МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал

№ 4 (8), 2020

Тверь 2020

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2020. № 4 (8). 110 с.

Включает научные статьи, подготовленные на основе результатов исследований и экспериментальных разработок в области строительства, электротехники и химических наук, выполненных учеными и специалистами-практиками ведущих вузов и научно-исследовательских учреждений нашей страны и зарубежья. Представлены работы, соответствующие профилю издания по следующим научным отраслям: 05.23.00 Строительство и архитектура; 05.09.00 Электротехника; 05.17.00 Химическая технология.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74328 (печат.) от 19 ноября 2018 года, Эл № ФС77–74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

ISSN 2658-7459 (печатн.)

ISSN 2686-794X (онлайн)

© Тверской государственный
технический университет, 2020

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»
Учредитель и издатель
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
Адрес редакции
170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22
Тел. редакции +7 (4822) 78-89-00
E-mail: common@tstu.tver.ru
Цена свободная
Дата выхода в свет
Формат 60x84 1/8
Тираж 500 экз.
ISSN 2658-7459
Главный редактор
Гультяев В.И. – д.т.н., доц.
Заместители главного редактора:
Белов В.В. – д.т.н., проф.;
Луцик В.И. – д.х.н., проф.;
Макаров А.Н. – д.т.н., проф.
Ответственный секретарь
Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доц.
Редакционная коллегия:
Качанов А.Н. – д.т.н., проф.;
Коротких Д.Н. – д.т.н., проф.;
Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., проф.;
Лепешкин А.Р. – д.т.н.;
Матар П.Ю. – к.т.н., проф.;
Недосеко И.В. – д.т.н., проф.;
Никольский В.М. – д.х.н., проф.;
Строкова В.В. – проф. РАН., д.т.н., проф.;
Трещев А.А. – д.т.н., проф.;
Фишер Х.-Б. – д.-инженер;
Ясинская Н.Н. – к.т.н., доц.

Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»

Founder and Publisher
Federal State Budget Educational Institution of Higher Education, Tver State Technical University
Address
22, embankment of Afanasiy Nikitin, 170026, Tver, Russia
Tel. +7 (4822) 78-89-00
E-mail: common@tstu.tver.ru
Open price
Release Date
Format 60x84 1/8
Printing run 500 copies
ISSN 2658-7459
Editor-in-Chief
Gul'tyaev V.I. – d.t.s., Assoc. Prof.
Vice Editor-in-Chief
Belov V.V. – d.t.s., Prof.;
Lucik V.I. – d.c.s., Prof.;
Makarov A.N. – d.t.s., Prof.
Executive Secretary
Novichenkova T.B. – k.t.s., Assoc. Prof.
Editorial team
Kachanov A.N. – d.t.s., Prof.;
Korotkih D.N. – d.t.s., Prof.;
Kosivcov Y.Y. – d.t.s., Prof.;
Lepeshkin A.R. – d.t.s.;
Matar P.Y. – k.t.s., HDR, Prof.;
Nedoseko I.V. – d.t.s., Prof.;
Nikol'skij V.M. – d.c.s., Prof.;
Strokova V.V. – prof. RAS., d.t.s., Prof.;
Treshchev A.A. – d.t.s., Prof.;
Fisher H.-B. – d.-ingineer;
Yasinskaya N.N. – k.t.s., Assoc. Prof.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Баркая Т.Р., Гавриленко А.В., Федоров В.В., Куляев П.В. Экспериментальное исследование предварительно напряженных без сцепления железобетонных плит при продавливании…… 6

Белов В.В. Опилкобетон на модифицированном цементном вяжущем.… 14

Бровкин А.В., Цыбина Р.З., Кривохижина А.В., Баркая Т.Р. Сравнительный анализ эффективности применения сборно-монолитных перекрытий в условиях нового строительства…….. 26

Курятников Ю.Ю. Технико-экономические аспекты замены природного щебня на вторичный при производстве бетона…… 32

Федоров В.В. Архитектурная среда: пространства, территории, локусы... 38

Черемных С.В. Экологический горно-туристический комплекс Северного Кавказа «У подножья высот “Зоркий”»…….. 47

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Корнеев К.Б., Раймонд Осеи-Овусу. Реконфигурация существующей электрической сети населенных пунктов на основе данных о загрузке потребителей…… 57

Макаров А.Н. Влияние высоты слоя шлака на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах…… 66

Макаров А.Н. Влияние емкости, расстояния от дуг до стен на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах…….. 72

Попов И.П. Рассеяние магнитного потока в трансформаторах……... 81

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Качановский Ф.В. Удельная электропроводность осадков, выпадающих в Твери…….. 89

Куляев П.В., Бровкин А.В., Цыбина Р.З., Гавриленко А.В. Влияние карбоната натрия на процесс твердения портландцементного композита…….. 98

Курятников Ю.Ю. Способы переработки бетонного лома для получения вторичного щебня в качестве минерального сырья…… 103

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Barkaya T.R., Gavrilenko A.V., Fedorov V.V., Kulyaev P.V. Experimental study of punching shear of unbonded post-tensioned reinforced concrete slabs……. 6

Belov V.V. Sawbobetone on modified cement binder…….. 14

Brovkin A.V., Tsybina R.S., Krivozhina A.V., Barkaya T.R. Comparative analysis of the effectiveness of prefabricated monolithic overlaps in the conditions of new construction……. 26

Kuryatnikov Y.Y. Technical and economic aspects of substitution of natural crushed by secondary crushed in the production of concrete……. 32

Fedorov V.V. Architectural environment: spaces, territories, locis…… 38

Cheremnykh S.V. Ecological mountain and tourist complex of the North Caucasus «U podnozh'ya vysot «"Zorkij"»……. 47

ELECTRICAL ENGINEERING

Korneev K.B., Osei-Ovusu Raymond. Reconfiguration of existing electric network of urban territories based on power consumption data.…… 57

Makarov A.N. Influence of the height of the slag layer on the efficiency of arcs and electricity consumption in electric arc furnace…… 66

Makarov A.N. Influence of capacitance, distance from arcs to walls on the efficiency of arcs and electricity consumption in electric arc furnace….. 72

Popov I.P. Magnetic flux scattering in transformers……... 81

CHEMICAL TECHNOLOGY

Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver…….. 89

Kulyaev P.V., Brovkin A.V., Tsybina R. Z., Gavrilenko A.V. Effect of sodium carbonate on the hardening process of the portland cement composite……. 98

Kuryatnikov Y.Y. Methods for processing concrete scrap to obtain secondary crushed stone as mineral raw material…… 103

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 692.52;624.073.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ

Т.Р. Баркая, А.В. Гавриленко, В.В. Федоров, П.В. Куляев
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Баркая Т.Р., Гавриленко А.В.,
Федоров В.В., Куляев П.В., 2020

Аннотация. В статье представлены результаты испытаний на продавливание образцов-плиток, моделирующих преднапряженные железобетонные плиты перекрытий при их продавливании колоннами. Приведены геометрические размеры образцов-плиток, а также данные по прочностным характеристикам использованных материалов. Всего рассматривались 4 серии образцов, отличавшихся уровнем предварительного обжатия. Нагружение проводилось штампами нескольких типоразмеров, что позволило реализовать различные варианты расположения напрягаемой арматуры относительно пирамиды продавливания. Дано обоснование полученным в исследовании результатам и приведены рекомендации, соблюдение которых позволит получить при продавливании положительный эффект от обжатия плит арматурой без сцепления с бетоном.

Ключевые слова: железобетон, постнапряжение, напряжение без сцепления, продавливание.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-6-14

ВВЕДЕНИЕ

С ростом пролетов эффективность применения обычных железобетонных плит перекрытий в зданиях монолитной конструктивной системы снижается – необходимо увеличивать их толщину и армирование. При пролетах более семи метров, как правило, необходимо устройство балочных перекрытий или применение капителей, которые усложняют производство опалубочных и арматурных работ, а в дальнейшем требуют устройства тех или иных потолочных отделочных систем.

Одним из оптимальных способов улучшения эксплуатационных свойств железобетонных плит перекрытий является их предварительное напряжение в условиях строительной площадки – постнапряжение [1]. В этом случае удается уменьшить толщину перекрытий, снизить расход обычной ненапрягаемой арматуры, отказаться от использования балочных систем и капителей. Однако остается не до конца выясненным вопрос прочности стыков постнапряженных плит с колоннами при продавливании [2].

За рубежом по данной теме был выполнен ряд экспериментальных и аналитических исследований. В статье [3], содержащей, помимо прочего, краткий обзор результатов нескольких весьма крупных экспериментальных изысканий, показано, что предельная сила среза увеличивается с ростом величины среднего преднапряжения. Кроме того, прочность постнапряженных плит при срезе увеличивается при постановке в их верхней зоне над колонной стержней обычной ненапрягаемой арматуры. Результаты экспериментальных исследований легли в основу американского нормативного документа по расчету и проектированию железобетонных конструкций ACI 318 [1].

В нашей стране постнапряженные плиты перекрытий в силу разных причин к настоящему времени еще не получили достаточного распространения, что обусловливает низкий интерес к их изучению со стороны исследователей [1]. В статье [5] упомянуто, что обжатие бетона плиты в зоне колонн благоприятно влияет на прочность перекрытия при продавливании. Однако в данный момент не удается найти достаточных отечественных экспериментальных обоснований по работе стыка постнапряженной плиты с колонной при продавливании [2, 6].

В связи с изложенным представляются целесообразными выполнение экспериментального исследования прочности при продавливании ряда образцов плит, напряженных арматурой без сцепления, и сопоставление полученных результатов с прочностью при продавливании плит без напрягаемой арматуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Из бетона с параметрами, соответствующими классу В30, были изготовлены масштабные образцы-модели плит с размерами в плане 300×300 мм и толщиной 50 мм [2]. Всего было изготовлено 4 серии образцов по 3 плиты в каждой. Все серии имели ненапрягаемое армирование в нижней зоне в виде сварной неоцинкованной сетки из проволоки диаметром 2 мм с ячейкой размером 25 мм. Напрягаемая арматура плит серий 2–4 моделировалась шпильками ∅6 мм из нержавеющей стали класса А4. Прочность шпилек при испытании на разрыв оказалась равной 18,6 кН.

Образцы серии 1 были эталонными и армировались только сварной сеткой. Серии 2–4 отличались между собой количеством стержней напрягаемой арматуры: в плиты серии 2 устанавливались 2 стержня только в одном направлении; в плиты серии 3 устанавливались 4 стержня – 2 стержня в продольном направлении и 2 стержня в поперечном; в плитах серии 4 было установлено всего 8 напрягаемых стержней по 4 стержня в продольном и поперечном направлениях. Чертежи образцов плит каждой серии приведены на рис. 1.

Для формования плиток была изготовлена опалубка из фанеры, внутри которой были размещены пластиковые оболочки-кембрики, надетые на жесткие стальные стержни, в количестве, предусмотренном принятой программой испытаний. При извлечении формовочных стальных стержней из кембриков после затвердевания бетона в плитках оставалось отверстие для пропуска напрягаемых шпилек.

Усилие обжатия создавалось при помощи растяжения шпилек в машине ИР-500 и дальнейшей фиксации их в растянутом состоянии путем накручивания усиленных гаек из нержавеющей стали. Усилие растяжения каждой шпильки составляло 14,71 кН, при этом их удлинение достигало 30…40 мм. Для исключения смятия бетона под торцом гайки между ним и бетоном плиты размещалась полоска из стали толщиной 4 мм и шайба.

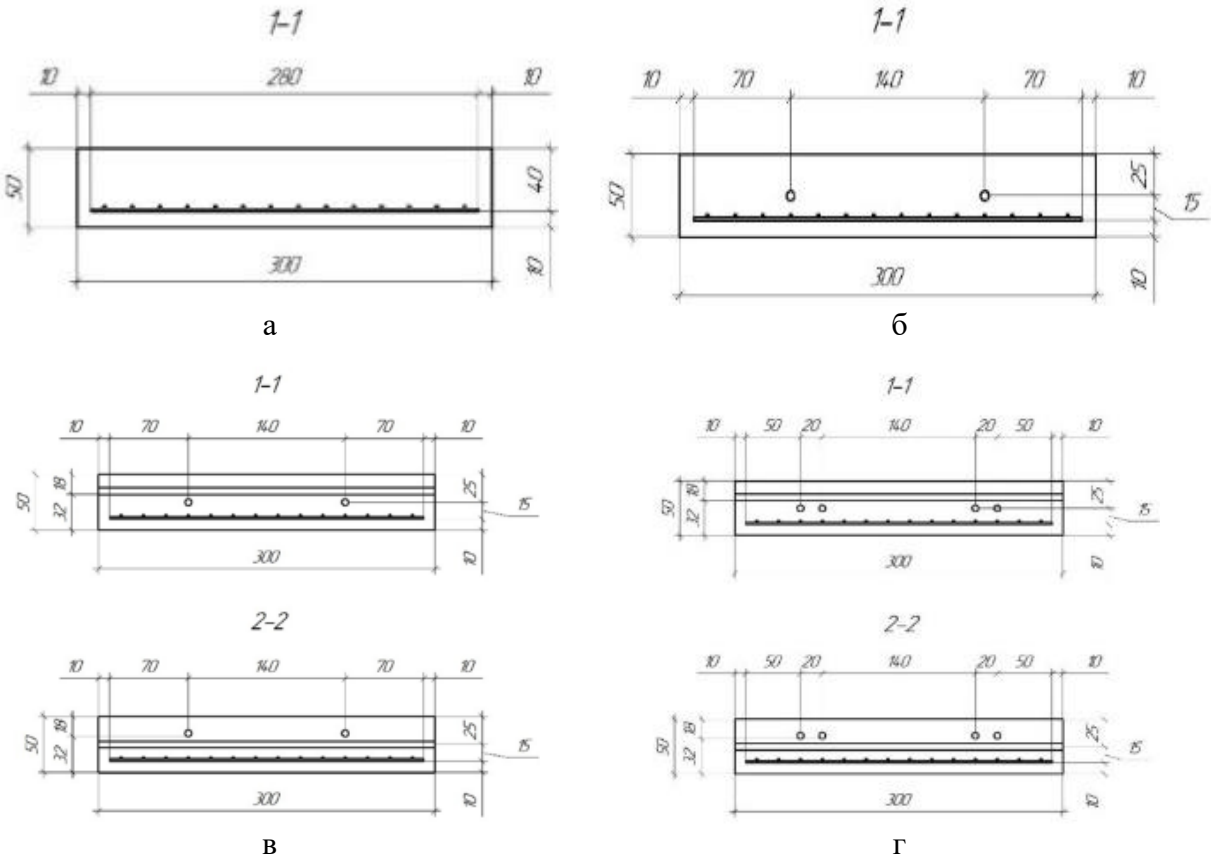


Рис. 1. Чертежи образцов плит: а – серии 1; б – серии 2; в – серии 3; г – серии 4

Уровень предварительного обжатия образцов различных серий, в зависимости от количества напрягаемых стержней, варьировался в пределах от 2 до 4 МПа.

При проведении испытаний варьируемыми параметрами, кроме наличия и величины предварительного обжатия, являлись также форма и размер штампа. Всего рассматривались три штампа, два из которых были квадратными и один круглый. Квадратный штамп № 1 имел размеры в плане 50×50 мм, квадратный штамп № 2 – 100×100 мм, а круглый штамп № 3 имел диаметр 140 мм.

