий 204
- Абу Махади М.И., Безбородов А.В.** Применение шлакощелочных вяжущих в строительстве..... 212
- Razin A.D., Alhalabi Z.Sh., Khalil I.** The study of business centers in the Arabian Gulf: residential, offices, and commercial buildings (Исследование бизнес-центров в Арабском заливе: жилых, офисных и коммерческих зданий) 219
- Разин А.Д.** Архитектурно-планировочные требования по обеспечению антитеррористической защищенности дипломатических зданий 230
- Задиранов А.Н., Малькова М.Ю., Нурмагомедов Т.Н., Дхар П.** Перспективы применения современных технологий при переработке строительных отходов 236
- Свинцов А.П., Гамал Т.С.Ф., Шумилин Е.Е.** Влияние минерального и растительного масла на деформативные свойства бетона 245

КИБЕРНЕТИКА И МЕХАТРОНИКА

- Дивеев А.И., Константинов С.В.** Эволюционные алгоритмы для решения задачи оптимального управления 254

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Жильцов С.А., Карпушин А.А.** Использование гелиотропических солнечных панелей для автономного электроснабжения потребителей 266
- Шаталов И.К., Шаталова И.И.** Оценка эффективности применения инновационных технологий для энергообеспечения тепличного комплекса 275

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

- Вальехо Мальдонадо П.Р., Антипов Ю.А., Ощепков П.П.** Сравнение экономичности бензинового двигателя с расслоением заряда и автомобильного дизеля..... 286

CONTENTS

INNOVATIVE USE OF MINERAL RESOURCES

- Iofis M.A., Esina E.N.** Development of methods for geomechanical ensure the operation of the gas-bearing coal seams 167
- Serebryakov A.N., Motuzov I.S.** Corrosion of oilfield equipment and anticorrosion techniques applied on the Karakuduk oilfield (Western Kazakhstan) 174

CURRENT ISSUES OF CONSTRUCTION PROCESSES

- Debolskiy V.K., Maslikova O.Ya., Ionov D.N., Gritsuk I.I., Jumagulova N.T.** Laboratory study influence of flow on thawing of underwater slopes and the pace coastal erosion of rivers, occurring in the permafrost zone 182
- Campos Cedeno Antonio Fermin, Sinichenko E.K., Gritsuk I.I.** Evaluation of potential water erosion of hydrographic demarcation of Manabi, Ecuador..... 192
- Imomnazarov T.S., Tupikova E.M.** Composite structures application in urban landscaping 204
- Abu Mahadi M.I., Bezborodov A.V.** Application slag-alkali binder in construction..... 212
- Razin A.D., Alhalabi Z.Sh., Khalil I.** The study of business centers in the Arabian Gulf: residential, offices, and commercial buildings 219
- Razin A.D.** The ensuring anty-terrorist protection of diplomatic buildings by architectural planning decisions..... 230
- Zadiranov A.N., Malkova M.Y., Nurmagomedov T.N., Dkhar P.** Prospects of modern technologies application in the construction waste processing..... 236
- Svintsov A.P., Gamal T.S.F., Shumilin E.E.** Effect of mineral and vegetable oil on deformation properties of concrete 245

CYBERNETICS AND MECHATRONICS

- Diveev A.I., Konstantinov S.V.** Evolutionary algorithms for the problem of optimal control 254

INNOVATIVE RESEARCH PROGRAMS IN ENGINEERING

- Zhiltsov S.A. Karpushin A.A.** Use of tropical helios solar panels for stand-alone power supply to consumers 266
- Shatalov I.K., Shatalova I.I.** The effectiveness of innovative technologies for energy supply of greenhouses..... 275

MECHANICAL ENGINEERING AND POWER ENGINEERING

- Vallejo Maldonado P.R., Antipov Yu.A., Oshchepkov P.P.** Comparison of efficiency petrol of engine with strautified charge and automotive diesel..... 286



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-167-173

УДК 622.83

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ СВИТ ГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

М.А. Иофис¹, Е.Н. Есина²

¹ Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук

Крюковский туп., 4, Москва, Россия, 111020

² Российский университет дружбы народов

ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Получили развитие методы геомеханического обеспечения разработки свит газоносных угольных пластов. Научно обоснован и разработан способ скважинной добычи угля и газа из пластов, склонных к газо- и геодинамическими явлениями. При этом безопасное ведение горных работ обеспечивается за счет использования внутренней энергии массива горных пород для разрушения полезного ископаемого при скважинной добыче и его транспортировки к потребителю. Разработан способ гидравлической добычи угля из свит газоносных угольных пластов. В качестве дегазации используется предварительная разгрузка угольных пластов и вмещающего массива горных пород путем скважинной выемки угля из пласта, опасного по выбросам газа. В целом, составленная методика управления геомеханическими и газодинамическими процессами обеспечивает безопасную и эффективную разработку газоносных угольных пластов.

Ключевые слова: месторождения полезных ископаемых, свиты угольных пластов, газодинамические явления, геомеханическое обеспечение, предварительная дегазация

Разработка месторождений полезных ископаемых, склонных к газо-, геодинамическим явлениям, с применением традиционного шахтного способа разработки, сопряжена с повышенным травматизмом при производстве горных работ в условиях высокой опасности газо- и геодинамических явлений [1].

Так, только на шахтах «Юбилейная», «Ульяновская» и «Распадская» в Кузбассе, шахтах им. Засядько и им. Скочинского в Донбассе взрывы метана в течении трех лет вызвали гибель около двухсот человек и разрушение многих километров горных выработок. При этом взрыв на шахте «Распадская» был настолько мощным, что взрывная волна вышла по стволу на земную поверхность и разрушила здание административного комбината.

Наиболее распространенной мерой борьбы с внезапными выбросами газа долгое время была принята опережающая отработка защитных пластов, согласно которой в первую очередь разрабатывается наименее опасный пласт, а затем в зоне его влияния обрабатываются выше- и нижележащие пласты. В основу этого метода положено свойство угольного пласта, попадающего в зону разгрузки от горного давления, выделять содержащиеся в нем газы и заполнять ими образующиеся при этом трещины. После удаления этого газа пласт становится невыбро-

соопасным. Однако практика горного дела показала, что удаление газа в современных условиях, особенно при применении высокопроизводительной добычной техники, происходит значительно медленнее, чем его выделение. Попытки применить дегазационные скважины для решения этой проблемы пока должного эффекта не дали, так как понятие защитный пласт — условно и пребывание людей в нем весьма опасно. Наиболее целесообразно осуществлять выемку защитного пласта в рассматриваемых условиях с помощью добычных скважин. Их же использовать и в качестве дегазационных.

При скважинной геотехнологии все технологические процессы производятся без непосредственного нахождения людей в местах залегания полезного ископаемого. При этом создаются преимущества, которые позволяют по-новому оценивать как известные месторождения полезных ископаемых, так и вновь открываемые, обеспечивая повышение технологической, экономической и экологической эффективности освоения недр.

Известны скважинные геотехнологии освоения месторождений, позволяющие вести добычу сырья без присутствия людей непосредственно в очистном забое. Существует опыт разработки угольных месторождений методом подземной газификации угля [2]. При этом уголь в пласте, под землей, превращается в горючий газ, обладающий достаточной калорийностью для энергетического и технологического использования. Однако недостаток данного способа заключается в трудности управления огневым забоем при выгазовывании угольных пластов, а также сложности регулирования полноты отработки пласта, что влечет за собой ограничения в извлечении ресурсов недр.

В результате установления природы и механизма геомеханических процессов при освоении месторождений, опасных по газо-, гидро и геодинамическим явлениям, систематизированы методы геомеханического обеспечения освоения месторождений в сложных условиях [3]. Институтом проблем комплексного освоения недр РАН разработан способ *скважинной добычи угля и газа из пластов, склонных к газо- и геодинамическим явлениям*, и составлена методика управления геомеханическими и газодинамическими процессами, основанная на предварительной дегазации угольных пластов с применением скважинных способов добычи [4].

Согласно этому способу при разработке месторождений полезных ископаемых, склонных к газо- и геодинамическим явлениям, производят вскрытие с помощью скважин [5]. Затем создается полость с применением физического воздействия (взрывного, электрогидравлического разрушения и др.). Для дальнейшего разрушения полезного ископаемого при разработке пластов, склонных к газо- и геодинамическим явлениям, в качестве мощного физического воздействия используется собственная природная энергия, например, высокая метаноносность угольных пластов, которая служит отрицательным фактором при традиционных способах добычи, играет положительную роль для разрушения угольного пласта. При этом контролируется содержание метана в образованной полости. При достижении наиболее взрывоопасной концентрации метана 10% (метан взрывоопасен при концентрации в воздухе от 5 до 15%) в этой полости инициируется

взрыв для разрушения полезного ископаемого. Для предотвращения возгорания метана его концентрация снижается до взрывоопасной (5—15%) путем выпуска метана по скважинам на поверхность к потребителям, например, с помощью передвижной вакуум-насосной станции. Контроль содержания метана в образованной полости осуществляется одним из известных способов, например, с применением газоанализаторов. Далее уголь на поверхность поднимается путем перевода разрушенного угля в гидросмесь и дальнейшей подачи водоугольной суспензии на поверхность с помощью эрлифта или гидроэлеватора. После откачки водоугольной суспензии, выполняется второй цикл работ: контролируется достижение взрывоопасной концентрации метана во вновь образованной полости, инициируется повторный взрыв, повторяются ранее проведенные операции. При концентрации метана более 15% он горит, для предотвращения возгорания его концентрация снижается до взрывоопасной путем выпуска метана по скважинам на поверхность к потребителю, где также возможно его дальнейшее использование для технологических целей. Описанная последовательность операций проводится до тех пор, пока не произойдет обрушение основной кровли (генеральная посадка). После этого над обрушившейся основной кровлей образуется полость, равная по объему выработанному пространству, которая при разработке метанонасыщенных пластов заполняется газом. Скопившийся газ также откачивается по трубам на поверхность к потребителю.

Данный способ позволяет вести безопасную и эффективную отработку месторождений, склонных к газо- и геодинамическим явлениям, за счет использования внутренней энергии массива горных пород для разрушения полезного ископаемого при скважинной добыче и его транспортировке к потребителю.

В развитии методов управления геомеханическими и газодинамическими процессами разработан способ добычи угля из свит газоносных угольных пластов [6]. В качестве дегазации используется предварительная разгрузка угольных пластов и вмещающего массива горных пород путем скважинной выемки угля из пласта, опасного по выбросам газа.

При разработке свиты газонасыщенных пластов определяется защитный пласт, защитное действие которого распространяется на вышележащие и нижележащие пласты. Залежи вскрываются с помощью скважин (рис. 1). Затем в газонасыщенном пласте создается полость с применением мощного физического воздействия (взрывного, электрогидравлического разрушения и др.).

Для снижения интенсивности метановыделения из угольных пластов в горные выработки действующих шахт применяются предварительная дегазация и разгрузка вышележащих и нижележащих угольных пластов до начала очистных или подготовительных работ и текущая дегазация разгружаемых от горного давления угленосных толщ. При этом дегазационные скважины могут быть пробурены из подземных выработок или с земной поверхности.

Для дальнейшего разрушения полезного ископаемого в качестве мощного физического воздействия используется собственная природная энергия — высокая метаносность угольных пластов. При достижении наиболее взрывоопасной концентрации метана 10% в этой полости инициируется взрыв, разрушая тем

самым полезное ископаемое [5]. Разрушенный уголь в полости переводится в гидросмесь, интенсивно перемешивается, осаждая пустую породу на дно созданной полости, затем с помощью гидроэлеватора на поверхность подается водоугольная суспензия.

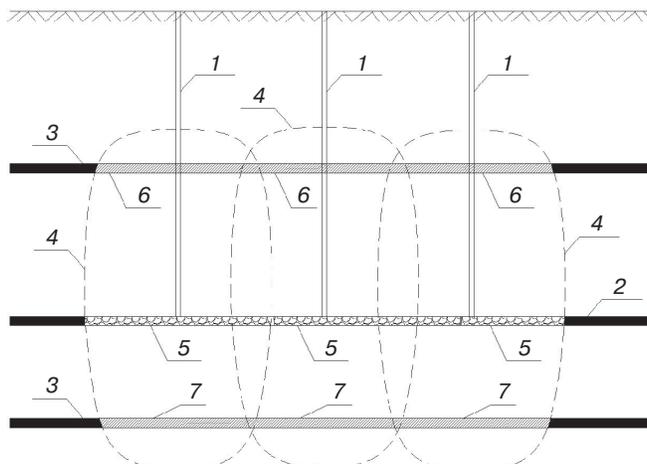


Рис. 1. Схема перераспределения горного давления в пределах области влияния очистной выработки по защитному пласту: 1 — скважины; 2 — первый отработываемый пласт, который используется в качестве защитного; 3 — подзащитные вышележащий и нижележащий пласты; 4 — контур защищенной зоны; 5 — выработанное с помощью скважин пространство в пласте, принятом в качестве защитного; 6 — защищенные участки вышележащего пласта; 7 — защищенные участки нижележащего пласта

[Fig. 1. A scheme of redistribution of rock pressure in the region of influence of an excavation on the protective layer: 1 — wells; 2 — working on the first layer, which is used as a protective; 3 — defendants overlying and underlying strata; 4 — circuit protected zones; 5 — developed with wells space in the seam, adopted as a protective; 6 — the protected parts of the overlying layer; 7 — the protected parts of the underlying layer]

При этом снижается опорное давление в массиве горных пород, прилегающем к выработанному пространству — участки 6, 7 (рис. 1). Описанным способом создается выработанное пространство такого размера, при котором надрабатываемые и подрабатываемые угольные пласты попадают в контур защищенной зоны 4, в которой снижается давление газа в пластах, уменьшается газоносность угля, повышается его газопроницаемость. Добычные скважины проектируются таким образом, чтобы границы защитных зон разрабатываемого пласта располагались равномерно по защищаемым пластам. По рекомендуемой схеме разработки угольных месторождений (рис. 2) с поверхности бурятся скважины первой очереди 1 по квадратной сетке, по мере отработки создаются защищенные зоны 2. Расстояние между скважинами принимается исходя из устойчивости кровли и принятого коэффициента извлечения. После того, как произведена гидродобыча из четырех скважин, расположенных по квадрату, бурятся скважины второй очереди в центре этого квадрата, при этом создаются защищенные зоны второй очереди 3. При этом добываются того, чтобы границы защитных зон разрабатываемого пласта располагались равномерно по защищаемым пластам.

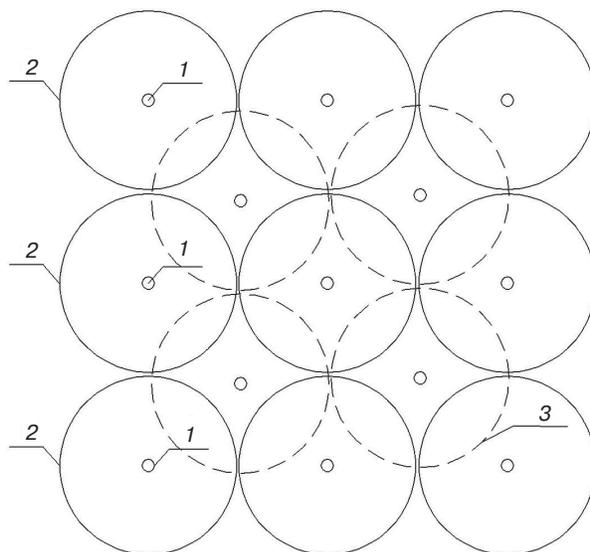


Рис. 2. Схема расположения скважин на земной поверхности и защищенных зон: 1 — скважины; 2 — контур защищенной зоны от скважин первой очереди; 3 — контур защищенной зоны от скважин первой очереди

[Fig. 2. Wells arrangement scheme on the surface and protected areas: 1 — wells; 2 — circuit protected zone from the first stage; 3 — circuit protected zone from the second stage]

В дальнейшем данные подзащитные участки угольных пластов 6, 7 (см. рис. 1), которые попадают в защищенную зону 4, разрабатываются традиционными подземными способами или ранее описанным скважинным.

Данный способ позволяет вести безопасную и эффективную отработку месторождений, склонных к газо- и геодинамическим явлениям, путем предварительной дегазации угольных пластов с применением скважинного способа добычи, без применения дорогостоящих и не всегда эффективных локальных мероприятий, что особенно важно при больших глубинах разработки и применении современной высокопроизводительной техники, поскольку выделение газа из пластов пропорционально объему добычи полезного ископаемого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / под ред. К.Н. Трубецкого. М.: Изд-во АГН, 1997. 478 с.
- [2] Крейнин Е.В., Федоров Н.А., Звягинцев К.Н., Пьянкова Т.М. Подземная газификация угольных пластов. М.: Недра, 1982. 151 с.
- [3] Иофис М.А., Есина Е.Н. Классификация методов геомеханического обеспечения горных работ в сложных условиях / Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. 2017. № 1. С. 13—22.
- [4] Трубецкой К.Н., Иофис М.А., Есина Е.Н. Особенности геомеханического обеспечения освоения месторождений, склонных к геодинамическим явлениям // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 3. С. 64—71.
- [5] Патент на изобретение № 2474691 «Способ скважинной добычи угля и газа из пластов, склонных к газо- и геодинамическими явлениями» Приоритет изобретения 14.04.2011. Зарегистрирован 10.02.2013.

[6] Патент на изобретение № 2564888 «Способ гидравлической добычи угля из газонасыщенных пластов». Приоритет изобретения 25.09.2014. Зарегистрирован 10.09.2015.

© Иофис М.А., Есина Е.Н., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 3 марта 2017

Дата принятия к печати: 16 марта 2017

Для цитирования:

Иофис М.А., Есина Е.Н. Развитие методов геомеханического обеспечения разработки свит газоносных угольных пластов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования».* 2017. Т. 18. № 2. С. 167–173.

Сведения об авторах:

Иофис Михаил Абрамович, профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела проблем управления освоением и сохранением недр Земли Института проблем комплексного освоения недр Российской академии наук. *Сфера научных интересов:* геомеханика, сдвигание горных пород, охрана недр и подрабатываемых объектов, управление деформационными и дегазационными процессами, освоение подземного пространства крупных городов. *Контактная информация:* e-mail: iofis@mail.ru

Есина Екатерина Николаевна, доцент, кандидат технических наук, доцент департамента «Геологии, горного и нефтегазового дела» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* геомеханика, сдвигание горных пород, геомеханическое обеспечение безопасного освоения недр. *Контактная информация:* e-mail: esina_en@pfur.ru

DEVELOPMENT OF METHODS FOR GEOMECHANICAL ENSURE THE OPERATION OF THE GAS-BEARING COAL SEAMS

М.А. Iofis¹, Е.Н. Esina²

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences

Kryukovsky tupik, 4, Moscow, Russia, 111020

² Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The methods of geomechanical ensuring development gas-bearing coal seams has been developed. The method of borehole mining of coal and gas from formations prone to gas and geodynamic phenomena has been scientifically substantiated and developed. Safe mining operations are ensured through the use of the internal energy of the rock mass to fracture the mineral in borehole production and its transportation to the consumer. The hydraulic mining method of sweet gas-bearing coal seams has been developed. As degassing is used preliminary unloading of coal beds and rocks by borehole

coal mining from the reservoir, hazardous gas emissions. In general, the method of controlling geomechanical and gas-dynamic processes ensure the safe and efficient development of gas-bearing coal seams.

Key words: mineral deposits, formation of coal seams, gas-dynamic phenomena, geomechanical ensure, preliminary degassing

REFERENCES

- [1] Mining science. Development and conservation of the Earth's interior / ed. by K.N. Trubetskoy. M.: Publishing house of AGN, 1997. 478 p. [Gornye nauki. Osvoenie i sokhranenie nedr Zemli / pod red. K.N. Trubetskogo. M.: Izd-vo AGN, 1997. 478 s.]
- [2] Kreinin E.V., Fedorov N.A., Zvyagintsev K.N., Pyankova T.M. Underground gasification of coal seams. M.: Nedra, 1982. 151 p. [Kreinin E.V., Fedorov N.A., Zvyagintsev K.N., P'yankova T.M. Podzemnaya gazifikatsiya ugol'nykh plastov. M.: Nedra, 1982. 151 s.]
- [3] Iofis M.A., Esina E.N. Technique classification of geomechanical maintenance of mining in difficult conditions / *Mining information-analytical Bulletin*. Special issue. 2017. No. 1. Pp. 13–22. [Iofis M.A., Esina E.N. Klassifikatsiya metodov geomekhanicheskogo obespecheniya gornyykh rabot v slozhnykh usloviyakh / Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten'. Spetsial'nyi vypusk. 2017. № 1. S. 13–22.]
- [4] Trubetskoy K.N., Iofis M.A., Esina E.N. Geomechanical Service in Mining under Gas-and-Dynamic Phenomena // *Journal of Mining Sciences*. 2015. No. 3. Pp. 506–512.
- [5] The Patent for the invention № 2474691 “Method of borehole mining of coal and gas from formations prone to gas and geodynamic phenomena” Priority of invention 14.04.2011. Was 10.02.2013. [Patent na izobretenie № 2474691 «Sposob skvazhinnoi dobychi uglya i gaza iz plastov, sklonnykh k gazo- i geodinamicheskim yavleniyami» Prioritet izobreteniya 14.04.2011. Zaregistrovan 10.02.2013.]
- [6] The Patent for the invention № 2564888 “Method of hydraulic mining of coal from gas-saturated reservoir”. Priority of invention 25.09.2014. Was 10.09.2015. [Patent na izobretenie № 2564888 «Sposob gidravlicheskoj dobychi uglya iz gazonasyshchennykh plastov». Prioritet izobreteniya 25.09.2014. Zaregistrovan 10.09.2015.]

Article history:

Received: 3 March 2017

Accepted: 16 March 2017

For citation:

Iofis M.A., Esina E.N. (2017) Development of methods for geomechanical ensure the operation of the gas-bearing coal seams. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 167–173.

Bio Note:

Mikhail A. Iofis, Professor, Doctor of technical Sciences, Chief Researcher of Department of Problem management development and conservation of the Earth's interior, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences. *Research interests*: geomechanics, rock movement, protection of mineral resources and undermining objects, deformation and degassing processes, development of underground space of megapolis. *Contact information*: e-mail: iofis@mail.ru

Ekaterina N. Esina, Ph.D., Associate Professor of the Department of Geology, Mining and Petroleum Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Sphere of scientific interests*: geomechanics, rock movement, geomechanical safe development of mineral resources. *Contact information*: e-mail: esina_en@pfur.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-174-181

УДК 622.323

КОРРОЗИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЕ НА НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАРАКУДУК (ЗАПАДНЫЙ КАЗАХСТАН)

А.Н. Серебряков, И.С. Мотузов

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Статья посвящена актуальной проблеме коррозии нефтепромыслового оборудования и борьбы с ней. Перед авторами статьи стояла цель обобщить накопившиеся сведения и данные о проблемах и перспективах применения различных противокоррозионных методов и средств, а также проанализировать имеющийся фактологический материал о противокоррозионной защите на нефтяном месторождении Каракудук.

На примере многолетней работы нефтепромысла нефтяного месторождения Каракудук, промышленная разработка которого началась в 1998 году согласно технологической схеме разработки, составленной институтом НИПИМунайгаз (город Актау, Республика Казахстан) в 1996 году, выполнен краткий обзор первостепенных причин коррозии нефтепромыслового оборудования и перечислен ряд существенных осложнений в работе нефтепромыслового оборудования, обусловленных коррозией. Рассмотрены наиболее значимые и действенные применяемые методы борьбы с коррозией. Последовательно приведены сведения об особенностях противокоррозионных мероприятий, проводимых на нефтяном месторождении Каракудук и нацеленных на предупреждение и уменьшение влияния коррозионных процессов на состояние ключевого нефтепромыслового оборудования различных систем: системы поддержания пластового давления, системы добычи, системы сбора и системы подготовки нефти. Описан порядок осуществления коррозионного контроля. Сделаны качественные выводы об эффективности мероприятий по противокоррозионной защите и даны рекомендации касательно выбора противокоррозионных методов и приемов.

Ключевые слова: коррозия, нефтепромысловое оборудование, система ППД, герметичность, защитное покрытие, солеотложение, ингибитор

Коррозия оборудования системы поддержания пластового давления (ППД)

Система ППД месторождения Каракудук основана на использовании альб-сеноманской воды, выкачиваемой из водозаборных скважин альб-сеноманского водоносного горизонта и затем закачиваемой в разрабатываемые нефтяные пласты с помощью нагнетательных скважин. На месторождении Каракудук альб-сеноманская вода — вода хлоркальциевого типа с минерализацией около 124 г/л и $\text{pH} = 6$ [1].

Промысловая практика применения альб-сеноманских вод в системе ППД на месторождении Каракудук, Узень, Кумколь, западносибирские нефтяные регионы и др. показала, что альб-сеноманские воды весьма агрессивны. Первые порывы начинают возникать на низконапорных водоводах спустя 1—2 года с введения этих водоводов в работу. Коррозия на внутренней поверхности труб носит локальный характер. Скорость коррозии, при отсутствии защитных мероприятий, доходит до 5 мм/год (согласно фактическим данным о сроках службы водоводов до появления первых порывов).

Основные факторы, вызывающие коррозию в системе ППД, следующие:

- 1) кислород, поступающий из воздуха;
- 2) песок, выносимый из водозаборных скважин;
- 3) соль, содержащаяся в воде системы ППД.

Кислород из воздуха попадает во внутреннее пространство труб различными путями: во-первых, вследствие негерметичности самой системы сбора и передачи воды; во-вторых, в результате захвата воздуха центробежными насосами при падении уровня воды в водозаборных скважинах; в-третьих, из-за неритмичной работы системы сбора и передачи воды.

В системе ППД планируется в качестве нагнетательной жидкости, помимо альб-сеноманской воды, использовать сточную воду нефтепромысла, количество которой будет возрастать по мере увеличения количества добываемой нефти [1; 2]. Пока трудно определить, чем будет ограничиваться коррозионная способность сточной воды, но следует ожидать, что присутствие растворенных газов в сточной воде, например, таких как сероводород, кислород или двуоксид углерода, усилит коррозионную активность сточной воды по отношению к металлу. Кроме того, возрастанию коррозионной активности способствует высокая температура.

Коррозия оборудования системы добычи, системы сбора и системы подготовки нефти

Каракудукские нефти легкие (плотность от 808 до 866 кг/м³), высокопарафинистые (от 4,2 до 22,3%, с температурой застывания от 8 до 29 °С), малосернистые (от 0,03 до 0,49%). По групповому углеводородному составу относятся к нафтеново-метановым. Температура нефтей в пластовых условиях заключена в пределах от 78 до 111 °С. Газонасыщенность имеет значения от 107 до 300 м³/т [1].

Пластовые воды высокоминерализованные (от 140 до 230 г/л), хлоркальциевого типа, с пластовой температурой от 104 до 110 °С. Плотность пластовых вод характеризуется значениями от 1055 до 1155 кг/м³. Значение рН пластовых вод находится в пределах от 4 до 6 [1].

Промысловой практикой установлено, что коррозия подземного оборудования добывающих скважин проявляется в первую очередь на насосно-компрессорных трубах (НКТ) и обсадных колоннах (ОК) [3]. Главные причины коррозии оборудования добывающих скважин такие:

- 1) значительная минерализация пластовой воды, добываемой попутно с нефтью (от 140 до 230 г/л);
- 2) механические примеси (преимущественно в виде песчинок);
- 3) высокая температура добываемой смеси флюидов (около 105 °С).

В ряду отрицательных последствий коррозии числятся:

1) потеря герметичности НКТ, что, в свою очередь, приводит к бесполезной энергозатратной внутрискважинной циркуляции добываемой смеси флюидов и, в особо тяжелых случаях, к обрыву колонны НКТ;

2) потеря герметичности обсадных колонн, способствующая крайне нежелательным перетокам между изначально разобщенными пластами;

3) порывы промысловых нефтепроводов, приводящие к образованию утечек жидких углеводородов и загрязнению окружающей среды.

Следует отметить, что многократные спускоподъемные операции (СПО) насосно-компрессорных труб (например, при проведении текущего и капитального ремонтов скважин) приводят к износу резьбовых соединений и, как следствие, к потере герметичности в местах соединения НКТ.

В ходе разработки месторождения могут возникать осложнения, связанные с отложениями неорганических солей. Отложения неорганических солей могут стать причиной нарушения стабильного режима добычи нефти. Наиболее подвержены осложнениям следующие технологические участки трех основных систем: в системе добычи нефти — призабойная зона пласта, НКТ, глубинные насосы, устьевая арматура; в системе внутривыпускного сбора и передачи нефти — замерные устройства, запорная арматура, выкидные линии; в системе подготовки нефти и утилизации сточных вод — печи подогрева водонефтяных эмульсий, замерные устройства, перекачивающие насосы, водоводы. Отложения неорганических солей в нефтепромысловом оборудовании обусловлены рассолами, т.е. возникающими в пластовых условиях перенасыщенными растворами труднорастворимых солей, выпадающих в осадок при соответствующем изменении термобарических условий и гидрохимической обстановки.

В составе солевых отложений могут быть, в различных соотношениях, сульфаты и карбонаты кальция и магния. Химический анализ пластовой воды на выявление ионов бария не проводился, однако в водах многих месторождений Мангышлака отмечено наличие этого иона. В случае присутствия его в пластовой воде месторождения Каракудук, вероятно выпадение солей сульфата бария.

Мероприятия по противокоррозионной защите

Примеров нарушения герметичности обсадных колонн в зацементированных зонах существенно меньше, чем в незацементированных зонах, т.е. цементное кольцо хорошо предохраняет металл от коррозионного разрушения. Поэтому рекомендуется с самого начала строительства скважин поднимать уровень цементного раствора до устья и качественно выполнять цементаж.

Внутреннюю поверхность подъемных труб и линий нефтяных скважин защищают противокоррозионные покрытия, которые противостоят агрессивным средам с температурой 50—80 °С. В некоторых случаях, при отсутствии труб с внутренней изоляцией, защита обеспечивается ингибиторами коррозии. С помощью передвижных агрегатов периодически подают ингибитор в нефтяные скважины (в кольцевое пространство между обсадной колонной и подъемной трубой). Для этого между обсадной колонной и трубой (у башмака) предусмотрено пакерующее

устройство (манжета) с небольшим (3–7 мм) отверстием для выхода ингибитора. Поданный в скважину объем ингибитора представляет собой запас на 10–15 дней.

Необходимое количество ингибитора для обработки всей поверхности защищаемого оборудования, включая внутреннюю поверхность эксплуатационной колонны, наружную и внутреннюю поверхность подъемных труб, поверхность штанг, внутреннюю поверхность выкидной линии, рассчитывается по формуле:

$$P = qS,$$

где q — норма расхода ингибитора на 1 м^2 поверхности, $\text{кг}/\text{м}^2$; S — суммарная площадь поверхности защищаемого оборудования, м^2 .

В системе ППД по мере возможности применяют трубы с внутренней изоляцией (на основе полимерных покрытий). Если такой возможности нет, то для защиты используют ингибиторы коррозии.

Опасность коррозии уменьшается с помощью специальной подготовки воды до поступления ее в систему ППД, а именно, благодаря удалению из нее едких агрессивных газов, а также солей и песка. При этом наряду с такой подготовкой воды к закачке, применяют ингибиторы коррозии.

В межтрубном же пространстве водозаборных скважин коррозию предотвращают с помощью пакеров, пространство над которыми подлежит заполнению противокоррозионным раствором.

В интервале перфорации защита обсадных колонн водозаборных скважин обеспечивается или спуском труб из коррозионностойких материалов, или спуском труб с защитными покрытиями, или спуском цементируемых хвостовиков.

Проблема потери герметичности НКТ в местах резьбовых соединений устраняется применением специальных уплотнительных составов-герметиков для улучшения герметизации.

К методам по предотвращению отложений неорганических солей относятся:

1) селективная изоляция и/или ограничение притока воды в добывающих скважинах;

2) ликвидация нарушений в цементном кольце и обсадной колонне;

3) обработка воды ингибиторами солеотложений.

Процесс ингибирования осуществляется двумя способами:

1) постоянным поступлением ингибитора в поток добываемой жидкости;

2) периодической (с интервалом в 3–6 месяцев) поставкой ингибитора в призабойную зону скважин.

Наиболее эффективным и экономичным методом предотвращения отложений неорганических солей является метод ингибирования химическими веществами, небольшие добавки которых (в количестве 0,0005–0,005% от веса добываемой смеси пластовых флюидов) замедляют процесс кристаллизации солей на поверхности оборудования.

В качестве ингибиторов солеотложений наибольшее применение нашли фосфорорганические соединения типа SP-203; СНПХ-5301 (РД 39-0148332-007ВНИИ-86); корексит-7647 (РД 39-1-219-79) — полимер с низким молекулярным весом. Однако могут быть использованы новые, более эффективные, экономически вы-

годные ингибиторы солеотложений успешно прошедшие лабораторные и опытно-промышленные испытания.

Для удаления солеотложений предлагается обработка скважин соляной кислотой. А также удаление солеотложений эмульсиями, успешно прошедшими опытно-промышленные испытания.

Коррозионный контроль

Состояние оборудования и трубопроводных коммуникаций оцениваются на основе технического диагностирования и специальных методов обнаружения коррозии. Исходя из характера коррозии, выбирается набор методов по ее обнаружению. В итоге удается качественно и количественно оценить коррозионные проявления.

Наблюдение за работой различных трубопроводных коммуникаций (водоводов низкого и высокого давления, газопроводов, нефтепроводов) осуществляется в ходе ревизий, проведение которых регламентируется особым документом — «Правила безопасности при сборе, подготовке и транспортировке нефти и газа на предприятиях нефтяной промышленности».

Методы неразрушающего контроля и порядок их применения выбираются в каждом случае с учетом таких факторов, как возможности средств технической диагностики, разрешающая способность методов контроля, выявляемость дефектов и производительность контроля.

Коррозионный контроль оборудования и трубопроводов выполняется в местах наиболее подверженных коррозионному воздействию. Это зона верхней и нижней образующей, где возможна концентрация влаги и возможно скопление минерализованной водной фазы и шлама; зона раздела фаз «газ-жидкость», где коррозионный процесс развивается достаточно интенсивно и имеет специфическое проявление; места резких поворотов труб, где возможен эрозионно-коррозионный износ [1].

Основные методы контроля состояния внутрипромысловых трубопроводов следующие: техническое освидетельствование; визуально-измерительный контроль (ВИК) с применением оптических и линейно-измерительных приборов; ультразвуковая толщинометрия (УЗТ); радиографический метод (РГМ).

Контроль скорости коррозии подразумевает использование приборов по определению скорости коррозии (коррозионно-индикаторные установки, коррозиометры), а также использование толщиномеров и водородных зондов (при процессах сульфат-редукции). Скорость коррозии контролируется в пунктах наблюдения, оснащенных датчиками и вторичными приборами контроля.

Выводы

Необходимость своевременного проведения противокоррозионных мероприятий подтверждается снижением количества аварийных ситуаций и увеличением срока стабильной работы нефтепромыслового оборудования. Хотя сами противокоррозионные мероприятия образуют немалую статью расходов, отказ от таких мероприятий неизбежно приведет к еще большим расходам, сопряженным с ре-

монтажными работами и заменой оборудования. Для оценки состояния нефтепромыслового оборудования необходимо регулярно выполнять коррозионный контроль. Причем, в целях минимизации расходов, коррозионный контроль должен осуществляться лишь в местах наиболее подверженных коррозионному воздействию.

На нефтяном месторождении Каракудук наибольшую коррозионную опасность представляют такие явления как солеотложение, высокая температура, механические примеси. Наиболее эффективными средствами противокоррозионной защиты оказались специальные защитные покрытия труб и впрыскиваемые ингибиторы коррозии. В качестве ингибиторов солеотложений наибольшее применение нашли фосфорорганические соединения типа SP-203; СНПХ-5301 (РД 39-0148332-007ВНИИ-86); корексит-7647 (РД 39-1-219-79).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Шудабаев Р.К.* Уточненный проект разработки нефтяного месторождения «Каракудук». 2011. ТОО «Каракудукмунай».
- [2] Единые правила по рациональному и комплексному использованию недр при разведке и добыче полезных ископаемых — утверждены постановлением правительства РК от 10.02.2011 № 123.
- [3] *Лиматудинов Ш.К.* Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. М.: Недра, 1983.

© Серебряков А.Н., Мотузов И.С., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 3 марта 2017

Дата принятия к печати: 17 марта 2017

Для цитирования:

Серебряков А.Н., Мотузов И.С. Коррозия нефтепромыслового оборудования и мероприятия по противокоррозионной защите на нефтяном месторождении Каракудук (Западный Казахстан) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. № 2. С. 174–181.

Сведения об авторах:

Серебряков Александр Николаевич, студент магистратуры департамента Геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* нефтегазовая геология, разработка нефтяных и газовых месторождений, полевая разведочная геофизика, аэрогеофизика. *Контактная информация:* e-mail: serebryakov.alexander2013@gmail.com

Мотузов Иван Сергеевич, ассистент департамента «Геологии, горного и нефтегазового дела» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* геологическое моделирование залежей нефти и газа, проблема образования конденсата на ранних стадиях катагенеза органического вещества, производство и накопление электроэнергии на скважине. *Контактная информация:* e-mail: motuzovis@yandex.ru

CORROSION OF OILFIELD EQUIPMENT AND ANTICORROSION TECHNIQUES APPLIED ON THE KARAKUDUK OILFIELD (WESTERN KAZAKHSTAN)

A.N. Serebryakov, I.S. Motuzov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The article delves into the modern problem of oilfield equipment corrosion and anticorrosion techniques. The authors of the article pursued the goal of generalisation of amassed data and information about problems and perspectives of anticorrosion techniques; and tried to analyse current factual material about anticorrosion protection of the Karakuduk oilfield equipment.

On the basis of multiyear functioning of the Karakuduk oilfield facility, from the beginning of commercial production in 1998, planned by NIPImunaigaz Research Institute (Aktau, the Republic of Kazakhstan) in 1996, a brief overview on primary causes of oilfield equipment corrosion was made and an array of substantial implications in the functioning of oilfield equipment caused by corrosion was pointed out.

The most preeminent and effective applicable anticorrosion techniques were scrutinised. Some information about peculiar features of anticorrosion operations carried out on the Karakuduk oilfield and designed for the anticipation and deflation of the influence of corrosive processes on the key oilfield equipment of various systems: the reservoir pressure maintenance system, the oil production system, the oil gathering system, and the oil treatment system, was sequentially presented. The order of corrosion control was described. Qualitative conclusions about the effectiveness of anticorrosion preemptive measures were made; also some recommendations concerning the choice of anticorrosion techniques were given.