В процессе испытаний первый из трех образцов каждой из четырех рассматриваемых серий подвергался силовому воздействию, передаваемому на него от штампа № 1, второй образец – воздействию от штампа № 2 и третий образец – от штампа № 3 соответственно.

Следует также заметить, что при проведении испытаний под образцы плит подкладывалась фанера с вырезанным в середине нее отверстием. Форма отверстий под испытания штампами № 1 и 2 была квадратной, а для штампа № 3 – круглой. Штампу № 1 соответствовало отверстие размерами 130×130 мм, штампу № 2 – 180×180 мм, а штампу № 3 – ∅220 мм. Отверстия в фанере-основании были выполнены после проведения предварительных экспериментальных исследований, которые показали, что нагружение плит, расположенных на сплошном фанерном основании, приводит к их разрушению от изгиба, а не от продавливания. Размеры отверстий подобраны таким образом, чтобы

пирамида продавливания получалась с углом наклона граней порядка 45, принятом в действующих в РФ нормативах.

Испытания проводились на прессе ИП-1000 в лаборатории кафедры конструкций и сооружений.

Принятые размеры плит, штампов и отверстий в фанере позволяют реализовать следующие случаи нагружения образцов:

при штампе № 1 стержни преднапряженной арматуры будут обжимать пирамиду продавливания за ее границами;

штампе № 2 стрежни предварительно напряженной арматуры расположены на границе пирамиды продавливания;

штампе № 3 стрежни предварительно напряженной арматуры расположены в границах конуса продавливания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытания описанных серий плит по принятым схемам сведены в таблицу.

Результаты экспериментальных испытаний

Серия плит	Разрушающая нагрузка при нагружении штампом, кН		
	№ 1	№ 2	№ 3
1	65,2	80,83	71,0
2	57,5	68,00	68,9
3	53,8	67,30	67,0
4	51,3	52,9	65,4

При разрушении образцов плиток всех серий при их нагружении через штамп № 1 была получена вполне отчетливая пирамида продавливания. На рис. 2 приведен характер разрушения плит серий 1 и 4 при их нагружении через штамп № 1.

а

б

Рис. 2. Разрушение образцов при нагружении через штамп № 1: а – серии 1; б – серии 4

При нагружении плит серии 1 штампом № 2 разрушение произошло по пирамиде продавливания с углом граней, почти равным 45° (рис. 3а). Пирамида продавливания в плитах серий 2 и 4 оказалась с углами граней, отличающимися от 45 ° (рис. 3б, в, г).

Пирамиды продавливания образцов серий 1 и 2 при их нагружении круглым штампом № 3 приведены на рис. 4а и б соответственно.

Рис. 3. Разрушение образцов при нагружении через штамп № 2: а – серии 1; б – серии 2; в – серии 4, общий вид; г – серии 4, вид сверху

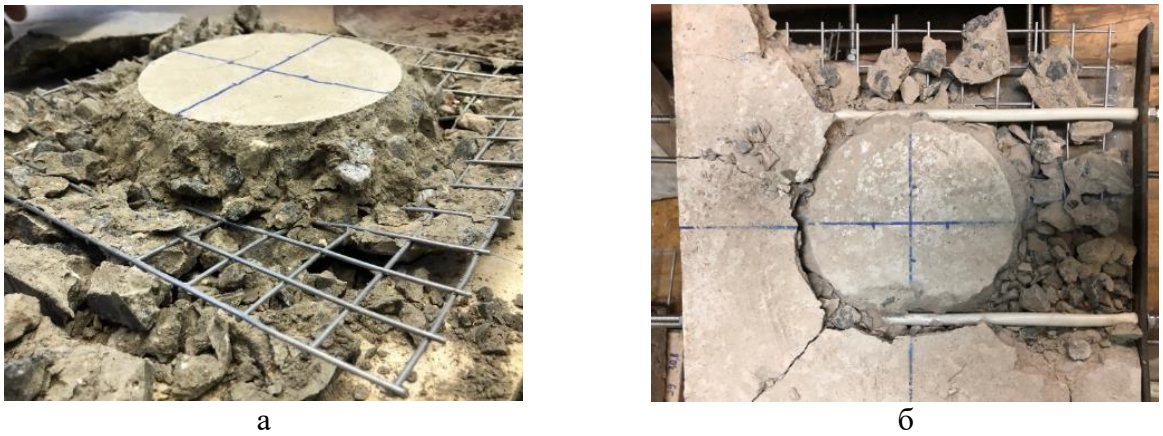


Рис. 4. Разрушение образцов при нагружении через штамп № 3: а – серии 1; б – серии 2

По данным таблицы следует, что при испытаниях плит всех серий тремя рассматриваемыми типами штампов с увеличением количества предварительно напряженных стержней повышения несущей способности при продавливании не наблюдалось.

В случае нагружения плит штампом № 2 наблюдавшееся в эксперименте снижение прочности при увеличении предварительного обжатия можно объяснить тем, что напрягаемые стержни находились на наклонной грани пирамиды продавливания, тем самым оказалась уменьшена площадь бетона в сечении и, напротив, возникли локальные концентраторы напряжений в виде отверстий под напрягаемую арматуру.

В случае испытания плит штампом № 3 снижение несущей способности при продавливании с ростом обжатия могло иметь сходную причину: защитный слой бетона между границей продавливания и предварительно напряженными стержнями мог оказаться недостаточным, в результате чего стрежни фактически «прорезали» пирамиду продавливания, что можно видеть на рис. 4б.

В случае испытаний штампом № 1 наблюдавшееся снижение несущей способности может свидетельствовать о том, что отверстия под предварительно напряженные стержни, будучи расположенными даже за границами пирамиды продавливания, оказывают определенный негативный эффект на несущую способность плит, ослабляя их бетон.

Чтобы установить, какое влияние оказывают отверстия в бетоне на несущую способность плит при продавливании, был испытан один дополнительный образец серии 4 с восемью отверстиями без предварительного напряжения. Его разрушение при нагружении штампом № 1 произошло при нагрузке в 46,5 кН, что менее разрушающей нагрузки аналогичного предварительно напряженного образца, равной 51,3 кН. Из этого опыта отчетливо следует, что обжатие плит стержнями, расположенными за границами теоретически ожидаемой пирамиды продавливания, оказывает положительное влияние на их несущую способность при продавливании на уровне порядка 10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При испытании описанных плит, предварительно напряженных арматурой без сцепления, создающей обжатие бетона на уровне порядка 2…4 МПа, повышения их несущей способности зафиксировано не было. Напротив, с ростом количества напрягаемой арматуры и, соответственно, уровня обжатия, наблюдалось снижение предельной продавливающей силы. По мнению авторов, наблюдавшееся поведение образцов может объясняться рядом некорректных решений, принятых на стадии разработки программы экспериментального исследования: оказался некорректно выбран масштабный фактор, в результате чего отверстия под стержни напрягаемой арматуры существенно ослабили бетон, особенно в случаях, когда стержни проходили по грани пирамиды продавливания или внутри нее; предварительное напряжение, несомненно, создающее положительный эффект по увеличению несущей способности плит при продавливании, в проведенном опыте не смогло компенсировать негативного эффекта, вызванного ослаблением сечения отверстиями для арматуры; центры тяжести предварительно напряженных стержней в рассмотренных плитах находились на расстоянии 15…25 мм от наиболее растянутой грани, что не позволило обжатию должным образом повлиять на развитие напряжений в растянутой части сечений.

По результатам проведенных исследований можно дать следующие рекомендации по конструктивным мероприятиям, соблюдение которых позволит получить положительный эффект от преднапряжения при продавливании: должен быть создан достаточно высокий уровень обжатия бетона (равный или более 4 МПа); предварительно

напряженная арматура должна размещаться в наиболее растянутой зоне бетона; не следует допускать расположения стержней напрягаемой без сцепления арматуры в зонах, граничащих с боковыми поверхностями пирамиды продавливания.

В целом рассмотренный вопрос представляется весьма актуальным и требующим дальнейшей экспериментальной и теоретической проработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко А.В., Абдуллина Ю.Р., Баркая Т.Р. Особенности технологии преднапряжения железобетонных конструкций в условиях производства строительно-монтажных работ // *Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2020. С. 72–78.
2. Бровкин А.В., Митин М.А., Юлленен С.И. Вопросы расчетной прочности предварительно напряженных железобетонных плит на продавливание // *Международный студенческий строительный форум – 2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова): сборник докладов: в 2 т.* Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2018. Т. 1. С. 35–40.
3. Saleh Z.A., Wimal S. Punching shear strength of post-tensioned concrete flat plates with L-shaped columns. *PTI Journal.* 2009. V. 7. No. 1, pp. 29–39.
4. Bondy K.B. Two-way post-tensioned slabs with bonded tendons. *PTI Journal.* 2012. V. 8. No. 2, pp. 43–48.
5. Бардышева Ю.А., Кузнецов В.С., Тылызова Ю.А. Конструктивные решения безбалочных безкапительных перекрытий с предварительно напряженной арматурой // *Вестник МГСУ*. 2014. Вып. 6. С. 44–51.
6. Баркая Т.Р., Бровкин А.В., Митин М.А., Юлленен С.И. Исследование продавливания плит перекрытий // *Саморазвивающаяся среда технического университета: материалы III Всероссийской научно-практической конференции: в 2 ч.* Тверь: Тверской государственный технический университет, 2018. Ч. 1. С. 119–129.
7. Юлленен С.И. Расчетная и экспериментальная прочность предварительно напряженных железобетонных плит при продавливании: дисс. маг. Тверь, 2019. 122 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРКАЯ Темур Рауфович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович – ассистент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: gawaw@mail.ru

ФЕДОРОВ Виктор Владимирович – д-р культурологии, профессор кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vvf322@yandex.ru

КУЛЯЕВ Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Гавриленко А.В., Федоров В.В., Куляев П.В. Экспериментальное исследование предварительно напряженных без сцепления железобетонных плит при продавливании // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 6–14.

EXPERIMENTAL STUDY OF PUNCHING SHEAR OF UNBONDED POST-TENSIONED REINFORCED CONCRETE SLABS

T.R. Barkaya, A.V. Gavrilenko, V.V. Fedorov, P.V. Kulyaev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In this paper there are results of a punching shear test of slab samples, which were modeling post-tensioned reinforced concrete floor slabs when they are punched by columns. Geometrical dimensions of slab samples and properties of used materials are listed as well. There were 4 series of samples which differed to each other by level of prestress. Load have been applied through stamps of several types, which have allowed to research different positions of tensioned reinforcement relatively to the punching pyramid. Obtained results are discussed. Recommendations, which compliance may allow to obtain positive effect in ultimate punching shear loads for unbonded post-tensioned slabs are given.

Keywords: reinforced concrete, unbonded post-tensioning, punching shear.

REFERENCES

1. Gavrilenko A.V., Abdullina Yu.R., Barkaya T.R. Features of the technology of post-tensioning of reinforced concrete structures in conditions of construction and installation works. *Self-developing environment of technical university: scientific research and experimental studies: materials of the IV All-Russian scientific and practical conference*. Tver: Tver State Technical University. 2020, pp. 72–78. (In Russian).
2. Brovkin A.V., Mitin M.A., Yullenen S.I. Issues of calculational punching shear strength of post-tensioned reinforced concrete slabs. *International Student Construction Forum – 2018 (to the 165th anniversary of the birth of V.G. Shukhov): collection of reports: in 2 vol.* Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2018. Vol. 1, pp. 35–40. (In Russian).
3. Saleh Z.A., Wimal S. Punching shear strength of post-tensioned concrete flat plates with L-shaped columns. *PTI Journal.* 2009. V. 7. No. 1, pp. 29–39.
4. Bondy K.B. Two-way post-tensioned slabs with bonded tendons. *PTI Journal.* 2012. V. 8. No. 2, pp. 43–48.
5. Bardysheva Yu.A., Kuznetsov V.S., Talyzova Yu.A. Constructive solutions for flat floor slabs without girders and capitals with stressed reinforcement. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 6, pp. 44–51. (In Russian).

6. Barkaya T.R., Brovkin A.V., Mitin M.A., Yullenen S.I. Research of punching shear of floor slabs. *Self-developing environment of technical university: scientific research and experimental studies: materials of the III All-Russian scientific and practical conference: in 2 vol.* Tver: Tver State Technical University. Vol. 1. 2018, pp. 119–129. (In Russian).
7. Yullenen S.I. Calculative and experimental punching shear strength of prestressed reinforced concrete slabs. Mag. Diss. (Construction). Tver, 2019. 122 p. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru
GAVRILENKO Alexey Vladimirovich – Assistant of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: gawaw@mail.ru
FEDOROV Viktor Vladimirovich – Doctor of Cultural Sciences, Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vvf322@yandex.ru
KULIAEV Pavel Victorovitch – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Gavrilenko A.V., Fedorov V.V., Kulyaev P.V. Experimental study of punching shear of unbonded post-tensioned reinforced concrete slabs // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 6–14.

УДК 691.517

ОПИЛКОБЕТОН НА МОДИФИЦИРОВАННОМ ЦЕМЕНТНОМ ВЯЖУЩЕМ

В.В. Белов
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Белов В.В., 2020

Аннотация. В статье рассмотрены принципы получения опилкобетона на цементном вяжущем, модифицированном добавками растворимого стекла и золы гидроудаления местных ТЭЦ. Материал на основе модифицированного цементного вяжущего с использованием местных вторичных сырьевых ресурсов: опилок в качестве заполнителя опилкобетона и отвальной золы в качестве тонкодисперсного наполнителя, является эффективным в условиях малоэтажного строительства.

Ключевые слова: модифицированное цементное вяжущее, отходы деревообработки, добавки растворимого стекла и отвальной золы, подбор состава, математическое планирование эксперимента.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-14-25

ВВЕДЕНИЕ

Проблема получения недорогих, безопасных в пожарном и экологическом отношении, эффективных в теплотехническом отношении стеновых материалов на основе компонентов растительного происхождения, в частности отходов деревообработки, является весьма актуальной в современном малоэтажном строительстве. Одним из таких материалов с успехом может стать опилкобетон, изготовленный не по традиционной технологии − с большой долей песка в составе смеси и с высокой средней плотностью (более 1 000 кг/м^3), а на основе современных представлений о механизме взаимодействия минеральных вяжущих с древесным заполнителем, путях и способах снижения плотности этого материала при сохранении достаточной прочности.

Для склеивания древесных частиц в древесно-стружечных и древесно-волокнистых плитах используют, как правило, синтетические фенолформальдегидные и карбамидные смолы, затраты на которые достигают 30 % стоимости плит. Главный недостаток синтетических связующих заключается не в дороговизне, а в их токсичности. Так, фенолформальдегидные смолы содержат до 9 % свободного фенола, до 11 % свободного формальдегида и 1,5…2,0 % метанола. В процессе производства и эксплуатации изделий значительная часть этих высокотоксичных веществ выделяется в воздух, загрязняя окружающую среду.

Известно, что основными сложностями управления качеством композиционных материалов на основе экологически безопасных минеральных вяжущих являются химическая агрессивность по отношению к ним древесного заполнителя, а также подверженность последнего значительным влажностным деформациям, что сказывается на прочности контакта заполнителя с минеральным вяжущим [1]. Важнейшим фактором формирования адгезионного контакта древесного заполнителя с цементным тестом является капиллярная диффузия воды затворения вглубь заполнителя. При этом наиболее целесообразной является химическая подготовка древесного заполнителя путем выдержки в известковой воде, когда одновременно достигается предадсорбция ионов Ca^{2+} на волокнах древесины и нейтрализация водорастворимых «цементных ядов» [2].