Key words: corrosion, oilfield equipment, reservoir pressure maintenance system, hermeticity, protective cover, scale deposits, inhibitor

REFERENCES

- [1] Shudabaev R.K. Utochnennyi proekt razrabotki neftyanogo mestorozhdeniya «Karakuduk». 2011. TOO «Karakudukmunai». (in Russ.).
- [2] Edinye pravila po ratsional'nomu i kompleksnomu ispol'zovaniyu nedr pri razvedke i dobyche poleznykh iskopaemykh (ordinance № 123 issued by the government of the Republic of Kazakhstan on the 10th of February 2011). (in Russ.).
- [3] Gimatudinov Sh.K. Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniyu razrabotki i ekspluatatsii neftnykh mestorozhdenii. M.: Nedra, 1983. (in Russ.).

Article history:

Received: 3 March 2017

Accepted: 17 March 2017

For citation:

Serebryakov A.N., Motuzov I.S. (2017) Corrosion of oilfield equipment and anticorrosion techniques applied on the Karakuduk oilfield (Western Kazakhstan). *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 174–181.

Bio Note:

Serebryakov Alexandr, Postgraduate Student, Department of Geology, Mining and Petroleum Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University).

Research interests: Petroleum Geology, Oil and Gas Fields Development, Exploration Geophysics, Airborne Geophysics. *Contact information:* e-mail: serebryakov.alexander2013@gmail.com

Motuzov Ivan, Assistant Professor of the Department of Geology, Mining and Petroleum Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University).

Research interests: geological modeling of oil and gas reservoirs, issue on gas-condensate generation at early stage of organic matter catagenesis, energy generation and storage at well site. *Contact information:* e-mail: motuzovis@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-182-191

УДК 519.714

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТОКА НА ПРОТАИВАНИЕ ПОДВОДНОГО СКЛОНА И ТЕМПЫ БЕРЕГОВОЙ ЭРОЗИИ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

В.К. Дебольский¹, О.Я. Масликова¹, Д.Н. Ионов¹,
И.И. Грищук^{1,2}, Н.Т. Джумагулова³

¹ Институт водных проблем РАН

ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

² Российский университет дружбы народов

ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

³ Московский государственный строительный университет

Ярославское шоссе, 26, Москва, Россия, 129337

В гидравлической лаборатории РУДН выполнены исследования разрушения подводного и надводного берегового склона в условиях, имитирующих криолитозону, в зависимости от типа грунта, слагающего откос, и угла уклона. Показано, что скорость эрозии подводного склона отстает от скорости протаивания мерзлого грунта. Работа водного потока значительно превышает влияние остальных факторов (температура, влияние ветра, солнечная радиация), приводя к образованию ниш вымывания. Работа является продолжением исследования динамики берегового склона водных объектов в условиях криолитозоны [1–4].

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, мерзлый грунт, протаивание, эрозия почв, водные потоки

Введение

Мерзлота является причиной как чрезвычайной стабильности русловых потоков вследствие своих сковывающих и цементирующих свойств, так и причиной определенной нестабильности (например, при техногенных нагрузках) в условиях криолитозоны. Это приводит к тому, что огромное количество исследований, проводящихся в разное время, дают спектр противоречивых результатов, даже в рамках одной географической местности и даже одного потока. Вполне вероятно, что комбинации различных факторов могут приводить к различным соотношениям скоростей сезонного протаивания грунта и эрозии, что требует особой тщательности и осторожности, особенно при инженерном проектировании. Не всегда представляется возможным провести натурные наблюдения, а уж тем более сравнивать абсолютные скорости боковой эрозии различных мерзлых русел нерегулируемых потоков, но вполне возможно допустить, что влияние на размыв внешних условий является более стабилизирующим фактором в зоне мерзлоты, чем в районах, не принадлежащих криолитозоне. Поэтому коллективом авторов были проведены эксперименты с мерзлыми грунтами разного состава в лаборатории РУДН.

Экспериментальные исследования влияния потока на размыв подводного склона

Интенсивность разрушения берегов северных водоемов связана с тем, что размыв подводного берегового склона, сложенного мерзлыми льдистыми породами, осуществляется под действием не только механической, но и тепловой энергии движущейся воды. При этом интенсивность размыва мерзлых пород зависит от температуры [1] и льдистости пород [2].

Ранее [3] была получена формула для транспортирующей способности водного потока с учетом изменения льдистости:

$$S = 2,4 \cdot 10^{-9} \frac{U^3}{ghw(i^2 + 10^{-6})}, \quad (1)$$

где S — транспортирующая способность потока; U — средняя скорость потока; h — глубина потока; w — гидравлическая крупность незамерзшего материала; i — льдистость за счет ледяных включений в долях единицы (д.е.).

Из формулы транспорта наносов (1) и формулы Дарси—Вейсбаха для потока на склоне с учетом льдистости получаем формулу размыва твердого вещества поверхностным стоком [4]:

$$S = \frac{6 \cdot 10^{-9}}{w(i^2 + 10^{-6})} \frac{\sqrt[3]{gq_{\text{ск}}}}{\lambda^{4/3}} \text{tg } \alpha^{4/3}, \quad (2)$$

где S — транспортирующая способность склонового потока; $q_{\text{ск}}$ — удельный расход склонового потока; λ — коэффициент сопротивления, или потери энергии на трение по длине — определяется экспериментально; α — угол уклона берега.

Таким образом, видим, что зависимость размыва твердого вещества от угла уклона (при прочих равных условиях) будет иметь степенной (4/3) вид (рис. 1).

В гидравлической лаборатории РУДН была проведена серия экспериментов с полистиролом и с различным углом уклона для определения влияния потока на темпы эрозии.

Полистирол обладает меньшей плотностью и большей плавучестью, чем песок. Следовательно, для него можно подобрать такие скорости, которые будут размывающими для полистирола, но неразмывающими для песка. Таким образом, авторам удалось смоделировать двухслойную породу, слои которой имеют различные физические свойства (аналогично природным условиям: сезонноталый подвижный слой и слой ММП).

Предварительно полистирол смочили водой так, чтобы вода заполняла все пространство между частицами (насыщенный влагой грунт) и заморозили. Затем замороженные формы вложили в склон, имеющий естественный для песка угол откоса.

Полистирол был погружен в поток на 5,5 см, на поверхности оставалось 2 см. Можно было наблюдать различную скорость таяния замороженных кусков полистирола в потоке и на воздухе. Через 20 мин погруженная часть полностью

оттаяла и размывлась, тогда как верхняя часть оставалась скованной льдом еще 20 мин, и только под воздействием проседания и погружения в поток подвергалась размыву (рис. 2).

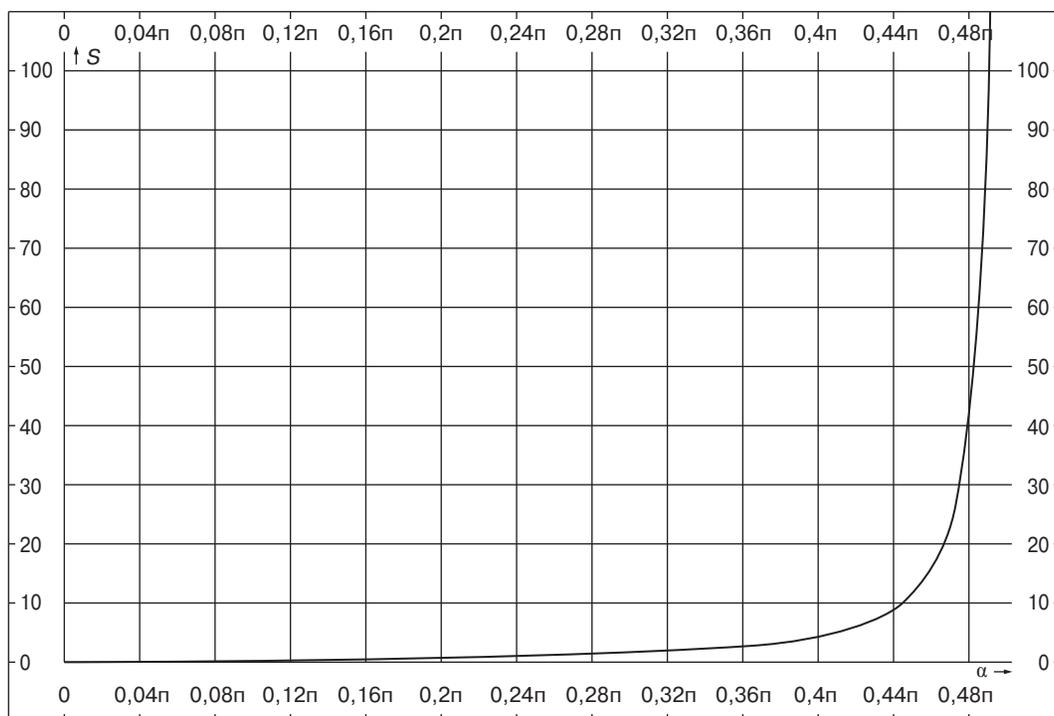


Рис. 1. Зависимость размыва твердого вещества со склона от угла уклона берега (при прочих равных условиях)

[Fig. 1. Dependence of washout of solid substance from a slope from a coast bias corner (other things being equal)]

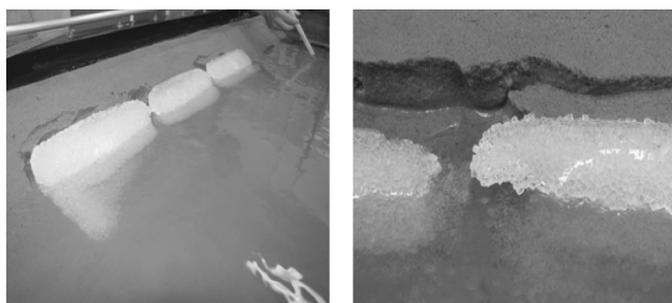


Рис. 2. Влияние потока на подводный размыв оттаявшего материала

[Fig. 2. Influence of a stream on underwater washout of the thawed material]

На участках берегового откоса, лежащих выше уреза воды, влияние потока не распространяется, и в отсутствии каких-либо внешних условий (дождь, снеготаяние, любых других факторов, вызывающих склоновые потоки) протаивание грунта не вызывает подвижки материала, а только частное проседание.

Таким образом, была проверена формула (1) — влияние скорости потока на продольный транспорт наносов (видны размывы в подводной части и навесы над водой, где скорость течения равна нулю).

Экспериментальное исследование связи протаивания подводного склона и темпов береговой эрозии

В работе [5] проведено наиболее полное на сегодняшний момент теоретическое исследование движение фронта протаивания в зависимости от глубины размыва талого грунта при типичных значениях теплофизических параметров для различных скоростей движения фронта эрозии и установлены закономерности процесса.

При увеличении скорости фронта эрозии (рис. 3) происходит увеличение скорости фронта протаивания. При этом рост скорости фронта эрозии приводит к уменьшению толщины талой прослойки. Такое развитие процесса термоэрозии соответствует предельно-термоэрозионному типу размыва, основным механизмом которого служит тепловой фактор. Однако в дальнейшем он переходит в термоэрозионный тип, характер взаимодействия водного потока с породой в этом случае определяется уже механическими факторами (прочностные свойства мерзлых пород, кинетическая энергия водного потока). При росте льдистости мерзлых грунтов скорость движения фронта протаивания замедляется, толщина талой прослойки уменьшается.

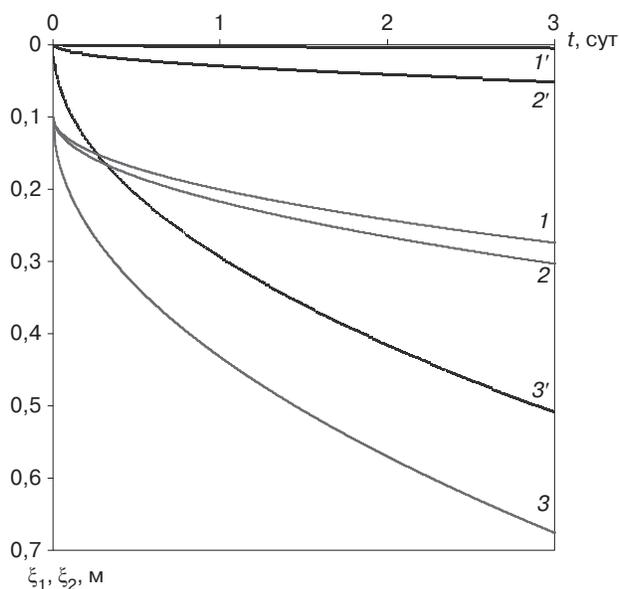


Рис. 3. Динамика фронтов эрозии (1', 2', 3') и протаивания (1, 2, 3) при различных значениях коэффициента теплопроводности

[Fig. 3. Dynamics of fronts of an erosion (1', 2', 3') and thawing (1, 2, 3) at various values of coefficient of heat conductivity]

Увеличение температуры водного потока, взаимодействующего с мерзлым грунтом, способствует росту талой прослойки, так как оттаивание породы про-

исходит быстрее. Скорость протаивания намного опережает интенсивность размыва и происходит постепенное нарастание талого слоя, идет размыв и вынос разупрочненного грунта.

На коэффициент теплопроводности оказывает сильное влияние плотность, состав включений, льдистость и состояние пород (талое — мерзлое). С увеличением льдистости повышается значение коэффициента теплопроводности. При прочих равных условиях скорость протаивания увеличивается в направлении: глины — супеси — пески.

Натурные исследования на нескольких реках Аляски [6] показали, что скорость протаивания подводного берегового склона зависит от текстуры материала и температуры воды. Результаты наблюдений [6] показывают общую тенденцию эрозии отставать от оттаивания. При этом сравнение скоростей эрозии и скоростей протаивания на двух реках Аляски показало равные результаты, независимо от свойств грунтов (рис. 4). Это как раз те случаи, когда отрицательная температура играла доминирующую роль, не давая грунту оттаять.

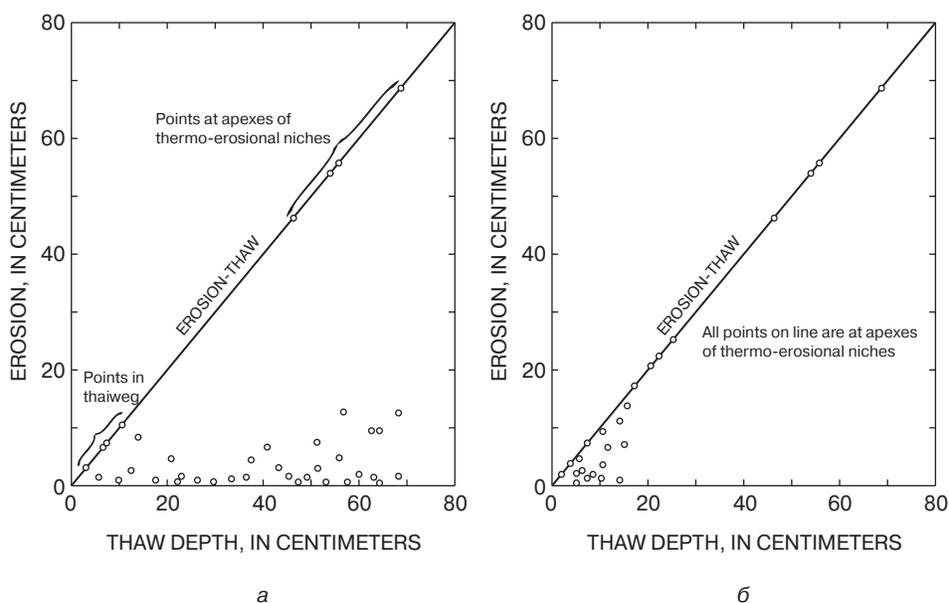


Рис. 4. Сравнение скоростей протаивания и эрозии на примере рек Аляски:
а — для несвязанного типа грунта; б — для связанного

[Fig. 4. Comparison of speeds of thawing and erosion on the example of the rivers of Alaska]

Эксперименты с различным углом откоса проводились для смоченного замороженного грунта (аналог подводного склона в условиях криолитозоны) и для естественного замороженного (аналог надводного склона в тех же условиях). Проводились замеры изменения профиля относительно начала эксперимента по времени для трех случаев: 26° (естественный угол залегания откоса), 40 и 50°. Были проведены замеры оттаивания и эрозии в течении времени, построены графики протаивания грунта различной заморозки и графики размыва для каждого эксперимента в зависимости от времени. Полученные графики однозначно интерполируются логарифмической зависимостью. Для уклона берега 40° логарифми-

ческая аппроксимация этих зависимостей представлена на рисунке 5. Для других углов уклона графики имеют аналогичный характер.

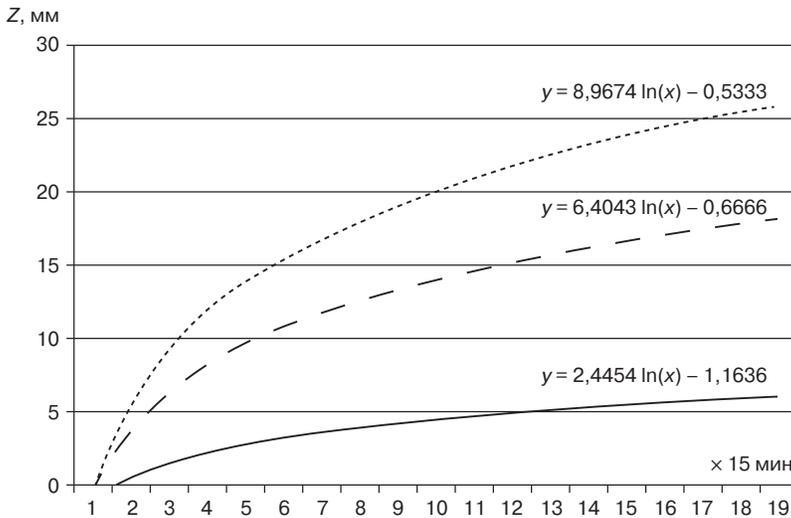


Рис. 5. Зависимость фронта протаивания Z , мм (логарифмическая аппроксимация) от времени t : пунктирная линия — для смоченного грунта, точечная — для естественного влажного; сплошная линия — движение фронта эрозии. Замеры проводились каждые 15 мин

[Fig. 5. The movement of the front of thawing (logarithmic approximation): a dashed line — for the moistened soil; dot — for natural damp; the continuous line — the movement of the front of an erosion]

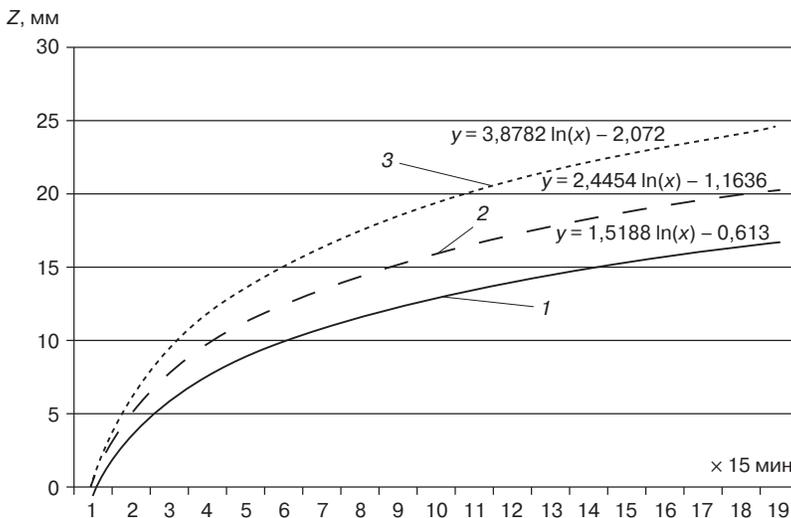


Рис. 6. Графики зависимости фронта эрозии Z , мм от времени t : 1 — для угла 27°; 2 — для 40°; 3 — для 50°

[Fig. 6. Schedules of dependence of speed of an erosion from time: 1 — for a corner of 27 degrees; 2 — for 40 degrees; 3 — for 50 degrees]

Из графиков видно, что начало эрозии (размыва) происходит спустя некоторое время после начала протаивания, а скорость эрозии значительно отстает от скорости протаивания минимум в 2 раза. Протаивание замороженного естественно-

го грунта и замороженного смоченного (например, такой грунт образуется ниже уреза воды в самом потоке, замерзая вместе с ним) отличаются примерно в 1,5 раза.

Хотя скорость протаивания смоченного и замороженного грунтов отличается, размыву подвергается только участок, находящийся в воде. Верхняя, надводная часть склона, подвергалась проседанию. Надо заметить, что в случае с углом 50° логарифмическая зависимость эрозии наблюдалась до определенного момента (спустя 2 ч 30 мин). Далее наблюдался отрыв большого куска грунта сверху. Это как раз тот случай, когда образуются, кроме солифлюкции, поверхностные оползни.

Если сопоставить значения эрозии для различных углов уклона (рис. 6) в одинаковые моменты времени, то можно увидеть, что зависимость этих значений будет описываться функцией $\text{tg } \alpha^{4/3}$ с определенным коэффициентом. Значения этого коэффициента рассчитываются по уравнению (2). Таким образом, экспериментально подтверждена зависимость, полученная ранее в теоретическом виде.

Эрозия подводного берегового склона в условиях криолитозоны — сложный физический процесс, окончательный результат которого зависит от массы факторов. И только рассматривая все эти факторы в совокупности, можно с определенной достоверностью спрогнозировать поведение породы в определенной точке земного шара в определенное время года и при определенных метеоусловиях.

Выводы

Интенсивность разрушения берегов северных водоемов связана с тем, что подводный береговой склон, сложенный мерзлыми льдистыми породами, размывается под действием не только механической, но и тепловой энергии движущейся воды. При этом интенсивность размыва мерзлых пород зависит от температуры и льдистости пород.

Скорость эрозии значительно отстает от скорости протаивания минимум в 2 раза. Протаивание замороженного естественного грунта и замороженного смоченного отличаются примерно в 1,5 раза.

Протаивание замороженного сухого грунта и замороженного смоченного (например, такой грунт образуется ниже уреза воды в самом потоке, замерзая вместе с ним) отличаются примерно в 1,5 раза.

Значение размыва оттаивающих пород непосредственно связана с углом залегания откоса вследствие добавления к основному воздействию потока таких явлений, как солифлюкция и оползни. При увеличении угла откоса талый увлажненный грунт легко сползает по слою еще мерзлого грунта.

Слои грунта, лежащие глубже, будут испытывать те же деформации с некоторым запаздыванием (в зависимости от скорости протаивания). Таким образом, в результате многолетних размывов будет происходить непрерывное оттаивание пород и смыв вновь образующегося деятельного слоя со скоростью, соответствующей механическим свойствам подстилающих грунтов. Деформации будут происходить до тех пор, пока не обнажатся скальные породы и/или размываемый слой не приобретет естественный для данного типа грунтов угол откоса.

Экспериментально показано, что зависимость размыва твердого вещества от угла уклона (при прочих равных) будет иметь степенной (4/3) вид. Таким образом, экспериментально подтверждена зависимость, полученная ранее в теоретическом виде.

Хотя мерзлота отличается чрезвычайной нестабильностью, как может быть нестабильным такое вещество, как лед, тем не менее, нет никаких оснований считать, что русла рек в криолитозоне с физической точки зрения отличаются от аналогичных русел в умеренных широтах. Просто в первом случае в уравнение добавляется дополнительная переменная — льдистость, и уравнения решаются с учетом реальных показателей окружающей среды (скорость ветра, температура, освещенность).

Полученные результаты исследования одной из составляющих единого термогидродинамического процесса (радиационное снеготаяние) являются необходимой частью общего прогноза влияния изменения климата на течение деструкционных криогенных процессов в зоне ММП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Грицук И.И., Масликова О.Я., Ионов Д.Н.* Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды. М.: Лед и Снег, 2013. № 1(121). С. 104–110.
- [2] *Котляков А.В., Грицук И.И., Масликова О.Я., Пономарев Н.К.* Экспериментальное исследование влияния льдистости грунтов, слагающих русло рек, на динамику берегового склона. М.: Лед и Снег, 2011. № 2 (114). С. 92–98.
- [3] *Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К.* Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород. М.: Лед и снег, 2012. № 3(119). С. 73–78.
- [4] *Масликова О.Я., Козлов Д.В.* Влияние зимних и весенних условий на размыв рек в криолитозоне. М.: Природообустройство, 2014. № 1. С. 54–59.
- [5] *Хусаинова З.Р.* Теоретическое исследование процессов термоэрозии и термокарста многолетнемерзлых пород: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2007.
- [6] *Scott K.M.* Effect of Permafrost on Stream Channel Behavior in Arctic Alaska, Geological Survey Professional Paper 1068, 1978, Library of Congress Catalog — card No. 78-600058.

© Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ионов Д.Н.,
Грицук И.И., Джумагулова Н.Т., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 28 февраля 2017

Дата принятия к печати: 14 марта 2017

Для цитирования:

Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ионов Д.Н., Грицук И.И., Джумагулова Н.Т. Лабораторное исследование влияния потока на протаивание подводного склона и темпы береговой эрозии в условиях криолитозоны // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 182–191.

Сведения об авторах:

Дебольский Владимир Кириллович, профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, гидродинамика, водные ресурсы, гидрохимия, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: vdebolsky@mail.ru

Масликова Оксана Яковлевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: oksana68@mail.ru

Ионов Дмитрий Николаевич, инженер лаборатории «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: dima_ionov@mail.ru

Грицук Илья Игоревич, кандидат технических наук, доцент департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. Старший научный сотрудник лаборатории «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Джумагулова Назира Тентимишовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ). *Сфера научных интересов:* гидравлика, водоснабжение и канализация. *Контактная информация:* e-mail: dnazira@rambler.ru

LABORATORY STUDY INFLUENCE OF FLOW ON THAWING OF UNDERWATER SLOPES AND THE PACE COASTAL EROSION OF RIVERS, OCCURING IN THE PERMAFROST ZONE

V.K. Debolskiy¹, O.Ya. Maslikova¹, D.N. Ionov¹, I.I. Gritsuk^{1,2}, N.T. Jumagulova³

¹ Russian Academy of Sciences Water Problems Institute
Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333

² Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

³ Moscow State University of Civil Engineering
Yaroslavl highway, 26, Moscow, Russia, 129337

In the RUDN hydraulic laboratory researches of destruction of an underwater and surface coastal slope in the conditions imitating a kriolitozona depending on type of the soil composing a slope and a bias corner are executed. It is shown that the speed of an erosion of an underwater slope lags behind the speed of thawing of frozen soil. Work of a water stream considerably exceeds influence of other factors (temperature, wind influence, solar radiation), leading to formation of niches of washing away. Work is continuation of a research of dynamics of a coastal slope of water objects in the conditions of a kriolitozona [1—4].

Key words: laboratory experience, frozen ground, thawing, soil erosion, water flow

REFERENCES

- [1] Debolskaya Ye.I., Debolskiy V.K., Gritsuk I.I., Maslikova O.Ya., Ionov D.N. Modelirovanie deformatsiy rusel, slozhennykh merzlymi porodami, pri povyshenii temperatury okruzhayushchey sredy [Modeling beds strains composed of frozen soils, with an increase in ambient temperature]. M.: Led i Sneg, 2013. № 1(121). S. 104—110.

- [2] Kotlyakov A.V., Gritsuk I.I., Maslikova O.Ya., Ponomarev N.K. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya ldistosti gruntov, slagayushchikh ruslo rek, na dinamiku beregovogo sklona [Experimental study of the effect of ice content soils composing the riverbeds, the dynamics of the coastal slope]. M.: Led i Sneg, 2011. № 2 (114). S. 92–98.
- [3] Gritsuk I.I., Debolskiy V.K., Maslikova O.Ya., Ponomarev N.K. «Vliyanie osadkov v vide dozhdya na deformatsii beregovogo sklona rusel rek v usloviyakh mnogoletnemerzlykh porod» [The impact of rain on the coastal slope deformation of riverbeds under permafrost]. M.: Led i sneg, 2012. № 3(119). S. 73–78.
- [4] Maslikova O.Ya., Kozlov D.V. «Vliyanie zimnikh i vesennikh usloviy na razmyv rek v kriolitozone» [Influence of winter and spring conditions in the river erosion in permafrost]. M.: Prirodoobustroystvo, 2014. № 1. S. 54–59.
- [5] Khusainova Z.R. «Teoreticheskoe issledovanie protsessov termoerozii i termokarsta mnogoletnemerzlykh porod» [A theoretical study of the processes and thermal erosion thermokarst permafrost]: avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. Ufa, 2007.
- [6] Scott K.M. “Effect of Permafrost on Stream Channel Behavior in Arctic Alaska”, Geological Survey Professional Paper 1068, 1978, Library of Congress Catalog — card No. 78-600058.

Article history:

Received: 28 February 2017

Accepted: 14 March 2017

For citation:

Debolskiy V.K., Maslikova O.Ya., Ionov D.N., Gritsuk I.I., Jumagulova N.T. (2017) Laboratory study influence of flow on thawing of underwater slopes and the pace coastal erosion of rivers, occuring in the permafrost zone. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 182–191.

Bio Note:

Vladimir K. Debolskiy, professor, doctor of technical sciences, head of laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests*: hydraulics, engineering hydrology, hydrodynamics, water resources, hydrochemistry, ice thermal conditions. *Contact information*: e-mail: vdebolsky@mail.ru

Oksana Ya. Maslikova, Ph.D., senior researcher laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests*: hydraulics, engineering hydrology, ice thermal conditions. *Contact information*: e-mail: oksana68@mail.ru

Dmitriy N. Ionov, Ph.D., engineer laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests*: hydraulics, engineering hydrology, ice thermal conditions. *Contact information*: e-mail: dima_ionov@mail.ru

Ilya I. Gritsuk, Ph.D., associate arofessor of the department “Architecture and construction”, Engineering academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). Senior researcher laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests*: hydraulics, engineering hydrology, ice thermal conditions. *Contact information*: e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Nazira T. Jumagulova, Ph.D., associate professor of department of “Hydraulic and hydraulic engineering”, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University. *Research interests*: hydraulics, water supply and sewerage. *Contact information*: e-mail: dnazira@rambler.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-192-203

УДК 556.5(1/9)

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ ДЕМАРКАЦИИ МАНАБИ (ЭКВАДОР)

Кампос Седеньо Антонио Фермин (Эквадор)¹, Е.К. Синиченко¹, И.И. Грицук^{1,2}

¹ Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

² Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

Водная эрозия — наиболее важная причина разрушения почв во всем мире. Так, в Азии из 747 млн гектаров земель, страдающих от эрозии, 60% соответствуют водной эрозии; в Африке из 497 млн — 46%; в Южной Америке из 243 млн — 51%; в Европе из 219 млн — 53%; 106 млн — в северной и центральной Америках (Бифани, 1984). Тот же автор указывает что, явление эрозии тесно связано с явлением оседания. Процесс эрозии под воздействием воды обычно измеряется по объему наносов. Реки Ганг, Брахмапутра, Хуанхэ ежегодно транспортируют 1451 млн, 726 млн и 1887 млн т наносов, соответственно, по сравнению с реками Миссисипи, Амазонка и Нила, которые переносят только 97, 63 и 31 тонн на квадратный километр бассейна (Хоулмен, 1968) [9].

Эрозия почв в Эквадоре представляет серьезную экологическую проблему, которая затрагивает большую часть страны в той или иной степени. Использование методов прогнозирования смыва поверхностного плодородного слоя почв от осадков не получила широкого применения, ввиду того, что многочисленные исследования были направлены на количественную оценку скорости эрозии для различных видов землепользования в прибрежных зонах речных бассейнов, а лишь немногие были сосредоточены на прогнозировании эрозионных процессов по всей территории. В 1986 году Эквадорский центр географических исследований (CEDIG) впервые провел ряд исследований, связанных со сбором общих данных о проблемах эрозии в стране [4].

В настоящей работе, на основе актуальных данных по дождевым осадкам за 51 год и составу почв, проведена оценка потенциальной водной эрозии гидрографической демаркации Манаби.

Ключевые слова: водная эрозия, демаркация Манаби, уравнение разрушения почвы, фактор R-USLE, фактор K-USLE, фактор LS-USLE

Гидрографическая демаркация Манаби одна из 9 в Республике Эквадор, имеющая площадь 11483,70 км², которая составляет 4,5% всей территории страны. На западе омывается Тихим океаном и расположена на северо-западе Эквадора (рис. 1).

Водная эрозия — процесс разрушения почв, который тесно связан с объемом и интенсивностью дождевых осадков. Влияние энергии дождя на почву тем больше, чем меньше растительного покрова, с одной стороны. С другой стороны, состав грунта является еще одним важным фактором, участвующим в этом процессе.



Рис. 1. Расположение гидрографической демаркации Манаби
[Fig. 1. Location hydrographic demarcation of Manabi]

При исследовании были использованы следующие данные:

- цифровая модель рельефа гидрографической демаркации Манаби разрешением 76 м [8];
- многолетние среднегодовые дождевые осадки 34-х метеорологических станций гидрографической демаркации Манаби, в период 1963—2013 годов [1; 2];
- гидрогеологическая карта Эквадора [8];
- всемирная карта классификации почв [7].

Методологический подход

Для оценки *действительной водной эрозии* использовано универсальное уравнение разрушения почвы (USLE — Universal Soil Loss Equation), разработанное департаментом сельского хозяйства Службы охраны почв США (USDA SCS; сейчас Natural Resources Conservation Service, NRCS):

$$A = RKLSCP, \quad (1)$$

где A — годовая потеря почвы, т/га; R — фактор дождевых осадков, МДж·мм/(га·час); K — фактор размываемости почв, т·га·ч/(МДж·мм·га); L — фактор длины склона, о.е.; S — фактор уклона склона; C — коэффициент покрова почвы, о.е.; P — фактор практики сохранения почв, о.е.

При определении потенциальной водной эрозии, факторы C и P равны единице и уравнение (1) приобретает вид:

$$A_p = RKLS. \quad (2)$$

В рисунке 2 приведена структурная схема последовательности расчетов с помощью гидрографических информационных систем (ГИС).

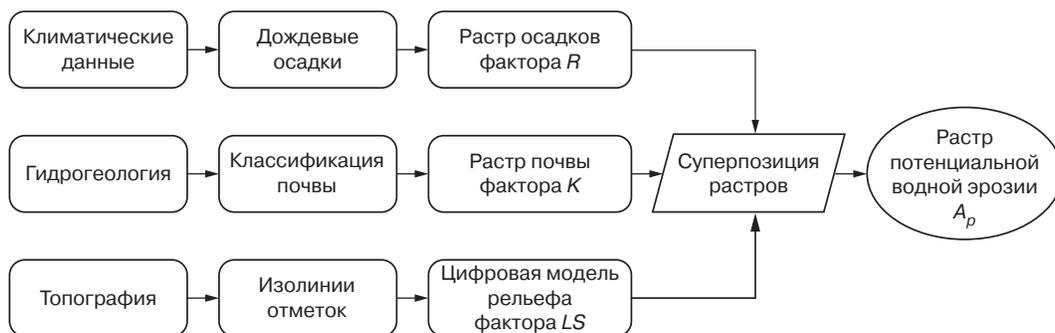


Рис. 2. Структурная схема процесса получения растра потенциальной водной эрозии
[**Fig. 2.** A block diagram of the process of obtaining the raster potential water erosion]

Фактор дождей осадков R определяется в зависимости от максимальной интенсивности дождя за 30 мин и от ее кинетической энергии.

Важное место в расчетах имеет удельная кинетическая энергия, которая определяется для каждого интервала с равномерным значением интенсивности дождя, по формуле Wischmeier-Smith 1978 [5]

$$e = 0,1191 + 0,0873 \log_{10} I, \quad (3)$$

где I — интенсивность дождя для каждого рассчитанного интервала, мм/ч.

Энергия дождя будет

$$E = eP, \quad (4)$$

где P — дождевой осадок для каждого рассчитанного интервала, мм.

Сложение значений всех удельных энергии, умноженных на интенсивность дождя за 30 мин даст значения EI события. Годовой фактор R рассчитывается путем сложения всех значений EI имеющихся за год. На основе многолетних среднегодовых значений фактора R для гидрографической демаркации Манаби (табл. 1), с помощью ГИС, построен растр фактора R (рис. 3).