В литературе отмечено, что предварительная обработка (минерализация) опилок уменьшает водопоглощение, а следовательно, уменьшает возможность гниения древесины и образования вредных для бетона гумусовых кислот, повышает прочность и огнестойкость опилок и, кроме того, улучшает связи между органическими и неорганическими составляющими опилкобетона [3].

В последние годы в технологии строительных материалов все шире начинают использоваться принципы работы биосистем с целью разработки строительных биотехнологий и биокомпозитов. Это основано, в частности, на определенных аналогиях в работе, восприятиях внешних нагрузок и внутреннем строении объектов живой и неживой природы [4, 5]. К важнейшим задачам биотехнологии относится создание композиционных материалов строительного назначения на основе древесного и другого растительного сырья. Пьезометрическая обработка или тонкое измельчение сырья с целью

придания ему вяжущих свойств в производстве этого типа материалов предполагают большие энергозатраты. Альтернативным вариантом обработки сырья может быть биотехнологический процесс [6]. Таковы древесные биопластики, изготовленные без добавления токсичных синтетических связующих [7]. Применение биотехнологического процесса удаления сахаров из органического заполнителя может повысить прочность древесно-цементных композиций в зависимости от продолжительности обработки в 1,5…3 раза [8]. Однако перечисленные направления требуют от технологов специальных знаний и квалификаций в области микробиологии, что не всегда возможно в условиях малых предприятий.

Технологически более простым является применение смешанного вяжущего на базе промышленных отходов, содержащих щелочной компонент, так как это позволяет отказаться от предварительной минерализации древесного заполнителя. Таким вяжущим могут быть фторангидритовое и золощелочное вяжущее на высокомодульном жидком стекле [9].

В предыдущей работе автора [10] показана возможность получения тепло-изоляционного материала на основе отходов деревообработки и бесцементного композиционного вяжущего, который может стать достаточно эффективным в условиях реального производства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Целью данной работы было получение теплоизоляционного опилкобетона по другому варианту подбора состава этого материала на цементной основе с добавками отвальной золы и растворимого стекла, а также путем оптимизации дополнительных технологических мероприятий, обеспечивающих повышение адгезионной прочности цементного камня к древесному заполнителю, к которым относятся, в частности, просеивание опилок через сито с отверстиями 5 мм для отделения коры и крупных фракций древесины, а также в ряде случаев помол опилок [11, 12].

В работе решались задачи:

определить оптимальные дозировки золы и жидкого стекла по отношению к массе цемента;

найти оптимальную степень измельчения опилок;

определить оптимальное количество воды затворения опилкобетонной смеси;

установить влияние предварительной выдержки (замачивания) опилок в воде на плотность и прочность опилкобетона.

В работе использовались следующие сырьевые материалы: портландцемент ПЦ 500-Д5; отвальная зола Тверской ТЭЦ-4, предварительно отсеянная через сито 1,25 мм с целью удаления загрязняющих примесей и высушенная до постоянной массы при температуре 100–105 °С; древесные опилки хвойных пород с влажностью 15 %; натриевое растворимое стекло в виде водного раствора с плотностью 1,3 г/см^3.

В соответствии с решаемыми задачами работа была разделена на ряд этапов.

На первом этапе устанавливалось содержание добавок золы и растворимого стекла по массе по отношению к массе цемента. Задача решалась в рамках планированного эксперимента ПФЭ 3^2 с одновременным варьированием двух факторов: добавок золы и растворимого стекла (табл. 1).

Уровни варьирования факторов: а) добавки золы по отношению к массе цемента З/Ц – от 0,2 до 0,4; б) добавки растворимого стекла по отношению к массе цемента ЖС/Ц – от 0,01 до 0,05.

Таблица 1

План эксперимента ПФЭ 3^2 и его результаты

Номер опыта	План		Уровни		Плотность, кг/м^3	Прочность, МПа	Влажность, %
	x_1	x_2	З/Ц	Ж/С			
1	–1	–1	0,2	0,01	644	0,066	24,35
2	0	–1	0,3	0,01	619	0,057	24,38
3	+1	–1	0,4	0,01	653	0,0535	25,48
4	–1	0	0,2	0,03	523	0,038	19,44
5	0	0	0,3	0,03	655	0,044	24,39
6	+1	0	0,4	0,03	630	0,041	24,55
7	–1	+1	0,2	0,05	475	0,047	17,43
8	0	+1	0,3	0,05	468	0,1035	16,93
9	+1	+1	0,4	0,05	480	0,072	17,63

Соотношение опилок и цемента по массе поддерживалось постоянным и равным 1, а водоцементное отношение – равным 2.

Из сырьевых смесей формовались образцы-кубы размером 10×10×10 см. Сначала перемешивали золу с цементом в течение 1 мин. Затем в эту смесь добавляли опилки и перемешивали еще 2 мин. В полученную смесь добавляли воду с необходимым количеством растворимого стекла и перемешивали еще 2 мин. Сырьевую смесь загружали в формы и уплотняли. Уплотнение производили в следующей последовательности. Сначала смесь засыпали на половину формы и уплотняли трамбованием 20 раз штампом площадью 35 см^2. Затем смесь досыпали доверху и трамбовали еще 20 раз. Формы с кубиками ставили на сутки в сушильный шкаф при температуре 50 °С. Через сутки производили распалубку и кубы оставляли на воздухе еще на 6 сут.

Затем производились испытания образцов. Образцы взвешивались, определялись их плотность и предел прочности при сжатии. После разрушения образцов из каждой серии брали навеску, высушивали ее и таким образом определялась влажность образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты планированного эксперимента ПФЭ 3^2 приведены в табл. 1. В соответствии с ними построены математические модели зависимостей свойств опилкобетона от добавок золы и растворимого стекла:

$$y = в_0 + в_1x_1 + в_2x_2 + в_{11}x_{12} + в_{22}x_{22} + в_{12}x_1x_2,$$

где y – выходные параметры (плотность в кг/м^3 или прочность на сжатие в МПа); x_1 и x_2 – факторы в кодированном виде ($x_1 = \frac{З/Ц - 0{,}1}{0{,}2}$; $x_2 = \frac{ЖС/Ц - 0{,}02}{0{,}03}$).

Значения коэффициентов моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты моделей зависимостей свойств опилкобетона от добавок золы и растворимого стекла

Выходные параметры	$в_0$	$в_1$	$в_2$	$в_{11}$	$в_{22}$	$в_{12}$
Плотность, кг/м^3	611,7	20,5	–82,2	–11,5	–44,5	–1,1
Прочность на сжатие, МПа	0,0512	0,0026	0,0077	–0,0151	0,0257	0,0094

На рис. 1 и 2 показаны зависимости соответственно плотности и прочности на сжатие опилкобетона от содержания золы по отношению к массе цемента при разной добавке растворимого стекла, а на рис. 3 и 4 – от добавки растворимого стекла при разном содержании золы, построенные по математическим моделям.

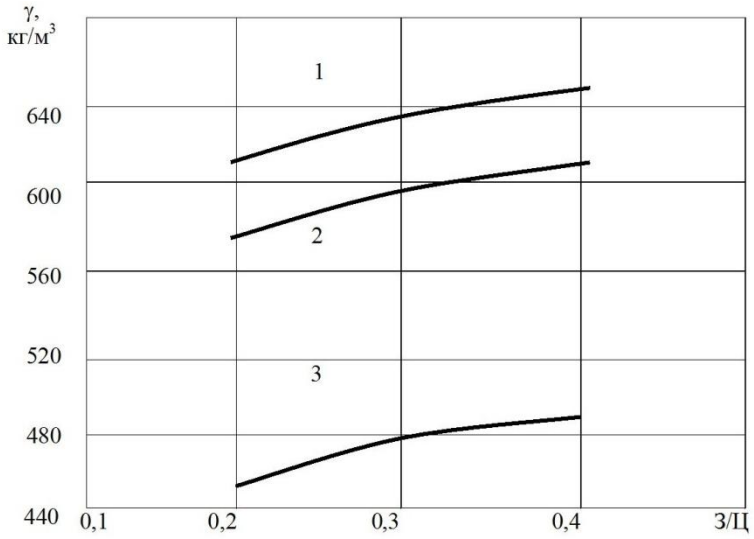


Рис. 1. Зависимости плотности опилкобетона от содержания золы:
1 − Ж/Ц = 0,01; 2 − Ж/Ц = 0,03; 3 − Ж/Ц = 0,05

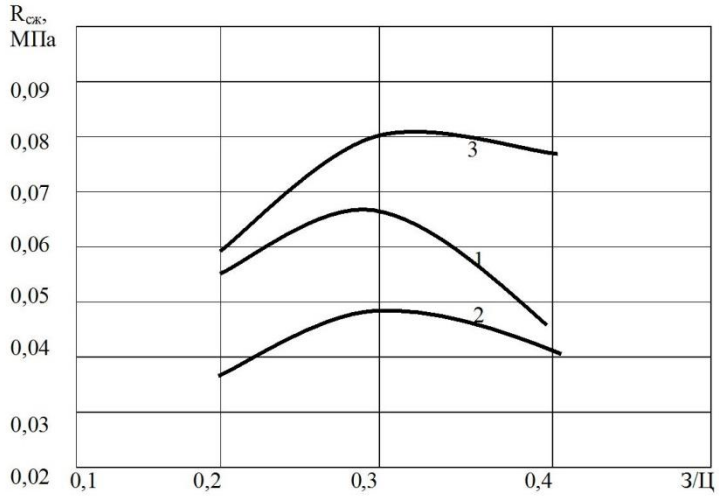


Рис. 2. Зависимости прочности опилкобетона от содержания золы:
1 − Ж/Ц = 0,01; 2 − Ж/Ц = 0,03; 3 − Ж/Ц = 0,05

Зависимости, приведенные на рис. 1, 3, показывают, что с увеличением добавки золы плотность опилкобетона в небольших пределах увеличивается. Более заметно на плотность опилкобетона влияет добавка растворимого стекла, с увеличением которой плотность заметно снижается. При этом дозировка растворимого стекла в количестве 5 % от массы цемента обеспечивает плотность опилкобетона менее 500 кг/м^3, что соответствует требованиям к теплоизоляционным материалам.

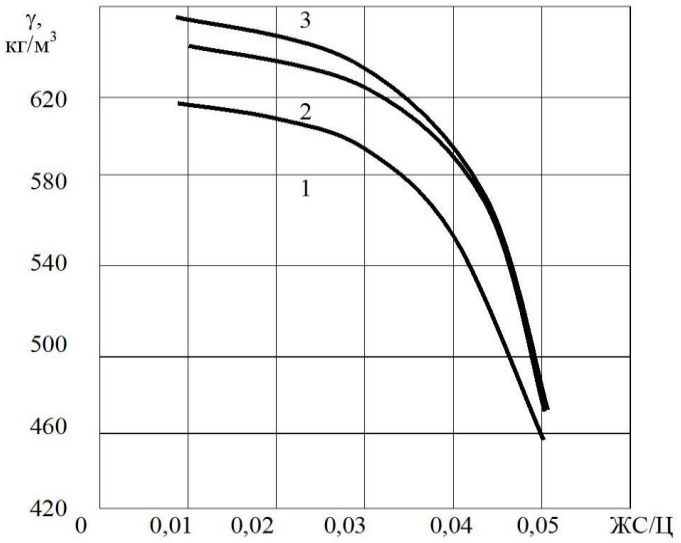


Рис. 3. Зависимости плотности опилкобетона от содержания растворимого стекла:
1 − З/Ц = 0,2; 2 − З/Ц = 0,3; 3 − З/Ц = 0,4

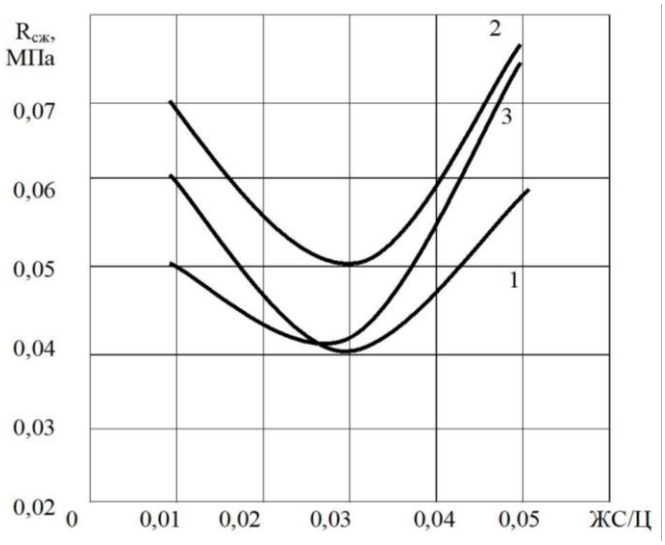


Рис. 4. Зависимость прочности опилкобетона от содержания растворимого стекла:
1 − З/Ц = 0,2; 2 − З/Ц = 0,3; 3 − З/Ц = 0,4

Рис. 2, 4 показывают, что дозировка растворимого стекла 5 % от массы цемента соответствует наибольшей прочности материала почти во всем диапазоне изменения количества золы. При содержании золы 30 % от массы цемента наблюдается максимум

прочности. Это объясняется тем, что при таком содержании зола покрывает поверхность опилок тонким слоем, что обеспечивает наилучшее сцепление опилок с цементом, а следовательно, увеличивается прочность материала. При меньшем содержании золы не обеспечивается необходимая обработка поверхности опилок, а при большем содержании покрытие поверхности опилок более толстое, что ослабляет взаимосвязь их с цементом.

Целью следующего этапа было выявление возможности повышения прочности опилкобетона за счет помола опилок в течение определенного времени. В ходе проведения эксперимента были использованы данные предыдущих этапов по оптимальным дозировкам золы и растворимого стекла (З/Ц = 0,3; Ж/Ц = 0,05). Формование образцов и твердение материала производились по указанной методике. Для увеличения прочности опилкобетона применяли совместный помол опилок и золы, так как зола играет роль минерализатора и активизатора поверхности опилок. Перед помолом отдозированные опилки перемешивали с золой и загружали в лабораторную шаровую мельницу типа МБЛ и подвергали совместному помолу в течение 5, 10 и 15 мин.

Как показывают экспериментальные данные (табл. 3, рис. 5), минимальная плотность образцов достигается при совместном помоле опилок и золы в течение 5 мин. При этом прочность образцов достигает максимума, а их влажность – минимума. При дальнейшем увеличении времени помола прочность снижается.

Таблица 3

Влияние времени помола опилок на свойства опилкобетона

Время помола, мин	Плотность, кг/м^3	Прочность на сжатие, МПа	Влажность, %
Без помола	580	0,094	18
5	560	0,106	17,4
10	620	0,053	19,3
15	765	0,05	23,8

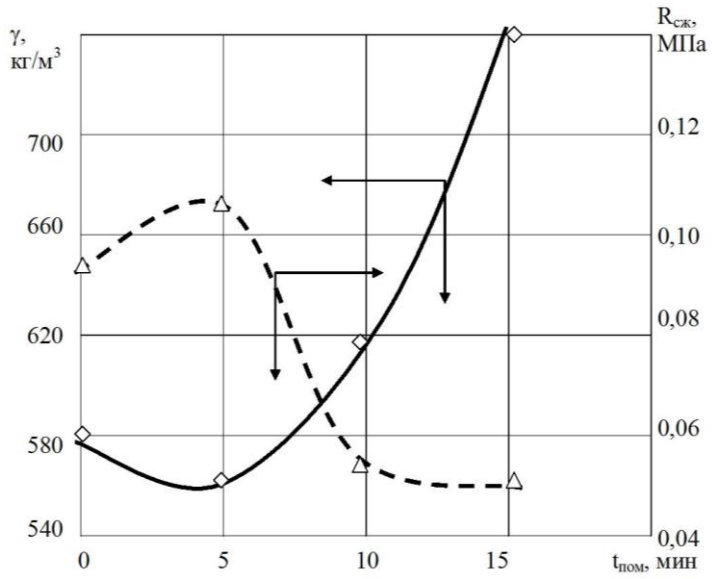


Рис. 5. Зависимости плотности и прочности опилкобетона от времени помола опилок с золой

Таким образом, совместный помол опилок и золы в течение 5 мин оказывает определенное положительное влияние на свойства опилкобетона. Так, плотность снижается на 20 кг/м^3 при некотором увеличении прочности. Микроструктура опилкобетона в этом случае способствует наиболее быстрой сушке.

Цель следующего этапа заключалась в определении влияния водоцементного отношения (В/Ц) на физико-механические свойства опилкобетона. Образцы изготовлялись при значениях В/Ц, равных 1,5; 1,75; 2,0; 2,25; 2,5, что соответствовало следующим значениям водотвердого отношения (В/Т): 0,65; 0,76; 0,87; 0,97; 1,09. После испытания образцов были получены результаты, указанные в табл. 4.

Таблица 4

Влияние В/Ц на физико-механические свойства опилкобетона

В/Ц	Плотность, кг/м^3	Прочность на сжатие, МПа	Влажность, %
1,5	565	0,25	15,3
1,75	573	0,34	15,9
2,0	580	0,22	16,4
2,25	584	0,14	17,0
2,5	590	0,12	17,4

Как показывают экспериментальные данные (рис. 6), плотность образцов постепенно растет при увеличении В/Ц, при этом она изменяется от 568 до 587 кг/м^3. Повышение плотности образцов с увеличением В/Ц объясняется тем, что при этом сырьевая смесь лучше уплотняется.

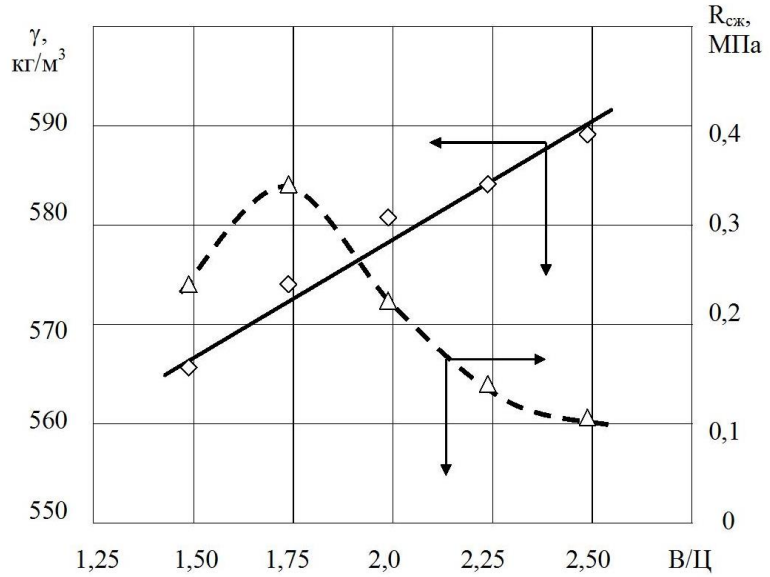


Рис. 6. Зависимости плотности и прочности образцов от В/Ц

При увеличении В/Ц от 1,5 до 1,75 прочность образцов увеличивается, а с дальнейшем увеличением В/Ц прочность резко снижается (см. рис. 6), что можно объяснить смыванием цемента с опилок при большем содержании воды в сырьевой смеси.

Максимальное значение прочности достигается при В/Ц = 1,75 и составляет 0,34 МПа. При этом плотность образцов равна 580 кг/м^3.

Целью следующего этапа являлось установление зависимостей прочности и плотности опилкобетона от предварительной выдержки опилок в воде, которая может обеспечить лучшее налипание цемента, увеличение зоны контакта и ее упрочнение.

Использовался следующий состав смеси: водоцементное отношение – 1,75; опилко-цементное отношение – 1; золоцементное отношение – 0,3; отношение растворимого стекла к цементу – 0,05.

Эксперименты проводились по методике, описанной выше. Отличительной чертой являлся процесс предварительного замачивания опилок. Кинетика замачивания опилок в воде показала, что наибольший рост впитывания воды был в промежутке от 0 до 1 ч. Исходя из этого, замачивание опилок в данных опытах производилось в течение 0, 10, 30 и 60 мин. Измельченные совместно опилки и зола затворялись водой с добавкой растворимого стекла. Через определенные, указанные выше, промежутки времени в замоченные опилки вводили заданное количество цемента, и смесь перемешивали. Формование и твердение образцов производилось по обычной методике.

Данные, полученные в результате эксперимента, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Показатели образцов после эксперимента с предварительным замачиванием опилок

Время замачивания, мин	Средняя плотность, кг/м^3	Прочность на сжатие, МПа	Влажность образцов, %
0	530	0,37	16
10	550	0,415	16,6
30	570	0,45	17,1
60	595	0,515	18

По данным табл. 5 видно, что с увеличением времени замачивания опилок плотность и прочность образцов растут. Плотность образцов растет на протяжении всего времени замачивания опилок в воде (от 0 до 60 мин). При этом плотность изменяется от 530 до 595 кг/м^3. Прочность образцов с увеличением времени замачивания также повышается от 0,37 до 0,515 МПа, что соответствует приросту прочности на 39 %.

Повышение плотности образцов с увеличением времени замачивания можно объяснить ростом влажности образцов с 16 до 18 % и лучшей уплотняемостью смеси, так как плотность образцов в пересчете на сухое вещество также несколько увеличивается. Повышение прочности образцов с увеличением времени замачивания опилок за этот сравнительно небольшой промежуток можно объяснить тем, что водный раствор растворимого стекла лучше пропитывает опилки, улучшает адгезионные свойства их контактной поверхности, а также увеличивает и саму поверхность контакта с вяжущим компонентом. Частицы цемента при этом обволакивают опилки, создавая соответствующую контактную зону. Если выходить за обозначенную цель эксперимента, т. е. получение теплоизоляционного материала с плотностью до 600 кг/м^3, то за счет дальнейшего увеличения времени предварительного замачивания опилок можно, очевидно, добиться дополнительного прироста прочности опилкобетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Максимальная прочность опилкобетона на цементном вяжущем, модифицированном добавками растворимого стекла и золы гидроудаления, достигается при золоцементном отношении, равном 0,3, так как в этом случае зола обеспечивает оптимальное покрытие опилок, что улучшает сцепление и, соответственно, прочность материала возрастает.

Оптимальное содержание добавки растворимого стекла по отношению к массе цемента, равное 0,05, обеспечивает минимальное значение плотности, а прочность при этом увеличивается за счет наиболее прочного сцепления древесных частиц.

Оптимальное время совместного помола опилок и золы – 5 мин, при этом даже малоактивная зола гидроудаления играет роль минерализатора и активизатора поверхности опилок. Плотность образцов при этом минимальна и равна 560 кг/м^3.

Оптимальное значение водоцементного отношения из условия наибольшей прочности материала составляет 1,75, при этом прочность образцов достигает 0,32 МПа.

Улучшение адгезионных свойств контактной поверхности опилок, а также и увеличение самой поверхности их контакта с вяжущим компонентом достигается за счет предварительного замачивания опилок в водном растворе растворимого стекла в течение 60 мин. При этом прочность опилкобетона на сжатие равна 0,515 МПа, а плотность составляет менее 600 кг/м^3 при влажности 18 %. Если выходить за обозначенную цель эксперимента и рассматривать возможности получения конструкционно-теплоизоляционных материалов с плотностью свыше 600 кг/м^3, то за счет дальнейшего увеличения времени предварительного замачивания опилок в водном растворе растворимого стекла можно добиться существенного дополнительного прироста прочности опилкобетона.

Оптимизация состава, а также выявление важнейших технологических факторов позволили обосновать в данной работе возможности получения опилкобетона, соответствующего по основным физико-механическим свойствам требованиям к теплоизоляционным легким бетонам и эффективного в условиях малоэтажного строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудяков А.И. Структурообразование бесцементных вяжущих в композициях с древесным заполнителем // *Известия вузов. Строительство*. 1996. № 8. С. 65–66.
2. Кузнецов А.И., Кривда В.В. О принципах взаимодействия в цементно-древесных композициях на начальных стадиях структурообразования // *Известия вузов. Строительство.* 1993. № 11/12. С. 15–17.
3. Куннос Г.Я. Опилкобетон. Рига, 1960. 68 с.
4. Шушпанов В.А. Принципы организации биоструктур и строительные материалы // *Современные проблемы строительного материаловедения: материалы Международной научно-технической конференции: в 2 ч.* Пенза: ПГАСА, 1998. Ч. 2. С. 79–81.
5. Андреев Е.И. Использование принципов работы биосистем в технологии строительных материалов // *Современные проблемы строительного материаловедения: материалы Международной научно-технической конференции: в 5 ч.* Казань: КГАСА, 1996. Ч. 1. С. 25–27.
6. Соломатов В.И., Селяев В.Д., Черкасов В.П. Перспективы применения биотехнологии в строительстве // *Известия вузов. Строительство*. 1995. № 7. С. 34–38.

7. Лехина Е.П., Соломатов В.И., Черкасов В.Д. Пути повышения эксплуатационных свойств древесных биопластиков // *Современные проблемы строительного материаловедения: материалы Международной научно-технической конференции: в 2 ч.* Пенза: ПГАСА, 1998. Ч. I. С. 40-41.
8. Соломатов В.И., Черкасов В.Д. Создание строительных биокомпозитов из древесного и другого растительного сырья. Сообщение 1 // *Известия вузов. Строительство*. 1997. № 1-2. С. 27–32. Сообщение 3. Там же. 1997. № 3. С. 32–35.
9. Звягин А.И. Теплоизоляционные материалы из макулатуры и отходов деревообработки // *Строительные материалы*. 1999. № 7/8. С. 10–11.
10. Белов В.В. Опилкобетон на бесцементном композиционном вяжущем // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2020. № 3. С. 15–23.
11. Коротаев Э.И., Клименко М.И. Производство строительных материалов из древесных отходов. М.: Лесная промышленность, 1997. 230 с.
12. Оболенская А.В. Химия древесины и полимеров. М.: Лесная промышленность, 1980. 168 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Опилкобетон на модифицированном цементном вяжущем // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 14–25.

SAWBOBETONE ON MODIFIED CEMENT BINDER

V.V. Belov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article considers the principles of production of sawbobetone on cement binder modified with additives of soluble glass and ash of hydraulic removal of local CHP. The material based on the modified cement binder using local secondary raw materials: sawdust as a filler of sawdust and waste ash as a fine filler is effective in low-rise construction conditions.

Keywords: modified cement binder, woodworking wastes, soluble glass and waste ash additives, composition selection, mathematical experiment planning.

REFERENCES

1. Kudyakov A.I. Structure formation of non-cement binders in compositions with wood filler. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo.* 1996. No. 8, pp. 65–66. (In Russian).
2. Kuznetsov A.I., Krivda V.V. On the principles of interaction in cement-wood compositions at the initial stages of structure formation. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 1993. No. 11/12, pp. 15–17. (In Russian).

3. Kyunnos G.Ya. Opilkobeton [Sawbobetone]. Riga, 1960. 68 p.
4. Shushpanov V.A. Principles of organization of biostructures and construction materials. *Modern problems of construction materials science: materials of the International scientific and technical conference*. Penza: PGASA, 1998. Part II, pp. 79–81. (In Russian).
5. Andreev E.I. Use of the principles of operation of biosystems in the technology of construction materials. *Modern problems of construction materials science: materials of the International scientific and technical conference.* Kazan: KGASA. 1996. Part I, pp. 25–27. (In Russian).
6. Kolomatov V.I., Selyaev V.P., Chernasov V.D. Prospects of biotechnology application in construction. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 1995. No. 7, pp. 34–38. (In Russian).
7. Lehina E.P., Solomatov V.I., Chernas V.D. Ways to improve the operational properties of wood biplasts. *Modern problems of construction materials science: materials of the International scientific and technical conference*. Penza: PGASA. 1998. Part I, pp. 40–41. (In Russian).
8. Solomatov V.I., Chernas V.D. Creation of building biocomposites from wood and other vegetable raw materials. Message 1. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 1997. No. 1-2, pp. 27–32. Message 3. In the same place. 1997. No. 3, pp. 32–35. (In Russian).
9. Zvyagin A.I. Heat insulation materials from waste paper and wood processing wastes. *Stroitel'nye materialy*. 1999. No. 7/8, pp. 10–11. (In Russian).
10. Belov V.V. Sawbobetone on a non-cement composite binder. *Vestnik TvGTU*. 2020. No. 3, pp. 15–23. (In Russian).
11. Korotayev E.I., Klimenko M.I. Proizvodstvo stroitel'nyh materialov iz drevesnyh othodov [Production of construction materials from wood waste]. M.: Forestry industry, 1997. 230 p.
12. Obolenskaya A.V. Himiya drevesiny i polimerov [Chemistry of wood and polymers]. M.: Forestry industry, 1980. 168 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V. Sawbobetone on modified cement binder // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 14–25.

УДК 69.07

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

А.В. Бровкин, Р.З. Цыбина, А.В. Кривохижина, Т.Р. Баркая
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Бровкин А.В., Цыбина Р.З.,
Кривохижина А.В., Баркая Т.Р., 2020

Аннотация. В данной статье проводится сравнительный анализ эффективности применения сборно-монолитных перекрытий в условиях нового строительства, обусловленный наличием в строительной отрасли проблемы экономической эффективности применяемых конструкций плит перекрытий. Для здания магазина с административными помещениями проводится расчет и анализ монолитного безбалочного и сборно-монолитного перекрытия конструкции Rectorlight [1].

Ключевые слова: сборно-монолитное перекрытие, монолитное перекрытие, расчет, эффективность, новое строительство.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-26-32

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в строительной отрасли большое внимание уделяется проблеме экономической эффективности. Учитывая тот факт, что железобетонные перекрытия являются одними из наиболее затратных и материалоемких конструкций, очень важен выбор рационального типа перекрытия.

Решением этой проблемы может стать применение сборно-монолитных перекрытий. Сейчас на международном рынке имеется большое количество компаний, занимающихся производством систем сборно-монолитных перекрытий. В России наиболее распространены сборно-монолитные системы «Teriva» (Польша), «YTONG» (Швеция), «Rector» (Франция) и «МАРКО» (Россия).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Представленные выше сборно-монолитные перекрытия отличаются между собой конструкцией сборных балок и элементов заполнения. Но все они имеют общее преимущество над традиционными типами перекрытий: небольшой вес сборных балок позволяет использовать механизмы малой грузоподъемности или вовсе обходиться без них, а малый собственный вес самих сборно-монолитных перекрытий позволяет значительно снизить нагрузку на несущие конструкции. При новом строительстве использование сборно-монолитных перекрытий дает значительную экономию материалов и ресурсов за счет упрощения производства работ.

Учитывая перечисленные выше достоинства сборно-монолитных перекрытий, целесообразно произвести сравнительный анализ с наиболее часто применяемым типом – монолитным безбалочным перекрытием.