Таблица 1

Многолетние среднегодовые значения фактора R -USLE
[Long-term average annual values of a factor of R-USLE]

№ п/п	Код метеостанции	Координаты UTM (WGS1984, 17S)		Многолетние среднегодовые осадки, мм	Фактор R-USLE, МДж·мм/(га·ч)
		X	Y		
1	M005	559523	9884982	528,0	77,07
2	M006	671167	9878373	2156,7	2042,40
3	M026	684860	9947353	2768,8	3587,50
4	M047	529608	9896745	397,2	38,41
5	M074	535232	9894995	270,2	14,53
6	M160	671939	9968948	2650,3	3251,41

Окончание табл. 1

№ п/п	Код метеостанции	Координаты UTM (WGS1984, 17S)		Многолетние среднегодовые осадки, мм	Фактор R-USLE, МДж·мм/(га·ч)
		X	Y		
7	M162	599186	9922067	1233,4	569,67
8	M163	588400	9937145	1190,7	525,18
9	M165	561350	9905400	454,1	53,40
10	M166	587791	9845734	1657,2	1122,19
11	M167	580800	9977125	778,8	194,88
12	M168	605098	9993552	1036,9	381,07
13	M169	540911	9836412	990,6	342,63
14	M171	566617	9823940	1308,6	652,99
15	M296	587159	9909725	847,6	237,90
16	M297	579744	9926307	705,8	154,41
17	M298	568607	9871041	859,8	246,03
18	M446	593441	9959038	767,5	188,30
19	M447	564710	9858637	1024,3	370,39
20	M448	541813	9872580	378,4	34,08
21	M449	545983	9860943	530,1	77,79
22	M450	521785	9875161	443,1	50,30
23	M451	551325	9836471	994,6	345,86
24	M452	605084	9896272	1472,6	856,52
25	M453	534613	9883481	609,9	109,03
26	M454	578716	9883443	891,3	267,69
27	M455	540758	9847496	459,0	54,83
28	M456	582963	9969540	480,3	61,23
29	M457	529325	9850844	416,0	43,07
30	M458	554628	9823913	1131,9	467,12
31	M459	545421	9825480	1671,5	1144,48
32	M462	588084	9896706	1058,6	399,87
33	M464	585361	9885407	1234,5	570,84
34	MA29	589006	9876563	1287,8	629,35
35	COMP	507285	9883367	579,00	96,24
36	COMP	549661	9795165	949,00	309,98
37	COMP	624697	10054669	2035,00	1790,55

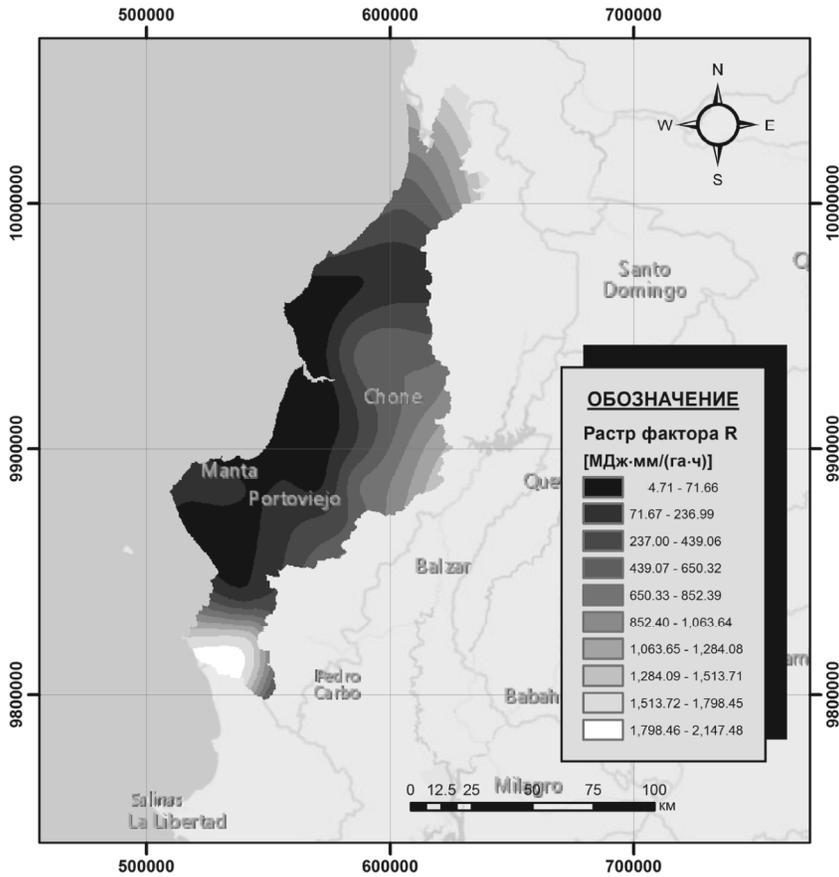


Рис. 3. Растр фактора R-USLE гидрографической демаркации Манаби
[Fig. 3. Raster of a factor of R-USLE of hydrographic demarcation of Manabi]

Фактор размываемости почв K (рис. 4). Существуют несколько методов для косвенной оценки фактора размываемости почвы. Среди них, распространено уравнение Шарпли—Виллиамс (1990) [3; 10]

$$K = 0,1317 f_{csand} f_{cl-si} f_{org} f_{hisand}, \quad (5)$$

откуда:

$$f_{csand} = \left\{ 0,2 + 0,3 \exp \left[-0,0256 m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\}; \quad (6)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3}; \quad (7)$$

$$f_{orgC} = \left[1 - \frac{0,25 orgC}{orgC + \exp[3,72 - 2,95 orgC]} \right]; \quad (8)$$

$$f_{hisand} = \left[1 - \frac{0,70 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \left(1 + \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right], \quad (9)$$

где m_s , m_{silt} и m_c — доля песка, ила и глины, содержащихся в почве, %; $orgC$ — содержание органического углерода.

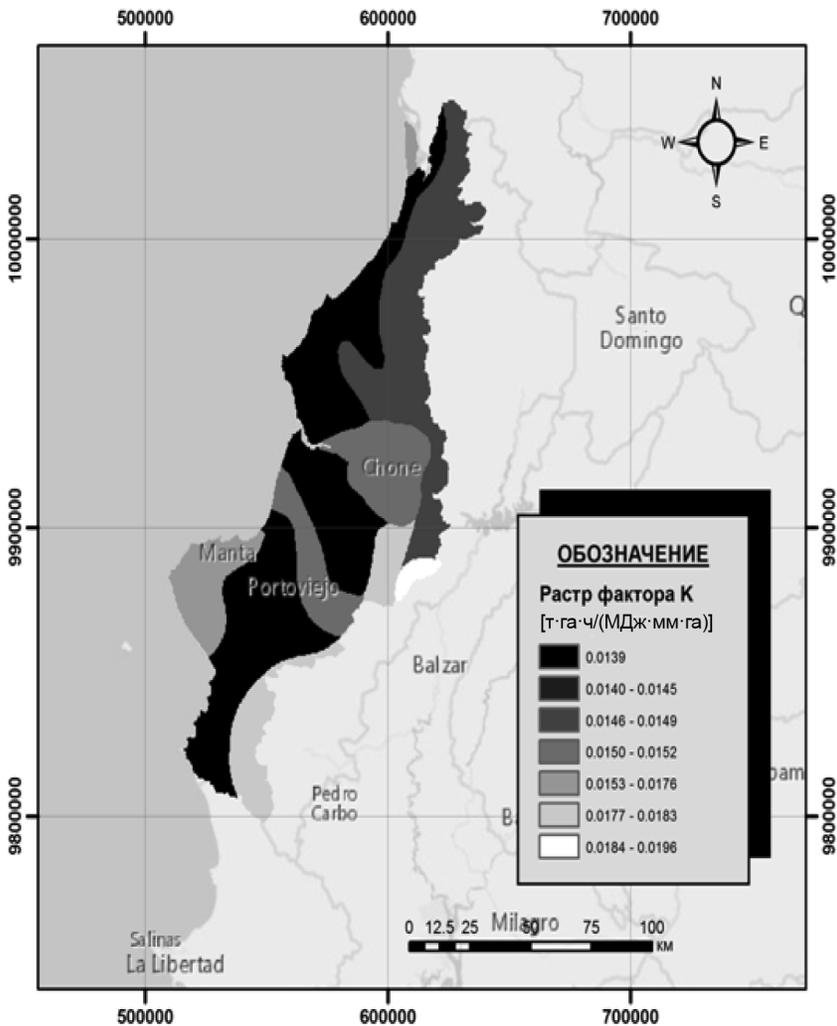


Рис. 4. Растр фактора К-USLE гидрографической демаркации Манаби
[Fig. 4. Raster of a factor of K-USLE of hydrographic demarcation of Manabí]

Данные почвенных переменных взяты из мировой карты, разработанной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных наций (FAO — Food and Agriculture Organization of the United Nations) [7].

Фактор рельефа LS. Определение факторов L и S проводится посредством ГИС по формулам [6]:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m; \quad m = \frac{F}{1+F}; \quad F = \frac{\sin \beta / 0,0896}{3(\sin \beta)^{0,8} + 0,56}. \quad (10)$$

При использовании в ГИС формула имеет вид:

$$L_{(i,j)} = \frac{[A_{(i,j)} + D^2]^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{(m+1)}}{x^m D^{m+2} (22,13)^m}, \quad (11)$$

где $A_{(i,j)}$ — часть площади бассейна, пиксель; D — размер пикселя; x — фактор коррекции формы.

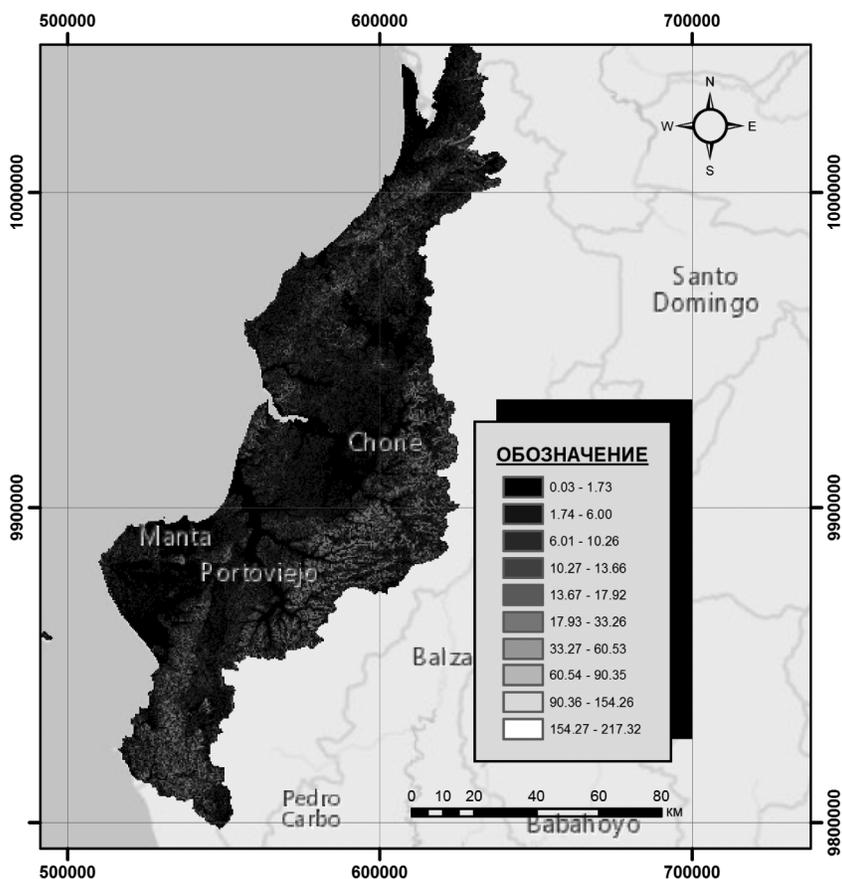


Рис. 5. Растр фактора LS-USLE гидрографической демаркации Манаби
[**Fig. 5.** Raster of a factor of LS-USLE of hydrographic demarcation of Manabi]

Фактор S зависит от уклонов β склонов бассейна. Варианты определения β (McCool, 1987, 1989):

— при $\tan \beta_{(i,j)} < 0,09$

$$S_{(i,j)} = 10,8 \sin \beta_{(i,j)} + 0,03; \quad (12)$$

— при $\tan \beta_{(i,j)} \geq 0,09$

$$S_{(i,j)} = 16,8 \sin \beta_{(i,j)} - 0,5. \quad (13)$$

Произведение растров L и S дает растр рельефа LS (рис. 5).

Согласно процессу (см. рис. 2), полученный растр соответствует потенциальной водной эрозии (рис. 6).

Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций (FAO) классифицирует водную эрозию определенным образом (табл. 2).

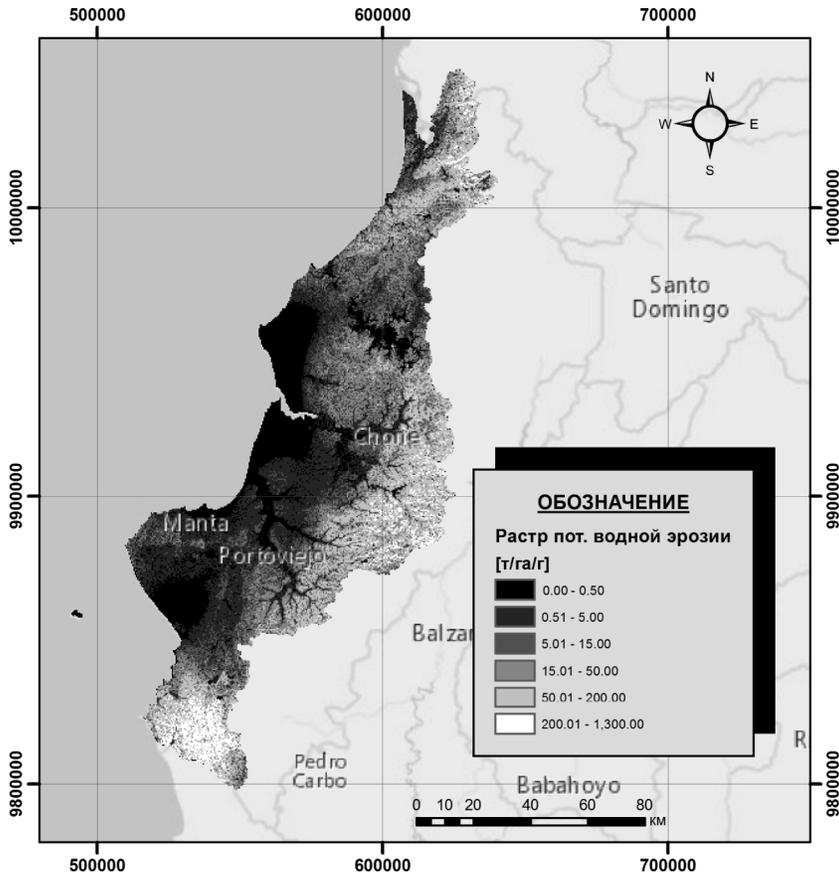


Рис. 6. Растр потенциальной водной эрозии гидрографической демаркации Манаби
[Fig. 6. Raster of a potential water erosion of hydrographic demarcation of Manabí]

Таблица 2

Классификация водной эрозии [FAO, 1980]
[Classification of a water erosion [FAO, 1980]]

Уровень	Потеря почвы (т/га/г)	Тип эрозии	Уровень	Потеря почвы (т/га/г)	Тип эрозии
1	< 0,5	Нормальная	4	15—50	Сильная
2	0,5—5	Незначительная	5	50—200	Очень сильная
3	5—15	Умеренная	6	> 200	Катастрофическая

Выводы

1. Фактор R , характеризующий процесс эрозии в зависимости от кинематической энергии дождей и колеблется в пределах 4,71—2147,48 МДж·мм/(га·ч). Наибольшие значения получены в южной и северной зонах демаркации.

2. Фактор K , выражающий потенциал размыва почв в зависимости от содержания песка, ила, глины и органического углерода варьируется в интервале 0,0139—0,0196 т·га·ч/(МДж·мм·га). Наибольшие значения получены на юго-востоке и на западе демаркации.

3. Фактор LS , выражающий состояние уклонов водосборного бассейна, изменяется в пределах 0,03—217,32. Наибольшие уклоны местности имеются на юге, на севере и на востоке демаркации.

4. Наиболее пострадавшие от потенциальной водной эрозии бассейны демаркации Манаби следующие: на юге — 15134, 15135 и 15136; на севере — 15191, 15192, 15193, 15194, 15195 и 15196; и на востоке — 15144, 15149, 15168, 15169, 15166 и 15162.

5. Потенциальная водная эрозия демаркация Манаби находится в пределах 0,00—1300,00 т/га/г. Согласно классификации FAO выделяются 6 типов водной эрозии (табл. 2) и потенциальная водная эрозия по указанным группам распределяется следующим образом (рис. 7).

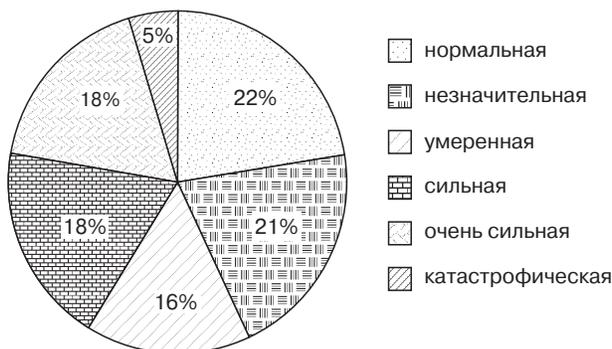


Рис. 7. Процентное распределение потенциальной водной эрозии, %
[Fig. 7. Percentage distribution of potential water erosion]

6. Критические значения потенциальной водной эрозии (сильная, очень сильная и катастрофическая) в сумме составляют 41%, что охватывает существенную часть территории. Данное значение необходимо уменьшать за счет реализации соответствующих планов по восстановлению лесов и созданию экологических практик для защиты водосборных бассейнов, особенно на тех водосборах, где планируется проектирование и строительство гидротехнических сооружений для регулирования стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кампос Седеньо Антонио Фермин, Сениченко Е.К., Грицук И.И. Структурный подход к оценке морфометрических характеристик бассейнов рек провинции Манаби (Эквадор) // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». 2015. № 1. С. 52—61.

- [2] *Кампос Седеньо Антонио Фермин*. Гидраграфическое обоснование контроля и оптимизации использования водных ресурсов гидрографической демаркации Манаби (Эквадор). М.: РУДН, 2016. С. 79–86.
- [3] *Anache J., Vacchi C., Panachuki E., Alve Sobrinho T.* Assessment of methods for predicting soil erodibility in soil loss modeling // *Geociências*. 2015. Т. 34. №. 1. P. 32–40.
- [4] Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica. La erosión en el Ecuador / Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica // *Documentos de investigación*. 1986. № 6. 96 p.
- [5] *Correa Calle O.* Modelo dinámico para calificación de la amenaza pluvial y evaluación de la posibilidad de erosión en la sectorización geotécnica de oleoductos y su aplicación en la planeación y toma de decisiones. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia — Facultad de Ingeniería, 2003. 87 p.
- [6] *Diaz J.* Análisis de Erosión de suelo. Canada: Services in Geographic Information Systems (GIS), 2014. P. 6–7.
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations — FAO. Digital Soil Map of the World — ESRI shapefile format [Электронный ресурс] / Food and Agriculture Organization of the United Nations — FAO. 2017. Access mode: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>
- [8] Instituto Geografico Militar del Ecuador. Geodescargas: Cartografía, Software, Manuales, Enlaces [Электронный ресурс] / Instituto Geografico Militar del Ecuador. 2017. Access mode: <http://www.geoportalign.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
- [9] *Santacruz de León G.* Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México // *Aqua-LAC*. 2011. Т. 3. № 1. P. 45–54.
- [10] *Wawer R., Nowocień E., Podolski B.* Real and Calculated K USLE Erodibility Factor for Selected Polish Soils // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2005. Т. 14. № 5. P. 655–658.

© Кампос Седеньо А.Ф., Синиченко Е.К., Грицук И.И., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 28 февраля 2017

Дата принятия к печати: 14 марта 2017

Для цитирования:

Кампос Седеньо Антонио Фермин, Синиченко Е.К., Грицук И.И. Оценка потенциальной водной эрозии гидрографической демаркации Манаби (Эквадор) // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 192–203.

Сведения об авторах:

Кампос Седеньо Антонио Фермин (Эквадор), аспирант департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* гидравлика и инженерная гидрология. *Контактная информация:* e-mail: arcangelitok@yahoo.com

Синиченко Евгений Константинович, кандидат технических наук, доцент департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* гидравлика и инженерная гидрология. *Контактная информация:* e-mail: sinichenko_ek@pfur.ru

Грицук Илья Игоревич, кандидат технических наук, доцент департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. Старший научный сотрудник лаборатории «Динамики русловых потоков и ледотермики» Института водных проблем РАН. *Сфера научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, ледотермика. *Контактная информация:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

EVALUATION OF POTENTIAL WATER EROSION OF HYDROGRAPHIC DEMARICATION OF MANABI, ECUADOR

Campos Cedeno Antonio Fermin (Ecuador)¹, E.K. Sinichenko¹, I.I. Gritsuk^{1,2}

¹ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

² Water Problems Institute Russian Academy of Science
Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333

Water erosion is the most essential reason of destruction of soils in the whole world. So, in Asia, from the 747 million hectares of earth suffering from erosion, 60% correspond to water erosion; in Africa from 497 million, 46%; in South America, from 243 millions, 51%; in Europe, from 219 million, 53%; 106 millions in a North and Central America, Bifani (1984). The same author specifies that, the phenomenon of erosion is closely related to the phenomenon of settling. The process of water erosion is usually measured on volume alluviums. The Rivers Ganges, Brahmaputra and Huang He, transport 1451, 726 and 1887 million tons annually, respectively, as compared to the rivers Mississippi, Amazon and Nile, that carry only 97, 63 and 31 tons on the square kilometer of basin (Holeman, 1968) [9].

Erosion of soil in Ecuador is a serious ecological problem that affects greater part of country in one or another degree. The use of methods of prognostication of washing off of superficial fertile layer of soils from fallouts did not get wide use, as numerous researches were directed to on a quantitative estimation speed of erosion for the different types of land-tenure in the off-shore zones of river basins, and only not many were concentrated on prognostication of erosive processes on all territory. In 1986 the Ecuadorian Center of Geographical Researches (CEDIG), for the first time conducted the row of the researches related to the capture of common data about the problems of erosion in a country [4].

In this paper, based on actual data on rainfall in 51 years and the composition of the soils, was carry out the estimation of potential water erosion for Hydrographic Demarcation of Manabi (Ecuador).

Key words: water erosion, Manabi demarcation, Universal Soil Loss Equation, R factor — USLE, K factor — USLE, LS factor — USLE

REFERENCES

- [1] Kampos Sedeno A.F., Sinichenko Ye.K., Gritsuk I.I. Strukturnyy podkhod k otsenke morfometricheskikh kharakteristik basseynov rek provintsii Manabi (Ekvador) [A structured approach to the evaluation of the morphometric characteristics of the river basin demarcation of Manabi (Ecuador)]. *Vestnik RUDN. Seriya «Inzhenernye issledovaniya»*. 2015. № 1. Pp. 52—61.
- [2] Kampos Sedeno A.F. *Gidrologicheskoe obosnovanie kontrolya i optimizatsii ispolzovaniya vodnykh resursov Gidrograficheskoy demarkatsii Manabi (Ekvador)* [Hydrological study control and optimize the use of water resources of the hydrographic demarcation Manabi (Ecuador)]. M.: RUDN, 2016. Pp. 79—86.
- [3] Anache J., Bacchi C., Panachuki E., Alve Sobrinho T. Assessment of methods for predicting soil erodibility in soil loss modeling // *Geociências*. 2015. T. 34. № 1. Pp. 32—40.
- [4] Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica. *La erosión en el Ecuador* // *Documentos de investigación*. 1986. № 6. 96 p.
- [5] Correa Calle O. *Modelo dinámico para calificación de la amenaza pluvial y evaluación de la posibilidad de erosión en la sectorización geotécnica de oleoductos y su aplicación en la planeación y toma de dicisiones*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia — Facultad de Ingeniería, 2003. 87 p.
- [6] Díaz J. *Análisis de Erosión de suelo*. Canada: Services in Geographic Information Systems (GIS), 2014. P. 6—7.

- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations — FAO. Digital Soil Map of the World — ESRI shapefile format [Электронный ресурс] / Food and Agriculture Organization of the United Nations — FAO. 2017. Access mode: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>
- [8] Instituto Geografico Militar del Ecuador. Geodescargas: Cartografia, Software, Manuales, Enlaces [Электронный ресурс] / Instituto Geografico Militar del Ecuador. 2017. Access mode: <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
- [9] Santacruz de León G. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México/ German Santacruz de León // Aqua-LAC. 2011. T. 3. № 1. P. 45—54.
- [10] Wawer R., Nowocień E., Podolski B. Real and Calculated K USLE Erodibility Factor for Selected Polish Soils / R. Wawer and etc. // Polish Journal of Environmental Studies. 2005. T. 14. № 5. P. 655—658.

Article history:

Received: 28 February 2017

Accepted: 14 March 2017

For citation:

Kamos Sedeno A.F., Sinichenko Ye.K., Gritsuk I.I. (2017) Evaluation of potential water erosion of hydrographic demarcation of Manabi, Ecuador. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 192—203.

Bio Note:

Campos Cedeno Antonio Fermin (Ecuador), Graduate student of the Department “Architecture and Construction”, Engineering Academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests:* hydraulics and engineering hydrology. *Contact information:* e-mail: arcangelitok@yahoo.com

Evgeniy K. Sinichenko, Ph.D., Associate Professor of the Department “Architecture and Construction”, Engineering Academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests:* hydraulics and engineering hydrology. *Contact information:* e-mail: sinichenko_ek@pfur.ru

Ilya I. Gritsuk, Ph.D., Associate Professor of the Department “Architecture and Construction”, Engineering Academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). Senior researcher laboratory of “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Russian academy of sciences Water problems institute. *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology, ice thermal conditions. *Contact information:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-204-211

УДК 669.018-419.8(035)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ БЛАГОУСТРОЙСТВЕ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Т.С. Имомназаров, Е.М. Тупикова

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В статье предложено применение композитного газонного ограждения, описаны преимущества данного решения, приведен расчет конструкции на эксплуатационные нагрузки, произведен сравнительный анализ накопленной стоимости за три и десять лет эксплуатации, доказана экономическая эффективность композитного газонного ограждения по сравнению с традиционными металлическими газонными ограждениями.

Ключевые слова: композитные материалы, благоустройство территорий, газонное ограждение, перильное ограждение

В последнее время использование конструкций из композитных материалов набирает популярность и доказывает свою целесообразность. Сфера применения композитных материалов стала настолько обширной, что трудно представить отрасль, где бы они не применялись. Использование их позволяет открывать новые возможности при проектировании различных элементов или конструкций. На сегодняшний день использование композитных материалов на российском рынке относительно мало по сравнению с другими странами, доля изделий из композитных материалов российского производства составляет всего лишь 0,3–0,5% от мирового рынка подобных изделий [1]. В связи с этим на уровне правительства была разработана концепция по внедрению композитных материалов, президентом РФ утверждено постановление от 30 октября 2013 года № 972 «Правила предоставления субсидий из федерального бюджета на поддержку развития производства композиционных материалов (композитов) и изделий из них в рамках реализации российскими организациями комплексных инновационных проектов по созданию высокотехнологичной продукции»¹.

Авторы статьи сотрудничали с передовой компанией «МЭКОНС», занимающейся производством конструкций из композитных материалов, которая предоставила место для прохождения студенческой практики, предложила принять участие в исследовании о внедрении конструкций из композита.

Компания «МЭКОНС» имеет большой опыт в производстве мостового перильного ограждения из композитных материалов, которое все чаще применя-

¹ Законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации. Федеральный закон от 22.02.2017 г. № 20-ФЗ.

ется вместо металлического перильного ограждения. При тщательном исследовании композитных материалов было замечено, что их можно использовать и при изготовлении ограждающих конструкций, которые в настоящее время состоят, в основном, из металла. Традиционные металлические ограждения уступают композитным по эксплуатационным характеристикам и имеют меньший ресурс.

Идея разработать газонные ограждающие конструкции (рис. 1) из композитных материалов на сегодняшний момент является простой и экономически эффективной.

Композиционный материал (композит, композитный материал) — искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с четкой границей раздела между ними. В композитах конструкционного назначения армирующие элементы обычно обеспечивают необходимые механические характеристики материала (прочность, жесткость и др.), а матрица (или связующее) обеспечивает совместную работу армирующих элементов и защиту их от механических повреждений, и агрессивной химической среды.

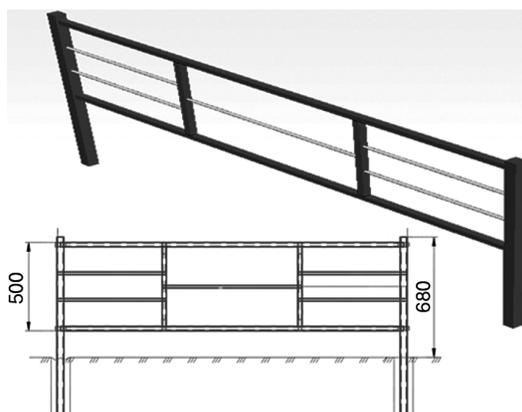


Рис. 1. Газонные ограждения
[Fig. 1. Lawn fence]

Основная цель применения композитных газонных ограждений — это уменьшение эксплуатационных затрат, которое достигается за счет свойств композитного материала (таблица) и обеспечивает значительную экономическую выгоду относительно традиционных решений. При конструировании ограждения были учтены все требования, предъявляемые к ограждающим конструкциям, также были составлены графики и таблицы экономической эффективности композитных газонных ограждений по сравнению с металлическими.

Таблица

Сравнительные характеристики строительных материалов
[Comparative characteristics of building materials]

Характеристика	Стеклопластик	ПВХ	Дерево, сосна	Алюминиевые сплавы	Сталь
Плотность, кг/см ³ (т/м ³)	1,6—2,0	1,3—1,43	0,52	2,7	7,7—7,9
Модуль упругости, ГПа	17—32	2,0—2,8	11	70—71	210
Предел прочности при сжатии, МПа	170—227	4—7	83	100	200—226

Окончание таблицы

Характеристика	Стеклопластик	ПВХ	Дерево, сосна	Алюминиевые сплавы	Сталь
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	200–400	80–110	71,8	275	400
Коэффициент теплопроводности, Вт/К·м	0,3–0,58	0,13–1,63	0,29	150–221	17,5–58
Коррозионная стойкость	Отличная	Отличная	Хорошая	Средняя	Плохая

Основные преимущества композитного газонного ограждения.

— *Прочность.* Наиболее высокое соотношение прочности и собственного веса (по сравнению с металлами, деревом и бетоном), оптимизация конструкций и сокращение их материалоемкости.

— *Коррозионная стойкость.* Устойчивость к химическим агрессивным средам, включая соленую морскую воду. Ограждения не подвержены коррозии и гниению, как металл и дерево.

— *Легкость.* На 80% легче чем конструкционная сталь и на 30% чем алюминий.

— *Разнообразие решений.* Возможность производства композитных элементов различной формы и цветов позволяет создавать высокоэстетичные конструкции.

— *Электромагнитная проницаемость.* Не препятствуют распространению электромагнитных полей и радиочастотных волн.

— *Диэлектрик.* Низкая электропроводность и теплопроводность.

— *Цветостойчивость.* Цветовой пигмент добавляется при изготовлении профиля, прокрашивая весь объем профиля, что исключает повторную окраску в течение срока эксплуатации.

— *Долговечность.* Увеличение эксплуатационных показателей и устойчивость к средам обеспечивает длительный срок службы.

— *Безопасность.* Простота монтажа и легкость самих конструкций позволяет свести к нулю вероятность несчастных случаев при строительстве.

— *Бесполезность для охотников за металлом.* Не может быть сдан на металлолом, что дает дополнительную гарантию целостности конструкции на протяжении всего срока эксплуатации.

В работе был выполнен расчет двух пролетной рамы (рис. 2), из прямоугольных труб сечением 50×50 мм.

В программе ANSYS, была построена трехмерная модель и приложена сосредоточенная нагрузка. В этом случае рассматривается одновременное действие горизонтальной и вертикальной нагрузок. Данное нагружение моделирует опирание человека на перила.

$$F_v = F_h = 1270 \text{ Н,}$$

при этом суммарная нагрузка $F = F_r / \sin 45^\circ = 1796 \text{ Н}$ (см. рис. 2), нагрузка прикладывалась на край поручня в районе крайней стойки и в середине поручня крайней секции.

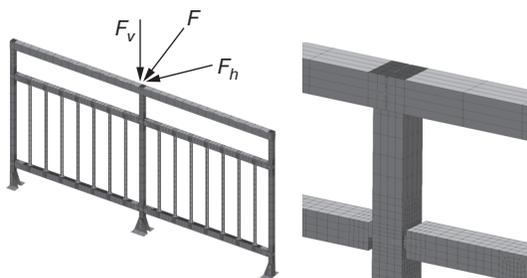


Рис. 2. Расчетная модель
[**Fig. 2.** Design model]

При расчете конструкции на действие сосредоточенной нагрузки, было рассмотрено три варианта нагружения (рис. 3): над средней стойкой, между стойками и над крайней стойкой.

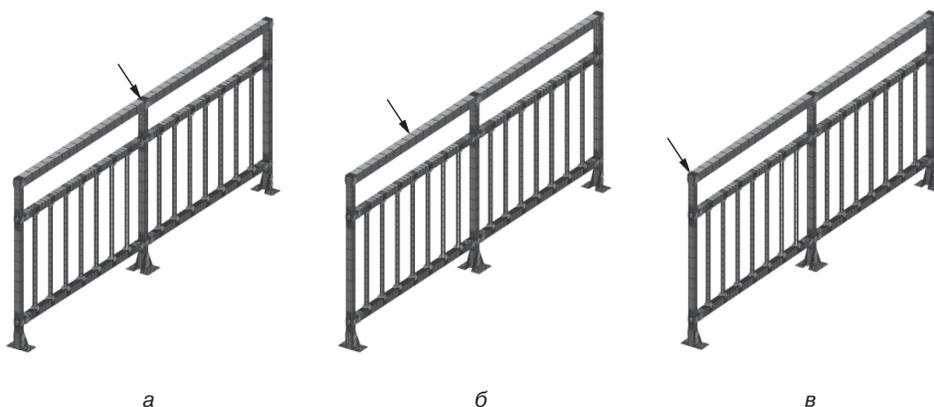


Рис. 3. Расчетная модель с приложенной сосредоточенной нагрузкой в программе ANSYS: *a* — приложения сосредоточенной нагрузки над средней стойкой; *б* — приложения сосредоточенной нагрузки между стойками; *в* — приложения сосредоточенной нагрузки над крайней стойкой)
[**Fig. 3.** Stress analysis from the concentrated load in the program ANSYS: *a* — applications of concentrated load over the middle rack; *б* — applications of concentrated load between racks; *в* — applications of concentrated load over the extreme rack)]

По результатам расчета было получено:

- максимальные растягивающие напряжения над средней стойкой 89,7 МПа, сжимающие 101 МПа;
- максимальные растягивающие напряжения над промежуточной стойкой 89,8 МПа, сжимающие 94,6 МПа;
- максимальные растягивающие напряжения над крайней стойкой 153 МПа, сжимающие 163 МПа.

Также при расчете на заданные нагрузки, был загружен равномерно-распределенной нагрузкой (рис. 4, *a*) по всей длине верхний поручень конструкции, найдены максимальные напряжения, возникающие в конструкции (рис. 4, *б*). Рассматривалось нагружение равномерно распределенной нагрузкой, приложенной под углом 45° , и получили $g = g_r / \sin 45^\circ = 1,98$ кН/м, нагрузка прикладывалась по всей длине поручня.

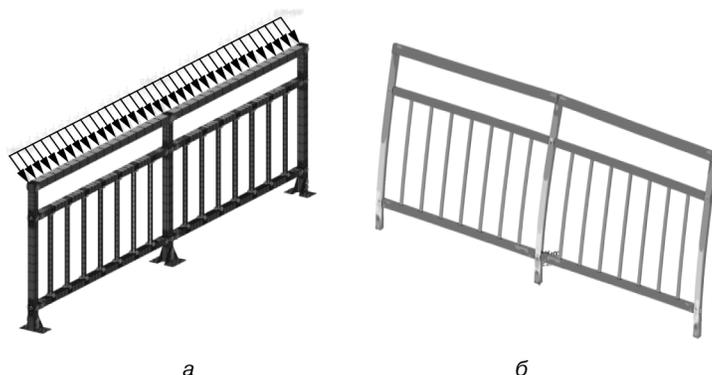


Рис. 4. Расчетная модель (а) и изополя напряжений (б) от равномерно-распределенной нагрузки в программе ANSYS

[Fig. 4. Analytics model (a) and isofield of stress from evenly distributed load (б) in the program ANSYS]

В результате проведенные расчеты показали, что максимальное напряжение возникает в конструкции от действия нагрузки, распределенной по длине верхнего ригеля. Сжимающие усилия в данном случае составили 205 МПа, при пределе прочности (см. таблицу) вдоль волокон 227 МПа. Данная конструкция соответствует требованиям по прочности.

Сравнивая композитные газонные ограждения с металлическими, видим, что металлические газонные ограждения (рис. 5) имеют ряд недостатков по сравнению с композитными. Например, устаревшие газонные ограждения:

- ржавеют;
- требуют вложений;
- создают неудобства;
- портят одежду;
- ухудшают облик города.



Рис. 5. Металлические газонные ограждения

[Fig. 5. Metal lawn fencing]

Стеклопластик долговечен, не подвержен коррозии, цветоустойчив, что его несомненный плюс при эксплуатации.

Важно было знать окупаемость композитного ограждения по сравнению с металлическим, в связи с этим были сделаны расчеты по приведенной (накопленной) стоимости на три (рис. 6) и десять (рис. 7) лет эксплуатации.



Рис. 6. Приведенная (накопления) стоимость 1 м за 3 года эксплуатации
[Fig. 6. Given (pooling) price 1 m for 3 years of operation]



Рис. 7. Приведенная (накопления) стоимость 1 м за 10 лет эксплуатации
[Fig. 7. Given (pooling) price 1 m for 10 years of operation]

Выводы. Приведенное сравнение стоимости композитных ограждений по сравнению с металлическими показывает, что с увеличением срока эксплуатации применение композитных газонных ограждений обходится намного дешевле.

По результатам исследования было обосновано, почему целесообразно заменить металлические ограждения на композитные. Основным фактором служит маржинальность продукта во время эксплуатации, которая достигается благодаря долговечности материала — производители стеклопластикового профиля предоставляют гарантию на материал на срок до 50 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] www.scienceforum.ru/2016/1743/22089 (дата обращения: 20.02.2017).
[2] *Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др.* Композиционные материалы. М.: Машиностроение, 1990.
[3] *Гартимова Е.Б.* Стекло и стеклопластики. Волгоград: Изд-во ВолгГасу, 2006. 124 с.
[4] *Альперин В.И.* Конструкционные стеклопластики. М.: Химия, 1979. 360 с.

© Имомназаров Т.С., Тупикова Е.М., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 3 марта 2017

Дата принятия к печати: 16 марта 2017

Для цитирования:

Имомназаров Т.С., Тупикова Е.М. Использование композитных материалов при благоустройстве городских территорий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. № 2. С. 204–211.

Сведения об авторах:

Имомназаров Тимур Соибназарович, магистрант департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* конструкции из композитных материалов, расчет и проектирование конструкций с применением анизотропных материалов. *Контактная информация:* e-mail: timur-imomnazarov@mail.ru

Тупикова Евгения Михайловна, ассистент департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* теория оболочек и численные методы. *Контактная информация:* e-mail: emelian-off@yandex.ru

COMPOSITE STRUCTURES APPLICATION IN URBAN LANDSCAPING

T.S. Imomnazarov, E.M. Tupikova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The application of composite structures is gaining popularity because of their distinct economic advantages. Light weight, high strength, durability make these structures able to replace metal analogues. The article concerns approval of composite lawn fences in urban landscaping. The original shape of fence is suggested and designed by finite element analysis means. The cost advantage is also calculated.

Key words: composite materials, urban landscaping, lawn fence, barrier railing

REFERENCES

- [1] www.scienceforum.ru/2016/1743/22089 (20.02.2017).
[2] *Vasiliev V.V., Protasov V.D.* Kompozitsionnye materialy. M.: Mashinostroenie, 1990.

[3] Gartemova, E.B. *Steklo i stekloplastiki*. Volgograd: Izdatel'stvo VolgGasu, 2006.

[4] Alperina V.I., Vasiliev V.V., Protasov V.D. *Konstrukzionay srekloplastiki*. M.: Khimiy, 1979.

Article history:

Received: 3 March 2017

Accepted: 16 March 2017

For citation:

Imomnazarov T.S., Tupikova E.M. (2017) Composite structures application in urban landscaping. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 204–211.

Bio Note:

Timur S. Imomnazarov, graduate student of the Department of Architecture and Construction, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research Interests*: constructions from composite materials, lawn fencing, calculation and design of anisotropic materials. *Contact*: e-mail: timur-imomnazarov@mail.ru

Evgeniya M. Tupikova, Assistant of the Department of Architecture and Construction, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research Interests*: Shell theory and numerical methods. *Contact*: e-mail: emelian-off@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-212-218

УДК 691.5

ПРИМЕНЕНИЕ ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ ВЯЖУЩИХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

М.И. Абу Махади, А.В. Безбородов

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В данной статье представлена информация о шлакощелочных вяжущих и опыте их применения в строительстве на территории России. Здесь отражены составы, виды и свойства шлакощелочного бетона, а также преимущества шлакощелочных вяжущих над портландцементом. В конце статьи сделаны выводы по результатам обзора применения материалов на основе шлакощелочных вяжущих на различных строительных объектах и анализа свойств шлакощелочных бетонов.

Ключевые слова: шлакощелочные вяжущие, портландцемент, бетон, шлак, отходы промышленного производства

В настоящее время в строительстве многих стран, в том числе и в Российской Федерации, основным материалом для производства различных видов бетонов служит, как правило, портландцемент.

С развитием человеческого общества увеличивается объем строительного производства, что ведет к повышению использования портландцемента.

Однако производство портландцемента связано с высоким потреблением природных минеральных сырьевых и энергетических ресурсов и сопровождается высокими объемами выбросов в окружающую среду.

Одним из основных направлений развития строительной отрасли является сохранение природных ресурсов за счет увеличения объемов использования отходов промышленного производства.

Таким образом, актуален вопрос поиска материалов, альтернативных портландцементу.

Примером таких материалов могут служить шлакощелочные вяжущие, основа которых — гранулированные шлаки — отходы металлургического производства.

Цель статьи заключается в привлечении внимания к шлакощелочным вяжущим при производстве строительных материалов и замене портландцементов, в связи с высокими ценами на цемент, а также отрицательным воздействием на окружающую среду при его производстве.

В России выпуск шлакощелочного бетона был налажен в 1973 году в регионе Западного Урала. На заводах изготовлялись фундаментные блоки, детали очистных сооружений, плиты покрытия площадей, сваи.

В 1975—1980 годах на строительных предприятиях Тульской области был осуществлен выпуск предварительно напряженных аэродромных плит размерами

2×6 м, которые были уложены в дорожное полотно аэродрома г. Тулы, бордюрных камней, тротуарных плит, кирпича, блоков стен подвалов.

Также конструкции из шлакощелочного бетона были использованы для устройства подъездных путей к химическим предприятиям в Тульской области, смонтированы в полы Новомосковского завода органического синтеза и отделения электролиза хлорного производства ПО «Азот».

С 1973 года производилось укрепление грунтов шлакощелочными вяжущими для использования их в основаниях дорожных одежд.

Институтом «УралНИИстрой» в течение многих лет проводились испытания по использованию шлаков в производстве строительных материалов. Были разработаны составы жаростойкого бетона на шлакощелочном вяжущем для футеровки печных вагонеток керамической промышленности.

В Челябинске в 1980-е годы шлакощелочные вяжущие были внедрены в тресте «Челябметаллургстрой». Шлакощелочной бетон использовался при изготовлении фундаментных блоков, надоконных перемычек и плит перекрытия.

В 1973 году Омский асфальтобетонный завод наладил выпуск железобетонных дорожных плит из шлакощелочного бетона марки 300 и бордюрных камней. Указанные изделия укладывали на магистральных дорогах и при благоустройстве г. Омска. Исследования, проведенные через 4 года эксплуатации, показали, что все конструкции находятся в хорошем состоянии.

В 1984 году шлакощелочной бетон был использован при строительстве спецдороги под многотоннажные БелАЗы в г. Магнитогорске.

В 1988 году предварительно напряженные бетонные шпалы из шлакощелочного бетона были уложены на действующей железной дороге Санкт-Петербург — Москва.

Примером успешного использования шлакощелочного бетона в ограждающих и несущих конструкциях является возведение высотного жилого дома в Липецке в 1988—1989 годах. Двадцатипятиэтажное здание выполнено в сборно-монолитном варианте, вся подземная часть и стены — монолитные, а плиты перекрытий, лестничные марши и площадки — из сборного шлакощелочного бетона.

Исследования, проходившие в 2012 году, показали, что все конструкции данного дома находятся в хорошем состоянии.

Шлакощелочной бетон — искусственный камень, образующийся при твердении смеси шлакощелочного цемента, заполнителей и воды.

Результатами исследований в период с 1960—1990-х годов стали разработка нормально-, быстро-, особо быстротвердеющих составов ШЩВ и технологий производства изделий из них.

К шлакощелочным бетонам применима общая классификация бетонов — по структуре и плотности, виду и крупности заполнителей, условиям твердения, назначению и наиболее характерным свойствам.

Ориентировочный состав тяжелых бетонов:

- молотый гранулированный шлак — 15—30%;
- щелочной компонент — 0,5—1,5%;
- заполнители — 70—85%.

Помимо традиционных заполнителей (щебня, гравия, песка) в шлакощелочных бетонах могут быть использованы многие дисперсные природные материалы и попутные продукты различных отраслей промышленности.

В качестве заполнителей используют мелкие пески, супеси, лессы, гранулированные и отвалы шлаки, горелые породы, отсев камнедробильных производств, хвосты горнообогатительных комбинатов, гравийно-песчаные и глиногравийные смеси [1].

В отличие от цементных бетонов, где содержание дисперсных и загрязненных заполнителей недопустимо, в шлакощелочных бетонах содержание глинистых частиц может достигать 5%, а пылеватых — 20%.

Применение дисперсных заполнителей с повышенным содержанием пылевидных и глинистых примесей не ухудшает физико-механические свойства шлакощелочных бетонов.

Это объясняется их химическим взаимодействием с щелочным затворителем, в результате чего образуются дополнительные цементирующие новообразования — щелочные гидроалюмосиликаты.

В естественных условиях образование указанных минералов, относящихся в основном к группе цеолитов, происходит медленно, оно существенно ускоряется при пропаривании и автоклавной обработке, а также при предварительном обжиге.

В 1980—1990-е годы были утверждены нормативные требования к сырьевым компонентам, составам и свойствам ШЩВ, ШЩБ, бетонных и железобетонных изделий и конструкций из них, технологии их производства и применения [2; 3].

В зависимости от назначения получают бетоны плотной, крупнопористой, поризованной и ячеистой структур.

По зерновому составу заполнителей подразделяют на мелко- и крупнозернистые, по плотности — на тяжелые и легкие.

Тяжелые бетоны на шлакощелочном вяжущем относят к конструкционным бетонам, легкие бетоны разделяют на конструкционные, конструкционно-теплоизоляционные и теплоизоляционные.

Конструкционные легкие шлакощелочные бетоны классов В15—В50 (М200—М600) со средней плотностью 1500—1800 кг/м³ изготавливают на керамзите, доменном гранулированном шлаке, аглопорите, известняке-ракушечнике, шлаковой пемзе, отходам древесины. Эти же заполнители применяют для конструкционно-теплоизоляционных бетонов со средней плотностью 500—1400 кг/м³, которые характеризуются прочностью при сжатии 3,5—40 МПа и теплопроводностью 0,17—0,4 Вт/(м·°С).

Теплоизоляционные шлакощелочные материалы средней плотности 170—450 кг/м³, прочностью при сжатии от 0,25—2 МПа и теплопроводностью 0,059—0,13 Вт/(м·°С) разработаны на основе вспученного перлита.

Прочность шлакощелочных бетонов регулируют, главным образом, изменением плотности щелочного компонента, степенью влияния которой зависит от его природы. Наиболее ощутимо сказывается на повышении прочностных характеристик применение растворимых силикатов натрия. Бетоны на их основе высокопрочные.

Наибольшей прочности при сжатии (120 МПа) характеризуются пропаренные бетоны на основе нейтральных шлаков и низкомодульных ($M_c = 1—2$) жидких стекол.

Мелкозернистые бетоны представляют собой искусственный камень, получаемый после отверждения рационально подобранной смеси молотого шлака, раствора щелочного компонента и мелкого заполнителя, в качестве которого служат мелкие пески и грунты в виде супесей и легких суглинков.

Мелкозернистые шлакощелочные бетоны выпускают классов В10—В60. Их свойства практически определяются теми же факторами, что и свойства тяжелых шлакощелочных бетонов на крупнозерновом заполнителе.

Жаростойкие бетоны на основе шлакощелочного вяжущего способны выдерживать температуры от 200 до 1500 °С.

Достоинства этих бетонов следующие:

- 1) отказ от предварительной сушки перед началом монтажа, что обусловлено низкой влажностью изделий после автоклавной обработки;
- 2) для большинства изделий нет снижения прочности в интервале температур 600—900 °С;
- 3) высокая прочность после разогрева на рабочую температуру.

Применение данного вида бетонов может быть очень эффективным при строительстве стартовых площадок на космодроме «Восточный».

Для получения *шлакощелочных пенобетонов* с низкой плотностью и высокопористой пористостью, обеспечивающей материалу достаточно высокие звукопоглощающие свойства, используют молотый электротермофосфорный шлак с удельной поверхностью 350—400 м²/кг и щелочные растворы.

Способ поризации и стабилизации поровой структуры предусматривает приготовление устойчивой пеномассы с последующим введением в нее тонкомолотого шлака.

В качестве пенообразователей используют омыленный древесный пек, смолу древесную омыленную, белковые протеиносодержащие продукты и ряд других отходов производства.

Применение шлакощелочных вяжущих в строительстве в настоящее время крайне ограничено и составляет не более 2—3 % от общего количества портландцемента, несмотря на то что физико-механические свойства шлакощелочных бетонов близки к свойствам цементных бетонов, а в ряде случаев они могут быть и существенно выше.

Прочность шлакощелочных бетонов может достигать значений выше 100 МПа. Наибольшую прочность имеют бетоны на основе основных и нейтральных шлаков в условиях тепловлажностной обработки. В результате проведенных испытаний [1] установлено, что за период эксплуатации все шлакощелочные бетоны повысили свою проектную прочность в 1,5 — 2,5 раза.

Увеличение расхода шлака от 300 до 600 кг/м³ приводит к увеличению прочности бетона, особенно при твердении в нормальных воздушно-влажных условиях [4].

При постоянной плотности щелочного раствора увеличение растворошлакового отношения (Р/Ш) уменьшает прочность, однако значительно менее существенно, чем водоцементное отношение для портландцементных бетонов.

При нормальных условиях твердения и длительном водонасыщении шлакощелочной бетон характеризуется большей интенсивностью набора прочности на изгиб по сравнению с цементным.

Было выявлено, что ШЩБ устойчивы в минерализованных, сульфатных, магниевых водах, морской воде, растворах солей и неорганических кислот, что обусловлено отсутствием в продуктах твердения ШЩВ свободной извести и высокоосновных новообразований, характерных для портландцементного камня [4].

ШЩБ по сравнению с портландцементными способны твердеть как при высоких положительных (+5—0 °С), так и при отрицательных (–5—–15 °С) температурах, обладают низким тепловыделением при твердении, что обеспечивает возможность использования его для бетонирования массивных конструкций.

Морозостойкость шлакощелочных бетонов изменяется в пределах 300—1300 циклов и более. Она увеличивается при увеличении плотности раствора щелочного компонента, применении жестких бетонных смесей, твердении бетона в нормальных условиях, использовании заполнителей оптимального гранулометрического состава.

Высокая морозостойкость шлакощелочных бетонов обусловлена особенностями их структуры — меньшей общей пористостью, повышенным содержанием мелких замкнутых пор, высокой плотностью и прочностью контактной зоны.

Особенности поровой структуры шлакощелочных бетонов, повышенная водонепроницаемость и седиментационная устойчивость бетонных смесей определяют высокую водонепроницаемость бетонов.

Как показали результаты испытаний [1], водонепроницаемость шлакощелочных бетонов после их длительной эксплуатации значительно повышается, что связано с уплотнением структуры бетона с течением времени.

Для шлакощелочных бетонов характерно образование плотной и прочной контактной зоны «вяжущее — заполнитель» из щелочных и щелоче-щелочеземельных гидроалюмосиликатов.

Истираемость шлакощелочных бетонов, по данным работы [1], находится в пределах истираемости гранитов (0,21—0,47 г/см²).

Обзор применения материалов на основе шлакощелочных вяжущих на различных строительных объектах в России; анализ свойств бетонов на основе шлакощелочных вяжущих позволил сделать следующие выводы:

1) многолетний опыт применения бетонов на основе шлакощелочных вяжущих доказывает эффективность и высокие эксплуатационные качества данного вида вяжущего при строительстве сооружений специального назначения, а также при возведении жилых домов;

2) шлакощелочные вяжущие обладают высокими физико-механическими характеристиками, такими как: высокая плотность, стабильный и постоянный рост прочности, коррозионная устойчивость, стойкость к воздействию агрессивных сред, а также высокая морозостойкость;

3) шлакощелочные бетоны можно отнести к разряду материалов со специальными свойствами и рекомендовать к использованию в специальных видах строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев: «Будівельник», 1978. 184 с.
- [2] ГОСТ 3476—74. Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов, Госстрой СССР. М.: Изд-во стандартов, 1988.
- [3] Рекомендации по изготовлению шлакощелочных бетонов и изделий на их основе, НИИЖБ Госстроя СССР, 1986.
- [4] Глуховский В.Д. Шлакощелочные вяжущие и мелкозернистые бетоны на их основе. Ташкент, 1978. 485 с.

© Абу Махади М.И., Безбородов А.В., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 9 марта 2017

Дата принятия к печати: 17 марта 2017

Для цитирования:

Абу Махади М.И., Безбородов А.В. Применение шлакощелочных вяжущих в строительстве // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 212—218.

Сведения об авторах:

Абу Махади Мохаммед Ибрагим, кандидат технических наук, доцент департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: механика грунтов, основания и фундаменты, строительные материалы. *Контактная информация*: e-mail: moham_d@mail.ru

Безбородов Александр Викторович, магистрант департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: повышение качества строительных материалов, эффективные методы закрепления слабых грунтов под основания сооружений. *Контактная информация*: e-mail: avbezb@mail.ru

APPLICATION SLAG-ALKALI BINDER IN CONSTRUCTION

M.I. Abu Mahadi, A.V. Bezborodov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Information about slag-alkali binders and the experience of their application in construction of Russia is provided in this article. Structures, types and properties of slag-alkali concrete, and also a benefit the slag-alkali binders over a portland cement are reflected. At the end of article conclusions by results of using materials based on slag-alkali binders in various construction objects and the analysis of properties the slag-alkali binders concrete are drawn.

Key words: slag-alkali binder, portland cement, concrete, slag, industrial waste

REFERENCES

- [1] Glukhovskiy V.D., Pakhomov V.A. Shlakoshchelochnye tsementy i betony. Kiev: Budivel'nik, 1978. 184 s.
- [2] GOST 3476—74. Shlaki domennyye i elektrotermofosfornyye granulirovannyye dlya proizvodstva tsementov, Gosstroy SSSR. M.: Izdatel'stvo standartov, 1988.
- [3] Rekomendatsii po izgotovleniyu shlakoshchelochnykh betonov i izdeliy na ikh osnove, NIIZHB Gosstroya SSSR, 1986.
- [4] Glukhovskiy V.D. Shlakoshchelochnye vyazhushchie melkozernistyie betony na ikh osnove. Tashkent, 1978. 485 s.

Article history:

Received: 9 March 2017

Accepted: 17 March 2017

For citation:

Abu Mahadi M.I., Bezborodov A.V. (2017) Application slag-alkali binder in construction. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 212—218.

Bio Note:

Mohammed I. Abu Mahadi, Ph.D., Associate Professor of the Department of Architecture and Construction, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: soil mechanics, foundation engineering, building materials. *Contact information*: e-mail: moham_d@mail.ru

Alexander V. Bezborodov, graduate student of the Department of Architecture and Construction, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: improving the quality of building materials, effective methods for stabilization weak soil under the bases of constructions. *Contact information*: e-mail: avbezb@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-219-229

UDK 725.2

THE STUDY OF BUSINESS CENTERS IN THE ARABIAN GULF: RESIDENTIAL, OFFICES, AND COMMERCIAL BUILDINGS

A.D. Razin, Z.Sh. Alhalabi, I. Khalil

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The modern architecture of the Arabian Gulf has become an international icon after the completion of Burj Al Arab in 1999. Since then, many more modern buildings were built in order to host the numerous international companies residing or branching in the Arabian Gulf especially in Dubai.

This article will examine few examples of the modern architecture the Arabian Gulf, some of many amazing projects were constructed, alongside a brief introduction, what challenges the architecture faces in the Arabian Gulf, and what's the future seems like.

Key words: Commercial buildings, offices, Middle East, Dubai, Arabian Gulf, architecture, and carbon critical design

1. INTRODUCTION

The Arabian Gulf has become one of the popular international business hubs. With thousands of foreign businesses taking place in that geographical spot, the architecture of that region has changed rapidly and immensely in order to provide the adequate place to host all these businesses and all the facilities needed for those who run them.

One of the things that make the architecture of the Arabian gulf unique is the zest for excellence, they take environmental measurements and sustainability into consideration so they have Carbon Critical Designs which aims to decrease the carbon emission levels during construction as well afterwards; Carbon Critical Designs is a layer of the multiple layers sustainable design and it's rather an important one. This is a big step due to the fact that climate change is partially caused by manmade carbon emissions.

2. MODERN ARCHITECTURE IN THE ARABIAN GULF

The first building to ever be built in the Middle East which has an international fame is Burj Al Arab and it's one of the most important projects for this region, its importance comes from the change caused by it. In 1999 the construction of Burj Al Arab was completed putting Dubai in the international spotlight as it amazed the world with the simple iconic design; which in its turn turned Dubai into an international tourism destination and a modern city.

2.1. Urban Architecture in Dubai

Dubai's urban master plan has changed drastically in the past 20 years, changing from a modest city into an international icon of modern architecture. One of the main features

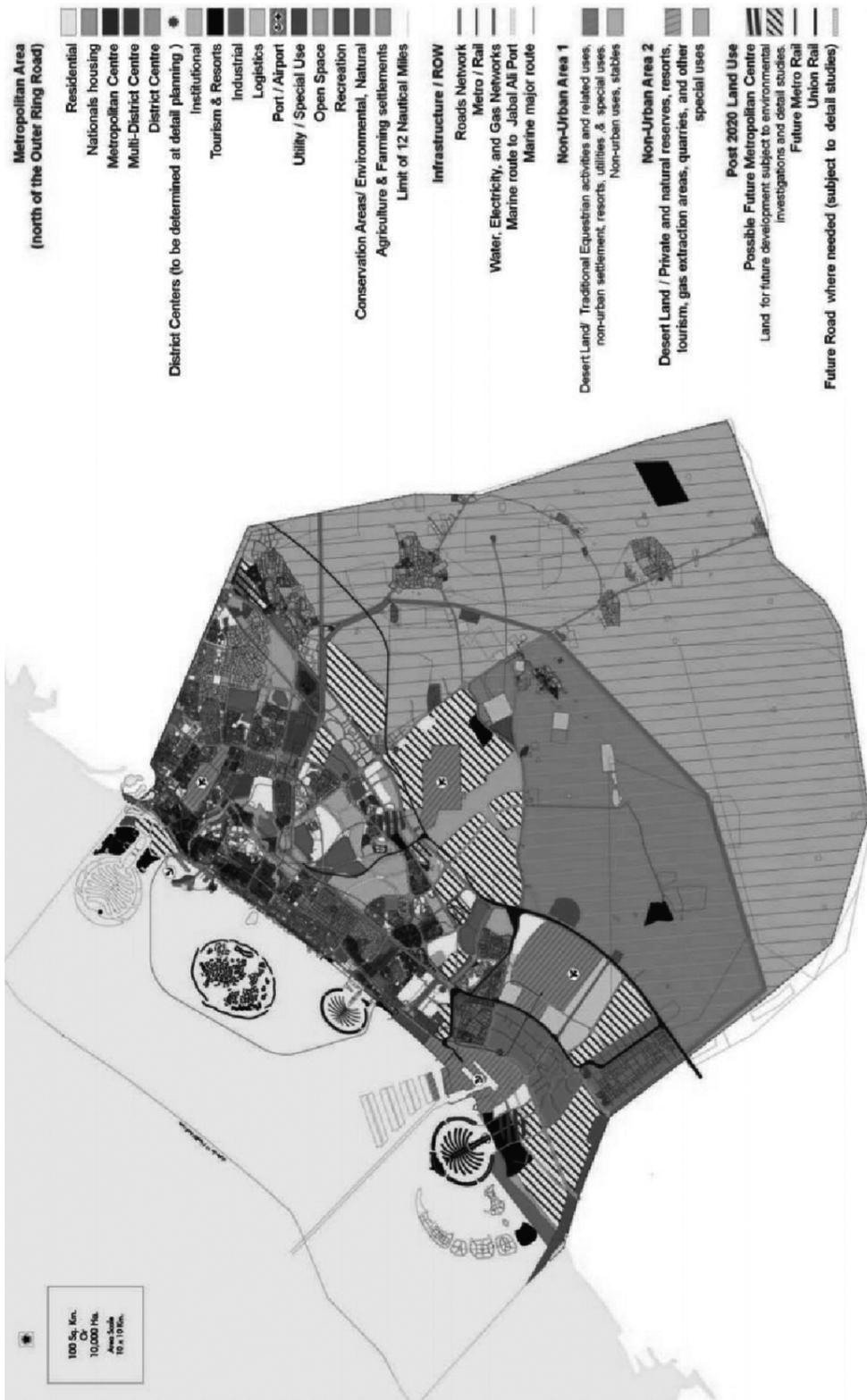


Fig. 1. Dubai Urban Master Plan 2020
 [Рис. 1. Генеральный Городской План Дубая 2020]

of Dubai's urban planning is the artificial islands, which provided a solution to the limited land problem as the total area of Dubai is 4,114 km² while the population of 2.657 million (5 Nov. 2016). As noticed below (fig. 1) Dubai's metropolitan center is divided into two parts; both parts are surrounded by residential areas from behind while maintaining some residential areas integrated within the metropolitan centers. On the other hand, major tourism zones are located in three main parts by the sea; two of them are adjacent to the two parts of the metropolitan center. It is noticed that each of the city's two international airports is located near one of the two parts of the metropolitan center while the sea port is located between two major tourist areas.

2.2. Offices and Commercial Buildings

After the construction of Burj Al Arab, the Arabian Gulf was brought to life and became an attraction for international businesses bringing a new demand for offices and commercial buildings. Since then, many projects have been designed and constructed in the Arabian Gulf some of which are the following:

2.2.1. Al Rostamani Office and Residential Building

The building was completed in 2005, just one year after the beginning of its construction in 2004. It is located in the midst of the banking district of Dubai, UAE. The tower contains 4 commercial floors in addition to a banking hall on the ground floor; the 9 upper floors are residential and are separated from the commercial floors. The total floor count is 16 overground and 3 underground, with a total height of 79 m. The design represents a float and has curved beautiful lines providing a pleasant view of the city (fig. 2), and is considered to have a postmodernism architectural style.



Fig. 2. Al Rostamani Office and Residential Building, Dubai, UAE, 2005
[Рис. 2. Аль Ростамани офисные и жилые здания, Дубай, ОАЭ, 2005]

2.2.2. Tiffany Tower

The Tiffany Tower is located in Dubai, UAE within the Jumeirah Lake Towers, which is a new district “New Dubai”. It’s made up of 79 towers arranged in 3 groups of towers in form of lakes. The simple elegant curvy design from the outside (fig. 3) surrounds a rectangular plan on the inside (fig. 4). The 183m high building is made of 41 floors above ground and contains 3 floors of retail and restaurant outlets while having 38 floors of offices and guest suites on the upper levels. The construction started in 2005 and was completed in 2010.



Fig. 3. Tiffani Tower, Dubai, UAE, 2010

[Рис. 3. Башня Тиффани, Дубай, ОАЭ, 2010]

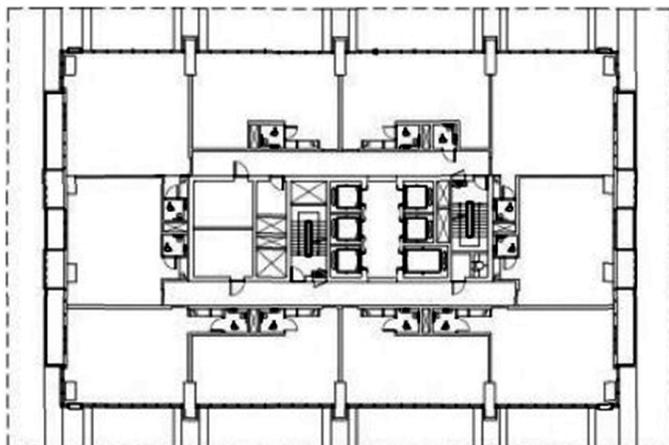


Fig. 4. A Typical Floor Plan (3-19)

[Рис. 4. Типичный план этажа (3-19)]

2.2.3. DSEC Commercial Tower

This commercial tower (fig. 6) was completed in 2010 and is located in the center of the business district of Dubai, UAE. It contains 19 office floors with underground parking for 650 cars. The building hosts restaurants and retail stores within the first three floors while the roof is a leisure center including a gym, swimming pool and relaxation decks that provide a wonderful view of the city.

The building consists of a glazed box of offices (fig. 5) enveloped by an ovoid cylinder lifted beautifully above the ground which divides the external design into two main elements; the podium and the tower (fig. 7).

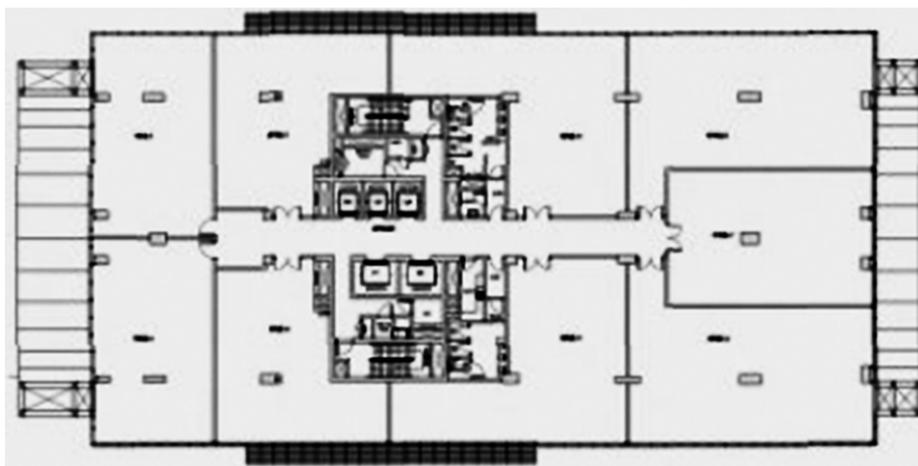


Fig. 5. A Typical Floor Plan
[Рис. 5. Типичный план этажа]

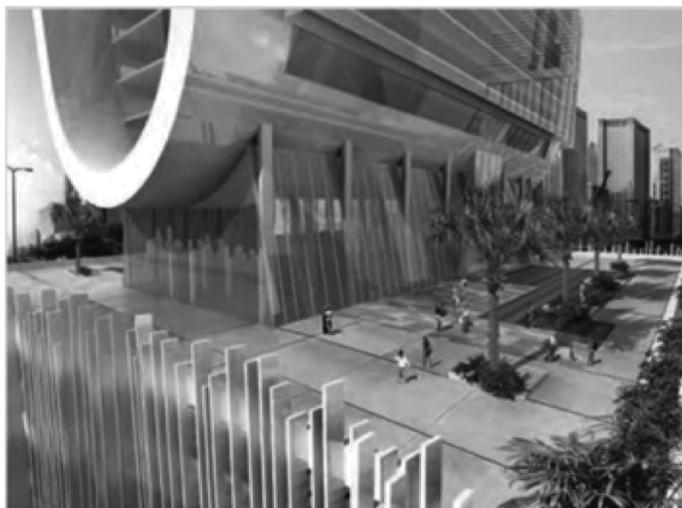


Fig. 6. DSEC Commercial Tower, Dubai, UAE, 2010
[Рис. 6. DSEC Коммерческая башня, Дубай, ОАЭ, 2010]

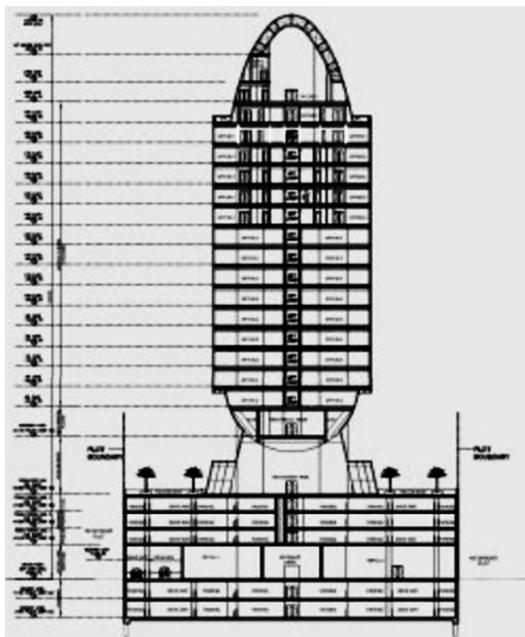


Fig. 7. A General Section
[Рис. 7. Общий раздел]

There are many other modern commercial buildings in the Middle East and many other unrealized projects, most of which are carbon critical designs with outstanding sustainability solutions but unfortunately cannot all be included in this short article.

2.3. Residential Buildings Within The Business District

One of the main problems in Business districts is that after work hours they become empty, which in its turn make a vital part of the city awfully quiet and empty in the evenings, turning the zone to a ghost-like area, thus, making it unpleasant for the few who reside within a business district, not to mention the waste of using a well-built area. Therefore, it is more desirable to build mix-use buildings (residential and commercial) which will allow a building and the Business district area to stay alive after work hours. However, more often we see all-residential buildings surround the business district or are located within the same zone. Such examples can be found in Dubai and many other international business hubs. Some of the examples in Dubai are.

2.3.1. Princess Tower

The princess tower (fig. 8) is one of the important buildings in Dubai and in the world, as it was the tallest residential building in the world until 2015. It is now the 20th tallest building in the world and the second in Dubai. Princess tower is located in Dubai Marina area, Dubai, UAE. With its simple square shaped floor plan (fig. 9) it arises for 101 floors overground and 6 underground, the total height of the tower is 413.4 m. It is one of the few skyscrapers that are residential only and it contains 957 parking spots and 763 units which are; two, three and four bedroom apartments, duplex villas, and penthouses. The

building also contains swimming pools, a sauna club, a gymnasium and a children's day care nursery. In addition; it has a mosque that is exclusive to the tower's residents and eight retail outlets which provide services to the building's residents. It took about 7 years to finish construction which started in 2005 with a budget of 210 million USD adding a remarkable skyscraper to the modern city of Dubai.



Fig. 8. Princess Tower, Dubai, UAE, 2012
[Рис. 8. Башня Принцессы, Дубай, ОАЭ, 2012]

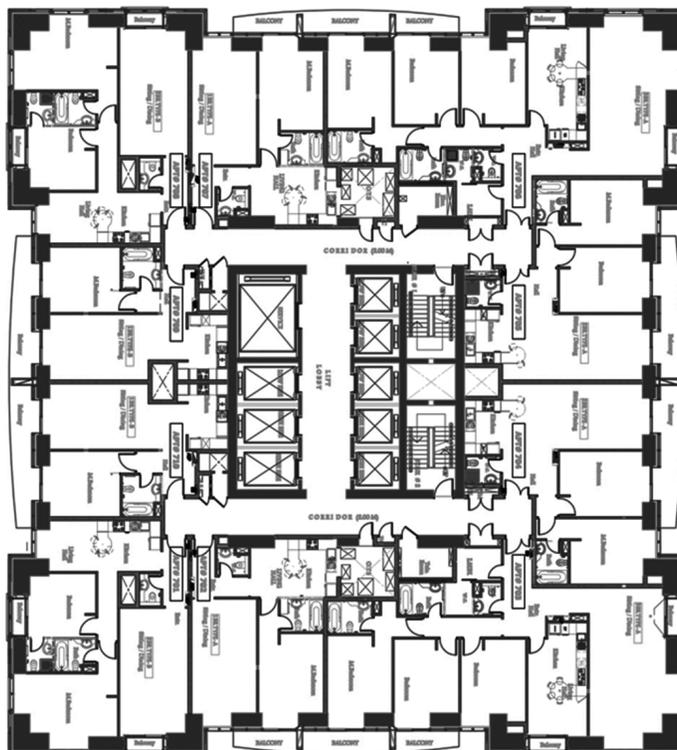


Fig. 9. Princess Tower, a typical floor plan (7-22)
[Рис. 9. Башня Принцессы, Типичный план этажа (7-22)]

2.3.2. 21st Century Tower

Located in Dubai, UAE, 21st Century Tower (fig 10) is yet another all-residential tower. Upon its completion in 2003 it was given the title of the tallest residential building which was later given to Eureka Tower in Melbourne, Australia. The total height of the tower is 269m with an approximate floor area of 1350 m². It contains 55 floors overground and 4 underground, in addition, the building provides 412 parking places for its residents in an adjacent 9-level car park. The building provides all needed services for its residences (which are mainly the crew of Emirates airlines) like a rooftop swimming pool and a gym.



Fig. 10. 21st Century Tower, Dubai, UAE, 2003
[Рис. 10. Башня 21-го века, Дубай, ОАЭ, 2003]

3. PROBLEMS AND FUTURE EXPECTATIONS

The architecture in the Arabian Gulf has faced so many challenges, especially during the global recession. Many other challenges faced the realization of many projects which were designed but never realized; as all these projects need enormous amount of funding which was nowhere to be found even though most of the projects tend to have many sources of renewable power which lower the cost of using the facility, many projects were left unfunded and remained as blueprints.

Dubai is known for its high-tech designs and architecture, it continues to grow adding more technology each time, funders from all over the world are getting interested in investing over there which will solve the funding problems faced earlier which in its turn allows architecture to flourish.

One of the other challenges facing the architecture in the Arabian Gulf is the lack of space to construct; one of the solutions was the construction of artificial islands which provided more space to have horizontal spread instead of vertical. But that is a limited source as well and is not practical due to its limitation. On the other hand, the desert which has extreme high temperatures could be somehow rehabilitated and turned into a habitable space in the future.

4. CONCLUSION

Our new style of life demands radical changes of our cities and buildings. Environmental solutions and sustainability must be present in all new projects as we must pay attention to the levels of carbon emission and make all building as self-sufficient as possible by using renewable energy from the surrounding environment and lowering the cost of construction by using domestic materials in order to get project more beneficial and productive.

Many great examples are to be found in the world- even though some are unrealized - such as X-Change Gateway in Dubai, UAE which is a zero-carbon super tower that provides 6Mw using wind energy. Such examples are the future of architecture not only for skyscrapers but also for all types of buildings and constructions bringing architecture to the future.

REFERENCES

- [1] Atkins Architects. Atkins: Architecture & Urban Design: Selected & Current Works 2011. *Images Publishing*. 01 January 2011.
- [2] www.atkinsglobal.com [online]. Burj Al Arab. <https://www.atkinsglobal.com/en-gb/projects/burj-al-arab>.
- [3] www.atkinsglobal.com [online]. Atkins at a glance. <https://atkinsglobal.co/en-gb/about-the-group/atkins-at-a-glanct>. 23 March 2015.
- [4] www.emporis.com [online]. Al Rostamani Residential and office building. *Emporis*. <https://www.emporis.com/buildings/212000/al-rostamani-building-dubai-united-arab-emirates>.
- [5] www.emporis.com [online]. Tiffany Towers. *Empois*. <https://www.emporis.com/buildings/240181/tiffany-towers-dubai-united-arab-emirates>
- [6] www.architect.co.uk [online]. DSEC Commercial Tower Dubai, Skyscraper. *e-architect* <https://www.e-architect.co.uk/dubai/dsec-commercial-tower>. 12 September 2016.
- [7] Government of Dubai. Duabi 2020 Urban Masterplan. www.dm.gov.ae
- [8] www.emporis.com [online]. Princess Tower. *Emporis*. <https://www.emporis.com/buildings/220471/princess-tower-dubai-united-arab-emirates>
- [9] www.emporis.com [online]. 21st century Tower. *Emporis*. [emporis.com. https://www.emporis.com/buildings/186985/21st-century-tower-dubai-united-arab-emirates](https://www.emporis.com/buildings/186985/21st-century-tower-dubai-united-arab-emirates)
- [10] Alexey Shipitsin. Top 20 — masterpieces of concrete and glass. [www.psdom.ru](http://psdom.ru). [online]. <http://psdom.ru/catalog/top-20-shedevry-iz-betona-i-stekla>

© Razin A.D., Alhalabi Z.Sh., Khalil I., 2017

Article history:

Received: 28 February 2017

Accepted: 14 March 2017

For citation:

Razin A.D., Alhalabi Z.Sh., Khalil I. (2017) The study of business centers in the Arabian Gulf: residential, offices, and commercial buildings. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 219—229.

Bio Note:

Info was not provided.

ИССЛЕДОВАНИЕ БИЗНЕС-ЦЕНТРОВ В АРАБСКОМ ЗАЛИВЕ: ЖИЛЫХ, ОФИСНЫХ И КОММЕРЧЕСКИХ ЗДАНИЙ

А.Д. Разин, З.Ш. Алхалаби, И. Халиль

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Современная архитектура Арабского залива стала международным значком после завершения Бурдж Аль-араб в 1999 году. С тех пор появились много более современных зданий, которые были построены для размещения многочисленных международных компаний проживающих или ветвящихся в Арабском заливе, особенно в Дубае.

В этой статье рассмотрены несколько примеров современной архитектуры Арабского залива, некоторые из многих удивительных проектов были реализованы, наряду с кратким введением, с какими проблемами сталкивается архитектура в Арабском заливе, и что будущее кажется подобное.