В качестве объекта было выбрано здание магазина с административными помещениями, расположенное по адресу: г. Тверь, ул. Хрустальная, д. 35. Здание двухэтажное, прямоугольное в плане с размерами в осях 18×24 м.

В программно-вычислительном комплексе SCAD Office был произведен расчет всего каркаса и выполнен подбор армирования для перекрытия на отметке +3,550 [2]. Общий вид расчетной схемы приведен на рис. 1.

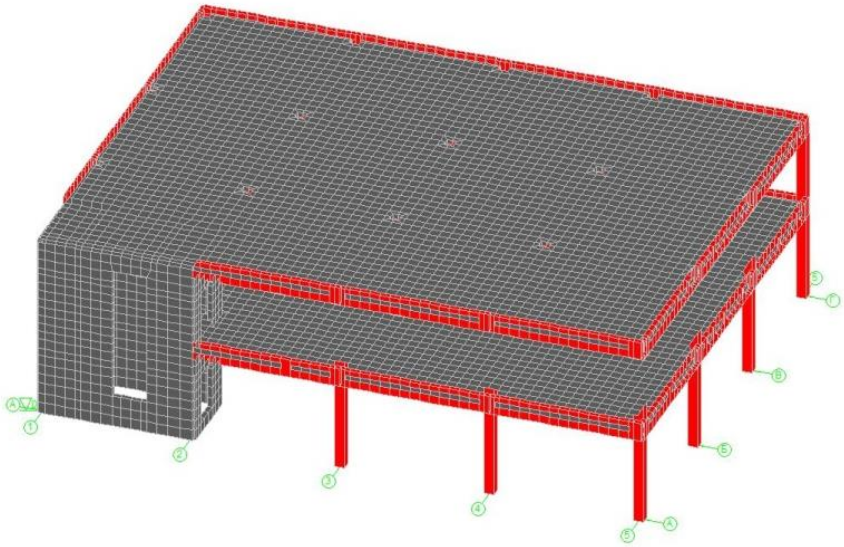


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

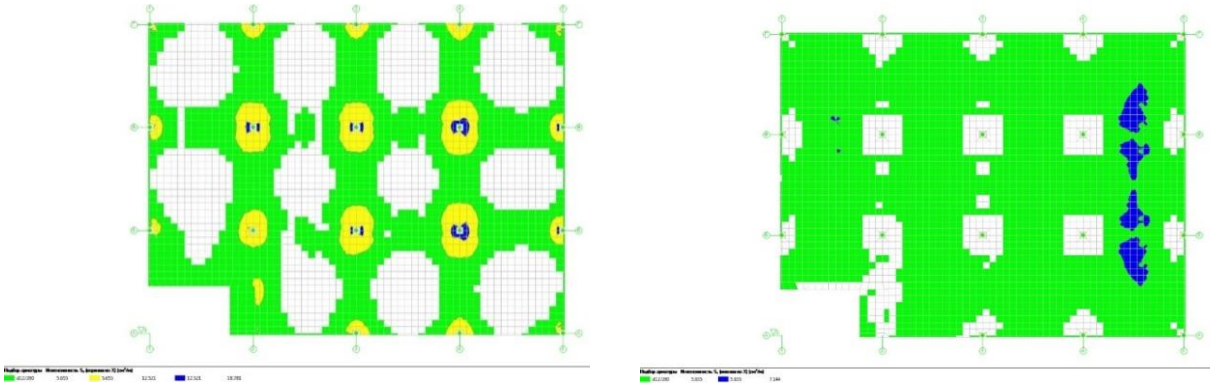
По результатам произведенных расчетов установлено, что для возведения монолитного безбалочного перекрытия необходимо 95,8 м^3 бетона класса В25, 12,53 т арматуры класса А500С и 0,87 т арматуры класса А400. При этом общая масса перекрытия составила 252,9 т.

В результате расчета была принята монолитная плита перекрытия высотой 200 мм из бетона класса В25 и арматуры класса А500С. На рис. 2 и 3 приведены изополя верхнего и нижнего армирования плиты перекрытия по осям X и Y.

В качестве сборно-монолитного перекрытия была выбрана система перекрытий французской компании Rectorlight [1]. Она состоит из сборных предварительно напряженных балок RS136 длиной 5,8 м, элементов заполнения Rectorlight 16 и монолитного бетона толщиной 60 мм. Кроме того, по колоннам выполняются монолитные балки сечением 400×400 мм. Для монолитной части используется бетон класса В25 и арматура класса А500С, А240 и В500.

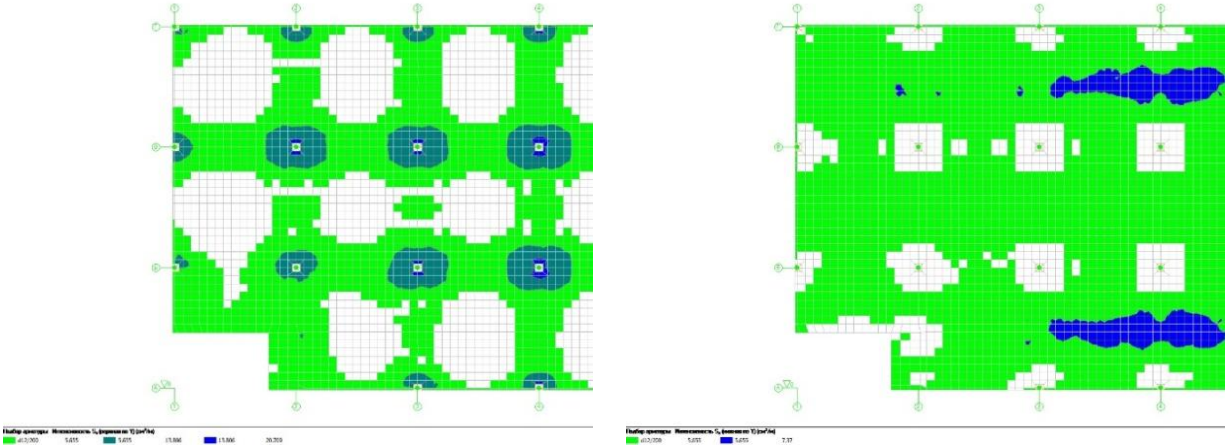
Для расчета выбирается фрагмент сборно-монолитного перекрытия, который рассматривается как изгибаемый и внецентренно-сжатый элемент. Расчет выполняется в соответствии с действующими нормами и правилами и производится в два этапа [3–6]. На первом этапе расчет производится на стадии монтажа, когда сборная балка приведенного таврового сечения рассматривается как неразрезная, воспринимающая нагрузку от элементов сборно-монолитного перекрытия и свежеуложенного монолитного бетона. На втором этапе расчет производится на стадии эксплуатации после набора монолитным

бетоном проектной прочности как для однопролетной балки приведенного двутаврового сечения, состоящего из бетона разных классов. В обоих случаях прочность сечения по первой и второй группе предельных состояний обеспечена.



а б

Рис. 2. Изополя армирования по оси X: а – нижнего; б – верхнего



а б

Рис. 3. Изополя армирования по оси Y: а – нижнего; б – верхнего

По результатам расчета установлено необходимое количество материалов и изделий для возведения данного типа перекрытия: 8,49 кг арматуры и 54,93 м^3 бетона [4, 5]. Общая масса перекрытия составляет 180,3 т.

Общий расход материалов и изделий, необходимых для устройства каждого типа перекрытия, а также общая масса каждого перекрытия представлены в таблице.

Для сравнения типов перекрытий с экономической точки зрения был произведен локальный сметный расчет. Расчет составлен базисно-индексным методом в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 1-й квартал 2020 г. по НБ ТСНБ 2001 Тверской области, утвержденной приказом Министерства строительства Российской Федерации от 05.05.2015 № 337/пр. Также для определения стоимости отдельных позиций используется метод анализа конъюнктуры рынка – мониторинг.

Общий расход материалов и изделий

Тип перекрытия	Составляющие	Наименование	Ед. изм.	Кол-во
Монолитное	Материалы	Бетон B25 W150 F4	$м^3$	95,8
	Изделия арматурные	A240	кг	873,1
		A500C	кг	12 525
	Изделия закладные	C235, δ = 12 мм	кг	11,30
		A500C	кг	4,32
Сборно-монолитное	Материалы	Бетон B25 W150 F4	$м^3$	57,93
	Сборные элементы	Балка RS136	шт.	209
		Элемент заполнения Rectorlight 16	шт.	480
		Заглушка OBT Rectorlight 16	шт.	194
	Изделия арматурные	A240	кг	1 216,4
		A500C	кг	6 468,6
		B500	кг	801,5
	Изделия закладные	C235, δ = 12 мм	кг	8,3
		A500C	кг	2,16

Основные показатели для каждого типа перекрытия, подлежащие сравнению, представлены в виде диаграмм на рис. 4.

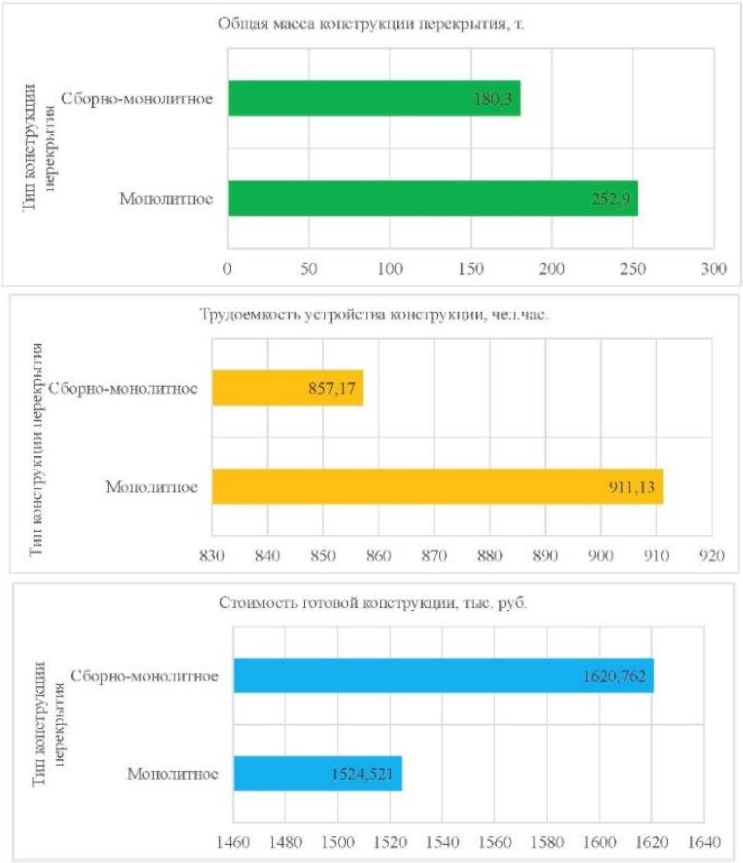


Рис. 4. Диаграммы сравнительного анализа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав полученные данные, можно утверждать, что в данном случае выгодным вариантом с точки зрения массы и трудозатрат является сборно-монолитное перекрытие. Его общая масса составляет 180,3 т, трудоемкость – 857,17 чел.-ч, но на 29 % легче и на 6 % менее трудоемкое, чем монолитное перекрытие, общая масса которого составляет 252,9 т, а трудоемкость – 911,13 чел.-ч.

В ценовом отношении монолитное перекрытие на 6 % экономичнее, чем сборно-монолитное: стоимость его возведения составляет 1 542 521,0 руб, в то время как устройство сборно-монолитного перекрытия обойдется в 1 620 762,0 руб.

Таким образом, несмотря на относительно высокую стоимость, сборно-монолитное перекрытие станет хорошим выбором при новом строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство для проектировщика системы перекрытий RECTORLIGHT. М., 2009. 32 с.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с изменениями № 1, 2): утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 891/пр: дата введения 4 июня 2017 г. URL: http://docs.cntd.ru/document/456044318/ (дата обращения: 15.08.2020).
3. СП 52-103-2003. Железобетонные монолитные конструкции зданий: дата введения 25 декабря 2003 г. М.: ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП, 2004. 22 с.
4. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СП 52-102-2004): дата введения 1 января 2005 г. М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2005. 160 с.
5. СП 337.1325800.2017. Конструкции железобетонные сборно-монолитные. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2017 г. № 1662/пр: дата введения 14 июня 2018 г. URL: http://docs.cntd.ru/document/557350526 (дата обращения: 15.08.2020).
6. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с изменением № 1): утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр: дата введения 20 июня 2019 г. URL: http://docs.cntd.ru/document/554403082 (дата обращения: 15.08.2020).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БРОВКИН Андрей Викторович – доцент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: a.brovkin82@gmail.com

ЦЫБИНА Раиса Захаровна – ст. преподаватель кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: zubina-rz@mail.ru

КРИВОХИЖИНА Альбина Владимировна – магистр кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: kozerog3538@mail.ru

БАРКАЯ Темур Рауфович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Бровкин А.В., Цыбина Р.З., Кривохижина А.В., Баркая Т.Р. Сравнительный анализ эффективности применения сборно-монолитных перекрытий в условиях нового строительства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 26–32.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF PREFABRICATED MONOLITHIC OVERLAPS IN THE CONDITIONS OF NEW CONSTRUCTION

A.V. Brovkin, R.S. Tsybina, A.V. Krivozhina, T.R. Barkaya
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This article provides a comparative analysis of the effectiveness of the use of prefabricated monolithic overlaps in the conditions of new construction, due to the problem in the construction industry of the economic efficiency of the applied structures of slabs Rectorlight of floors.

Keywords: prefabricated monolithic overlap, monolithic overlap, calculation, efficiency, new construction.

REFERENCES

1. Rector's Guide to the Block System Designer. M., 2009. 32 p.
2. SP 20.13330.2016. Loads and impacts. The updated version of the SNIP 2.01.07-85 (with changes № 1, 2): approved and put into effect by the order of the Ministry of Construction and Housing and Utilities of the Russian Federation of December 3, 2016 № 891/p.: the date of introduction of June 4, 2017. URL: http://docs.cntd.ru/document/456044318/ (date of access: 15.08.2020).
3. SP 52-101-2003 Concrete and reinforced concrete structures without prior rebar fixtures: introduction date of December 25, 2003. M.: NIIB, FGUP CPP, 2004. 22 p.
4. Manual for the design of pre-stressed reinforced concrete structures made of heavy concrete (to SP 52-102-2004): introduction date of January 1, 2005. M.: CNII Promzdations, 2005. 160 p.
5. SP 337.1325800.2017. Constructions reinforced concrete prefabricated monolithic. Design rules: Approved and put into effect by the order of the Ministry of Construction and Housing and Utilities of the Russian Federation of December 13, 2017 № 1662/p: the date of introduction of June 14, 2018. URL: http://docs.cntd.ru/document/557350526 (date of access: 15.08.2020).
6. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Key provisions. SNIP 52-01-2003 (change № 1): approved and put into effect: Order of the Ministry of Construction and Housing and Utilities of the Russian Federation dated of December 19, 2018 № 832/p: date of introduction of June 20, 2019. URL: http://docs.cntd.ru/document/554403082 (date of access: 15.08.2020).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BROVKIN Andrey Victorovich – Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: a.brovkin82@gmail.com

TSYBINA Raisa Zakharovna – Lecturer of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: zubina-rz@mail.ru

KRIVOHIZHINA Albina Vladimirovna – Master of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kozerog3538@mail.ru

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Engineering Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Brovkin A.V., Tsybina R.S., Krivozhina A.V., Barkaya T.R. Comparative analysis of the effectiveness of prefabricated monolithic overlaps in the conditions of new construction // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 26–32.