Ключевые слова: коммерческие здания, офисы, Ближний Восток, Дубай, Арабский залив, архитектура, и углеродные критические дизайны

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Архитекторы Аткинса. Аткинс: архитектура и городской дизайн: выбранных и текущих работ 2011. Изображения Публикации. 01 января 2011 года.
- [2] [www.atkinglobal.com](http://www.atkinglobal.com/en-gb/projects/burj-al-arab) [Электронный ресурс]. Бурдж Аль-араб. <https://www.atkinglobal.com/en-gb/projects/burj-al-arab>
- [3] www.atkinglobal.com [Электронный ресурс]. Аткинс на первый взгляд. <https://atkinglobal.com/en-gb/about-the-group/atkins-at-a-glanct> (дата обращения: 23 марта 2015).
- [4] www.emporis.com [Электронный ресурс]. Аль Ростамани жилого и офисного здания. Эмпориос. <https://www.emporis.com/buildings/212000/al-rostamani-building-dubai-united-arab-emirates>
- [5] www.emporis.com [Электронный ресурс]. Башня Тиффани. Эмпориос. <https://www.emporis.com/buildings/240181/tiffany-towers-dubai-united-arab-emirates>
- [6] сайт www.архитектор.co.uk [Электронный ресурс]. DSEC Коммерческая Башня Дубая, небоскреб. э-архитектор <https://www.e-architect.co.uk/dubai/dsec-commercial-tower> (дата обращения: 12 сентябрь 2016).
- [7] Государство Дубая. Городской Дубая 2020 Генеральный План. www.dm.gov.ae
- [8] www.emporis.com [Электронный ресурс]. Принцесса Башня. Эмпориос. <https://www.emporis.com/buildings/220471/princess-tower-dubai-united-arab-emirates>
- [9] www.emporis.com [Электронный ресурс]. Башня 21-го века. Эмпориос. [emporis.com. https://www.emporis.com/buildings/186985/21st-century-tower-dubai-united-arab-emirates](https://www.emporis.com/buildings/186985/21st-century-tower-dubai-united-arab-emirates)
- [10] Шипицин Алексей. ТОП-20 — шедевры из бетона и стекла. [www.psdom.ru](http://psdom.ru) [Электронный ресурс]. <http://psdom.ru/catalog/top-20-shedevry-iz-betona-i-stekla>

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 28 февраля 2017

Дата принятия к печати: 14 марта 2017

Для цитирования:

Разин А.Д., Алхалаби З.Ш., Халиль И. Исследование бизнес-центров в Арабском заливе: жилых, офисных и коммерческих зданий // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 219—229.

Сведения об авторах:

Сведения не предоставлены.



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-230-235

УДК 72.023

АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ДИПЛОМАТИЧЕСКИХ ЗДАНИЙ

А.Д. Разин

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117193

В статье рассматриваются требования по обеспечению антитеррористической безопасности дипломатических зданий различных типов, по строительному объему и функциональному назначению. Определены архитектурно-планировочные принципы по обеспечению антитеррористической безопасности. Проанализирован архитектурно-планировочный опыт в соответствии с нормативными документами по обеспечению антитеррористической безопасности. Предложены общие планировочные решения по обеспечению антитеррористической защищенности дипломатических зданий.

Ключевые слова: антитеррористическая защищенность, дипломатические объекты, архитектурно-планировочные требования

В соответствии с законом Российской Федерации все здания и сооружения должны иметь предусмотренные проектными решениями средства, обеспечивающие антитеррористическую защищенность [1].

Дипломатические здания принадлежат к такой категории объектов, которые регулярно подвергаются террористическим нападениям. В результате террористических актов дипломатическим зданиям и сооружениям, персоналу наносится материальный ущерб различной степени тяжести и в исключительных случаях погибают работники дипломатических представительств.

В соответствии со Сводом правил по обеспечению террористической защищенности необходимо разработать систему мероприятий, направленных, во-первых, на предотвращение несанкционированного доступа на дипломатический объект физических лиц, транспорта, грузов и, во вторых, на обнаружение устройств и материалов, способных привести к взрывам или использоваться, как оружие.

Анализ информации о террористических нападениях на дипломатические здания Российской Федерации в различных регионах мира, дипломатические представительства других стран показал, что в среднем в год происходит минимально 5 террористических нападений, в результате которых дипломатическому персоналу, зданиям, имуществу наносится значительный материальный ущерб. Террористические нападения на дипломатические здания происходят в странах Азии, Африки, Америки и в некоторых странах Европы. Необходимо отметить, что все террористические нападения следует разделять на две неравнозначные категории.

Первая категория — это нападения персонально на дипломатических сотрудников различного ранга, вторая категория — это нападение на дипломатические помещения, здания, группу зданий. Вторая категория нападений по количественным показателям значительно превышает первую.

Приведенная классификация вписывается в классическую схему индивидуального и массового террора, которая наблюдается в периоды дестабилизации политических систем и военной эскалации. В условиях нарастания именно военной эскалации в современной концепции войны четвертого поколения (*W-4*) именно террору отводится главная роль для достижения целей господства одних государств или группы государств над другими государствами. По данной концепции ведения войны вообще не предполагается ведения широкомасштабных боевых действий войсковыми соединениями. Война между государствами официально не объявляется, более того дипломатические отношения между государством — агрессором и государством — жертвой не прерываются. Следовательно, дипломатические сотрудники могут находиться во враждебной стране вполне официально [2].

Именно в этом случае начинается нарастание террористической опасности нападения на дипломатические здания под различными предлогами. На втором этапе происходит переход от угроз к нападениям. Необходимо отметить, что все меры по обеспечению террористической защищенности направлены на определенное замедление разворачивающейся агрессии, а возможно и предотвращение дальнейшей военной эскалации в рамках концепции войны четвертого поколения.

Дипломатические отношения, как правило, сдерживают развитие военной эскалации, так как носят симметричный характер и предполагают наличие равноправных дипломатических представительств у двух государств. Подвергая опасности дипломатический персонал аккредитованного государства, аккредитуемое государство тем самым увеличивает опасность террористической угрозы на собственных дипломатов, их имущество, здания и сооружения представительств.

Законодательство всех стран имеет собственные законы, обеспечивающие антитеррористическую защищенность. В Российской Федерации обеспечение антитеррористической защищенности зданий и сооружений нормируется наряду с ФЗ РФ специальным СП. В соответствии с данным СП безопасность объектов должна обеспечиваться по двум направлениям: во-первых, по предотвращению несанкционированного допуска на дипломатический объект неизвестных лиц и, во-вторых, по обнаружению взрывных устройств, оружия и боеприпасов для проведения террористических актов против дипломатического объекта.

Дипломатические объекты включают в себя дипломатические помещения, здания, сооружения, территорию, на которой находятся дипломатические объекты и дипломатический персонал. В соответствии с принципом экстерриториальности все дипломатические объекты размещаются на огражденной и строго охраняемой территории. Таким образом, режим допуска на дипломатический объект строго контролируется в соответствии с дипломатическим статусом. Кроме того дипломатический статус относит все дипломатические объекты к первому классу (класс 1) в зависимости от вида и размера ущерба, который может быть

нанесен объекту, находящимся на объекте людям и имуществу в результате реализации террористических угроз. По определению класса 1 (высокая значимость) ущерб в результате реализации террористических угроз приобретает федеральный или межрегиональный масштаб. Очевидно, что ущерб в результате реализации террористических угроз в отношении дипломатического объекта приобретает международный масштаб и может привести к усилению военных угроз или военной эскалации.

Для усиления контроля по несанкционированным проникновениям на территорию дипломатического объекта необходимо использовать следующие средства и системы: систему контроля и управления доступом на объект (СКУД), систему охранного освещения (СОО), систему охранную телевизионную (СОТ), систему охранной и тревожной сигнализации (СОТС), систему экстренной связи и систему контрольно-пропускных пунктов (КПП).

Для обнаружения взрывчатых веществ и оружия необходимо использовать следующие средства: газоанализатор паров взрывчатых веществ (ГАПВВ), стационарный металлообнаружитель (МО), ручной металлоискатель (МИ), рентгено-телевизионную установку (РТУ), средства визуального досмотра (СрВД), досмотровый радиометрический комплекс (ДРК).

С точки зрения разработки архитектурно-планировочных решений дипломатических объектов названные средства и системы влияют на объемно-планировочные характеристики, увеличивая либо внутренние площади некоторых специальных помещений, либо объемы инженерных сетей и проводных коллекторов. Увеличение внутренних площадей для размещения аппаратуры, оборудования и сотрудников требуется в первую очередь в КПП и в консульском корпусе. Возможно устройство дополнительных КПП и досмотровых помещений.

Архитектурно-планировочный анализ обеспечения антитеррористической защищенности дипломатического объекта предлагается проводить на основе планировочной схемы генерального плана дипломатического объекта среднего размера (рисунок).

На планировочной схеме тонкими линиями обозначен огражденный периметр дипломатического объекта. Дипломатический объект состоит из 2-х зданий, помещенных внутри периметра. Здание 1 объединяет в себе служебно-представительские функции и имеет внутренний дворик. Здание 2 сочетает в себе жилые и обслуживающие функции. Кроме того, на границе территории дипломатического объекта находится консульство. Как правило, консульство размещается таким образом, чтобы был возможен вход в здание посетителей непосредственно с внешней стороны территории представительства. Данное размещение консульства характерно для дипломатических комплексов посольства. Возможно размещение консульства на отдельной территории [3]. На внешней границе комплекса размещается небольшое отдельно стоящее здание контрольно-пропускного пункта (КПП 1). КПП 2 и КПП 3 размещаются внутри консульского здания. Стрелками обозначены входы и выходы в здания и на КПП 1, 2, 3 соответственно. В здании 1 устроены два внутренних КПП, обозначенные небольшими прямоугольниками. Эти КПП предназначены для контроля над входом и выходом в представительскую зону и из представительской зоны в служебную. L_{max} и L_{min} обозначают

максимальное и минимальное расстояния от внешнего ограждения до зданий дипломатического объекта. Изучение проектных материалов и практических рекомендаций показал, что для защищенности зданий дипломатических комплексов от террористических угроз требуется в среднем расстояние 30 м, таким образом, L_{max} и L_{min} может варьироваться от 45 до 15 м. Так как, дипломатический комплекс может состоять из нескольких зданий (см. рисунок), следует L_{max} 45—30 м устанавливать до служебного корпуса, который самый важный в дипломатическом объекте [3; 4].

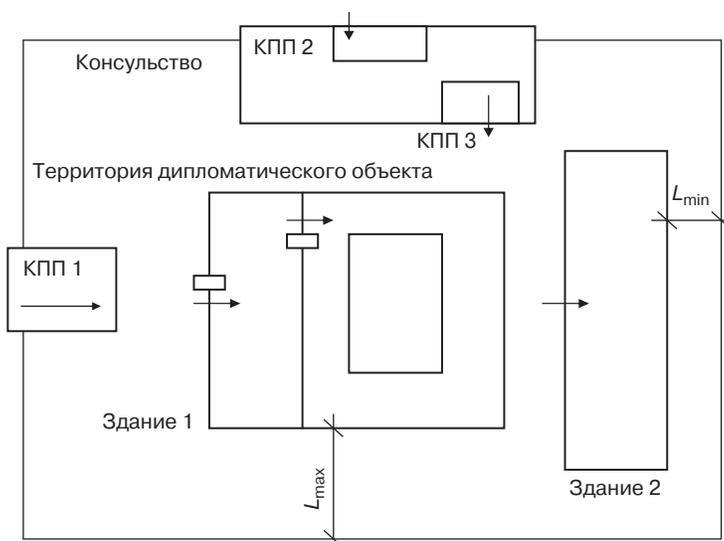


Рисунок. Планировочная схема для разработки генерального плана дипломатического объекта по обеспечению антитеррористической защищенности

[Figure. Diagram for evaluation of master plan of diplomatic objects for ensuring the anti-terrorist security]

В результате проведенного анализа нормативных документов [1] и в соответствии с представленной схемой (см. рисунок) предлагается следующие рекомендации по размещению средств и систем по обеспечению антитеррористической защищенности дипломатических объектов (таблица).

Таблица

Рекомендуемых средств и систем по обеспечению антитеррористической защищенности дипломатических объектов

[Recommended systems and means for ensuring the anti-terrorist security of diplomatic objects]

Средства и системы	Место размещения	Планировочные характеристики
СКУД	КПП, КПП-1, КПП-2, здание 1	Увеличение общей площади на 10%
СОО	Внешний периметр ограждения, КПП, здание 1, здание 2, территория объекта	Не требует дополнительных площадей
СОТ	Внешний периметр ограждения, КПП, здание 1, здание 2, территория объекта	Не требует дополнительных площадей
ГАПВВ	КПП, КПП-1, здание 1, здание 2	Не требует дополнительных площадей
МО	КПП, КПП-1	Увеличение общей площади КПП на 10%
РТУ	КПП, КПП-1	Увеличение общей площади КПП на 10%
СрВД	КПП, КПП-1, КПП-2, здание 1, здание 2	Не требует дополнительных площадей
ДРК	КПП, КПП-1	Не требует дополнительных площадей

Из таблицы следует, что увеличение планировочных площадей дипломатических объектов для размещения средств и систем по обеспечению антитеррористической защищенности следует предусматривать не более чем на 20% от планировочных площадей всех функциональных зон дипломатических объектов. Причем увеличение площадей может быть за счет технических помещений, не предусматривающих постоянное пребывание персонала, т.е. без оконных проемов и высотой 1,8—2,2 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] СП 132.13330.2011. Свод правил. Обеспечение антитеррористической защищенности зданий и сооружений. Общие требования проектирования. С. 1—6.
- [2] Борхсениус А.В. Информационная война: проблема теоретической интерпретации // Вестник РУДН. Серия «Государственное и муниципальное управление». 2016. № 1. С. 79—89.
- [3] Разин А.Д. Обеспечение безопасности дипломатических комплексов архитектурно-планировочными средствами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». 2015. № 2. С. 70—75.
- [4] Разин А.Д. Защита архитектурных объектов дипломатического назначения от неблагоприятных внешних воздействий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». 2016. № 1. С. 152—156.

© Разин А.Д., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 1 марта 2017

Дата принятия к печати: 13 марта 2017

Для цитирования:

Разин А.Д. Архитектурно-планировочные требования по обеспечению антитеррористической защищенности дипломатических зданий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. № 2. С. 230—235.

Сведения об авторах:

Разин Андрей Дионисович, кандидат технических наук, доцент департамента «Архитектуры и строительства» инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* архитектура жилых и общественных зданий, градостроительство. *Контактная информация:* e-mail: andreyrazin@mail.ru

THE ENSURING ANTY-TERRORIST PROTECTION OF DIPLOMATIC BUILDINGS BY ARCHITECTURAL PLANNING DECISIONS

A.D. Razin

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The article considers the demands of ensuring the anti-terrorist protection of diplomatic complexes consisting of different types of buildings. As result of analyses systems and means for ensuring the anti-terrorist security is recommended some changes planning squares. It was proposed general planning

schemas for considering problems for place systems and means for ensuring the anti-terrorist security diplomatic objects

Key words: anti-terrorist security, diplomatic objects, planning schemas, systems and means

REFERENCES

- [1] SP 132.13330.2011. The anti-terrorist protection of building and constructions. General requirements. P. 1–6.
- [2] Borchsenius A.V. Information war: the problem of theoretical interpretation. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Public administration*. 2016. No. 1. P. 79–89.
- [3] Razin A.D. The ensuring security of diplomatic complexes by architectural planning decisions. *Bulletin of Russian Peoples' Friendship University. Engineering researches*. 2015. No. 2. P. 70–75.
- [4] Razin A.D. The defense of diplomatic objects from the non-favorable external influences. *Bulletin of Russian Peoples' Friendship University. Engineering researches*. 2016. No. 1. P. 152–156.

Article history:

Received: 1 March 2017

Accepted: 13 March 2017

For citation:

Razin A.D. (2017) The ensuring anti-terrorist protection of diplomatic buildings by architectural planning decisions. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 230–235.

Bio Note:

Andrey D. Razin, PhD (in Technical Sciences), Associate Professor of Department of Architecture and Construction, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia. *Research Interests:* architecture of dwelling and public buildings, urbanism. *Contact:* e-mail: andreyrazin@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-236-244

УДК 67-08

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

А.Н. Задиранов¹, М.Ю. Малькова¹, Т.Н. Нурмагомедов², П. Дхар¹

¹ Российский университет дружбы народов

ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

² Академия гражданской защиты МЧС России

ул. Соколовская, 1, мкр. Новогорск, Химки, Московская обл., Россия, 141435

В статье представлены инновационные технологии переработки бетонного, железобетонного лома и лома цветных металлов — побочных продуктов строительной индустрии.

Одно из направлений переработки строительных отходов представляет переработка электрических кабелей в целях извлечения олова, свинца, меди и алюминия. Цветные металлы, содержащиеся в отходах этого типа, составляют значительный объем и могут быть использованы в качестве вторичного сырья для производства цветных металлов и сплавов.

В статье представлена разработанная авторами комплексная гидрометаллургическая схема переработки кабельного лома. В отличие от традиционного пирометаллургического метода переработки, схема обеспечивает значительно более полное извлечение ценных металлов и их высокую чистоту (в частности, свинец с чистотой до 99,99%).

Другим перспективным направлением переработки строительных отходов является предлагаемая авторами технология использования их в качестве расходного материала при строительстве зданий, сооружений или конструкций с применением 3D-печати.

Разработка и внедрение предложенных авторами технологий переработки строительных отходов позволит решить ряд важных задач:

- сокращение экономических затрат на утилизацию строительных отходов;
- создание новых материалов со специфическими характеристиками;
- сокращение сроков переработки строительных отходов;
- снижение вредного воздействия строительных отходов на окружающую среду.

Ключевые слова: строительные отходы, кабельный лом, свинец, медь, скрап, уксусная кислота, перекись водорода, 3D-печать

Известно [1–4], что одной из издержек развития цивилизации является образование и накопление технологических отходов, требующих либо утилизации, либо переработки с целью извлечения ценных компонентов.

Особое место в списке технологических отходов занимают строительные отходы. Источники их образования различны. К наиболее представительным относятся:

- продукты жизнедеятельности мирного времени — ремонт, реконструкция, возведение или снос зданий и сооружений;
- последствия природных катаклизмов — землетрясений, наводнений и др.;
- военные действия;
- отходы, формирующиеся при изготовлении строительных материалов.

Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов, выделен 21 вид строительных отходов. Прежде всего, это — бой кирпича и керамический плитки, отходы бетона, железобетона, керамзитобетона, древесины, лом черных и цветных металлов, металлическая тара и др. (табл. 1).

Таблица 1

Основные источники образования строительных отходов

Материал	Источник
Древесина	Изделия из древесины, ДСП, фанеры, ламинат и др.
Отделочный	Гипс, штукатурка, стеновые панели
Металлы	Трубы, провода, арматура, листы металлические
Пластмасса	Двери, окна, трубы, половое покрытие
Кровельный	Гидроизоляция, шифер
Стеновой	Бетон, шлакобетон, керамзитобетон, гипс, камни, кирпич
Стекло	Окна, зеркала, светильники, витрины

Table 1

The main sources of construction waste

Material	Source
Wood	Products from wood, chipboard, plywood, laminate, etc.
Finishing	Gypsum, plaster, wall panels
Metals	Pipe, wire, rebar, sheet metal
Plastic	Doors, windows, pipes, flooring
Roofing	Waterproofing, slate
Wall	Concrete, cinder block, concrete, plaster, stones, bricks
Glass	Windows, mirrors, lamps, windows

Объемы строительных отходов распределяются по-разному (рис. 1), например, доля железобетона в различных зданиях и сооружениях может колебаться от 5 до 93% [3].

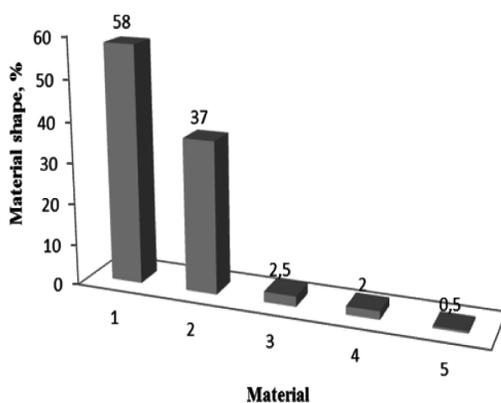
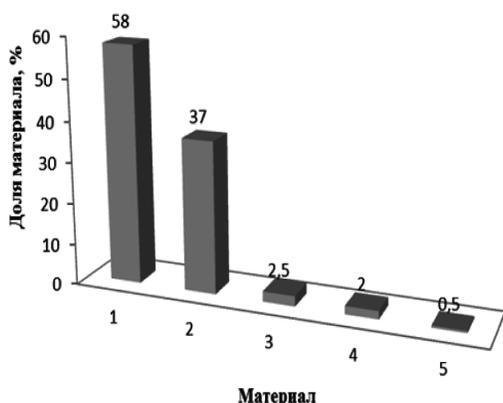


Рис. 1. Доли объемов различных строительных отходов: 1 — каменная кладка; 2 — бетон и железобетон; 3 — древесина; 4 — черные и цветные металлы; 5 — прочие отходы

[Fig. 1. The volume of various construction waste: 1 — masonry; 2 — concrete and reinforced concrete; 3 — wood; 4 — ferrous and non-ferrous metals; 5 — other waste]

Как правило, основная масса строительных отходов подлежит захоронению на специальных полигонах, лишь незначительная их часть направляется на переработку.

Захоронение отходов связано с высокими капитальными затратами (от 300 руб./м³ отходов в зависимости от региона) и экологической опасностью. Многие строительные отходы содержат вредные вещества (канцерогены), оказывая негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека (табл. 2). При этом строительные отходы (особенно отходы цветных металлов) представляют достаточно дорогой экономический продукт, характеризующийся высокой стоимостью (табл. 3).

Таблица 2

Вредные для окружающей среды компоненты строительных отходов [1]

Вещество	Источник	Негативное влияние
Полиуретан	Связующий компонент	Является канцерогеном
Парафин	Половое покрытие, кабели, краски	Является канцерогеном
Свинец	Электрические кабели, стальные листы, водопроводные трубы	Вызывает психические расстройства
Ртуть	Осветительные приборы, выключатели, термостаты и др.	Вызывает аллергию, нарушение функций нервной и репродуктивной системы
Кадмий	Стабилизатор в пластмассах и пигментах	Оказывает негативное влияние на печень, почки, кровеносную систему
Сера	Вяжущие вещества, добавки к бетонам и мастикам	Вызывает заболевания органов дыхательной и нервной систем, слизистых оболочек

Table 2

Harmful to the environment components of construction waste [1]

Substance	Source	The negative impact
Polyurethane	The binder component	Is a carcinogen
Paraffin	Flooring, cables, paint	Is a carcinogen
Lead	Electric cables, steel sheets, water pipes	Causes mental disorders
Mercury	Lighting fixtures, switches, thermostats, etc.	Allergy, dysfunction of the nervous and reproductive systems
Cadmium	Stabilizer in plastics and pigments	Has a negative effect on the liver, kidney, circulatory system
Sulfur	Binders, additives for concrete and mas	Causes diseases of the respiratory and nervous system, of the mucous membranes

Таблица 3

Table 3

Мировые цены на сталь и цветные металлы в 2015 году (по данным Лондонской биржи металлов LME)

Металл	Официальная цена, долл. США/т
Алюминий	1783,50
Медь	5855,00
Никель	13600,00
Олово	17750,00
Кобальт	28000,00
Молибден	17300,00
Цинк	2024,00
Сталь	305,00

World prices for steel and nonferrous metals in 2015 (according to the London metal exchange LME)

Metal	The official price, \$ /ton
Aluminium	1783,50
Copper	5855,00
Nickel	13600,00
Tin	17750,00
Cobalt	28000,00
Molybdenum	17300,00
Zinc	2024,00
Steel	305,00

В связи с этим проблема разработки эффективной технологии сбора, переработки и вторичного использования строительных отходов весьма актуальна. Разработка и внедрение такой технологии позволяет решать ряд важных задач.

1. Совершенствование действующих методов и создание новых технологий сбора и переработки строительных отходов.
2. Создание новых материалов со специфическими характеристиками.
3. Снижение потерь металлов и сплавов.
4. Снижение вредного воздействия строительных отходов на окружающую среду.

Однако выбор технологии переработки бетонного, железобетонного лома и лома цветных металлов зависит от ряда факторов: наличия свободных площадей размещения оборудования и складирования материалов, возможностей свободного проезда к месту переработки отходов, ограничения на габаритные размеры оборудования, заселенности территории и др.

В настоящее время наиболее широко используется схема переработки строительных отходов, включающая первичную (на территории объекта) и вторичную переработку отходов. Она включает в себя [3]:

- 1) установку технологического оборудования на месте разборки (сноса) зданий и сооружений с получением заполнителя и последующей его транспортировкой на железобетонный завод или объект;
- 2) первичную классификацию, разделку и складирование черного и цветного лома на территории объекта;
- 3) транспортировку полученных полупродуктов первичной переработки сырья на профильные предприятия с получением готового изделия (электрический кабель, металлургический сплав, щебень, строительные композиции и растворы).

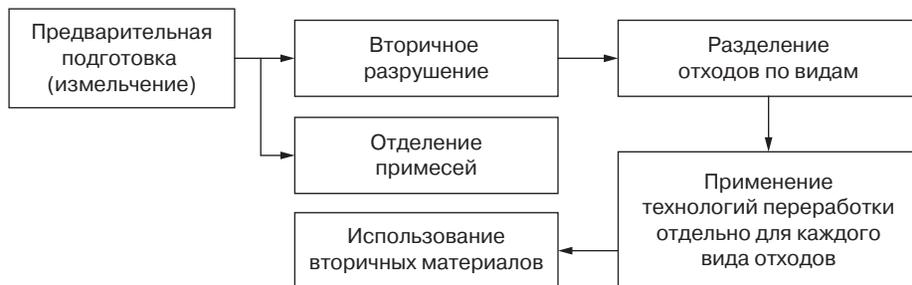
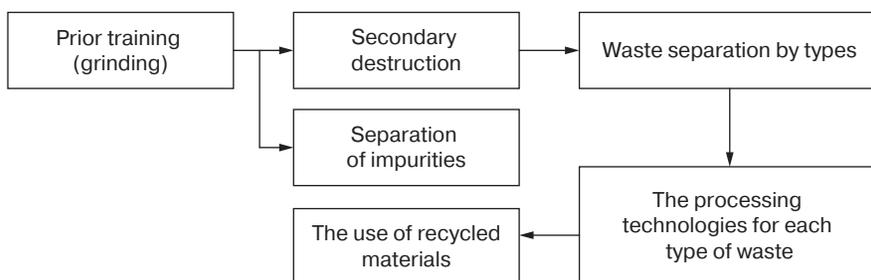
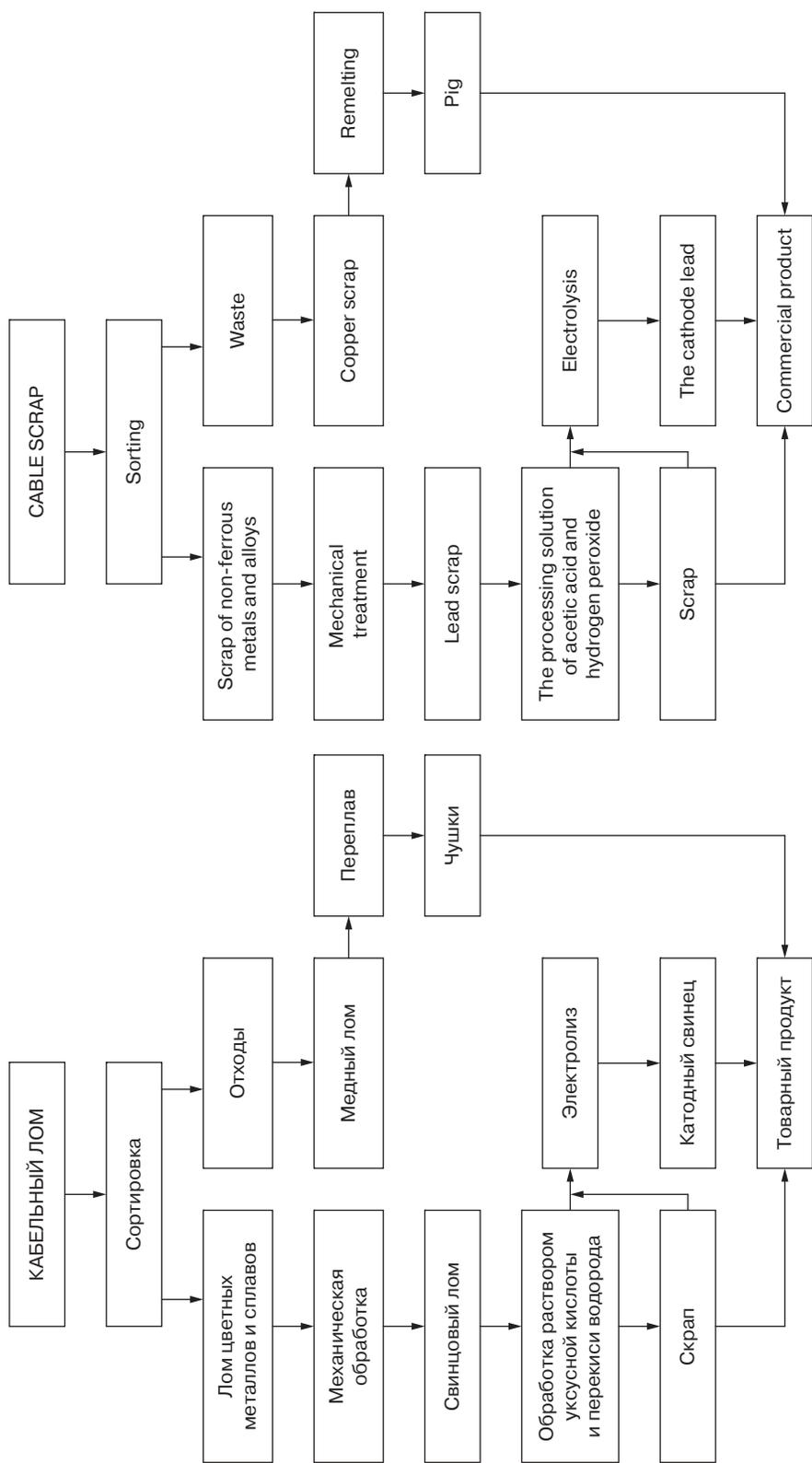


Рис. 2. Технологическая схема переработки строительных отходов



[Fig. 2. Technological scheme of processing of construction waste]



[Fig. 3. Hydrometallurgical scheme of processing of cable scrap]

Рис. 3. Гидрометаллургическая схема переработки кабельного лома

При этом технологическая схема переработки предусматривает процессы предварительной подготовки, удаления примесей, дробления, фракционирования, и др. на месте (рис. 2).

На рисунке 3 представлена разработанная авторами инновационная комплексная гидрометаллургическая схема переработки кабельного лома. Согласно предложенной схеме, сначала кабельный лом подвергают сортировке и механической обработке. Полученный в результате обработки лом отправляют либо на гидрометаллургическую переработку, либо на переплав в случае отсутствия примесей, в частности примеси свинца. Направленный на гидрометаллургическую переработку лом загружают в перфорированные титановые корзины, которые затем опускают в ванну с раствором уксусной кислоты и перекиси водорода с температурой порядка 60 °С. Находясь в ванне, лом вступает в химическое взаимодействие с данным раствором. В результате свинец, покрывающий поверхность кабельного лома, полностью переходит в раствор.

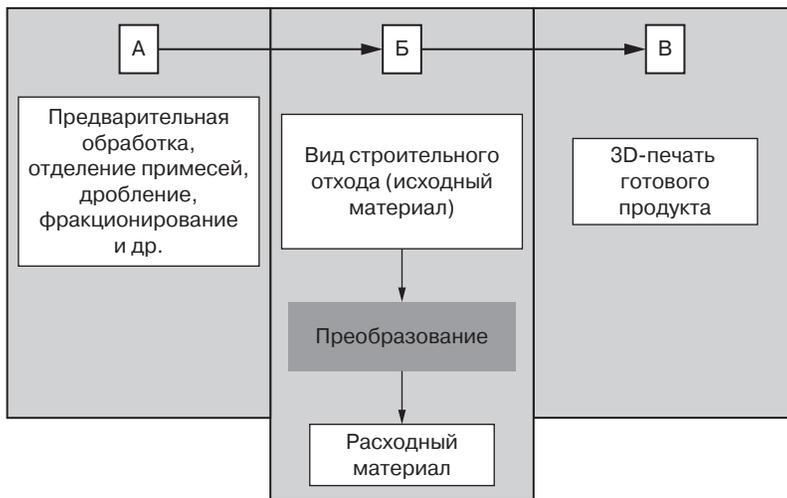
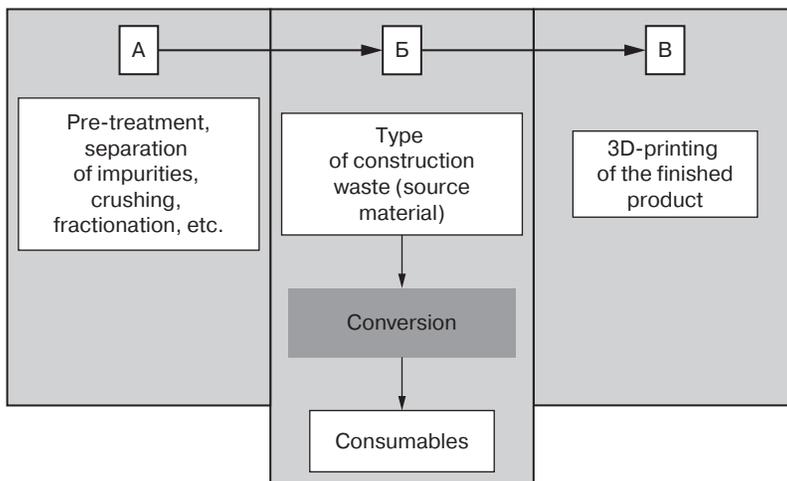


Рис. 4. Схема вторичного использования строительных отходов с применением 3D-печати



[Fig. 4. Scheme secondary use of construction waste with the use of 3D printing]

По завершении процесса гидromеталлургической обработки освобожденный от свинца медный лом извлекают из корзины, промывают, сушат. Прошедший сушку лом направляют в качестве шихты на переплав с получением чушковой меди. Его также используют в качестве растворимых анодов при электрохимическом способе получения катодной меди. Раствор с накопившимся свинцом обрабатывают электролизом в ванне с нерастворимым анодом. Свинец из раствора осаждают на катоде в виде металлического катодного осадка. Полученные в результате переработки кабельного лома материалы (катодные медь и свинец, а также чушковая медь) представляют собой готовые товарные продукты.

Другим перспективным направлением переработки строительных отходов служит использование их в качестве расходного материала при строительстве зданий, сооружений или конструкций с применением 3D-печати. Этот метод завоевывает все большую популярность в строительстве и в недалеком будущем технология трехмерной печати станет неотъемлемой частью строительного дела. Обычно при использовании 3D-печати в строительстве в качестве расходного материала применяются специальные виды бетона. Применение бетонного лома позволит существенно сократить расходы и время на создание материала для нового строительства.

Авторами предлагается следующий принцип объединения технологий 3D-печати и переработки и вторичного использования строительных отходов (рис. 4).

Выводы. Предложены новые технологии переработки строительных отходов, которые позволят извлечь экономическую выгоду из рационального использования строительных отходов и повысить экологическую безопасность технологических схем переработки вторичного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ГОСТ 24641—81. Оболочки кабельные свинцовые и алюминиевые (дата актуализации: 01.12.2013 г.).
- [2] *Любарская М.А.* Организация обращения со строительными отходами в городах: учеб. пособие. СПб.: СПбГИЭУ, 2011. 168 с.
- [3] *Олейник С.П.* Единая система переработки строительных материалов. М.: СвР-АРГУС, 2006. 336 с.
- [4] Большой энциклопедический словарь. URL: <http://enc-dic.com/>
- [5] Материалы сайта Лондонской биржи металлов LME. URL: <http://www.lme.com/>
- [6] *Морачевский А.Г.* Физико-химия рециклинга свинца. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 270 с. (Химия в политехническом университете)
- [7] *Бредихин В.Н., Маняк Н.А., Кафтаненко А.Я.* Свинец вторичный: монография. Донецк: ДонТПУ. 2005. 248 с.

© Задиранов А.Н., Малькова М.Ю., Нурмагомедов Т.Н., Дхар П., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 10 марта 2017

Дата принятия к печати: 20 марта 2017

Для цитирования:

Задиранов А.Н., Малькова М.Ю., Нурмагомедов Т.Н., Дхар П. Перспективы применения современных технологий при переработке строительных отходов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. № 2. С. 236–244.

Сведения об авторах:

Сведения не предоставлены.

PROSPECTS OF MODERN TECHNOLOGIES APPLICATION IN THE CONSTRUCTION WASTE PROCESSING

A.N. Zadiranov¹, M.Y. Malkova¹, T.N. Nurmagomedov², P. Dkhar¹

¹ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

² Federal State Educational Institute of Higher Professional Education Civil Defence Academy
(CDA) EMERCOM of Russia
*Sokolovskaya str., 1, district Novogorsk, Khimki, Moscow region,
Russia, 141435*

The article presents the innovation of technology of recycling concrete, reinforced concrete and non-ferrous metal scrap, which are by-products of the construction industry.

One of the areas of construction waste recycling may be the recycling of electrical cables for the purpose of extracting lead, copper and aluminum. Non-ferrous metals containing electric cables, wires, contacts, etc., are a small volume, but they weigh quite a significant portion of construction waste and can serve as an effective raw material for the production of secondary metals.

In the article the authors developed an integrated hydrometallurgical scheme of processing cable scrap, differing from the standard pyrometallurgical methods of high degree of extraction of precious metals in marketable products; possibly containing a purity of 99.99% lead; minimum quality required of copper or aluminum contained in the cable scrap.

Another promising direction of recycling of construction waste is proposed the technology of using them as consumable material in the construction of buildings, facilities or structures using 3D printing.

Development and implementation of the proposed technologies for processing of construction waste will help solve several important tasks:

- reduction of economic costs for disposal of construction waste;
- development of new materials with specific characteristics;
- reducing the time of processing construction waste;
- reducing the harmful effects of construction waste on the environment.

Key words: construction waste, cable scrap, lead, copper, scrap, acetic acid, hydrogen peroxide, 3D printing

REFERENCES

- [1] GOST 24641—81. Obolochki kabel'nye svintsovye i alyuminievye (data aktualizatsii 1.12.2013 g.).
- [2] Lyubarskaya M.A. Organizatsiya obrashcheniya so stroitel'nymi otkhodami v gorodakh: ucheb. posobie. SPb.: SPbGIEU, 2011. 168 s.