УДК 666.970

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАМЕНЫ ПРИРОДНОГО ЩЕБНЯ НА ВТОРИЧНЫЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА

Ю.Ю. Курятников

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Курятников Ю.Ю., 2020

Аннотация. С применением вторичного щебня фракции 5–20 мм и вторичной щебеночно-песчаной смеси (ЩПС) фракции 0–60 мм, полученных при переработке бетонного лома, разработаны составы бетона классов по прочности В7,5–В22,5. Замена природного щебня на вторичный дает заметный экономический эффект при его использовании.

Ключевые слова: вторичный щебень, вторичная щебеночно-песчаная смесь, бетонный лом, тяжелый бетон, переработка некондиционной продукции, улучшение экологической обстановки.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-32-38

ВВЕДЕНИЕ

В рамках национального проекта «Жилье и городская среда» действует «Адресная программа Тверской области по переселению граждан из аварийного жилищного фонда на 2019–2025 годы», в которую включены 362 многоквартирных дома, признанных

аварийными и подлежащими сносу или реконструкции в связи с физическим износом в процессе их эксплуатации, общей площадью 89,7 тыс. м^2. В результате разборки физически и морально устаревших зданий образуется большое количество лома бетонных конструкций. Специализированные фирмы, оснащенные современным оборудованием для демонтажа зданий и сооружений, производят снос строений с отделением железобетонных изделий от других строительных отходов.

Кроме того, бетонный лом постоянно образуется в результате переработки некондиционной продукции и технологических отходов на заводах сборного железобетона и строительных площадках.

Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов лом железобетонных изделий относят к 5-му классу отходов. Но при захоронении на полигонах такой крупногабаритный строительный мусор требует значительного места и расходов на утилизацию. После переработки бетонный лом содержит большое количество бетонной пыли, относящейся уже к 4-му классу отходов, которая разносится ветром и загрязняет воздух, почву и воду. Строительные свалки, в том числе несанкционированные, появляются и растут с большой скоростью, поэтому необходимо развивать производство по переработке отходов и внедрять новые технологии.

В связи с этим актуальность проблемы переработки и повторного использования строительных отходов, в первую очередь бетонного и железобетонного лома, становится совершенно очевидной. Переработка бетонного лома – это получение дешевых материалов для изготовления железобетонных изделий, сокращение транспортных потоков, связанных с поставкой заполнителей для бетона, сохранность природных ресурсов, улучшение экологической обстановки.

Применение вторичного щебня в качестве заполнителя для бетонов и методы его активации рассматриваются в работах Ю.М. Баженова [1], С.-А.Ю. Муртазаева [2], В.А. Шевченко [3], А.И. Бедова [4] и др. Для повышения прочности бетона применяются многостадийное дробление по «мягкому» режиму с разделением по фракциям, механоактивация смеси, поличастотное виброуплотнение смеси и другие способы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях применяли вторичный щебень, полученный путем переработки железобетонных изделий, которые не соответствуют стандартам и техническим характеристикам. Такие изделия измельчали гидромолотом, отделяли арматурный лом, дробили в специальном дробильном ковше, отбирали фракции 0–60 и 5–20 мм. Дробильный ковш устанавливается на экскаватор. Оборудование состоит из металлической рамы с двумя дробящими щеками, одна из которых подвижная, а вторая – неподвижная. Подвижная щека, соединенная к эксцентриковому валу и маховику, и коленчатый рычаг в верхнем положении создают четырехнаправленное движение таким образом, что подвижная щека смыкается с неподвижной и в то же время создает вертикально-маятниковое движение, способствуя разрушению материала. Вторичный щебень после первичного измельчения и вторичного дробления представлен на рис. 1, 2.

Рис. 1. Щебень после первичного измельчения

Рис. 2. Щебень после вторичного дробления

В исследованиях применяли цемент ПЦ 500 Д0-Н, песок природный средний, щебень природный фракции 5–20 мм, щебень вторичный фракции 5–20 мм, вторичную ЩПС фракции 0–60 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Были изготовлены бетоны классов по прочности на сжатие от В10 до В22,5 на основе продуктов дробления железобетонных изделий. Физико-механические свойства бетонов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства бетонов на основе продуктов дробления железобетонных изделий

Применяемый крупный заполнитель			Осадка конуса, см	Плотность бетона, кг/м^3	Прочность на сжатие, МПа	
Щебень природный 5–20 мм	Щебень вторичный 5–20 мм	ЩПС вторичная 0–60 мм			После тепло-влажной обработки	28 сут при нормальном твердении
Класс бетона по прочности на сжатие В10						
+	–	–	2,5	2 310	10,1	15,2
–	–	+	2,5	2 180	9,9	14,1
Класс бетона по прочности на сжатие В12,5						
+	–	–	4,0	2 335	10,7	22,2
–	+	–	4,0	2 220	8,5	18,8
Класс бетона по прочности на сжатие В15						
+	–	–	7,0	2 355	13,0	23,6
–	+	–	7,0	2 210	9,2	20,4
Класс бетона по прочности на сжатие В20						
+	–	–	6,0	2 340	18,3	28,0
–	+	–	6,0	2 220	14,8	25,6
Класс бетона по прочности на сжатие В22,5						
+	–	–	7,0	2 345	22,4	35,5
–	+	–	7,0	2 210	17,5	32,3

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, замена природного щебня на вторичный при одинаковых расходах цемента, параметрах бетонной смеси и условиях твердения приводит к снижению средней плотности и прочности бетона после тепловлажностной обработки на 1-е сутки твердения до 30 %, марочной прочности до 15 % в зависимости от класса бетона. Снижение средней плотности и прочности свидетельствует о более пористой структуре вторичного щебня и подтверждается данными его водопоглощения. Тем не менее с применением вторичного щебня фракции 5–20 мм и ЩПС фракции 0–60 мм для всех исследуемых составов обеспечивается требуемая марочная прочность бетона.

Для минимизации отрицательного влияния на прочность бетона проводили механоактивацию вторичного щебня путем подбора оптимальных режимов дозирования и перемешивания в смесителе. Результаты представлены в табл. 2. Механоактивация вторичного щебня дает рост прочности бетона до 23 % без дополнительных капиталовложений.

Таблица 2

Сравнение эффективности различных сценариев загрузки материалов

№ п/п	Состав бетонной смеси, кг/м^3				Осадка конуса, см	Плотность бетонной смеси, кг/м^3	Прочность на сжатие, МПа		
	Цемент	Песок	Щебень вторичный	Добавка			Тепловл. обработка	7 сут	28 сут
1.1	250	390	1 450	0 %	5,5	2 165	6,3	11,2	13,7
1.2	**250**	**390**	**1 450**	**0 %**	**5,0**	**2 210**	**8,4**	**13,6**	**16,9**
2.1	350	300	1 400	0,3 %	6,5	2 190	19,7	26,5	30,6
2.2	**350**	**300**	**1 400**	**0,3 %**	**5,5**	**2 250**	**22,3**	**30,7**	**36,9**

Примечания:

1. Замесы № 1.1 и 2.1 выполнялись при классической загрузке всех материалов в бетоносмеситель.

2. Замесы № 1.2 и 2.2 выполнялись при загрузке материалов в бетоносмеситель по специальному сценарию.

3. Специальный сценарий загрузки:

загрузка вторичного щебня в смеситель и предварительное перемешивание;

загрузка в смеситель 2/3 части необходимой воды и перемешивание;

загрузка в смеситель песка, цемента, оставшейся воды и перемешивание.

Механизм действия механоактивации вторичного щебня можно объяснить следующим. При предварительном перемешивании вторичного щебня в сухом виде от него отделяются слабые частицы, которые оказывают отрицательное влияние на процессы, происходящие в контактной зоне цемент – заполнитель. При перемешивании вторичного щебня и воды мелкодисперсные пылевидные частицы переходят в водную фазу. При добавлении в смесь цемента и ее перемешивании частицы цемента находятся во взвешенном состоянии в воде. Далее происходит распределение мелкодисперсных пылевидных частиц между частицами цемента. Затем система пылевидные частицы – цемент осаждается на поверхность зерен заполнителя, т. е. мелкодисперсные пылевидные частицы включаются в цементную матрицу и не образуют прослоек между цементным камнем и зернами заполнителя, что ведет к повышению прочности бетона.

Замена природного щебня на вторичный дает заметный экономический эффект в первую очередь за счет низкой себестоимости вторичного щебня, которая складывается из оплаты труда рабочих, затрат на содержание и эксплуатацию оборудования для дробления. Средняя себестоимость вторичного щебня составляет 553,29 руб. на тонну. Цена природного щебня складывается из закупочной цены и доставки и в среднем составляет 1 046 руб. за тонну, что в 2 раза выше, чем у вторичного щебня. Себестоимость произведенного бетона на вторичном щебне соответственно дешевле аналогичного на природном щебне. В среднем эта разница составила 588 руб. за куб бетона. В табл. 3 представлен расчет себестоимости 1 м^3 полуфабрикатного бетона.

Таблица 3

Расчет себестоимости 1 м^3 полуфабрикатного бетона

Состав 1 м^3 полуфабрикатного бетона	Ед. изм.	Цена без НДС, руб.	(М100) В7,5 на природном щебне		(М100) В7,5 на вторичном щебне	
			Норма расхода, ед./1м^3	Стоимость, руб./м^3	Норма расхода, ед./1м^3	Стоимость, руб./м^3
Цемент ПЦ 500 Д0-Н	т	4 218	0,175	738,2	0,175	738,2
Песок средний	т	292	0,89	260,2	0,62	181,3
Щебень природный 5–20 мм	т	1 046	1,2	1 255,7	–	–
ЩПС из дробленого бетона 0–60 мм	т	553	–	–	1,35	746,9
Изготовление бетона	руб./м^3	412	1	412	1	412
Итого	–	–	–	2 666	–	2 078

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существуют следующие риски и сложности реализации проекта по применению вторичного щебня на предприятиях железобетонных изделий:

1. Указанные расчеты не учитывают затраты на модернизацию бетоносмесительного узла: необходимо иметь свободный дополнительный расходный бункер под вторичный щебень. При его отсутствии необходимо четко планировать формовку на вторичном щебне на определенные дни, чтобы успевать опустошать бункер с одним материалом и засыпать туда вторичный щебень.

2. Для хранения вторичного щебня необходим закрытый склад инертных материалов во избежание пыления и контроля влажности.

3. Себестоимость вторичного щебня сильно зависит от вида, габаритов и возраста перерабатываемых ЖБИ. Балки, лежавшие на земле больше 20 лет и набравшие очень большую прочность, поддаются переработке во много раз сложнее мелкоштучных, тонкостенных изделий.

4. Для отделения щебня фракции более 40 мм, металла, мусора и вторичного песка с пылью, которые ухудшают качество изделий и значительно повышают трудоемкость работ, необходим виброгрохот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю.М., Муртазаев С.-А.Ю. Эффективные бетоны для строительных и восстановительных работ с использованием бетонного лома и отвальных зол ТЭС // *Вестник МГСУ*. 2008. № 3. С. 124–127.
2. Муртазаев С.-А.Ю., Сайдумов М.С., Абдуллаев М.А.-В., Хасиев А.А. Использование механоактивированных отсевов дробления бетонного лома в производстве бетонокомпозитов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2011. № 22. С. 136–140.
3. Шевченко В.А., Шатрова С.А. Исследование возможности получения заполнителя для бетонов из бетонного лома // *Эпоха науки. Технические науки*. 2017. № 9. С. 165–168.
4. Бедов А.И., Ткач Е.В., Пахратдинов А.А. Вопросы утилизации отходов бетонного лома для получения крупного заполнителя в производстве железобетонных изгибаемых элементов // *Вестник МГСУ*. 2016. № 7. С. 91–100.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курятников Ю.Ю. Технико-экономические аспекты замены природного щебня на вторичный при производстве бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 32–38.

TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF SUBSTITUTION OF NATURAL CRUSHED BY SECONDARY CRUSHED IN THE PRODUCTION OF CONCRETE

Y.Y. Kuryatnikov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. With the use of secondary crushed stone of fraction 5–20 mm and secondary crushed stone-sand mixture of fraction 0–60 mm, obtained during processing of concrete scrap, concrete compositions of strength classes B7.5–B22.5 have been developed. Replacing natural crushed stone with a secondary one gives a noticeable economic effect when using it.

Keywords: secondary crushed stone, secondary crushed stone-sand mixture, concrete scrap, heavy concrete, processing of substandard products, improving the ecological situation.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Murtazaev S.-A.Yu. Effective concretes for construction and restoration work using concrete scrap and waste ash from TPPs. *Vestnik MGSU*. 2008. No. 3, pp. 124–127.
2. Murtazaev S.-A.Yu., Saidumov M.S., Abdullaev M.A.-V., Khasiev A.A. The use of mechanically activated screenings of crushing of concrete scrap in the production of concrete

composites. *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2011. No. 22, pp. 136–140.
3. Shevchenko V.A., Shatrova S.A. Investigation of the possibility of obtaining aggregate for concrete from concrete scrap. *Epoch of Science. Technical science*. 2017. No. 9, pp. 165–168.
4. Bedov A.I., Tkach E.V., Pakhratdinov A.A. Issues of recycling waste concrete scrap to obtain a large aggregate in the production of reinforced concrete bent elements. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 7, pp. 91–100.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Y.Y. Technical and economic aspects of substitution of natural crushed by secondary crushed in the production of concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 32–38.

УДК 316.334

АРХИТЕКТУРНАЯ СРЕДА: ПРОСТРАНСТВА, ТЕРРИТОРИИ, ЛОКУСЫ

В.В. Федоров
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Федоров В.В., 2020

Аннотация. Рассматривается структурная организация архитектурной среды города, включающей территории, пространства, локусы. Показано, что архитектурной среде исторического центра города свойственны особые предметно-пространственные включения – локусы власти. Сложная динамика взаимообусловленности социального бытия и архитектурной среды определяет актуальность изучения взаимодействия локуса (архитектуры) власти и социума. Рассматриваются базовые черты архитектуры власти: социотехнический характер, особенности функционирования, упорядоченность структуры. Анализируются достоинства и общественное значение архитектуры власти, латентные черта функциональной структуры, диахрония композиционных свойств и принципов обеспечения замкнутости. Потенциал влияния власти, использующей семантику архитектуры, соотносится с процессами реализации алгоритмов обитания, распространения, доминирования. Трансформация статуса архитектурного пространства власти рассматривается не только как архитектурно-планировочное преобразование, а как изменение его семантики и отношения к нему. Утверждается, что концептуализация локуса (утверждение аутентичности) конвертируется в популярность, влияние, экономический рост населенного места. Общественное значение локусов власти заключается в их способности предметно-пространственного моделирования социальной

действительности; формировании потенциала снятия социального напряжения; подсказке вариантов поведения социальных акторов в нестандартных ситуациях. Отмечается, что для современных пространств власти характерен постепенный отказ от традиционной замкнутости в пользу имитируемой открытости. Констатируется, что образ архитектурного пространства власти представляет собой один из ракурсов социально-исторического портрета власти.

Ключевые слова: город, архитектурная среда, территория, пространство, локус, трансформация локусов власти, социосемиотика архитектуры.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-38-47

Архитектура, пронизанная многовековыми традициями, представляет собой наиболее сложное из пластических искусств, сплав изменчивых представлений о «пользе, прочности, красоте» (Витрувий). В техническом отношении предметно-пространственное наполнение городской среды вот уже на протяжении четырех веков лишено фундаментальных инноваций [1, с. 544]. По сути, используются все те же материалы, конструктивные и объемно-планировочные решения.