- [3] Oleinik S.P. *Edinaya sistema pererabotki stroitel'nykh materialov.* M.: SvR-ARGUS, 2006. 336 s.
- [4] Bol'shoi entsiklopedicheskii slovar'. URL: <http://enc-dic.com/>
- [5] Materialy saitа Londonskoi birzhi metallov LME. URL: <http://www.lme.com/>
- [6] Morachevskii A.G. *Fiziko-khimiya retsiklinga svintsa.* SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2009. 270 s. (Khimiya v politekhnicheskoi universitete)
- [7] Bredikhin V.N., Manyak N.A., Kaftanenko A.Ya. *Svinets vtorichnyi: monografiya.* Donetsk: DonTPU, 2005. 248 s.

Article history:

Received: 10 March 2017

Accepted: 20 March 2017

For citation:

Zadiranov A.N., Malkova M.Y., Nurmagomedov T.N., Dkhar P. (2017) Prospects of modern technologies application in the construction waste processing. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 236—244.

Bio Note:

Info was not provided.



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-245-253

УДК 69.07

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО И РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА НА ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

А.П. Свинцов, Т.С.Ф. Гамал, Е.Е. Шумилин

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Одной из особенностей функционирования многих промышленных зданий является производство или использование в технологических процессах масла или нефтепродуктов. Растительное или минеральное масло и нефтепродукты, попадая на бетонные и железобетонные несущие конструкции, постепенно пропитывают их и оказывают негативное влияние на физико-механические характеристики материала. Негативное воздействие растительного, минерального масла и нефтепродуктов на бетон и железобетон приводит к снижению надежности несущих конструкций промышленных зданий соответствующего назначения.

При экспериментальном исследовании установлены причинно-следственные связи между деформативными свойствами бетона и вязкостью минерального и растительного масла. На основе результатов экспериментального исследования может быть разработана методика определения единичных показателей надежности пропитанных минеральным и растительным маслом несущих бетонных и железобетонных конструкций промышленных зданий.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке технической безопасности промышленных зданий, в которых производят или используют растительное или минеральное масло, а также нефтепродукты.

Ключевые слова: бетон, масло, нефтепродукты, деформации, вязкость, безопасность

Введение

Изучению изменения деформаций бетона и железобетона под влиянием различных факторов посвящены ряд исследований, результаты которых представлены в работах российских и зарубежных авторов. В публикациях представлены выявленные особенности усадочных деформаций бетона. Однако закономерностей формирования деформаций бетона, пропитанного маслянистыми жидкостями, выполненными ранее исследованиями не выявлено.

В результате исследования влияния растительного и минерального масла, а также нефтепродуктов на физико-механические свойства бетона установлены закономерности их изменения.

Влияние маслянистых жидкостей на свойства бетона в свете современных исследований

Бетонные и железобетонные несущие конструкции промышленных зданий характеризуются большой надежностью, которую невозможно оценить на осно-

ве анализа статистических данных об отказах, как в электронике или машиностроении. Негативное воздействие масла на бетон и железобетон приводит к снижению надежности несущих промышленных зданий соответствующего назначения.

Исследованиями Даркенес А., Маиа Л., Салау М.А. и др. [8; 12; 14] установлены закономерности формирования усадочных деформаций бетона, а также деформаций ползучести. Исследованы деформации бетона в раннем возрасте и при длительных нагрузках на бетон высокой прочности и с дополнительными минеральными добавками. Исследованиями влияния на бетон таких масел и нефтепродуктов, как минеральное масло И-30, топочный мазут, дизельное топливо, осветительный керосин, бензин А-80 [1] выявлены особенности изменения его деформативных свойств, заключающихся в том, что при осевом сжатии продольные деформации уменьшаются, а поперечные увеличиваются. Однако в представленных работах влияние растительного масла на свойства бетона не отражены.

Пермяковой В.В. и др. выявлены особенности влияния отработанного машинного масла на структурные изменения бетонных и железобетонных конструкций [2], а также отмечено существенное отличие характеристик бетона, пропитанного свежим и отработанным машинным маслом. Вязкость отработанных минеральных масел отличается от вязкости свежих. В связи с этим изменение физико-механических характеристик бетона целесообразно рассматривать с учетом этой особенности [7].

Негативное влияние нефтепродуктов на бетон проявляется в том, что прочность на осевое сжатие снижается на 17% для обычного бетона, а для высокопрочного — на 11,8% [9]. Исследованиями [16; 17] также выявлено негативное воздействие минерального масла и нефтепродуктов на цементный камень. Механическое поведение бетона находится под влиянием минерального масла, находящегося в порах цементного камня. Ключевую роль в формировании сопротивления сжатию пропитанного минеральным маслом и нефтепродуктами играют пористость и проницаемость [11]. Минеральное масло, нефтепродукты и вода оказывают не одинаковое влияние на физико-механические характеристики пропитываемого бетона. Исследованием Матти М.А. [13] установлено увеличение модуля упругости бетона, пропитанного сырой нефтью, на 8—10% по сравнению с контрольными образцами, а пропитанного водой — на 10—15%. Это связано со смазывающей способностью маслянистых жидкостей. Нефтепродукты оказывают негативное влияние на конструкции бетонных и железобетонных резервуаров нефтехранилищ [10; 15]. Исследованиями влияния масла и нефтепродуктов на деформативные свойства бетона [3] установлены закономерности влияния вязкости нефтепродуктов на деформативность пропитанного ими бетона. Негативное воздействие масла и нефтепродуктов на деформативные и прочностные свойства бетона оказывают влияние на надежность несущих конструкций промышленных зданий [4]. В результате выполненного исследования предложены концептуальные основы количественной оценки технического состояния несущих бетонных и железобетонных конструкций, пропитанных нефтепродуктами.

Анализ публикаций научно-технической информации показывает, что в настоящее время влияние растительного масла на бетон исследовано не в полной

мере. Это сдерживает возможности решения задач оценки надежности несущих бетонных и железобетонных конструкций промышленных зданий, в которых производят или используют растительное масло.

Материалы

К исследованию приняты:

- а) контрольные образцы — 3 ед.;
- б) образцы, пропитанные нефтепродуктами: минеральное масло И-30 с условной вязкостью 15°E — 5 ед.;
- в) образцы, пропитанные: оливковым маслом с условной вязкостью $5,92^{\circ} \text{E}$ — 5 ед.; кукурузным маслом с условной вязкостью $4,1^{\circ} \text{E}$ — 5 ед.

Условная вязкость нефтепродуктов принята по справочным данным [6]. Условная вязкость растительных масел определена по таблице перевода секунд Сейболта в градусы Энглера [5]. Это позволило использовать единый методический подход к определению влияния маслянистых жидкостей на физико-механические свойства бетона в несущих конструкциях промышленных зданий.

Оборудование

Приготовление цементно-песчаного раствора выполнено в бетоносмесителе БЛ-10.

Для уплотнения образцов использован вибростол лабораторный ВМ-6.4.

Твердение и набор прочности образцов осуществлены в камере нормального твердения с поддержанием относительной влажности воздуха не ниже 80%.

Исследование образцов на осевое сжатие выполнено на испытательном прессе 50 кН.

Изготовление и хранение образцов

В соответствии с планом эксперимента изготовлены образцы из цементно-песчаного раствора в виде кубиков размером $7 \times 7 \times 21$ см. Кубики выдержаны в течение 28 суток в камере нормального твердения. По истечении срока нормального твердения контрольные образцы направлены на испытание. Для насыщения образцы помещены в емкости, которые заполнены растительным и минеральным маслом, соответственно. В указанных условиях образцы выдержаны в течение 7 месяцев при комнатной температуре от 16 до 24°C . По мере поглощения масло доливали в емкости. На рисунке 1 представлен момент подготовки образцов к насыщению растительным маслом.



Рис. 1. Подготовка образцов к насыщению растительным маслом

[Fig. 1. Preparation of samples saturated with vegetable oil]

Методика экспериментального исследования

Исследование выполнено на основе анализа, обобщения и оценок экспериментальных данных о влиянии растительного, минерального масла и нефтепродуктов на физико-механические свойства бетона.

В рамках экспериментального исследования определены продольные $\varepsilon_{\text{прод}}$ и $\varepsilon_{\text{поп}}$ деформации контрольных и пропитанных маслянистыми жидкостями образцов. Математическая обработка экспериментальных данных выполнена по известным методикам математической статистики. Это позволило получить статистически значимые результаты экспериментов с надежностью не ниже $\alpha = 0,90$. На основе анализа средних значений вычислены коэффициенты поперечной деформации $\nu = \varepsilon_{\text{поп}} / \varepsilon_{\text{прод}}$ и дифференциальные коэффициенты поперечных деформаций $\Delta\nu$ при уровнях напряжения $\sigma / R_{\text{пр}} = 0,07–0,94$.

Использование представленных материалов для экспериментального исследования, а также методов математической обработки и анализа полученных данных позволило уточнить причинно-следственные связи в аспекте влияния маслянистых жидкостей на физико-механические свойства пропитанного ими бетона.

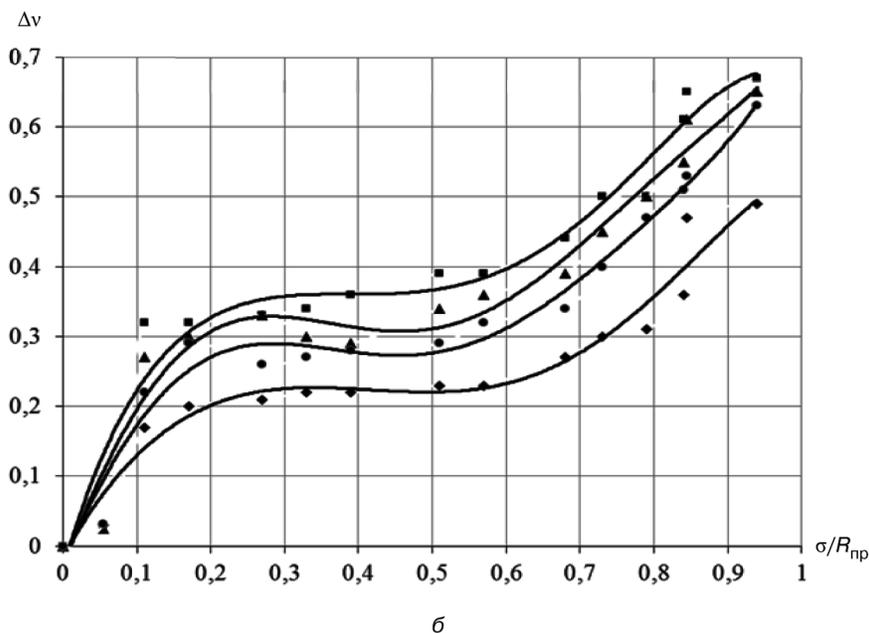
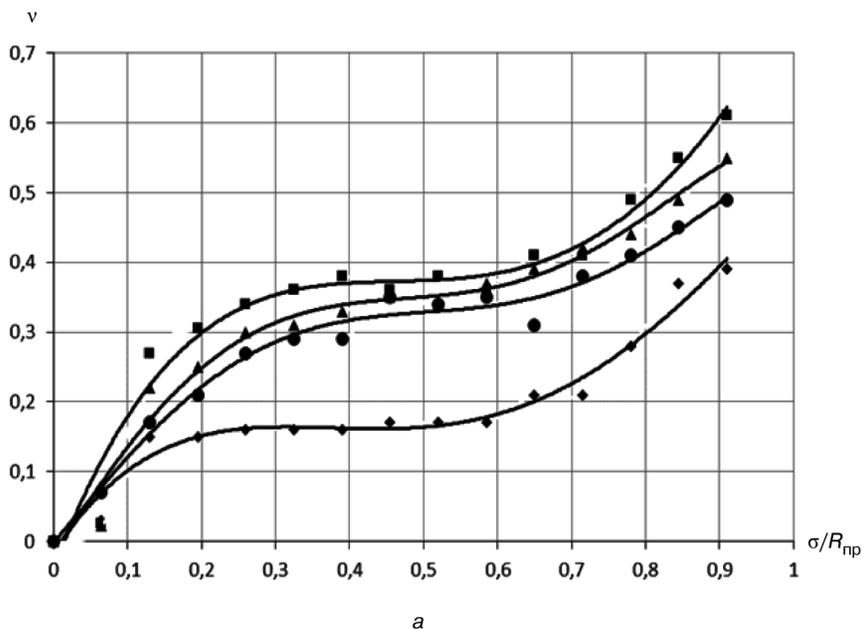
Исследование влияния растительного и минерального масла на физико-механические свойства пропитанного ими бетона

Маслянистые жидкости, производимые или используемые в промышленных зданиях, попадают на несущие бетонные и железобетонные конструкции и постепенно их пропитывают. Это приводит к существенному изменению физико-механических характеристик материала и к возможному увеличению вероятности проявления деструктивных процессов.

В рамках экспериментального исследования выявлены причинно-следственные связи изменения деформативных характеристик пропитанного минеральным и растительным маслом бетона. Установлено, что маслянистые жидкости с различной вязкостью не одинаково влияют на изменение деформативных свойств бетона. Индустриальные и растительные масла являются несжимаемыми жидкостями, заполняющими поры пропитываемого бетона. При осевой нагрузке масло, содержащееся в порах, служит дополнительным сопротивлением к сжатию. Этим объясняется соотношение продольных деформаций контрольных и пропитанных маслом образцов. Поперечные деформации образуются под действием распора масла содержащегося в порах бетонных образцов. В результате такого воздействия цементный камень распирается и разрушается в поперечном направлении, что приводит к образованию соответствующих деформаций.

На рисунке 2 представлены изменения деформаций в относительных единицах средних значений экспериментальных данных.

Анализ кривых показывает, что изменение коэффициентов поперечной деформации (ν) и дифференциальных коэффициентов поперечной деформации ($\Delta\nu$) образцов, пропитанных индустриальным маслом И-30, оливковым и кукурузным маслом, а также контрольных образцов сопоставимы по закономерности изменения.



- Условные обозначения:
- ◆ — контрольные образцы;
 - — пропитанные индустриальным маслом И-30;
 - ▲ — пропитанные оливковым маслом;
 - — пропитанные кукурузным маслом

Рис. 2. Зависимость коэффициентов поперечной деформации от уровня напряжения осевого сжатия: а — коэффициент поперечной деформации; б — дифференциальный коэффициент поперечной деформации

[Fig. 2. The dependence of the coefficients of transverse deformation of the stress level axial compression]

Коэффициент поперечной деформации и дифференциальный коэффициент поперечной деформации образцов, пропитанных маслом, больше чем у контрольных образцов в среднем на 158% и на 137%, соответственно. Совокупность признаков позволяет считать, что пропитывающее бетонные образцы масло оказывает влияние на его деформативные свойства. При этом значения коэффициентов поперечной деформации и дифференциальных коэффициентов поперечной деформации пропитанных маслом образцов отличаются между собой и не одинаковы для каждого вида масла. Отличие абсолютных значений составляет от 7% до 26%. Это следствие влияния масел с различной вязкостью. Таким образом, важным фактором, влияющим на физико-механические свойства бетона, служит вязкость пропитывающего его масла.

Анализ результатов экспериментального исследования показывает, что маслянистые жидкости, пропитывающие бетон, оказывают на его физико-механические характеристики негативное воздействие, которое существенно зависит от их вязкости. Изменение первоначальных свойств материала может привести к снижению технической безопасности несущих конструкций, из которых они сделаны. В связи с этим изменения строительных свойств бетонных и железобетонных конструкций необходимо учитывать при проектировании несущих элементов промышленных зданий, где используются или производятся маслянистые жидкости. Это позволит предотвратить преждевременные и непредвиденные разрушения, а также возникновение чрезвычайных ситуаций.

Заключение

Предотвращение аварий и чрезвычайных ситуаций является одной из важнейших научно-технических задач проектирования, строительства и эксплуатации промышленных зданий, где производят или применяют в технологических процессах маслянистые жидкости: растительные масла, минеральные масла, мазут, которые попадают на фундаменты под оборудования, на несущие конструкции и постепенно пропитывают их. Это обуславливает увеличение вероятности появления деструктивных процессов в несущих бетонных и железобетонных конструкциях промышленных зданий и риск их разрушения различной степени тяжести.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности изменения физико-механических характеристик бетона и железобетона в зависимости от вязкости пропитывающих маслянистых жидкостей. Установлено, что влияние на деформативные свойства бетона зависит от вязкости пропитывающих маслянистых жидкостей.

Полученные результаты исследования могут быть использованы в практических целях для предотвращения чрезвычайных ситуаций на промышленных зданиях, где производят растительное или минеральное масло, а также применяют нефтепродукты в технологических процессах.

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по Программе повышения конкурентоспособности РУДН «5-100» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2016—2020 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Воробьев А.А., Казаков А.С.* Стойкость строительных конструкций при эксплуатации в промышленных зданиях при воздействии на них нефтепродуктов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2010. № 2. С. 32—35.
- [2] *Пермякова В.В., Лебедева Н.А., Пожиткова О.А.* Исследование состояния бетонных и железобетонных конструкций, подверженных воздействию отработанного масла // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2000. Т. 237. С. 18—24.
- [3] *Свинцов А.П., Николенко Ю.В., Харун М., Казаков А.С.* Влияние вязкости нефтепродуктов на деформативные свойства бетона // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 7. С. 16—22.
- [4] *Свинцов А.П., Николенко Ю.В., Харун М.* Влияние нефтепродуктов на надежность бетонных и железобетонных несущих конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 10. С. 68—74.
- [5] *Техническая информация — таблицы Tehtab.ru.* Таблица соответствия единиц кинематической вязкости. URL: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/ViscosityReynolds/ConversionKinematicViscosity/> (дата обращения: 10.01.2017).
- [6] *Топлива. Смазочные материалы.* Технические жидкости. Справочник / В.М. Школьников. М.: Техинформ, 1999. 596 с.
- [7] *Юсупова Ю.Ф.* Влияние минеральных масел на эксплуатационные качества железобетонных конструкций // *Известия КазГАСУ*. 2008. № 1(9). С. 137—140.
- [8] *Darquennes A., Khokhar M.I.A., Rozière E. et al.* Early age deformations of concrete with high content of mineral additions // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Is. 4. Pp. 1836—1847.
- [9] *Diab H.* Compressive strength performance of low- and high-strength concrete soaked in mineral oil // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 33. Pp. 25—31.
- [10] *Emery G.* Tank-bottoms reclamation unit upgraded to meet stricter rules // *Oil and Gas J.* 1993. Vol. 91. No. 15. Pp. 40—46.
- [11] *Kameche Z.A., Ghomari F., Choinska M., Khelidj A.* Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 65. Pp. 551—565.
- [12] *Maia L., Figueiras J.* Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 34. Pp. 602—610.
- [13] *Matti M.A.* Effect of oil soaking on the dynamic modulus of concrete // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1983. Vol. 5. Is. 4. Pp. 277—282.
- [14] *Salau M.A.* Long-term deformations of laterized concrete short columns // *Building and Environment*. 2003. Vol. 38. Is. 3. Pp. 469—477.
- [15] *Wright R.N., Smith G.* Oil storage tank collapses // *Oil and Gas J.* 1988. No. 46. Pp. 49—54.
- [16] *Yuridas I., Xie S.Y., Burlion N. et al.* Influence of chemical degradation on mechanical behavior of a petroleum cement paste // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Is. 4. Pp. 412—421.
- [17] *Zhang J., Weissinger E.A., Peethamparan S., Scherer G.W.* Early hydration and setting of oil well cement // *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40. Is. 7. Pp. 1023—1033.

© Свинцов А.П., Гамал Т.С.Ф., Шумилин Е.Е., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 10 марта 2017

Дата принятия к печати: 20 марта 2017

Для цитирования:

Свинцов А.П., Гамал Т.С.Ф., Шумилин Е.Е. Влияние минерального и растительного масла на деформативные свойства бетона // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 245—253.

Сведения об авторах:

Сведения не предоставлены.

EFFECT OF MINERAL AND VEGETABLE OIL ON DEFORMATION PROPERTIES OF CONCRETE

A.P. Svintsov, T.S.F. Gamal, E.E. Shumilin

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The production or use of vegetable and mineral oils in industrial processes is one of the characteristics of industrial buildings. Negative impact of vegetable, mineral oil and petroleum products on concrete and reinforced concrete leads to decrease of reliability of bearing constructions of industrial buildings for appropriate purposes.

The results of experimental study of influence of mineral and vegetable oil on the concrete presented. The relationship between the properties of deformation of concrete and viscosity of mineral and vegetable oils installed.

The results of the study can be used in the safety assessment of industrial buildings.

Key words: concrete, oil, petroleum products, deformations, viscosity, safety

REFERENCES

- [1] Vorob'ev A.A., Kazakov A.S. Stojkost' stroitel'nyh konstrukcij pri jekspluatacii v promyshlennyh zdaniyah pri vozdeystvii na nih nefteproduktov // *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series «Engineering researches»*. 2010. № 2. S. 32—35. (In Russ).
- [2] Permyakova V.V., Lebedeva N.A., Pozhitkova O.A. Issledovanie sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy, podverzhennykh vozdeystviyu otrabotannogo masla // *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*. 2000. T. 237. S. 18—24. (In Russ).
- [3] Svintsov A.P., Nikolenko Y.V., Kharun M., Kazakov A.S. Vlijanie vjazkosti nefteproduktov na deformativnye svojstva betona // *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2014. № 7. S. 16—22. (In Russ).
- [4] Svintsov A.P., Nikolenko Y.V., Kharun M. Vlijanie nefteproduktov na nadezhnost' betonnyh i zhelezobetonnyh nesushhih konstrukcij // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015. № 10. S. 68—74. (In Russ).
- [5] Tehnicheskaja informacija — tablicy Tehtab.ru. Tablica sootvetstvija edinic kinematičeskoj vjazkosti. URL: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/ViscosityReynolds/ConversionKinematicViscosity/> (10.01.2017). (In Russ).
- [6] Toplivno-smazochnye materialy, tehničeskie zhidkosti, assortiment i primenenie. Spravochnik. Moscow: Tehinform, 1999. 596 s. (In Russ).
- [7] Jusupova Ju.F. Vlijanie mineral'nyh masel na jekspluatacionnye kachestva zhelezobetonnyh konstrukcij // *Izvestija KazGASU*. 2008. № 1(9). S. 137—140. (In Russ).
- [8] Darquennes A., Khokhar M.I.A., Rozière E., Loukili A., Grondin F., Staquet S. Early age deformations of concrete with high content of mineral additions // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Is. 4. Pp. 1836—1847. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.077>
- [9] Diab H. Compressive strength performance of low- and high-strength concrete soaked in mineral oil // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 33. Pp. 25—31. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.015>

- [10] Emery G. Tank-bottoms reclamation unit upgraded to meet stricter rules // *Oil and Gas Journal*. 1993. Vol. 91. No. 15. Pp. 40—46.
- [11] Kameche Z.A., Ghomari F., Choinska M., Khelidj A. Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 65 (29). Pp. 551—565. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.137>
- [12] Maia L., Figueiras J. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 34. Pp. 602—610. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.083>
- [13] Matti M.A. Effect of oil soaking on the dynamic modulus of concrete // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1983. Vol. 5 (4). Pp. 277—282.
- [14] Salau M.A. Long-term deformations of lateral concrete short columns // *Building and Environment*. 2003. Vol. 38 (3). Pp. 469—477. [http://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00014-8](http://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00014-8)
- [15] Wright R.N., Smith G. Oil storage tank collapses // *Oil and Gas Journal*. 1988. No. 46. Pp. 49—54.
- [16] Yurtdas I., Xie S.Y., Burlion N., Shao J.F., Saint-Marc J., Garnier A. Influence of chemical degradation on mechanical behavior of a petroleum cement paste // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Is. 4. Pp. 412—421. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.008>
- [17] Zhang J., Weissinger E.A., Peethamparan S., Scherer G.W. Early hydration and setting of oil well cement // *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40. Is. 7. Pp. 1023—1033. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.014>

Article history:

Received: 10 March 2017

Accepted: 20 March 2017

For citation:

Svintsov A.P., Gamal T.S.F., Shumilin E.E. (2017) Effect of mineral and vegetable oil on deformation properties of concrete. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 245—253.

Bio Note:

Info was not provided.



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-254-265

УДК 004.023, 517.977

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.И. Дивеев^{1,2}, С.В. Константинов²

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»

Российской академии наук

ул. Вавилова, 44, Москва, Россия, 119333

² Российский университет дружбы народов,

ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В работе приведено описание некоторых популярных эволюционных алгоритмов: генетического алгоритма, алгоритма дифференциальной эволюции, метода роя частиц и алгоритма летучих мышей. С помощью эволюционных алгоритмов решается задача оптимального управления мобильным роботом. Для сравнения эта же задача решается алгоритмами наискорейшего градиентного спуска и случайного поиска. Вычислительные эксперименты показали, что эволюционные алгоритмы дают результаты решения задачи оптимального управления лучше, чем градиентный алгоритм.

Ключевые слова: задача оптимального управления, эволюционные алгоритмы, генетический алгоритм, алгоритм дифференциальной эволюции, метод роя частиц, алгоритм летучих мышей

Численные методы решения задачи оптимального управления в основном заключаются в редукации задачи к задаче нелинейного программирования и использовании различных градиентных методов для поиска оптимального решения [1]. Следует отметить, что градиентные методы находят точки с нулевым значением градиента. Этому требованию удовлетворяют не только точки локального минимума, но и седловые точки, которых у произвольной функции большой размерности может быть больше, чем точек локального минимума. Например, если рассматривать произвольную функцию в пространстве размерности p , то для точки с нулевым значением градиента может быть 2^p вариантов знаков для вторых производных, среди которых только один вариант, когда все вторые производные больше нуля, т.е. данная точка есть локальный минимум, один вариант, когда все производные меньше нуля, т.е. точка — локальный максимум и $2^p - 2$ вариантов, когда данная точка является седлом. Градиентные методы как правило эффективно работают для выпуклых функций, у которых отсутствуют седловые точки и локальный минимум совпадает с глобальным. В задаче оптимального управления, приведенной к задаче нелинейного программирования, достаточно сложно определить свойства функционала и гарантировать его выпуклость даже в ограниченной области пространства поиска.

Современные поисковые эволюционные алгоритмы [2] не требуют от целевой функции специальных свойств, и находят точки локального минимума, причем в процессе поиска могут находить несколько точек локального минимума и в итоге определяют среди них наилучшую. До недавнего времени единственным препятствием применения эволюционных алгоритмов для решения многомерных задач оптимизации была слабость вычислительной техники. Современные компьютеры позволяют эффективно использовать эволюционные алгоритмы для решения задачи оптимального управления.

Цель данной работы заключается в подтверждении высокой эффективности эволюционных алгоритмов в задачах поиска оптимального управления. В работе рассматривается решение задачи оптимального управления популярными эволюционными алгоритмами: генетическим алгоритмом, алгоритмом дифференциальной эволюции, методом роя частиц и алгоритмом летучих мышей. Для сравнения решаем также эту же задачу алгоритмами случайного поиска и градиентного наискорейшего спуска. Результаты сравниваем по средним значениям функционалов.

Генетический алгоритм

Он был разработан в 80-х годах прошлого столетия [3].

В генетическом алгоритме каждую компоненту вектора параметров $q = [q_1 \dots q_8]^T$ кодируем двоичным кодом Грея. Для кодирования используем c бит под целую часть числа и d бит под дробную часть числа. Всего код одного вектора из восьми параметров содержит $8(c + d)$ бит. В результате код каждой компоненты вектора параметров определяет положительное число g_i , $i = 1, \dots, 8$, в диапазоне от 0 до 2^c .

В алгоритме первоначально генерируем случайно H двоичных кодов из $8(c + d)$ бит. Предполагаем, что сгенерированные коды представляют собой коды Грея

$$S = \{S_1, \dots, S_H\},$$

где $S_i = (s_1^i, \dots, s_{8(c+d)}^i)$, $s_j^i \in \{0, 1\}$, $i = 1, \dots, H$, $j = 1, \dots, 8(c + d)$.

Далее вычисляем значения функционалов для каждого кода возможного решения. Для этой цели первоначально переводим код Грея каждого возможного решения $S_i = (s_1^i, \dots, s_{8(c+d)}^i)$ в двоичный код $B_i = (b_1^i, \dots, b_{8(c+d)}^i)$ по формуле

$$b_j^i = \begin{cases} s_j^i, & \text{если } (j-1) \bmod (c+d) = 0 \\ s_j^i \oplus s_{j-1}^i & \text{— иначе} \end{cases}, j = 1, \dots, 8(c + d).$$

Переводим двоичный код в десятичный для каждых $(c + d)$ бит

$$g_k^i = \sum_{l=1}^{c+d} b_{(c+d)(k-1)+l}^i 2^{c-l}, k = 1, \dots, 8.$$

Вычисляем значения вектора параметров $q^i = [q_1^i \dots q_8^i]^T$ возможного решения i по формуле

$$q_k^i = \frac{g_k^i}{2^c} (q_i^+ - q_i^-) + q_i^-, k = 1, \dots, 8.$$

Формируем множество оценок целевых функций

$$F = \{f_1, \dots, f_H\}.$$

В алгоритме выполняем одноточечное скрещивание. Отбираем случайно два кода возможных решений

$$S_\alpha = (s_1^\alpha, \dots, s_{8(c+d)}^\alpha), S_\beta = (s_1^\beta, \dots, s_{8(c+d)}^\beta), \alpha, \beta \in \{1, \dots, H\}.$$

Вычисляем вероятность скрещивания по формуле

$$p_c = \max \left\{ \frac{f^-}{f_\alpha}, \frac{f^-}{f_\beta} \right\},$$

где $f^- = \min\{f_1, \dots, f_H\}$.

Находим случайно точку скрещивания $\sigma \in \{1, \dots, 8(c+d)\}$ и выполняем скрещивание. Получаем два новых кода возможных решений:

$$S_{H+1} = (s_1^\alpha, \dots, s_{\sigma-1}^\alpha, s_\sigma^\beta, \dots, s_{8(c+d)}^\beta);$$

$$S_{H+2} = (s_1^\beta, \dots, s_{\sigma-1}^\beta, s_\sigma^\alpha, \dots, s_{8(c+d)}^\alpha).$$

Выполняем операцию мутации с заданной величиной вероятности p_m . Для кода нового возможного решения S_{H+1} находим случайно точку мутации $\mu \in \{1, \dots, 8(c+d)\}$ и меняем случайно компоненту $S_\mu^{H+1} \in \{0, 1\}$. То же повторяем для второго нового возможного решения S_{H+2} .

Оцениваем новые возможные решения по значению минимизируемого функционала, получаем f_{H+1}, f_{H+2} .

Если оценка нового возможного решения лучше наихудшей оценки во множестве возможных решений, то заменяем наихудшее решение на новое возможное решение.

$$S_w \leftarrow S_{H+i}, f_w \leftarrow f_{H+i} \text{ если } f_w > f_{H+i}, \text{ где } f_w = \max\{f_1, \dots, f_H\}, i = 1, 2.$$

После выполнения K операций скрещивания алгоритм останавливаем и находим наилучшее возможное решение во множестве.

Алгоритм дифференциальной эволюции

Алгоритм дифференциальной эволюции впервые был представлен в 1995 году авторами К. Прайсом (K. Price) и Р. Сторном (R. Storn) [4]. В алгоритме исполь-

зуется адаптивная мутация особей, которая зависит от распределенности особей популяции в пространстве поиска. При сильной распределенности особей, алгоритм производит существенные вариации, а при малой распределенности производятся лишь небольшие изменения особей популяции.

Классическая схема алгоритма дифференциальной эволюции выглядит следующим образом: если доступная информация о системе не позволяет выбрать начальное приближенное решение, то начальная популяция s_0 заполняется случайным образом.

Далее на каждой итерации в текущей популяции s_k для каждой особи s создается особь-потомок s' на основе трех родительских особей s_1, s_2, s_3 , выбранных из этой популяции случайным образом ($s_1 \neq s_2 \neq s_3$). Для этого хромосому q' формируют путем линейной комбинации хромосом q_1, q_2, q_3 , которые являются вещественными векторами:

$$q' = q_1 + F(q_2 - q_3),$$

где F — скалярный коэффициент влияния.

После формирования особей s' проверяется их приспособленность и, если она выше чем у родительской особи s , то новая особь заменяет родительскую в популяции:

$$s_i = \begin{cases} s'_i, & \text{если } \varphi(s'_i) \geq \varphi(s_i) \\ s_i, & \text{иначе.} \end{cases}$$

При формировании новой хромосомы q' может возникнуть ситуация, когда один или несколько ее компонентов (генов) окажутся за пределами допустимых значений ($q_i^-; q_i^+$). В этом случае вычисляется новое случайное значение q , которым заменяется компонент в хромосоме.

Также существует модификация алгоритма дифференциальной эволюции, в котором в качестве базовой особи для мутации используется не случайно выбранная из текущей популяции, а наиболее приспособленная особь s_{best} . Тогда формирование новой хромосомы q' производится по правилу:

$$q' = q_1 + \lambda(q_{\text{best}} - q_1) + F(q_2 - q_3),$$

где λ — дополнительный коэффициент для повышения эффективности использования наиболее приспособленной особи.

Метод роя частиц

Метод роя частиц основан на имитации социально-поведенческих моделей организованных групп [5]. Метод строится на тех же принципах, на основе которых птицы в стае и рыбы в косяке ведут себя удивительно синхронно, двигаясь в том или ином направлении как единое целое. Авторами метода являются Дж. Кеннеди (J. Kennedy) и Р. Эберхарт (R. Eberhart), которые предложили идею канонического метода роя частиц в 1995 году. В методе роя частиц распределенные в

пространстве параметров задачи оптимизации частицы играют роль агентов. Частицы перемещаются в пространстве параметров и изменяют направление и скорость своего движения на основе определенных правил. На каждой итерации вычисляется соответствующее положению частицы значение целевой функции. Также частице доступна информация о наилучшей частице из числа соседних с ней частиц и информация о лучшем собственном значении на предыдущих итерациях. На основе этой информации определяется правило изменения положения и скорости частицы в пространстве параметров.

Новое положение частицы s_i в момент времени t определяется вектором ее координат q_i , а ее скорость — вектором v_i :

$$q_{i,t+1} = q_{i,t} + v_{i,t+1};$$

$$v_{i,t+1} = \alpha v_{i,t} + P_n[0; \beta] \times (q_{i,t}^b - q_{i,t}) + P_n[0; \gamma] \times (q_{g,t} - q_{i,t}),$$

где $P_n[a; b]$ — n -мерный вектор псевдослучайных значений, равномерно распределенных на интервале $[a; b]$; $q_{i,t}^b$ — вектор координат частицы с лучшим собственным значением на предыдущих итерациях; $q_{g,t}$ — вектор координат лучшей соседней частицы; α, β, γ — свободные параметры алгоритма со следующими рекомендуемыми значениями: $\alpha = 0,7298$; $\beta = \gamma = 1,4962$.

Алгоритм летучих мышей

Алгоритм разработан в 2010 году [6; 7]. Летучие мыши обладают уникальными средствами эхолокации, которая используется для обеспечения полетов в темноте и обнаружения добычи.

В процессе поиска добычи летучие мыши генерируют сигналы, имеющие частоту ω_i и громкость a_i . Частота сигналов и их громкость может изменяться в заданных пределах — $[\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ и $[0; 1]$ соответственно. Также может изменяться частота повторения сигналов $r_i \in [0; 1]$. На первом шаге метода случайным распределением задаются соответственно начальные значения $q_{i,0}$, скорость $v_{i,0}$, частота сигнала $\omega_{i,0}$, громкость сигнала $a_{i,0}$ и частота повторения сигнала $r_{i,0}$. Определяется вектор координат X^b агента, доставляющего глобально лучшее решение. Выполняется миграционная процедура по следующей схеме:

$$q_{i,t+1} = q_{i,t} + v_{i,t+1};$$

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + \omega_{i,t+1}(q_{i,t} - q^b);$$

$$\omega_{i,t+1} = \omega^{\min} + (\omega^{\max} - \omega^{\min})P_1[-1; 1],$$

где $P_1[-1; 1]$ — случайное число, равномерно распределенное на интервале $[-1; 1]$.

Далее реализуется случайный локальный поиск по следующей схеме:

$$q'_{i,t} = q_{i,t} + \bar{a}P_n[-1; 1],$$

где $P_n[-1; 1]$ — n -мерный вектор псевдослучайных значений, равномерно распределенных на интервале $[-1; 1]$; \bar{a} — текущее среднее значение громкостей всех агентов популяции:

$$\bar{a} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p a_i.$$

Схема локального поиска повторяется либо до получения вектора $q'_{i,t}$, при котором значение фитнес-функции $\phi(q'_{i,t})$ лучше, чем при $q_{i,t}$, либо до достижения терминального числа повторов схемы. На последнем этапе реализуется эволюция параметров a_i и r_i по правилу:

$$a_{i,t+1} = b_a a_{i,t};$$

$$r_{i,t+1} = r_{i,0} [1 - \exp(-b_r t)],$$

где $b_a \in (0; 1)$, $b_r > 0$ — свободные параметры алгоритма, рекомендуемые значения которых равны 0,9.

Алгоритм случайного поиска

Генерируем случайный вектор параметров $\tilde{q} = [\tilde{q}_1 \dots \tilde{q}_8]^T$ по формуле

$$\tilde{q}_k = \xi(q_i^+ - q_i^-) + q_i^-, k = 1, \dots, 8, \quad (1)$$

где ξ — случайная величина, $\xi \in [0; 1]$.

Вычисляем оценку вектора \tilde{f} по значению минимизируемого функционала.

Далее генерируем новый вектор $q = [q_1 \dots q_8]^T$ по формуле (1) и вычисляем его оценку f . Если оценка нового вектора лучше $f < \tilde{f}$, то заменяем вектор и его оценку, $\tilde{q} \leftarrow q, \tilde{f} \leftarrow f$.

Повторяем генерацию вектора и вычисление его оценки R раз. В результате получаем наилучший вектор параметров $\tilde{q} = [\tilde{q}_1 \dots \tilde{q}_8]^T$.

Алгоритм наискорейшего градиентного спуска

В соответствии со стратегией алгоритма наискорейшего градиентного спуска [8] генерируем случайный вектор параметров $\tilde{q} = [\tilde{q}_1 \dots \tilde{q}_8]^T$ по формуле (1).