Жизненный цикл опорных объектов городской среды измеряется десятилетиями/столетиями. И эти «вечные» архитектурные тексты (их морфо-функциональное содержание) по-новому прочитываются следующими поколениями. Одновременно эволюционируют представления о комфортной среде, например для жилища это неизбывный интерес к интимной стороне жизни (меняются размеры, пропорции и количество помещений, приходящихся на одного человека, в центре внимания попеременно оказываются коридоры-коммуникации или «перетекающие» пространства и т. д.).

Глобальные изменения действительности (рост социальной напряженности, обусловленный проблемами межэтнических и межрасовых отношений, климатические сдвиги, состояние экономик, пандемия COVID-19 и пр.) определяют актуальность взгляда на ситуацию сквозь призму пространственных отношений. В частности, это позволяет рассматривать отношения социума и власти как особым образом организованных пространств. Понимание различных граней взаимодействия *пространства социального* и *пространства власти* более полно раскрывает их структуру и содержание, типы взаимовлияний, характер связей между ними. И если территория может быть определена как часть окружающего мира (среда, допускающая существование на ней жизни, обеспечивающая ее ресурсами), то *пространство – это способ организации территории для конкретных видов жизнедеятельности* [2; 3]. Иными словами, «пространство» может трактоваться как *социальная реальность, спроецированная на территорию*. Пространство создается человеком в процессе обустройства жизни, функционально организует ее разные сферы (хозяйственно-бытовую, правовую, рыночную, социальную и, конечно, властных отношений).

Одна из первых в истории человечества городская площадь, воплощавшая идею власти, появилась в ходе перестройки центрального ядра Вавилона в начале VI в. до н. э. Позже символ «центр власти» утрачивает материальность, воспринимается как результат взаимодействия зданий, сооружений и пространственных пауз между ними. Например, греческие центральные площади (агоры) охватывались по периметру портиками, колоннады которых идеально упорядочивали «пустое» пространство, наполняя его

значением. Очень четко центральное и особое положение власти выражалось в барочной архитектуре Рима, где площадь не сливается с городом, а отделена от него и живет самостоятельной жизнью.

Структура пространственного распределения власти (легитимно присвоенных возможностей управления, неравных возможностей доступа к благам, их материальному и символическому присвоению) представляет собой объективированную форму борьбы за пространственную мобильность между столицей и провинцией; агломерациями; локусами (участками иерархизированного городского пространства) и пр. Общество воспринимает локализацию как показатель успеха или поражения индивида, социальной или этнической группы [4, с. 27; 5; 6]. Борьба за пространство может осуществляться и на индивидуальном, и на коллективном уровнях. Ее итог – локус власти (место бесспорного пространственного господства) – одна из привилегированных форм феномена власти, материализация социальной траектории.

Исторически сложилось так, что в центре средневекового европейского города обычно располагалась рыночная площадь, а на ней или же неподалеку стояли здания городского магистрата (ратуша) и главной городской церкви (в епископских городах – собора). Здесь располагались резиденции различных ветвей власти, концентрировались ее организационные структуры. Храмы (с колокольнями) и ратуши (с традиционными часовыми башнями) всегда превосходили окружающую застройку своей высотой, имели крупные членения, свойственные архитектуре общественных зданий, выразительный силуэт, богато украшенные фронтоны и пр. Приближаясь к городу, можно было издалека определить расположение архитектурной доминанты исторического центра города – локуса власти.

Современный город (как территория) оберегает свой исторический центр, где наиболее очевидным образом смешиваются функции и население. И только локус власти не допускает подобного смешения, поскольку подчинен выполнению преимущественно властной функции. При таком подходе локус власти рассматривается как *«монофункциональный» оператор пространства социального бытия и, конечно, не сводится к понятиям топографии и ландшафта*. Пространственная организация рассматриваемого феномена навязывает субъекту восприятия взгляд «издалека» и «снизу вверх». Однако доминирование такого ракурса неизбежно вносит помехи в результат восприятия и понимания, а главное, противоречит идее целесообразности и утилитарности городской среды.

Феномен локуса власти пронизывает все иерархические уровни антропогенных пространств, воспроизводя себя на каждом из них; предполагает взаимодействие различных аспектов его восприятия и осмысления (перцептивного, иконического, лингвистического, символического, онтологического и пр.). Отправной точкой рефлексии пространства власти являются место, время, социальная динамика, а также мораль, память, душевные порывы и пр. Мировоззрение человека центрировано, следовательно, условием (фундаментальной необходимостью) рефлексии и принятия существующего порядка вещей является константная топография населенного места – положение локуса власти (обязательно в центре, выше селитьбы и других функциональных зон).

В ходе истории города нередко получали право самоуправления и личную свободу для своих граждан. В свободном поселении власть обычно принадлежала выборному совету – магистрату, все места в котором де-факто делились исключительно между членами богатейших семейств. Добившись независимости, города подчиняли себе

большие территории вокруг, жителям которых отныне приходилось работать на городские республики точно так же, как раньше на суверенов. Менялся субъект власти, но не структура архитектурного пространства.

Идея природно-пространственной обусловленности становления и социокультурного развития антропогенной среды (включая пространства власти) не встречает каких-либо убедительных возражений. Бесспорно, потенциал влияния власти является естественным продолжением реализации алгоритмов обитания, распространения, доминирования. Чем сложнее арсенал задействованных архитектурных средств и приемов организации пространства, тем богаче семантика среды (результат коннотации). Поэтому трансформация статуса архитектурного пространства власти означает не переустройство, а радикальное изменение отношения к нему. Соответственно, новая концептуализация локуса (утверждение аутентичности) конвертируется в популярность, влияние, экономический рост. Яркий пример – возвращение столичного статуса Берлину после объединения ФРГ и ГДР, когда в полной мере сработал эффект новации-самоидентификации, новации-возрождения (реновация рейхстага, масштабная санация селитебных территорий и пр.).

Архитектурное пространство власти – удачно расположенный в центре города, ухоженный, тщательно контролируемый и малопосещаемый горожанами (туристы не в счет) фрагмент городской ткани – вызывает очень сложные чувства, которые во многом обусловлены не только и не столько архитектурными достоинствами, но, прежде всего, социально-политической обстановкой в стране или регионе. По сути, речь идет о восприятии не просто архитектурной среды, но шире – социально-исторического портрета власти (и не только актуально действующей).

Веками на социально-историческом портрете архитектурных пространств власти обнаруживаются одни и те же черты [6–10]:

1. Достоинства архитектуры власти:

а) организация точек/зон контакта для продуктивной коммуникации власти и общества;

б) стабильность в критические моменты истории;

в) постоянная готовность к функционированию (иногда даже в руинированном состоянии);

г) следование господствующей морали и общепринятым канонам.

2. Общественное значение локусов власти заключается:

а) в их способности предметно-пространственного моделировании социальной действительности;

б) использовании технологий снятия социального напряжения;

в) подсказке вариантов поведения социальных акторов в нестандартных (конфликтных) ситуациях.

3. Атрибутивной, но латентной чертой пространств власти является учет возможности силового воздействия (нападения, переворота, свержения). Чувство опасности, не оставляющее архитектора и власть (в роли заказчика), всегда заставляло думать о необходимости сооружения: ранее – крепостных стен, башен, рвов/валов; сегодня – художественно выполненных оград (по сути, тех же крепостных стен и заборов), тайных ходов, секретных линий метрополитена и пр.

4. Более сложная организация пространства, особый масштаб зданий и сооружений, привлекающий всеобщее внимание и находящийся вне публичной критики.

5. Сдержанный характер пластических форм, строгость светоцветовых и фактурных решений (основные черты – отвлеченность, геометричность, нефигуративность).

Современные пространства власти постепенно отказываются от композиционных средств и принципов обеспечения пространственной изолированности (замкнутости) в пользу старательно имитируемой открытости (прозрачности). Создаются масштабные открытые, перетекающие пространства интерьеров, неотделимые от внешнего окружения, и одновременно – максимально закрытые рабочие помещения, потаенные, расположенные ниже дневной поверхности, защищенные с помощью самых современных технических средств от любого внешнего контроля, тем более от покушения.

В процессе своего функционирования архитектурные пространства власти включены в процессы социального бытия, следовательно, постоянно претерпевают некие трансформации, обусловленные изменениями социального контекста. Длительный жизненный цикл зданий и сооружений в структуре локусов власти означает их историческое предметно-пространственное постоянство, поэтому неизбежные изменения пространства власти носят содержательный, ценностно-смысловой, но не архитектурно-ландшафтный характер.

Какие-то черты достаточно просто стираются с портрета власти (локуса власти). Скажем, в течение одной ночи надпись «Ленин и Сталин» (1953–1961) на мавзолее В.И. Ленина укоротилась вдвое, вернувшись к своей изначальной форме «Ленин». В то же время в силу ряда обстоятельств само здание мавзолея В.И. Ленина сегодня физически неустранимо, поэтому в моменты проведения торжественных мероприятий на Красной площади Москвы оно вынужденно драпируется и маскируется мобильными трибунами.

Формирование архитектурных пространств не ограничивается средствами формальной эстетики (равновесием, ритмом, светом, цветом и пр.) и особенностями индивидуального видения мира субъектом восприятия. Смысл архитектуры всегда находится за пределами ее физических свойств, поэтому очень важно чувство сопричастности человека к происходящему, т. е. социальная роль, предлагаемая (освоенная) в этой ситуации. Обнаруживаемые при этом значения локуса являются прежде всего следствием идентификации его достоинств. Так, семантика пространства власти отличается от результатов «потребления» селитебной территории уже в силу различных масштабов и времени нахождения в ней человека. В среде повседневного пребывания многие значения «стираются», воспринимаются как нечто само собой разумеющееся. И, напротив, эпизодическое погружение в пространство власти усиливает, обостряет его коммуникативную функцию.

Чаще всего речь не идет о каких-то принципиально новых решениях, скорее об использовании гипертрофированных размеров, непривычных сочетаний и пр. Во-первых, это использование особых, функционально не обусловленных размеров (габаритов, высоты, уровней расположения) элементов предметно-пространственного наполнения архитектурных пространств власти. Во-вторых, почти обязательные грандиозные атриумы, применение этажей преувеличенной высоты, большие размеры и особый характер размещения и пропорций дверных/оконных проемов в зданиях. В-третьих, обнаружение «оптимальной меры сложности» архитектурных решений (степень упорядоченности, характер членения фасадных поверхностей, использование непривычных стилистических приемов, деталей и пр.).

Места дислокации власти демонстративно наполнены значениями как никакой другой фрагмент городской среды. Их визуальная социосемиотика обеспечивает

необходимый набор стимулов восприятия, понимания и присвоения важной для социума информации. Именно здесь создаются наиболее продуктивные формы контактов между людьми и социальными группами. Заметим в этой связи, что в момент массовых митингов самые обычные городские площади современного города на время приобретают функциональность и статус традиционных пространств власти. Всегда и везде оппозиция стремится провести мероприятие в пределах официально признанных пространств власти, тем самым придавая им особое звучание. Значение происходящего зависит не только от количества участников, но и от локации (например, очевидны различия в характере информации о массовом мероприятии на центральной площади города или на его окраине).

Феномен власти (как асимметрия влияния) предполагает существование на территориях исторических центров крупных поселений неких локусов – архитектурных пространств власти, которые являются наиболее важными составляющими ее символизма [8, с. 184]. Во-первых, это особого рода социотехнические системы, объединяющие предметно-пространственные, архитектурно-ландшафтные, семиотические, мифосимволические и социальные элементы. Во-вторых, они несут особого рода функциональные черты, связанные с приведением социальных организмов различного масштаба в состояние упорядоченности (распределения функций, формирования связей, координации деятельности и пр.). В-третьих, они сами имеют особым образом упорядоченную структуру (иерархию соотношения элементов целого, их демонстративную связь и соподчинение, периодическую элиминацию).

Локус власти экстерриториален, предстает как символ островного мира, где из суеты обыденности человек попадает в зону торжественного спокойствия (часто лишь старательно имитируемого). Особая тема – тысячелетиями отработанная практика воплощения властных отношений в храмовой архитектуре, когда пространство площади становится развитием и продолжением храма. И это воплощение церковной власти не нуждается в массовом зрителе, достаточно служителей, замкнутых в нем.

Сложная динамика взаимообусловленности социального бытия и архитектурной среды диктует актуальность изучения взаимодействия социально-исторического портрета локуса власти и социума. В современном мире *дух локуса власти* (дух места, genius loci – по Л.Б. Альберти [8, с. 100]) следует искать в том, что называется «массовым сознанием», т. е. в воспоминаниях, представлениях, запретах, культах, мифах и пр. Семантика локуса власти надстраивается значениями богатого ассортимента атрибутов власти, свойственных форме ее организации и историческому периоду.

Гламурность и демонстрация благополучия рождают в обществе элементы радикального скептицизма по отношению к власти и ставят под вопрос (в идеале решаемый демократическими средствами) само ее существование. В любой социальной системе представители власти и носители престижа регулярно осмеиваются, неизбежно теряют со временем уровень поддержки населения. Сентиментальное и оптимистическое отношение к власти не приживается в современном обществе на длительный срок. Все эти особенности восприятия власти (политической, экономической, церковной) не угрожают ей напрямую, но акцентируют то обстоятельство, что натурализация властных отношений никогда не бывает «долгоиграющей» или окончательной. Отсюда следует понимание необходимости не только регулярной смены «лица» власти, но и ее архитектурно-ландшафтной «упаковки».

Актуальная проблема формирования и функционирования локусов власти является открытой для междисциплинарных исследований [11–18]. Понимание ситуации способно создать для нас преимущества (по крайней мере, в некоторых обстоятельствах), расширив наше сознание, а следовательно, и путь к ее позитивным изменениям. Символическая креативность (в рассматриваемом контексте – процесс создания, развития и руинирования архитектурно-ландшафтных символов власти) – атрибутивная черта любого социума. К сожалению, в современной практике российского государственного управления возможности оперирования локусами власти (например, даже самое простое – использования потенциала децентрализации столичных функций) осознаются далеко не в той мере, как они того заслуживают.

ВЫВОДЫ

1. Системный взгляд на структуру и содержание феномена архитектурной среды предполагает выделение и исследование таких концептов, как территории, пространства и локусы, т. е. рассмотрение действительности преимущественно сквозь призму пространственных отношений.

2. Территория поселения – часть окружающего мира, среда допускающая существование на ней жизни, обеспечивающая ее ресурсами.

3. Архитектурное пространство – способ организации территории населенного места для определенного набора видов жизнедеятельности, т. е. социальная реальность, спроецированная на территорию. Возникает в процессе обустройства городской среды, функционально организует ее разные сферы (хозяйственно-бытовую, правовую, рыночную, социальную и др.).

4. Локус доминирующей функции рассматривается как оператор пространства социального бытия, но не сводится к понятиям топографии и ландшафта.