Вычисляем значение оценки для полученного вектора параметров

$$\tilde{f} = J(\tilde{q}).$$

Вычисляем вектор градиента целевой функции в точке $\tilde{q} = [\tilde{q}_1 \dots \tilde{q}_8]^T$

$$\frac{\partial J(\tilde{q})}{\partial q} = \left[\frac{J(\tilde{q} + \Delta_1) - \tilde{f}}{\delta q} \quad \dots \quad \frac{J(\tilde{q} + \Delta_8) - \tilde{f}}{\delta q} \right]^T,$$

где δq — заданная малая положительная величина,

$$\Delta_i = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \delta q \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T.$$

Вычисляем значение второго вектора параметров $\bar{q} = [\bar{q}_1 \dots \bar{q}_8]^T$ в направлении антиградиента

$$\bar{q} = \tilde{q} - \frac{\partial J(\tilde{q})}{\partial q} (M \delta q), \quad (2)$$

где первоначально $M = M_0$, M_0 — заданное положительное целое число.

Проверяем ограничения для второго вектора параметров $\bar{q} = [\bar{q}_1 \dots \bar{q}_8]^T$.
Если

$$\exists \bar{q}_i \Rightarrow (\bar{q}_i > q_i^+) \vee (\bar{q}_i < q_i^-), 1 \leq i \leq 8, \quad (3)$$

то уменьшаем значение M

$$M \leftarrow M - \delta m, \quad (4)$$

где δm — заданное положительное целое число, $\delta m \ll M_0$.

Если $M > 0$, то пересчитываем значение второго вектора параметров по формуле (2), иначе завершаем вычисления и считаем решением вектор параметров $\tilde{q} = [\tilde{q}_1 \dots \tilde{q}_8]^T$.

Повторяем вычисления по формулам (2), (4), пока выполняются условия (3). В результате получаем второй вектор параметров $\bar{q} = [\bar{q}_1 \dots \bar{q}_8]^T$. Вычисляем значение минимизируемого функционала для второго вектора параметров

$$\bar{f} = J(\bar{q}).$$

Вычисляем значения векторов в точках золотого сечения

$$q^\alpha = (1 - \gamma)\tilde{q} + \gamma\bar{q}, q^\beta = \gamma\tilde{q} + (1 - \gamma)\bar{q},$$

где

$$g = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \approx 0,618034.$$

Векторы параметров $q^\alpha = [q_1^\alpha \dots q_8^\alpha]^T$, $q^\beta = [q_1^\beta \dots q_8^\beta]^T$ в точках золотого сечения удовлетворяют ограничениям (3)

$$q_i^- \leq \min\{\tilde{q}_i, \bar{q}_i\} \leq q_i^\alpha, q_i^\beta \leq \max\{\tilde{q}_i, \bar{q}_i\} \leq q_i^+, i = 1, \dots, 8.$$

Вычисляем значения целевой функции для векторов параметров в точках золотого сечения

$$f^\alpha = J(q^\alpha), f^\beta = J(q^\beta). \quad (5)$$

Если $f^{\alpha} < f^{\beta}$, то

$$\bar{q} = q^{\beta}, \bar{f} = f^{\beta}, q^{\beta} = q^{\alpha}, f^{\beta} = f^{\alpha}, \quad (6)$$

$$q^{\alpha} = (1 - \gamma)\tilde{q} + \gamma\bar{q}, f^{\alpha} = J(q^{\alpha}), \quad (7)$$

иначе

$$\tilde{q} = q^{\alpha}, \tilde{f} = f^{\alpha}, q^{\alpha} = q^{\beta}, f^{\alpha} = f^{\beta}, \quad (8)$$

$$q^{\beta} = \gamma\tilde{q} + (1 - \gamma)\bar{q}, f^{\beta} = J(q^{\beta}). \quad (9)$$

Повторяем вычисления по формулам (5)—(9), пока выполняются условия

$$\|q^{\beta} - q^{\alpha}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (q_i^{\beta} - q_i^{\alpha})^2} > \delta q. \quad (10)$$

При нарушении условия (10) определяем первый вектор параметров. Если $f^{\alpha} < f^{\beta}$, то $\tilde{q} = q^{\alpha}, \tilde{f} = f^{\alpha}$, иначе $\tilde{q} = q^{\beta}, \tilde{f} = f^{\beta}$. Повторяем вычисления по формулам (5)—(10). Всего выполняем все вычисления заданное количество K_1 раз. Результатом вычислений будет последний вектор параметров $\tilde{q} = [\tilde{q}_1 \dots \tilde{q}_8]^T$.

Задача параметрического оптимального управления мобильным роботом

Задана математическая модель мобильного робота:

$$\dot{x}_1 = u_1 \cos(x_3); \quad (11)$$

$$\dot{x}_2 = u_1 \sin(x_3); \quad (12)$$

$$\dot{x}_3 = u_2, \quad (13)$$

где $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ — вектор состояния; $u = [u_1 \ u_2]^T$ — вектор управления.

Заданы ограничения на управление:

$$u_i^- \leq u_i \leq u_i^+, \quad i = 1, 2.$$

Заданы начальные условия:

$$x_i(0) = x_i^0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

Заданы терминальные условия:

$$x_i = x_i^f, \quad i = 1, 2, 3$$

Задан функционал

$$J = t_f + \sqrt{(x_1(t_f) - x_1^f)^2 + (x_2(t_f) - x_2^f)^2 + (x_3(t_f) - x_3^f)^2}, \quad (15)$$

где

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } \sqrt{(x_1(t) - x_1^f)^2 + (x_2(t) - x_2^f)^2 + (x_3(t) - x_3^f)^2} \leq \varepsilon, \\ t^+ & \text{— иначе} \end{cases}$$

t^+ , ε — заданные положительные величины.

Необходимо найти управление в классе кубических полиномов

$$\tilde{u}_1(t) = \begin{cases} u_1^-, & \text{если } q_1 + q_2 t + q_3 t^2 + q_4 t^3 < u_1^- \\ u_1^+, & \text{если } q_1 + q_2 t + q_3 t^2 + q_4 t^3 > u_1^+, \\ q_1 + q_2 t + q_3 t^2 + q_4 t^3 & \text{— иначе} \end{cases} \quad (16)$$

$$\tilde{u}_2(t) = \begin{cases} u_2^-, & \text{если } q_5 + q_6 t + q_7 t^2 + q_8 t^3 < u_2^- \\ u_2^+, & \text{если } q_5 + q_6 t + q_7 t^2 + q_8 t^3 > u_2^+, \\ q_5 + q_6 t + q_7 t^2 + q_8 t^3 & \text{иначе} \end{cases} \quad (17)$$

где значения коэффициентов полиномов ограничены

$$q_i^- \leq q_i \leq q_i^+, \quad i = 1, \dots, 8.$$

Найденные оптимальные коэффициенты кубических полиномов должны обеспечивать минимальное значение заданному функционалу

$$J = t_f + \sqrt{(x_1(t_f) - x_1^f)^2 + (x_2(t_f) - x_2^f)^2 + (x_3(t_f) - x_3^f)^2} \rightarrow \min.$$

Сравнительный эксперимент

Для проведения сравнительного эксперимента для каждого возможного решения формировались полиномы для управления в виде (16), (17), интегрировалась система дифференциальных уравнений (11)—(13) из заданных начальных условий (14) и вычислялась оценка по значению функционала (15).

В вычислительном эксперименте использовались следующие параметры модели (11)—(13): $x_1^0 = 10$, $x_2^0 = 10$, $x_3^0 = 0$, $x_1^f = 0$, $x_2^f = 0$, $x_3^f = 0$, $u_1^- = -10$, $u_2^- = -10$, $u_1^+ = 10$, $u_2^+ = 10$, $t^+ = 4$, $\varepsilon = 0,02$, $q_i^- = -8$, $q_i^+ = 8$, $i = 1, \dots, 8$.

В генетическом алгоритме использовали следующие значения параметров: $H = 512$, $K = 2^{14} = 16384$, $c = 4$, $d = 12$, $p_m = 0,7$.

В алгоритме случайного поиска количество сгенерированных векторов параметров было $R = 40000$.

В алгоритме наискорейшего градиентного спуска использовали следующие параметры: $q = 0,0001$, $M_0 = 4096$, $\delta m = 8$, $K_1 = 128$.

В методе роя частиц размер популяции составлял $H = 16$, число итераций — $W = 2048$.

В методе, инспирированным летучими мышами, размер популяции составлял $H = 32$, число итераций — $W = 1024$.

В алгоритме дифференциальной эволюции размер популяции составлял $H = 64$, число итераций — $W = 1024$, число скрещиваний на каждой итерации — $S = 32$.

Для каждого алгоритма проводилось по 10 испытаний. Вычисления выполняли на компьютере с процессором Intel® Core™, i7-2640M, CPU@2.80 GHz. Результаты вычислений, представляющие собой продолжительность перехода из начального в конечное положение для каждого алгоритма (таблица) показали, что все эволюционные алгоритмы решают рассмотренную задачу оптимального управления приблизительно одинаково и лучше, чем алгоритм случайного поиска. Алгоритм наискорейшего градиентного спуска при решении данной задачи работает неустойчиво и не находит в большинстве случаев приемлемого решения. Среди эволюционных алгоритмов наилучшие результаты показа генетический алгоритм.

Таблица

Результаты вычислительного эксперимента
[The results of computational experiments]

Испытание	GA	DE	PSO	BIA	RS	FGD
1	4,9349	6,5507	4,8288	4,3877	5,9813	9,7561
2	4,1093	4,6874	4,8866	4,7422	6,1006	5,4075
3	4,6475	4,7433	4,4649	5,3366	5,2015	18,2190
4	4,4244	5,8050	4,6277	4,6821	5,7782	11,3907
5	4,2987	5,8152	4,4758	4,4747	4,6759	22,5127
6	4,0434	6,4671	4,7797	4,1769	5,2597	28,3650
7	4,1218	4,6943	4,8279	4,5676	5,0867	15,1068
8	4,6303	4,9991	4,9260	5,4031	5,0530	17,1744
9	4,2148	4,6895	4,7935	4,3658	5,9370	30,7676
10	4,4533	5,0282	4,6172	5,5366	5,1588	13,9237
Сред.	4,3878	5,3480	4,7228	4,7673	5,4233	17,2624

Финансирование:

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-04224-офи_м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Поллак Э. Численные методы оптимизации. М.: Мир, 1974. 376 с.
- [2] Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 448 с.
- [3] Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley. 1989. 412 p.
- [4] Storn R., Price K. Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces / Journal of Global Optimization. 1997. No. 11. P. 341—359.
- [5] Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization / Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV. 1995. P. 1942—1948.
- [6] Yang Xin-She. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, in: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010). Studies in Computational Intelligence. Berlin: Springer, 2010. Vol. 284. P. 65—74.

- [7] Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов // Информационные технологии. 2012. № 7. С. 1–32.
[8] Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 2005. 544 с.

© Дивеев А.И., Константинов С.В., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 28 февраля 2017

Дата принятия к печати: 13 марта 2017

Для цитирования:

Дивеев А.И., Константинов С.В. Эволюционные алгоритмы для решения задачи оптимального управления // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 254–265.

Сведения об авторах:

Дивеев Асхат Ибрагимович, доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, профессор департамента Механики и мехатроники инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: вычислительные методы для решения задач управления. *Контактная информация*: e-mail: aidiveev@mail.ru

Константинов Сергей Валерьевич, старший преподаватель департамента Механики и мехатроники инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: методы оптимизации, эволюционные алгоритмы, генетические алгоритмы, вычислительные методы решения задач оптимального управления. *Контактная информация*: e-mail: konstantinov_sv@rudn.university

EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR THE PROBLEM OF OPTIMAL CONTROL

A.I. Diveev^{1,2}, S.V. Konstantinov²

¹ Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS
Vavilova str., 40, Moscow, Russia, 119333

² Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The paper describes some of the popular evolutionary algorithms: genetic algorithms, differential evolution method, particle swarm optimization and bat-inspired method. With the help of these algorithms the problem of optimal control of a mobile robot is solved. For comparison the same problem is solved with the algorithm of fast gradient descent and random search. The computational experiments showed that evolutionary algorithms provide more accurate results for the optimal control problems than fast gradient descent algorithm.

Key words: optimal control problem, evolutionary algorithms, genetic algorithm, differential evolution method, particle swarm optimization, bat-inspired method

REFERENCES

- [1] Polak E. *Chislennyye metody optimizatsii*. M.: Mir, 1974. (In Russ).
- [2] Karpenko A.P. *Sovremennyye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy*. M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2014. (In Russ).
- [3] Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [4] Storn R., Price K. Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces / *Journal of Global Optimization*. 1997. No. 11. P. 341—359.
- [5] Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization / *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV*. 1995. P. 1942—1948.
- [6] Yang Xin-She. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, in: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010). *Studies in Computational Intelligence*. Berlin: Springer, 2010. Vol. 284. P. 65—74.
- [7] Karpenko A.P. Populyatsionnyye algoritmy global'noi poiskovoi optimizatsii. Obzor novykh i maloizvestnykh algoritmov. *Informatsionnyye tekhnologii*. 2012. No. 7 P. 1—32. (In Russ).
- [8] Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh: ucheb. posobie*. M.: Vysshaya shkola, 2005. (In Russ).

Article history:

Received: 28 February 2017

Accepted: 13 March 2017

For citation:

Diveev A.I., Konstantinov S.V. (2017) Evolutionary algorithms for the problem of optimal control. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 254—265.

Bio Note:

Askhat I. Diveev, Doctor of technical sciences, professor, chief of sector of Cybernetic problems, Federal Research Centre “Computer Science and Control” of Russia Academy of Sciences, professor of department Mechanics and mechatronics, Engineering Academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: Computational methods for problems of control. *Contact information*: e-mail: aidiveev@mail.ru

Sergey V. Konstantinov, senior lecturer of department Mechanics and mechatronics, Engineering Academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: Optimization algorithms, evolutionary algorithms, genetic algorithms, computational methods for problems of optimal control. *Contact information*: e-mail: konstantinov_sv@rudn.university



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-266-274

УДК 620.92

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕЛИОТРОПИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

С.А. Жильцов, А.А. Карпушин

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Все больше и больше отдельных регионов вкладывают средства в возобновляемую энергетику. Объективно существует угроза изменения климата за счет использования горючего топлива. Это означает, что все больше и больше стран будут переходить на экологически безопасную и возобновляемую энергетику — солнечную, ветреную и приливную.

С переходом в третью промышленную революцию, ячейкой производства труда станет домашнее хозяйство. Мы все чаще слышим о появлении распределенных сетей — Smart Grid, в которых каждый потребитель энергии может стать его производителем.

Цель данной работы заключается в разработке конструкции солнечной панели, которую можно использовать в качестве автономного источника питания для уличного освещения и станций зарядки устройств в условиях больших отклонений углов на диаграмме солнечного пути для регионов, удаленных от экватора.

Итак, гелиотропические установки — это эффективный способ управления солнечной панелью за счет корректировка ее положения относительно солнца. Это особенно актуально для регионов, удаленных от экватора. В данной работе кратко представлен финансовый прогноз рынка солнечной энергетики, предложена конструкция солнечной установки гелиотропического типа и приведено ее сравнение с классической стационарной установкой.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, солнечная энергетика, гелиотропические солнечные установки

Все больше и больше отдельных регионов вкладывают средства в возобновляемую энергетику. Так, Саудовская Аравия объявила тендеры на строительство крупных объектов солнечной и ветряной энергетики на общую сумму 50 млрд долл. США.

2015 год стал рекордным по приросту мощностей в фотоэлектрической и ветряной энергетике мира — более 50 и 60 ГВт за год соответственно [1]. За период с 2005 по 2015 годы установленная мощность ветровых электростанций увеличилась в 9 раз, фотоэлектрических — в 64 раза. Прирост инвестиций за последний год составил более 329 млрд долл. США, где более половины (161 млрд) направлен на солнечную энергетику. Для сравнения, в отрасль по добыче углеводородов было инвестировано 130 млрд долл. США.

Министерство возобновляемой энергетики Индии к 2021 году планирует создание 10-ти солнечных плантаций площадью 10 тысяч гектар каждая производительностью 4 кВт·ч/м². Цель проекта — достигнуть выработки 1 ГВт электри-

ческой энергии к 2022 году. На основании этого можно сделать вывод, что Индия таким образом открывает новый инвестиционный коридор для возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что позволит увеличить приток капитала и обеспечит создание сотни тысяч рабочих мест. Прогнозируемая установленная мощность всех мировых солнечных электростанций к 2020 году будет составлять порядка 700 ГВт, из которых на лидера, Китай, придется — 150 ГВт. Такие прогнозы связаны с бурным ростом и интеграцией возобновляемых источников в домашнее хозяйство и предметы быта. Драйвером, для развития портативных ВИЭ, служат инвестиции в Internet of Things, wearable, smart clothes — это портативные панели, интегрированные в общую систему дома, смартфоны и ткань одежды.

Наблюдается закономерность, что каждое удвоение установленной мощности фотовольтаических элементов приводит к снижению их стоимости на 26%. По прогнозам Международного агентства возобновляемой энергетики (IRENA) [2], стоимость модулей может упасть до диапазона 0,3—0,4 долл. США/Вт к 2025 году, а цена на электроэнергию будут составлять 3 цента/кВт·ч.

Для отдельных регионов России (богатых солнечными ресурсами), по прогнозу IRENA, было подсчитано, что капитальные затраты на строительство объектов солнечной генерации составят до 50000 руб./кВт (средний размер удельных капитальных затрат к 2025 году) при коэффициенте использования установленной мощности 18% и процентной ставки 15% годовых смогут обеспечить стоимость электроэнергии за 1 кВт·ч на уровне 2,6 руб. При смягчении условий кредитования и уменьшения ставки до 10%, стоимость будет равна 2 руб.

Применение ВИЭ целесообразно для домашних хозяйств. Это подкрепляется тем фактом, что традиционные энергостанции — одна из главных причин глобального потепления [3]. Установка портативных фотовольтаических модулей, как основных энергетических элементов автономного дома, позволит превратить любой дом из потребителя, в поставщика энергии. Однако необходим проект, который будет направлен на оптимизацию расхода энергии от солнечных панелей. Если рассматривать квартиру, как модель домашнего хозяйства в рамках плотной застройки с минимально-доступным свободным пространством для установки фотовольтаических элементов, то можно предложить проект «Гелиотропической солнечной установки» (ГУ).

Гелиотропизм — это способность растений поворачиваться вслед за солнцем, также известное как «Солнечный трекер». Подобное свойство растений позволяет максимизировать эффективность фотосинтеза.

Преобразование солнечной энергии в электрическую происходит за счет солнечной радиации, падающей на фотовольтаическую ячейку (полупроводник). Ячейка, содержащая полупроводники n и p типа, получившая энергию, создает пару носителей заряда, которые образуют p - n переход и как следствие — падение напряжения на его концах.

Масштабируемость ГУ позволяет устанавливать их на лоджиях, балконах, крышах, в парках. Такие установки могут быть источником энергии для уличного освещения и ламп внутри помещений, а также использоваться как станции зарядки портативных устройств. Преимущества данной системы: меньшие требования к площади установки и эффективная генерация энергии за счет системы

слежения за солнцем. Недостаток — более высокая стоимость за счет рамной конструкции и дополнительного обслуживания.

Современные солнечные панели можно разделить на два типа по материалам: органические (обычно PEDOT панели) и не органические (на основе кремния). Преимущество органических солнечных панелей: меньшая температура изготовления, гибкие свойства материалов (могут устанавливаться на изогнутые поверхности) [4]. Однако технология производства еще не оптимизирована и стоимость панелей на основе органических материалов остается высокой [5]. В данной работе рассматриваются кремниевые панели, однако, в будущем, подразумевается использование органических материалов.

В качестве солнечного элемента использовался модуль от компании Jinshan Petroleum Company с рабочим напряжением 0,5 В и рабочим током 80 мА. (Данный фотовольтаический элемент используется в качестве экспериментального, для оценки функционирования установки на территории России.) Экспериментальная ГУ, стационарная без автоматической коррекции положения и модель усовершенствованной ГУ с автоматической коррекцией положения относительно солнца. Коррекция положения происходит за счет изменения угла по двум осям. Экспериментальная ГУ содержит четыре подложки, на которых установлены девять солнечных элементов, каждый из которых генерирует напряжение 0,4–0,6 В (рис. 1). Все элементы подключены последовательно.

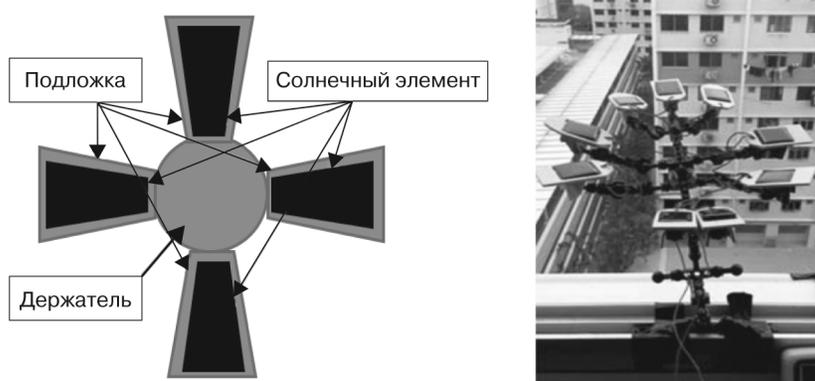


Рис. 1. Гелиотропическая солнечная панель, стационарная

[Fig. 1. The heliotropical solar panel, stationary]

На рисунке 2 представлена типичная диаграмма солнечного пути над экватором. Для таких зон достаточно изменять угол наклона панели в незначительном диапазоне, что не подходит для регионов России, т.е. такая установка будет работать неэффективно из-за изменения положение солнца относительно экватора на 70° в большинстве регионов РФ (например, в Москве) (рис. 3). Недостатком экспериментальной ГУ является ее стационарность, т.е. отсутствие автоматического изменения положения наклона панели относительно солнца.

С перспективной использования PEDOT солнечных элементов, которые позволяют использовать в качестве подложки фигуры нелинейной плоскости, а также для повышения эффективности используемого пространства, в данной

работе предложена конструкция усовершенствованной ГУ на лепестковой подложке с автоматической коррекцией положения для регионов, отдаленных от экватора (рис. 4).

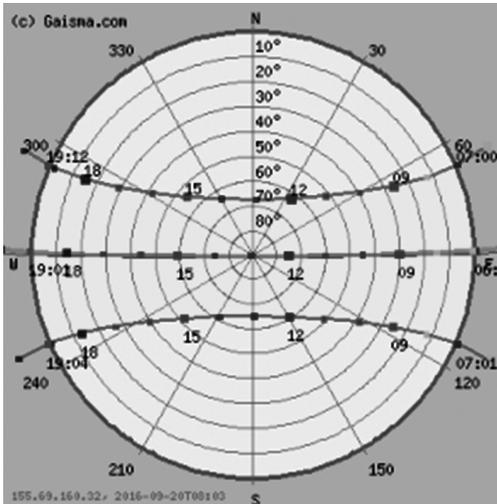


Рис. 2. Диаграмма солнечного пути над экватором в течении дня

[**Fig. 2.** The schedule of a solar way over the equator during the day]

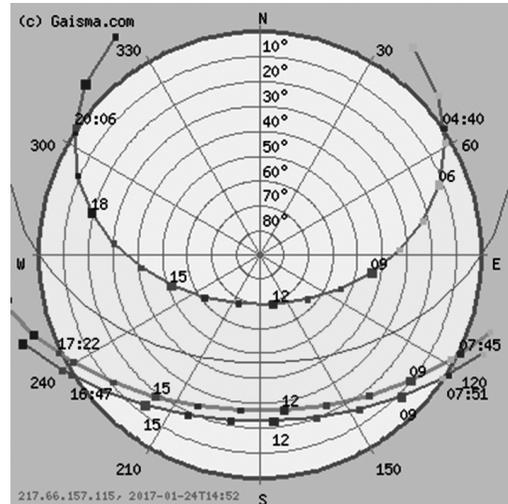


Рис. 3. Диаграмма солнечного пути над Москвой
[**Fig. 3.** The schedule of a solar way over Moscow]

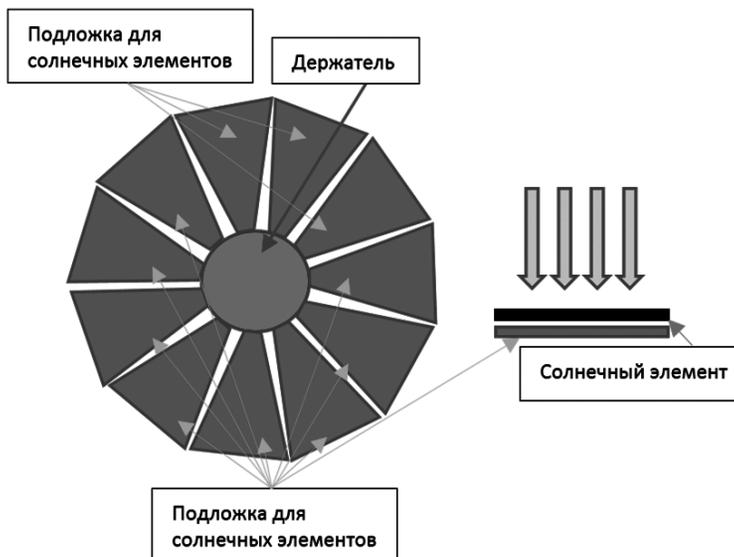


Рис. 4. Принципиальная схема ГУ на лепестковой подложке
[**Fig. 4.** The schematic scheme of GU on a petal substrate]

Особенностью данной схемы служит то, что каждый «лепесток» конструкции самостоятелен и может изменять свое положения относительно центрального держателя. Это позволяет производить самоочистку панели, за счет увеличения угла наклона подложки.

В роли вычислительной платформы для блока управления функциональной схемы ГУ на лепестковой подложке (рис. 5) была выбрана плата Arduino Uno. Она обладает необходимым количеством аналоговых и цифровых входов-выходов, которые необходимы для управления системой, а также необходимой тактовой частотой для выполнения алгоритма работы ГУ согласно определенным требованиям [7]. Блок АКБ необходим для обеспечения электроэнергией установки в случае минимального, по освещенности, светового дня, а также для питания поворотных механизмов и двигателей.

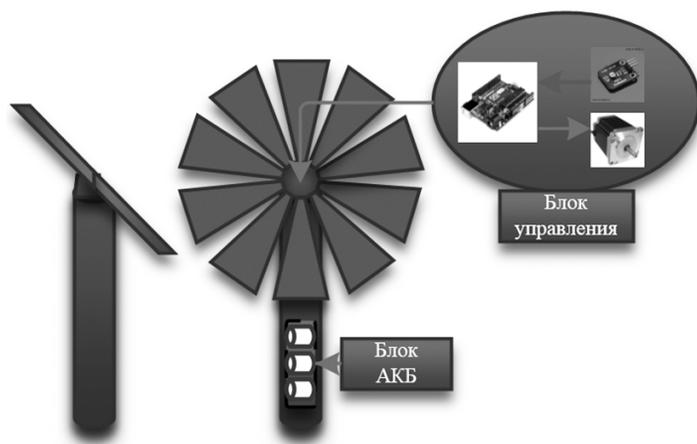


Рис. 5. Функциональная схема ГУ
[**Fig. 5.** Function scheme of GU]



Рис. 6. Схема работы солнечной панели «Гелиотропическая панель» на лепестковой подложке
[**Fig. 6.** Scheme of operation of the solar panel «Heliotropical Panel» on a petal substrate]

Система управления работает следующим образом (рис. 6): центральной держатель ГУ оборудован датчиком освещенности, включенным в мостовую схему Уилсона. В зависимости от интенсивности освещения, датчики меняют свое сопротивление. Данные, полученные с датчика, усиливаются операционным усилителем и подаются на аналоговый вход Arduino UNO. По разработанному алгоритму происходит корректировка положения солнечной панели относительно положе-

ния солнца. Автоматическая корректировка происходит раз в 30 минут. Такой интервал выбран исходя из соображения экономии батареи и масштабируется в зависимости от солнечной диаграммы местности.

Кроме корректировки положения в зависимости от изменения интенсивности освещения, система управления имеет в своем составе блок контроля тока (КТ). Функция данного блока — проверка силы выходного тока для определения загрязненности панели. Значение тока сравнивается с эталонной для данного уровня освещенности. Если оно отличается от эталонной более чем на 30%, то инициируется механизм очистки поверхностей: изменение угла панелей с последующей обдувкой (опционально).

Были получены выходные характеристики для экспериментальной ГУ по двум сценариям: с неизменным положением и с изменением положения панелей через определенный интервалы времени (рис. 7).

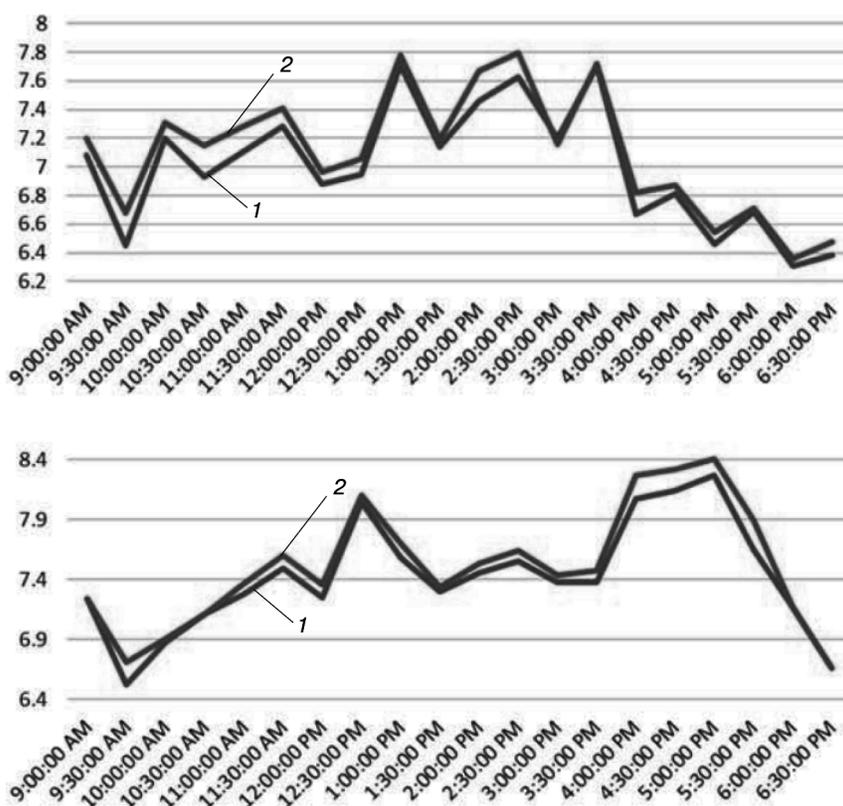


Рис. 7. Результаты работы ГП в случае стационарного расположения и периодической коррекцией положения относительно солнца: 1 — стационарная; 2 — с коррекцией

[**Fig. 7.** Results of work of GP in case of a stationary arrangement and periodic correction of situation concerning the sun: 1 — stationary; 2 — with correction]

Можно заметить, что при грубой коррекции с периодом 30 минут, выходное напряжение ГП с коррекцией положения выше на ~6,3%, относительно стационарной панели. Ожидается, что интеграция автоматического модуля корректировки позволит увеличить значения этого показателя в интервале 10—15%.

Таким образом, авторами был представлен анализ рынка возобновляемых источников энергии, а именно солнечной энергетики: финансовые и инвестиционные прогнозы в разных регионах, в том числе и РФ.

Было представлено техническое решение для малой солнечной энергетики — «Гелиотропическая панель» стационарная и теоретическая модель «Гелиотропической панели» лепесткового типа с автоматической корректировкой для регионов, удаленных от экватора.

Был поставлен эксперимент по двум сценариям с «Гелиотропической панелью»: измерялись значения выходного напряжения со стационарной панели, чье положение не менялось со временем, и выходного напряжения с установки, чье положение изменялось каждые 30 минут. Преимущество грубой коррекции положения составило 6,3%.

Был написан алгоритм коррекции положения относительно максимума освещенности солнца для платформы Arduino Uno.

Дальнейшее направление разработки: реализовать экспериментальный образец «Гелиотропической панели» лепесткового типа с автоматической коррекцией положения, а также протестировать солнечные элементы на основе органических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Отчет о развитии ВИЭ и предложения в энергетическую стратегию России. URL: <http://gisre.ru> (дата обращения: 12.12.2016).
- [2] IRENA. Renewable Energy Market Analysis: The GCC Region. Abu Dhabi, 2016. 454 p.
- [3] Causes effects solution urbanization. URL: <http://www.conserve-energy-future.com/causes-effects-solutions-urbanization.php> (дата обращения: 12.12.2016).
- [4] *Kukreti K., Pratap A., Brijeh K.* Recent Advancements and Overview of Organic Solar Cell. ICCCA, 2016.
- [5] *Rath J.* Low temperature polycrystalline silicon: a review on deposition, physical properties and solar cell applications // *Solar Energy Materials and Sola-Cells.* 2003. 76(4). P. 431—487.
- [6] *Rasool F., Drieberg M., Badruddin N., Singh B.* Modeling of PV Panels Performance Based on Datasheet Values for Solar Micro Energy Harvesting, 2016.
- [7] *Chien L.J., Drieberg M., Sebastian P., Hiung L.H.* A simple solar energy Harvester for Wireless Sensor Networks, 2016.

© Жильцов С.А., Карпушин А.А., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 03 марта 2017

Дата принятия к печати: 15 марта 2017

Для цитирования:

Жильцов С.А., Карпушин А.А. Использование гелиотропических солнечных панелей для автономного электроснабжения потребителей // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования».* 2017. Т. 18. № 2. С. 266—274.

Сведения об авторах:

Жильцов Сергей Алексеевич, ассистент Департамента инженерного бизнеса и менеджмента инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных ин-*

тересов: возобновляемые источники энергии, управление проектами, инновации. *Контактная информация*: e-mail: zhiltsov_sa@rudn.university

Карпушин Артур Александрович, магистрант Департамента инженерного бизнеса и менеджмента инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: малая энергетика, технико-экономические обоснования, оценка эффективности проектов. *Контактная информация*: e-mail: akareeee@mail.ru

USE OF TROPICAL HELIOS SOLAR PANELS FOR STAND-ALONE POWER SUPPLY TO CONSUMERS

S.A. Zhiltsov, A.A. Karpushin

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

More and more regions make investments in renewable power. Objectively there is a threat of climate change due to use of combustible fuel. It means that more and more countries will pass to ecologically safe and renewable power — solar, windy and tidal.

With transition to the third industrial revolution, there will be a household a part of production of work. We hear about emergence of the distributed networks — Smart Grid in which each consumer of energy can become it producer.

The purpose of this work is development of a design of the solar panel which can be used as the independent power supply for street lighting and stations of charging of devices in the conditions of big deviations of corners on the chart of a solar way for the regions remote from the equator.

So heliotropic installation — it is an effective way to control the solar panel due to the adjustment of its position relative to the sun. This is especially true for regions far from the equator. In this paper we briefly presented the financial forecast of the solar energy market, proposed solar installation design heliotropic type and given its comparison with the classical stationary installation.

Key word: solar energy, solar cells, renewable energy, heliotropic solar

REFERENCES

- [1] The report on development of RES and the offer in power strategy of Russia. Available from: <http://gisre.ru> [cited 2016 Dec. 12].
- [2] IRENA. *Renewable Energy Market Analysis: The GCC Region*. Abu Dhabi, 2016. 454 p.
- [3] Causes effects solution urbanization. Available from: <http://www.conserve-energy-future.com/causes-effects-solutions-urbanization.php> [cited 2016 Dec. 12].
- [4] Kukreti K., Pratap A., Brijeh K. *Recent Advancements and Overview of Organic Solar Cell*. ICCCA, 2016.
- [5] Rath J. Low temperature polycrystalline silicon: a review on deposition, physical properties and solar cell applications. *Solar Energy Materials and Sola-Cells*. 2003; 76(4): 431—487.
- [6] Rasool F., Drieberg M., Badruddin N., Singh B. *Modeling of PV Panels Performance Based on Datasheet Values for Solar Micro Energy Harvesting*, 2016.
- [7] Chien L.J., Drieberg M., Sebastian P., Hiung L.H. *A simple solar energy Harvester for Wireless Sensor Networks*, 2016.

Article history:

Received: 3 March 2017

Accepted: 15 March 2017

For citation:

Zhiltsov S.A. Karpushin A.A. (2017) Use of tropical helios solar panels for stand-alone power supply to consumers. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 266–274.

Bio Note:

Sergey A. Zhiltsov, Assistant Lecturer, Department of engineering business and management, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: Renewable energy sources, project management, innovations. *Contact information*: e-mail: zhiltsov_sa@rudn.university

Artur A. Karpushin, Master's Degree student, Department of engineering business and management, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: Small power engineering, feasibility studies, evaluation of project efficiency. *Contact information*: e-mail: akareeee@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-275-285

УДК 635.4

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛИЧНОГО КОМПЛЕКСА

И.К. Шаталов, И.И. Шаталова

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В настоящее время в тепличное хозяйство по всему миру активно внедряются инновационные технологии. Одним из способов повышения энергоэффективности тепличных комплексов является применение систем энергообеспечения теплиц, включающих тепловые насосы. Технология расчета и монтажа тепловых насосов хорошо отработана и широко используется в настоящее время для отопления жилых домов и других помещений. В работе проведен анализ эффективности применения теплового насоса, работающего совместно с тепловым двигателем для энергообеспечения теплицы. Был выбран газопоршневой двигатель фирмы «Звезда-энергетика» мощностью 315 кВт и тепловой насос мощностью 523 кВт фирмы Menenergy. Экономия энергоресурсов по сравнению с традиционной системой энергообеспечения теплицы: при использовании только теплового насоса 25%; при использовании газопоршневого ДВС с утилизацией тепла 32%; при совместной работе газопоршневого ДВС и ТН до 60%.

Ключевые слова: тепловой насос, теплица, газопоршневой двигатель, газовый котел

Затраты энергии на отопление — основные издержки в тепличном хозяйстве и напрямую влияют на конечную цену выращенного продукта. Именно поэтому необходимо уделять внимание энергоэффективности российских тепличных хозяйств. Необходимо вывести российскую продукцию на конкурентоспособный уровень, чтобы постепенно снизить долю ввозимых фруктов и овощей.

Наряду с традиционными системами энергообеспечения тепличных комплексов, все большее применение находят системы на базе инновационных технологий.

Одной из эффективных и экономичных установок для отопления теплиц служит тепловой насос (ТН). Он способен использовать низкопотенциальную тепловую энергию из различных ресурсов окружающей среды. ТН работает по закрытому контуру, и не выделяет вредных веществ в процессе эксплуатации. Наибольшее распространение получили парокомпрессорные ТН. Для отопления теплиц наиболее приемлемым вариантом является водяной тепловой насос замкнутого или открытого контура [1; 2].

Эффективность работы теплонасосной установки характеризуется отношением теплоты Q , полученной теплопотребителем, к потребленной ТН электрической мощности $N_{пр}$. Данную величину называют коэффициентом преобразования ТН:

$$\mu = \frac{Q}{N_{\text{пр}}}.$$

На рисунке 1 представлены схема ТН замкнутого контура для отопления помещений с использованием в качестве источника низкопотенциальной теплоты (ИНТ) теплоты грунта. Для отопления теплиц используются также ТН с погруженным в водоем теплообменником [3].

ТН используются по всему миру и уже успели показать себя в роли надежной и экономичной машины для обогрева помещений, в частности, для отопления теплиц.

В таблице 1 приведено сравнение затрат на покупку и эксплуатацию традиционных систем отопления и ТН [4].

Расчеты проведены на основе результатов эксплуатации двускатной теплицы с высотами конька 5 м и стены 4 м, площадью 5000 м². Теплица имела однослойное остекление из полиэтилена. Исследование проводилось в г. Сидней, Австралия. Анализ предполагал, что температура не падала ниже 18 °С и относительная влажность оставалась на уровне 75%. Проанализировав сведения (см. табл. 1), можно сделать вывод, что ТН, несмотря на большую стоимость покупки и установки, позволяет существенно экономить на эксплуатационных расходах [4].

Стоит уделить внимание пилотному проекту, описанному в статье журнала «Вестник» ВНИИ электрификации сельского хозяйства. В статье был представлен расчет автономного совместного энергообеспечения теплицы. В качестве источника тепла и электроэнергии использовалась мини-ТЭС с когенерацией тепловой энергии и применением тепловых насосов. В качестве целевого тепличного хозяйства было принято ЗАО «Совхоз имени М. Горького». Проведя расчеты, авторы приходят к выводу, что модернизация теплового оборудования с применением ТН позволит снизить расход топлива и выбросы СО₂ в атмосферу в 3,3 раза; уменьшить энергоемкость тепличной овощной продукции в 3,3 раза.

К недостаткам и трудностям применения ТН относятся несколько факторов. Один из таких факторов — отсутствие подходящих рабочих агентов, которые, с одной стороны, удовлетворяли бы экологическим требованиям (Киотское и Монреальское соглашения), а с другой стороны, обладали высокими термодинамическими свойствами. Второй фактор связан с низкими температурами теплоносителя на выходе из ТН, недостаточными для непосредственного применения в промышленных целях и в целях теплоснабжения. В первом случае ведутся исследования по созданию новых альтернативных рабочих агентов. Вторая проблема может быть решена за счет применения ТН с другими дополнительными источниками для производства теплоты, например, тепловыми двигателями с утилизацией их вторичных ресурсов.

В данной работе рассматриваются различные схемы энергообеспечения тепличного комплекса, включая тепловой насос и тепловой двигатель.

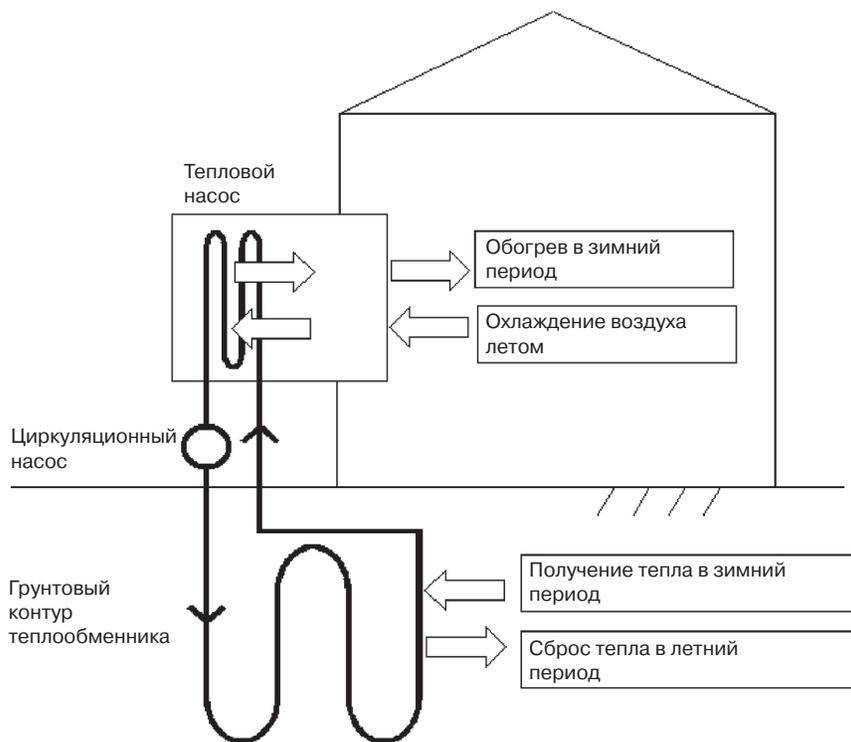
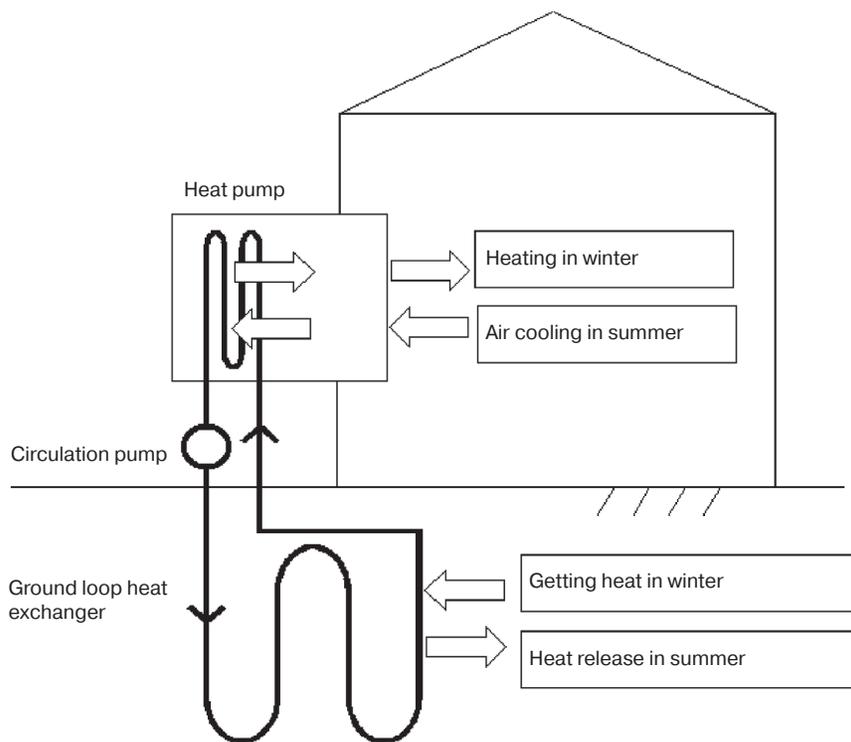


Рис. 1. Простейшая схема ТН, ИНТ-грунт



[Fig. 1. A simple diagram of a heat pump, low- potential heat source — ground]

Таблица 1

Сравнение затрат на покупку и эксплуатацию оборудования для обогрева теплицы с помощью традиционных систем отопления и системы с тепловым насосом, тыс. долл. США
[Comparison of costs for purchase and maintenance of equipment for heating of greenhouses with conventional heating systems and systems with a heat pump thousands of dollars]

Тип отопительной системы и вид топлива Type of heating system and type of fuel	Затраты на покупку и установку комплекта оборудования Costs for the purchase and installation of the equipment	Стоимость эксплуатации за 10 лет Operating cost for 10 years	Средне-годовая стоимость эксплуатации (за 10 лет) Average annual operating cost (for 10 years)	Стоимость эксплуатации за 15 лет Operating cost for 15 years	Средне-годовая стоимость эксплуатации (за 15 лет) Average annual operating cost (for 15 years)
Котел с жидким теплоносителем (природный газ) Boiler with heat transfer fluid (natural gas)	205	2200	212	3200	213
Котел с жидким теплоносителем (сжиженный газ) Boiler with liquid coolant (liquefied gas)	205	2273	220	3222	220
Тепловой насос с грунтовым теплообменником (эл.энергия) Heat pump with ground heat exchanger (el. energy)	400	1151	81	1412	94
Электрокотел (эл.энергия) Heat pump with ground heat exchanger (el. energy)	75	3313	301	4446	296

Сравнительный расчет различных отопительных систем теплиц

Исходные данные для расчета. Площадь теплицы — 10000 м² или 1 га; расход энергии на искусственную инсоляцию составляет 20% от всей энергии, расходуемой на выращивание культуры. Именно такой процент энергии в среднем затрачивается на стимуляцию роста растений с помощью искусственного освещения, в течение всего года [5]. Потребность растений в тепле зависит от времени года. Расход энергии на обогрев находится в рамках между 15 и 50 (70) Вт/м² [6]. Для расчета примем, что потребность в тепловой энергии составляет 50 Вт/м².

Чтобы провести достоверное сравнение различных типов энергообеспечения теплиц, за основу примем часовой расход условного топлива (у.т.), сжигаемого для получения того или иного количества энергии. Таким образом, можно отказаться от сравнения эффективности оборудования посредством сравнения стоимости эксплуатации, так как стоимость топлива, тепловой и электрической энергии являются динамическими, постоянно меняющимися величинами. В России за единицу условного топлива принята величина, равная 293 000 КДж/кг (за рубежом в качестве единицы условного топлива используется нефтяной эквивалент — 10 000 ккал/кг).

Таким образом, необходимая тепловая мощность на отопление

$$N_T = 50 \cdot 10\,000 = 500\,000 \text{ Вт} = 500 \text{ кВт.}$$

Электрическая мощность на досвечивание

$$N_{\text{Э}} = N_T \cdot 20\% = 500 \text{ кВт} \cdot 20\% = 100 \text{ кВт.}$$

Суммарная мощность

$$N_{\Sigma} = N_T + N_{\text{Э}} = 500 \text{ кВт} + 100 \text{ кВт} = 600 \text{ кВт.}$$

Вариант 1. Энергообеспечение теплицы с газовым котлом: тепловая мощность 500 кВт; топливо-природный газ, $Q_H^P = 30\,000$ КДж/кг; КПД газового котла 88%; электрическая мощность 100 кВт.

Часовой расход топлива, необходимый для энергообеспечения теплицы площадью 1 га в течение самого холодного времени года, равен 104,8 кг-у.т./ч.

Вариант 2. Энергообеспечение теплицы от ТН: тепловая мощность 500 кВт; электрическая мощность 100 кВт (рис. 2).

Проведен расчет ТН с грунтовым теплообменником. Принимаем, что теплообменник заложен на глубине 5 м. Грунт на глубине более 5 м характеризуется невысокой (8—12 °С), но постоянной температурой, что позволяет рассматривать его как эффективный источник энергии для тепловых насосов.

Исходные данные для расчета: тепловая производительность ТН — $Q = 500$ кВт; тип рабочего агента — R134a. Расчетом получено, что коэффициент преобразования теплового насоса равен 4,2. Это означает, что для выработки необходимой тепловой мощности в 500 кВт, тепловой насос затрачивает 119 кВт электроэнергии. Так как мы приняли, что электроэнергия, необходимая для освещения рас-

тений в теплице равна 100 кВт, суммарная необходимая электрическая мощность для энергообеспечения теплицы

$$N_{\Sigma} = N_{\text{ТНУ}} + N_{\text{Э}} = 119 + 100 = 219 \text{ кВт.}$$

Затраты на энергообеспечение в расходе условного топлива (обогрев и досвечивание) составляют 69,9 кг.у.т./ч.

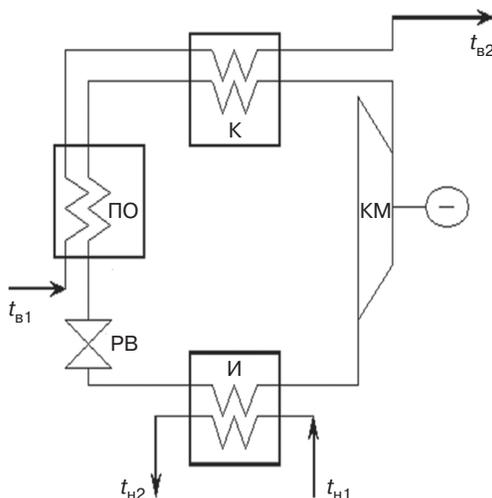


Рис. 2. Схема работы парокompрессионного ТН: КМ — компрессор; К — конденсатор; ПО — переохладитель; PB — регулирующий вентиль; И — испаритель; t_{b1} — температура греющей воды на входе в ТН; t_{b2} — температура греющей воды на выходе из ТН, на входе в теплицу

[Fig. 2. The scheme of the steam compression heat pump: КМ — compressor; К — condenser; ПО — subcooler; PB — control valve; И — vaporizer; t_{b1} — the temperature of heating inlet water for the heat pump; t_{b2} — the temperature of the heating water at the outlet of the heat pump, at the entrance to the greenhouse]

Исходя из потребной тепловой мощности выбран тепловой насос Menenergy (Канада) (рис. 3).



Рис. 3. Промышленный тепловой насос Menenergy
[Fig. 3. Industrial Heat Pump Menenergy]

Вариант 3. Энергообеспечение теплицы от ДВС.

Выбран в качестве энергетической установки газопоршневой двигатель внутреннего сгорания QSK 19G фирмы «Звезда — Энергетика», на номинальном режиме работы: электрическая мощность 315 кВт, тепловая мощность 411 кВт, КПД 35,8%.

Часовой расход топлива, необходимый для энергообеспечения теплицы площадью 1 га равен 70,8 кг·у.т./ч.

Вариант 4. Энергообеспечение теплицы от ДВС с ТН.

Схема использования теплоты, вырабатываемой газовым двигателем с искровым зажиганием, связанным с компрессором ТН, приведена на рис. 4 [7]. Часовой расход топлива, необходимый для энергообеспечения теплицы площадью 1 га в течение самого холодного времени года равен 41,9 кг·у.т./ч.

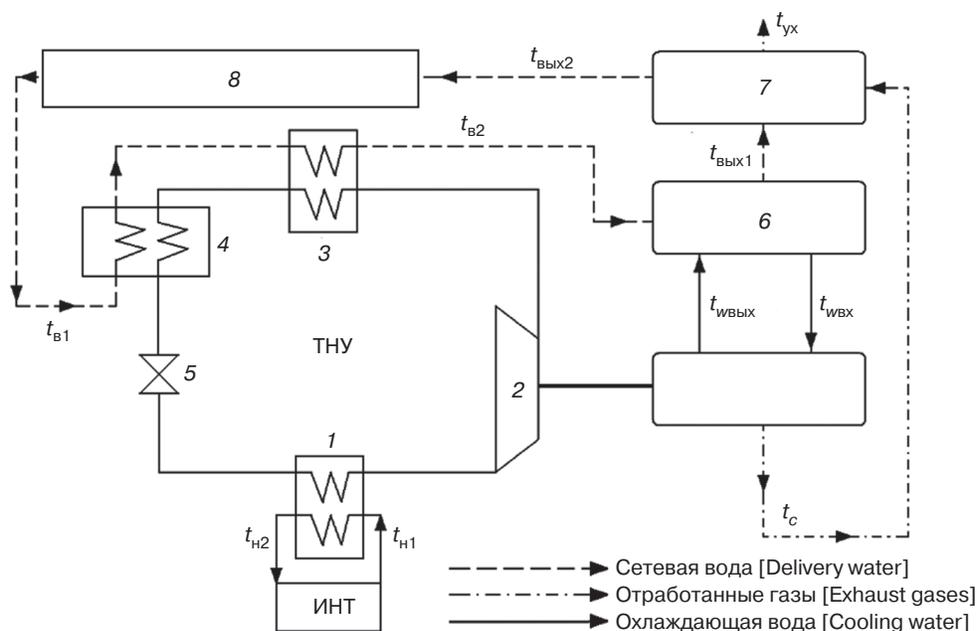


Рис. 4. Схема использования теплоты в теплонасосной установке с газовым двигателем с искровым зажиганием: 1 — испаритель; 2 — компрессор; 3 — конденсатор; 4 — переохладитель; 5 — регулирующий вентиль; 6 — теплообменник системы охлаждения двигателя; 7 — теплообменник утилизации теплоты ОГ; 8 — теплотребитель, отопление, теплица; ГД — газовый двигатель

[Fig. 4. Scheme of using heat in a heat pump with gas engine with spark ignition: 1 — vaporizer; 2 — compressor; 3 — condenser; 4 — subcooler; 5 — control valve; 6 — heat exchanger of the engine cooling system; 7 — heat exchanger utilizing the heat; 8 — heat consumer, heating, greenhouse; ГД — gas engine]

Из приведенных данных разных вариантов энергообеспечения теплицы (табл. 2) следует, что система энергообеспечения теплицы тепловым насосом в сочетании с тепловым двигателем — самая экономичная (до 60% экономии топлива, по сравнению с газовым котлом).

Таблица 2

Сравнение разных вариантов энергообеспечения теплицы
[Comparison of different energy supply options for the greenhouse]

Тип отопительной системы и вид топлива Type of heating system and type of fuel	Потребности в электрической мощности, кВт Needs for electrical power, kW	Часовой расход условного топлива на обогрев, кг·у.т./ч Consumption of conventional fuel for heating per hour, kg.c.f./h	Часовой расход условного топлива на досвечивание, кг·у.т./ч Consumption of conditional fuel for supplementary lighting per hour, kg.c.f./h	Общий часовой расход условного топлива, кг·у.т./ч The total hourly fuel consumption, kg.c.f./h	Относительный часовой расход условного топлива The relative hourly flow rate of conventional fuel
Газовый котел (природный газ) Gas boiler (natural gas)	100	69,8	35,1	104,8	1,0
Тепловой насос замкнутого контура с грунтовым теплообменником (электро-энергия) Closed-loop heat pump with ground heat exchanger (electricity)	219	41,7	35,1	76,8	0,73
Тепловой двигатель (природный газ) Heat engine (natural gas)	100	35,6	35,1	70,7	0,68
Тепловой двигатель (природный газ) + тепловой насос Heat engine (natural gas) + heat pump	219	6,8	35,1	41,9	0,4

Выводы

1. Традиционная система энергоснабжения теплицы имеет простую тепловую схему, хорошую ремонтпригодность, проста в эксплуатации, тем не менее, ее главный недостаток — малая экономичность.

2. Тепловые насосы дают большие возможности по сбережению энергии на отопление теплиц. Технология расчета и монтажа тепловых насосов хорошо отработана и широко используется в настоящее время для отопления жилых домов и других помещений.

3. Экономия энергоресурсов по сравнению с традиционной системой энергообеспечения (газовый котел) теплицы составляет: при использовании только ТН — 27%; при использовании только газопоршневого ДВС с утилизацией тепла — 32%. При совместной работе газопоршневого ДВС и ТН — 60%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Andrew D. Chiasson* Geothermal heatpump and heatengine systems. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 473 p.
- [2] *Ruqun Wu*. Energy Efficiency Technologies — Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump // *Journal of sustainable development*. 2009. Vol. 2. No. 2. Pp. 14–17.
- [3] *John W., Bartok Jr.* Geothermal Heat for Greenhouses, Natural Resources Mgt. & Engr. Dept. University of Connecticut, Storrs CT, 2008. Pp. 2–5.
- [4] *Badgery-Parker Jeremy*. Ground Source Heat... as an option for greenhouses // *Practical Hydroponics & Greenhouses*. October 2013. Issue 136. URL: <http://www.hydroponics.com.au/ground-source-heat-as-an-option-for-greenhouses/> (дата обращения: 05.02.2017).
- [5] *Свенцицкий И.И., Алзахова Е.О., Обычный А.Н.* Энергоемкость, КПД тепловых преобразователей энергии и эксергический анализ. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2009. С. 166–187.
- [6] *Круг Гельмут*. Овощеводство / пер. с нем. В.И. Леунова. М.: Колос, 2000. 572 с.
- [7] *Шаталов И.К.* Теплонасосные установки с приводом от тепловых двигателей: учеб. пособие. М.: РУДН, 2009. 94 с.

© Шаталов И.К., Шаталова И.И., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 5 марта 2017

Дата принятия к печати: 16 марта 2017

Для цитирования:

Шаталов И.К., Шаталова И.И. Оценка эффективности применения инновационных технологий для энергообеспечения тепличного комплекса // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 275–285.

Сведения об авторах:

Шаталов Иван Касьянович, кандидат технических наук, профессор Департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: энергетическое машиностроение, КПД турбин, мощность газотурбинных установок, тепловые насосы, компрессорные станции, экономичность газотурбинных установок, газоперекачивающих станций. *Контактная информация*: e-mail: shatalov_ik@rudn.university

Шаталова Ирина Ивановна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Департамента инженерного бизнеса и менеджмента инженерной академии Российского университета

дружбы народов. *Сфера научных интересов:* система контроллинга, управленческий учет, человеческие ресурсы, менеджмент, экономическая эффективность в энергетике. *Контактная информация:* e-mail: shatalova_ii@rudn.university

THE EFFECTIVENESS OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR ENERGY SUPPLY OF GREENHOUSES

I.K. Shatalov, I.I. Shatalova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Greenhouse industry around the world is actively introducing innovative technology. The suggested way to improve the cost efficiency of greenhouses is to use power supply systems, including heat pumps. The technology of installation and its calculations of heat pumps is well determined at present and widely used for heating houses and other premises. The paper presents the analysis of application of heat pump, working in conjunction with a heat engine for energy supply of greenhouses. We selected gas-piston engine capacity 315 kW of the company “Zvezda-Energetika” and the heat pump capacity of 523 kW of the company “Menergy” in our study. The results are: energy savings compared with traditional energy supply system of the greenhouse if using only the heat pump is 25%; if using a gas engine with heat recovery is 32%; when combined gas engine and TNU to 60%.

Key words: heat pump, greenhouse, gas-piston engine, gas boiler

REFERENCES

- [1] Andrew D. Chiasson *Geothermal heatpump and heatengine systems*. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 473 p.
- [2] Ruqun Wu. Energy Efficiency Technologies — Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump. *Journal of sustainable development*. 2009. 2(2): 14–17.
- [3] John W., Bartok Jr. *Geothermal Heat for Greenhouses*, Natural Resources Mgt. & Engr. Dept. University of Connecticut, Storrs CT, 2008:2–5.
- [4] Badgery-Parker Jeremy. Ground Source Heat as an option for greenhouses. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, October 2013. Issue 136. Available from: <http://www.hydroponics.com.au/ground-source-heat-as-an-option-for-greenhouses> [cited 2017 Feb 5].
- [5] Sventitsky I.I., Alsahafa E.O., Obynochny A.N. *Energy capacity, efficiency of thermal energy converters and analysis of exergy*. M.: GNU VIESH, 2009. P. 166–187. (In Russ).
- [6] Krug Helmut. *Vegetable Production: Translation from German Leunov V.I.* M.: KOLOS, 2000. 572 p. (In Russ).
- [7] Shatalov I.K. *Heat pumps driven by heat engines: textbook*. M.: RUDN University, 2009. 94 p. (In Russ).

Article history:

Received: 5 March 2017

Accepted: 16 March 2017

For citation:

Shatalov I.K., Shatalova I.I. (2017) The effectiveness of innovative technologies for energy supply of greenhouses. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 275–285.

Bio Note:

Ivan K. Shatalov, Ph.D., Professor of the Department of mechanical engineering and instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: power engineering, turbine efficiency, capacity of gas turbine plants, heat pumps, compressor stations, efficiency of gas turbines and gas compressor stations. *Contact information*: e-mail: shatalov_ik@rudn.university

Irina I. Shatalova, Ph.D., Associate Professor of the Department of Engineering Business and Management, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: Controlling system, management accounting, human resources, management, economic efficiency in the energy sector. *Contact information*: e-mail: shatalova_ii@rudn.university



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-286-291

УДК 621.43

СРАВНЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С РАССЛОЕНИЕМ ЗАРЯДА И АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

П.Р. Вальехо Мальдонадо, Ю.А. Антипов, П.П. Ощепков

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Применение в бензиновых двигателях рабочего процесса с расслоением заряда позволяет повысить степень сжатия ϵ в интервале 12–14, коэффициент избытка воздуха до 3 и более при отсутствии детонации. Благодаря расслоению заряда экономичность на частичных нагрузках повышается на 10–15%. Автомобильный дизель без наддува имеет в 1,5 раза меньшую литровую мощность и на 15% более высокую экономичность, чем бензиновый двигатель с расслоением заряда.

Ключевые слова: бензиновый двигатель с расслоением зарядом, экономичность, автомобильный дизель

Применение в бензиновых двигателях рабочего процесса с расслоением заряда позволяет получить устойчивую работу при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \geq 3,5$, в то время как при гомогенной смеси величина α не превышает 1,15–1,25 [1–4]. При этом двигатель на гетерогенной смеси имеет малую склонность к детонации, что позволяет повысить степень сжатия ϵ до 12 и более. Кроме того, при расслоении заряда уменьшается температура газа на периферийной зоне, что снижает теплоотдачу стенки цилиндра. В бензиновом двигателе с гетерогенной смесью удастся перейти от качественного к количественному регулированию и, как следствие, снизить потери от дросселирования на входе на эксплуатационных режимах. Благодаря всему этому можно заметно повысить индикаторный (η_i) и эффективный (η_e) коэффициенты полезного действия (КПД) бензинового двигателя [1–4].

С увеличением α (при > 1) снижается средняя по цилиндру максимальная температура T_Z и давление P_Z сгорания. Снижение T_Z приводит к уменьшению потерь, связанных с ростом теплоемкости продуктов сгорания и диссоциацией молекул. Однако максимальная температура вблизи свечи растет, что может привести к увеличению выделений оксидов азота. Это заставляет на некоторых режимах прибегать к рециркуляции отработавших газов.

В конце 1990-х годов фирмы Мицубиси, Таэта, Ситроэн, Пежо, Фольксваген и др. приступили к эксплуатации легковых автомобилей с двигателями, имеющими расслоение заряда [1; 3]. Выигрыш в экономичности этих автомобилей оценивается по разному. Поэтому представляет интерес сравнивать экономичность двигателей без наддува с расслоением зарядом и дизелей с неразделенной камерой сгорания.

Для сравнительного анализа удобно воспользоваться зависимостью [5]

$$\eta_i = (1 - \varepsilon^{1-m})\eta_\alpha\eta_{\text{опт}},$$

где $m = 0,22-0,25$ — для дизеля и бензинового двигателя; $\eta_{\text{опт}}$ — учитывает потери от неполноты сгорания (для дизелей), отдачу теплоты в стенки и другие факторы.

Из зависимостей $\eta_\alpha = f(\alpha)$ для дизелей [5], бензинового двигателя [1] и двигателя с расслоением заряда [2; 3] (рис. 1) видно, что расслоение заряда позволяет повысить КПД на 5–7%, существенно расширив при этом диапазон устойчивой работы.

Величины $\eta_{\text{опт}}$, в среднем, для дизелей равна 0,76, а бензиновых двигателей 0,80.

Среднее индикаторное давление

$$P_i = \frac{H_{\text{и}}}{\alpha L_o} (1 - \varepsilon^{1-m}) \rho_{\text{в}} \eta_{\text{в}} \eta_i,$$

где $H_{\text{и}}$ и L_o — теплотворность и стехиометрическое отношение топлива; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха во впускном коллекторе; $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент наполнения.

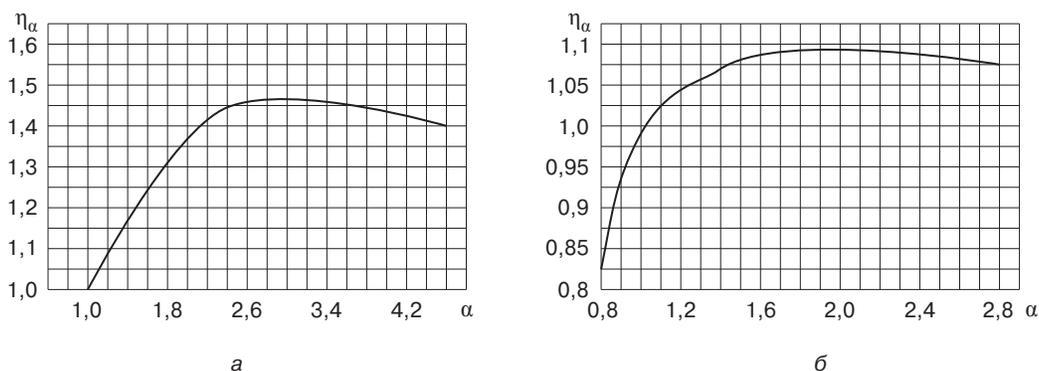


Рис. 1. Зависимость коэффициента η_α от коэффициента избытка воздуха: а — дизель; б — бензиновый двигатель с расслоением заряда

[Fig. 1. The dependence of the coefficient η_α of excess air factor: а — diesel engine; б — gasoline engine with charge stratification]

Среднее эффективное давление

$$P_e = P_i - P_{\text{м}},$$

где $P_{\text{м}}$ — среднее давление механических потерь, принятое при расчетах равным для дизеля 0,14 МПа, для бензинового двигателя 0,174 МПа.

Большие механические потери у бензинового двигателя объясняются увеличенными насосными потерями, связанными с дополнительным сопротивлением на входе в камеру с расслоением заряда.

Механический КПД $\eta_{\text{м}} = P_e / P_i$ и эффективный КПД $\eta_e = \eta_i \eta_{\text{м}}$.

На рисунке 2 приведены зависимости индикаторного и эффективного КПД, среднего эффективного давления и максимального давления P_Z для дизелей с $\varepsilon = 16$, $\eta_v = 0,91$, теплотворностью топлива $H_{и} = 43$ МДж/кг, $L_0 = 14,7$ кг/кг со средней скоростью поршня $c_{п} = Sn / 30 = 10,5$ м/с ($n = 3200$ мин⁻¹, S — ход поршня). Видно, что максимальное значение $\eta_e = 0,4$ достигается при $\alpha = 2,2-3,2$, а падение η_e при $\alpha > 3,2$ объясняется снижением механического КПД. При этом $\alpha_{мин} = 1,3$, $\eta_e = 0,33$ и $P_e = 0,78$ МПа.

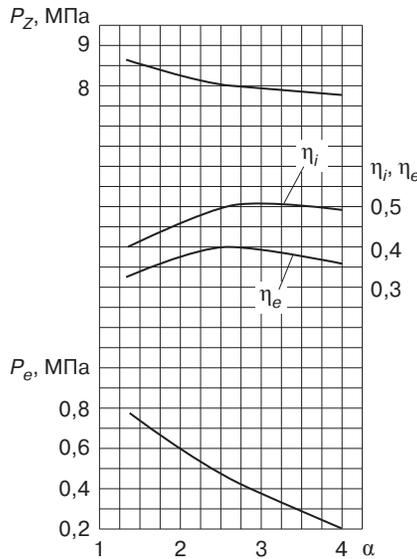


Рис. 2. Характеристика дизеля без наддува в зависимости от коэффициента избытка воздуха: $\varepsilon = 16$, $n = 3200$ мин⁻¹

[Fig. 2. Characteristics of a diesel engine without a boost as a function of the excess air factor: $\varepsilon = 16$, $n = 3200$ min⁻¹]

На рисунке 3 приведены аналогичные зависимости для бензинового двигателя с расслоением заряда с $\varepsilon = 16$, $\eta_v = 0,91$ при средней скорости поршня 11 м/с и частоте вращения коленчатого вала $n = 4000$ мин⁻¹. Видно, что эффективный КПД в широком диапазоне изменения $\alpha \geq 1$ равен около 0,35. Средняя по объему цилиндра температура газа T_Z и давление P_Z быстро снижается с увеличением α . При этом следует иметь в виду, что вблизи свечи зажигания местная величина α близка к единице, а на периферии цилиндра находится бедная смесь с низкой температурой. Это способствует уменьшению теплоотдачи в стенки и повышению КПД.

На номинальной частоте вращения коленчатого вала, которая у дизеля равна 4000 мин⁻¹, а у бензинового двигателя 5000 мин⁻¹, литровая мощность у бензинового двигателя $N_{л} = P_e n = 50$ кВт/л, а для дизелей 32 кВт/л. В то же время, на эксплуатационных режимах ($\alpha \geq 3-4$) дизель имеет на 10–15% более высокую экономичность, чем бензиновый двигатель. Сравнение двигателя с расслоением заряда и без расслоения заряда показывает, что их мощностные и экономические характеристики на номинальном режиме ($\alpha \approx 1$) близки между собой. Зато на

эксплуатационных режимах применение расслоенного заряда дает повышение экономичности на 10–15%.

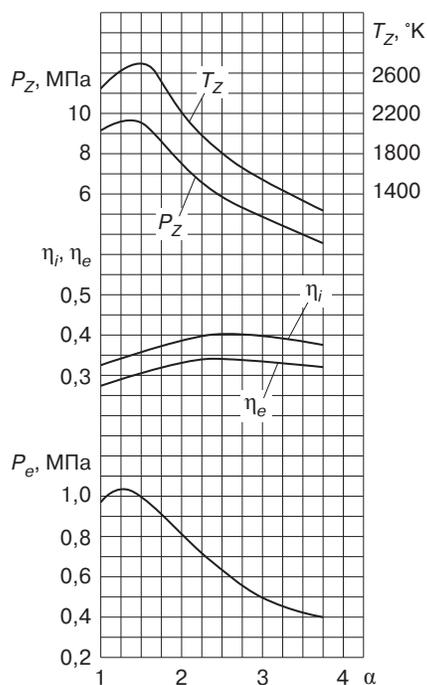


Рис. 3. Характеристика бензинового двигателя с расслоением заряда в зависимости от коэффициента избытка воздуха: $\varepsilon = 16, n = 4000 \text{ мин}^{-1}$

[Fig. 3. Characteristics of the gasoline engine with charge stratification depending on the excess air factor: $\varepsilon = 16, n = 4000 \text{ min}^{-1}$]

Выводы

1. Сравнение экономичности дизеля и бензинового двигателя с расслоением заряда показало, что на номинальном режиме экономичность дизеля на 10–15% выше, а литровая мощность в 1,5 раза меньше.

2. На эксплуатационных режимах, соответствующих $\alpha = 3–4$, экономичность дизеля на 15% выше, чем у двигателя с расслоением заряда.

3. Сравнение бензинового двигателя с гомогенным и расслоенным зарядом показало, что на эксплуатационных режимах, соответствующих 20–40% от номинальной мощности, расслоение заряда позволяет повысить экономичность на 10–15% по сравнению с обычным бензиновым двигателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн 1. Теория рабочих процессов: учебник / В.Н. Луканин, И.В. Алексеев и др.; под ред. В.Н. Луканина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2010. 480 с.
- [2] *Fraidl G.K. und andere.* Direkteinspitzung bei Ottomotoren // MTZ. 1997. № 2.
- [3] *Hoppe N. und andere.* Experimental Erfassung von Ottomotoren mit Direkteinspitzung // MTZ. 2003. № 7–8.

- [4] *Портнов Д.А.* Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. М.: Машгиз, 1963. 638 с.
- [5] *Кавтарадзе Р.З.* Теория поршневых двигателей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 589 с.

© Вальехо Мальдонадо П.Р., Антипов Ю.А., Ощепков П.П., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 28 февраля 2017

Дата принятия к печати: 17 марта 2017

Для цитирования:

Вальехо Мальдонадо П.Р., Антипов Ю.А., Ощепков П.П. Сравнение экономичности бензинового двигателя с расслоением заряда и автомобильного дизеля // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 286—291.

Сведения об авторах:

Вальехо Мальдонадо Пабло Рамон, кандидат технических наук, доцент Департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* рабочий процесс, динамика и конструкция двигателей внутреннего сгорания, альтернативные топлива. *Контактная информация:* prvm@rambler.ru

Антипов Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент Департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* теплопередача, газотурбинный двигатель, газодинамика. *Контактная информация:* gudn-tit@yandex.ru

Ощепков Петр Платонович, кандидат технических наук, доцент Департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов:* устройство и ремонт автомобиля, альтернативные топлива. *Контактная информация:* opp1967@yandex.ru

COMPARISON OF EFFICIENCY PETROL OF ENGINE WITH STRAUTIFIED CHARGE AND AUTOMOTIVE DIESEL

P.R. Vallejo Maldonado, Yu.A. Antipov, P.P. Oshchepkov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Petrol engine with strautified charge has compression ratio 12—14 and air/fuel ratio 3 and more without detonation. Charge strautification increases part-load efficiency by 10—15%. Automotive diesel without supercharging has 50% smaller specific output and o 15% higher efficiency that engine strautified charge.

Key words: petrol engine with strautified charge, efficiency, automotive diesel

REFERENCES

- [1] The internal combustion engines. 3 vol. Kn. 1. The theory of working processes: manual / V.N. Lukanin, V.I. Alekseev, etc.; under. ed. V.N. Lukanina. 2-e izd., Rev. and extra. M.: Higher. wk., 2010. 480 p.
- [2] Fraidl G.K. and others. Direct injection in Otto engine // MTZ. 1997. № 2.
- [3] Hoppe N. and others. Experimental recording of Otto engine with Direct Injection // MTZ. 2003. № 7–8.
- [4] Portnov D.A. High-speed turbo piston engines with compression ignition. M.: Mashgiz, 1963. 638 p.
- [5] Kavtaradze R.Z. Theory of piston engines. M.: MGTU im. N.E. Bauman, 2016. 589 p.

Article history:

Received: 28 February 2017

Accepted: 17 March 2017

For citation:

Vallejo Maldonado P.R., Antipov Yu.A., Oshchepkov P.P. (2017) Comparison of efficiency petrol of engine with stratified charge and automotive diesel. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 286–291.

Bio Note:

Pablo Ramon Vallejo Maldonado, Ph.D., Associate Professor of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: operation, dynamics and design of internal combustion engines, alternative fuels. *Contact information*: e-mail: prvm@rambler.ru

Antipov Yuri, Ph.D., Associate Professor of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: heat transfer, gas turbine engine and gas dynamics. *Contact information*: e-mail: rudn-tit@yandex.ru

Peter Oshchepkov, Ph.D., Associate Professor of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: device and car repairs, alternative fuels. *Contact information*: e-mail: opp1967@yandex.ru

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

АБОНЕМЕНТ на журнал

18230

(индекс издания)

ВЕСТНИК РУДН
Серия «Инженерные исследования»

Количество комплектов:

на 2017 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на журнал

18230

(индекс издания)

ПВ	место	литер

ВЕСТНИК РУДН

Серия «Инженерные исследования»

Стоимость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2017 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)