5. Важно, что в структурно-организационном отношении территории, пространства и локусы не ограничиваются рамками релевантности (т. е. не обладают подобием элементов, составляющих «матрешку» пространства бытия). Речь идет скорее о различных ракурсах феномена архитектурной среды, позволяющих рассматривать взаимоотношения социальных групп как особым образом организованных пространств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шоню П. Цивилизация классической Европы. Екатеринбург: У-Фактория, 2005. 608 с.
2. Косолапов Н.А. Глобализация: территориально-пространственный аспект // *Мировая экономика и международные отношения.* 2005. № 6. С. 3–13.
3. Штомпка П. Социология социальных изменений. М.: Аспект Пресс, 1996. 416 с.
4. Аркин Д.Е. Образы архитектуры и образы скульптуры. М.: Искусство, 1990. 664 с.
5. Бурдье П. Социология социального пространства. М.: Институт экспериментальной социологии; СПб.: Алетейя, 2007. 432 с.
6. Бурдье П. Физическое и социальное пространство: проникновение и присвоение. URL: http://bourdieu.name/content/fizicheskoe-i-socialnoe-prostranstva (дата обращения: 17.08.2020).
7. Зиммель Г. Большие города и духовная жизнь // *Логос.* 2002. № 3 (34). С. 23–34.
8. Альберти Л.Б. Десять книг о зодчестве: в 2 т. М.: Всесоюзная академия архитектуры, 1935. Т. 2. 416 с.
9. Федоров В.В. Мифосимволизм архитектуры. М.: КомКнига, 2006. 264 с.
10. Федоров В.В. Архитектурный текст: очерки по восприятию и пониманию городской среды. М.: Ленанд, 2016. 226 с.

11. Левиков А.В. Взаимообусловленность динамики социального бытия и архитектурной среды: дисс. … канд. филос. наук. М., 2017. 168 с.
12. Федоров В.В., Федоров М.В. Городские пространства власти // *ПРАКСЕМА. Проблемы визуальной семиотики.* 2018. № 3. С. 170–178.
13. Савчук В.В. Топологическая рефлексия. М.: Канон+, 2012. 424 с.
14. Наберушкина Э.К., Сорокина Н.В. Картографирование доступности городской среды // *Журнал исследований социальной политики.* 2016. Т. 10. № 1. С. 27–42.
15. Локус власти. Архитектура правительственных учреждений экстерриториальных зон Китая (1860–1930 гг.) // *Новые идеи нового века.* 2014. № 1. С. 246–254. URL: pnu.edu.ru/nionc/pub/articles (дата обращения: 02.08.2020).
16. Обирин А.И. Неравенство в пространстве города: пространственная сегрегация // *Вестник ТОГУ. Социология и философия.* 2011. № 1 (20). С. 223–230.
17. Коськов М.А. Архитектурные образы власти. URL: http://philosophy.lengu.ru (дата обращения: 02.08.2020).
18. Демос-версия: актуальные примеры архитектуры власти для народа. URL: https://archspeech.com/article/demos-versya (дата обращения: 04.08.2020).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ФЕДОРОВ Виктор Владимирович – д-р культурологии, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vvf322@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Федоров В.В. Архитектурная среда: пространства, территории, локусы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 38–47.

ARCHITECTURAL ENVIRONMENT: SPACES, TERRITORIES, LOCIS

V.V. Fedorov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The structural organization of the city's architectural environment, including territories, spaces, and loci, is considered. It is shown that the architectural environment of the historical center of the city is characterized by special subject-spatial inclusions-loci of power. The complex dynamics of the interdependence of social existence and the architectural environment determines the relevance of studying the interaction of the locus (architecture) of power and society. The basic features of the architecture of power are considered: sociotechnical character, features of functioning, orderliness of the structure. The author analyzes the advantages and social significance of the power architecture, the latent features of the functional structure, the diachrony of compositional properties and the principles of ensuring closeness. The potential influence of power using architecture semantics is correlated with the processes of implementing algorithms for habitation, distribution, and dominance. The transformation of the status of the architectural space of power is considered not only as an architectural and planning transformation, but also as a change in its semantics and attitude to it. It is argued that the

conceptualization of the locus (the assertion of authenticity) is converted into the popularity, influence, and economic growth of the locality. The social significance of loci of power is in their ability to subject-spatial modeling of social reality; in the formation of the potential for relieving social tension; in prompting the behavior of social actors in non-standard situations. It is noted that modern spaces of power are characterized by a gradual rejection of traditional closeness in favor of simulated openness. It is stated that the image of the architectural space of power is one of the angles of the socio-historical portrait of power.

Keywords: city, architectural environment, territory, space, locus, transformation of loci of power, sociosemiotics of architecture.

REFERENCES

1. Shony P. The Civilization of classical Europe. Ekaterinburg: U-Factoria, 2005. 608 p.
2. Kosolapov N.A. Globalization: territorial and spatial aspect. *World economy and international relations.* 2005. No. 6, pp. 3–13. (In Russian).
3. Shtompka P. Sociology of social changes. M.: Aspect Press, 1996. 416 p.
4. Arkin D.E. Images of architecture and images of sculpture. M.: Iskusstvo, 1990. 664 p.
5. Bourdieu P. Sociology of social space. M.: Institute of experimental sociology; SPb.: Aleteia, 2007. 432 p.
6. Bourdieu P. Physical and social space: penetration and appropriation. URL: http://bourdieu.name/content/fizicheskoe-i-socialnoe-prostranstva (date of access: 17.08.2020).
7. Simmel G. Big cities and spiritual life. *Logos.* 2002. № 3 (34), pp. 23–34.
8. Alberti L.B. Ten books about architecture: in 2 vol. M.: All-Union Publishing house. Acad. archit., 1935. Vol. 2. 416 p.
9. Fedorov V.V. Mythosymbolism of architecture. M.: Komkniga, 2006. 264 p.
10. Fedorov V.V. Architectural text: Essays on perception and understanding of the urban environment. M.: Lenand, 2016. 226 p.
11. Levikov A.V. Iinterconditionality of dynamics of social existence and architectural environment: diss. ... Cand. of Philos. Sc. M., 2017. 168 p.
12. Fedorov V.V., Fedorov M.V. Urban spaces of power. *PRAXEMA. Problems of visual semiotics.* 2018. № 3, pp. 170–178.
13. Savchuk V.V. Topological reflection. M.: Kanon+, 2012. 424 p.
14. Naberushkina E.K., Sorokina N.V. Mapping accessibility of the urban environment. *Journal of social policy research.* 2016. Vol. 10. № 1, pp. 27–42.
15. Locus of power. Architecture of government institutions of extraterritorial zones of China (1860–1930). *New ideas of the new century.* 2014. № 1, pp. 246–254. URL: pnu.edu.ru/nionc/pub/articles (date of access: 02.08.2020).
16. Obirin A.I. Inequality in the city space: spatial segregation. *Bulletin of the TOGU. Sociology and philosophy.* 2011. No. 1 (20), pp. 223–230.
17. Koskov M.A. Architectural images of power. URL: http://philosophy.lengu.ru (date of access: 02.08.2020).
18. Demos-version: actual examples of the architecture of power for the people. URL: https://archspeech.com/article/demos-versya (date of access: 04.08.2020).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
FEDOROV Victor Vladimirovich – Doctor of Cultural Sciences, Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vvf322@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE
Fedorov V.V. **A**rchitectural environment: spaces, territories, locis // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 38–47.

УДК 69.035.2

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ГОРНО-ТУРИСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СЕВЕРНОГО КАВКАЗА «У ПОДНОЖЬЯ ВЫСОТ “ЗОРКИЙ”»

С.В. Черемных
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Черемных С.В., 2020

Аннотация. В статье рассматривается один из наиболее оптимальных вариантов развития горной местности – формирование среды для развития предпринимательской деятельности на основе создания туристических комплексов. Чеченская Республика изобилует многочисленными памятниками культуры. Однако как бы ни была красива дикая природа, местность, освоенная людьми, должна развиваться. Достичь этого можно, обеспечив занятость трудоспособного населения, что является неотъемлемой составляющей для экономического развития Республики и России. Учитывая специфику горных территорий, необходимо принять комплекс мероприятий для развития горных районов, в том числе на основе опыта других стран.

Ключевые слова: стержневая система, металлические конструкции, ветроэнергетические установки, солнечные модули, аккумуляторы, энергетика, модульная конструкция.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-47-56

ВВЕДЕНИЕ

Месторасположение горно-туристического комплекса

Село Макажой Веденского района Чеченской Республики в переводе с чеченского означает «у подножья высот (гор)». Село расположено выше слияния рек Ансалта и Ахкете, в 57 км к югу от села Ведено, в 125 км от Грозного. Является административным центром Макажойского сельского поселения, а также родовым селением тейпа Макажой. Оно долгое время было крупным центром чеченского тукхума Чеберлой. Исторически чеберлоевцы проживали в юго-восточной части Чечни на границе с Дагестаном, а своим духовным центром они издревле считали аул Макажой. В этом месте сохранились такие памятники археологии, как Макажойские башенные постройки (XII–XVI вв.) [1, 2].

Невероятной красоты первозданная природа, древние родовые башни и поселения, традиционное гостеприимство и необычная местная кухня – все это в совокупности является отличным условием для приятного и познавательного времяпрепровождения. Поэтому именно здесь, по мнению автора проекта, может находиться экологичный гостиничный комплекс, сочетающий исторический изысканный архитектурный стиль с современными решениями, в том числе связанными с возобновляемой энергетикой.

В большинстве случаев неотъемлемой частью привлекательности той или иной постройки является его внешний вид. Архитектурный стиль постройки должен удивлять, заставлять восхищаться, а самое главное, быть спроектированным в соответствии с окружающей местностью. К наиболее распространенным архитектурным стилям зданий, расположенным в горах, можно отнести кикладский стиль греческой архитектуры, французский прованс, или стиль Лазурного Берега, а также скандинавский стиль [3–6]. Однако сначала стоит увидеть топографический план рассматриваемой местности. Среди величественных кавказских хребтов сама природа создает уникальное по своей структуре место, ландшафт которого вызывает чувство восторга! Облик горного орла, воцарившегося на вершине Кавказа, летящая хищная птица с расправленными крыльями, размах которых в плане достигает до 19 км (рис. 1).

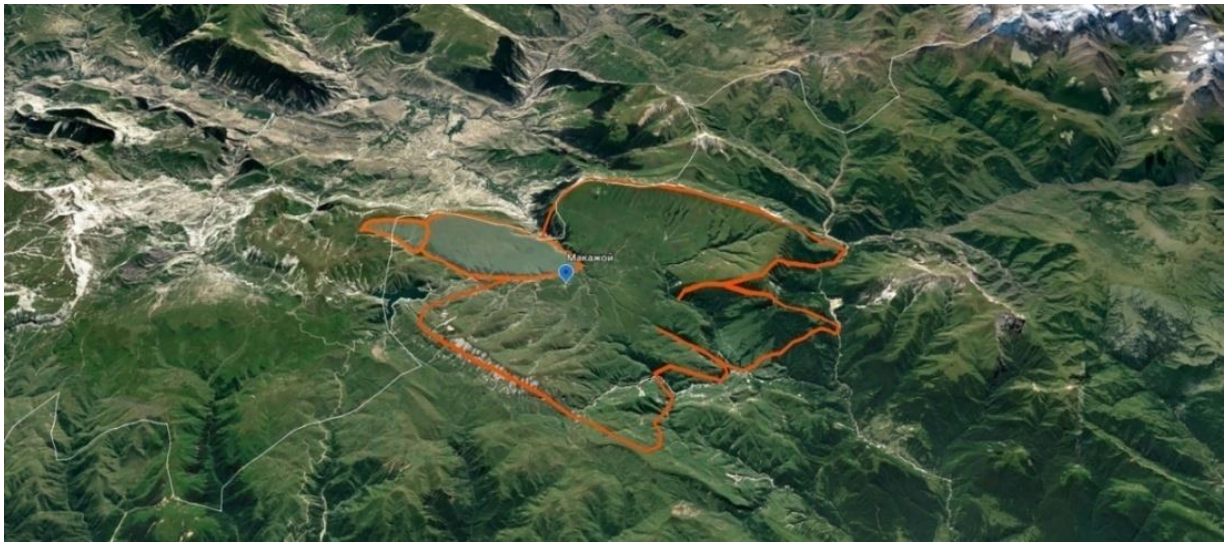


Рис. 1. Топографический план местности с обликом орла

Культ орла распространен по всему миру. Почти во всех мифологических системах орел так или иначе ассоциируется с солнцем, прямо отождествляется с ним либо представляется хозяином солнца и даже творцом, верховным божеством либо священной птицей верховного божества. Орел – благодетель и покровитель как отдельных людей, так и целых народов, птица счастья и плодородия. Образ орла присутствует и в мифологиях многих народов Северного Кавказа, а у чеченцев и сейчас детей называют именами, связанными с названиями птиц, – Леча (сокол), Кхокха (голубь), ТIаус (павлин) и Аьрзу (орел). Тема орла занимает особое место в кавказском фольклоре, орлы часто помогают героям выбраться из трудных ситуаций, например выносят героев из подземного мира, дают мудрые советы.

Таким образом, существующий ландшафт и почитаемый местными жителями культ орла определили и внешний вид проектируемого гостиничного комплекса «Зоркий», название которого символизирует величавость, силу, бесстрашие и бесподобное зрение этой птицы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Технология строительства и архитектурный стиль

С учетом всех сложностей строительства в высокогорье сооружение, создаваемое на данной территории, должно быть легковозводимым, поэтому за основу строительной конструкции была взята фахверковая каркасная система. Исторически технология зародилась в Германии. Там до сих пор стоят дома фахверк, которым, по некоторым данным, 500–600 лет, что доказывает надежность технологии и конструкции фахверка.

В целом здание сочетает в себе два основных материала – бетон и дерево. Спроектированное здание будет современным, энергоэффективным, с большой площадью остекления стен [7, 8].

Особенности климата требуют наличия крепкого основательного фундамента, поэтому опорой гостиницы служит свайный столбчатый фундамент с ростверком, обеспечивающим сглаживание поверхности при перепаде высот.

В качестве опорно-балочной системы «Зоркого» используется клееный брус. Эти несущие столбы и балки видны с наружной стороны дома и придают зданию характерный вид. Балки, являющиеся горизонтальными элементами каркаса, опираются на колонны фахверка и формируют основу для межэтажного или кровельного перекрытия комплекса. Со временем древесина темнеет и трескается, благодаря чему здание становится еще более колоритным. Раскосы между элементами обеспечивают прочность и придают жесткость всей конструкции. Пространство между колоннами по периметру заполняется экологичным целлюлозным утеплителем, который используется для создания теплого контура в здании [9, 12].

Со стороны склона устанавливаются светопрозрачные конструкции. Стеклопакеты устанавливаются прямо в стойки каркаса фахверка, при этом эффект от остекления будет максимальный.

Наиболее подходящим архитектурным стилем гостиницы является шале, ведь его архитектурные особенности формировались под влиянием суровых климатических условий и сложного горного рельефа [13].

Популярность шале в последнее время необычайно выросла. Это объясняется прежде всего возросшим интересом к горнолыжному спорту и туризму, в частности к кавказским лыжным курортам. Кроме того, стиль подходит и для людей, стремящихся к уединению и покою. Его выбирают творческие и романтические люди, истинные ценители культурного наследия, вековых традиций и качества. Потребность посетить гостиничный комплекс должна быть тесно связана с желанием человека уединиться и почувствовать связь с природой. Современный человек устал от суеты и городских стрессов, а гостиничный комплекс создает ощущение защищенности и психологического комфорта [14–17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Внешний вид «Зоркого»

Строение имеет покатую крышу с большим углом наклона и козырьком, который сильно выступает над основными стенами и служит защитой гостиницы от осадков.

Самой привлекательной стороной комплекса является восточный фасад, ориентированный на красивейшее ущелье и бегущую горную реку (рис. 2).

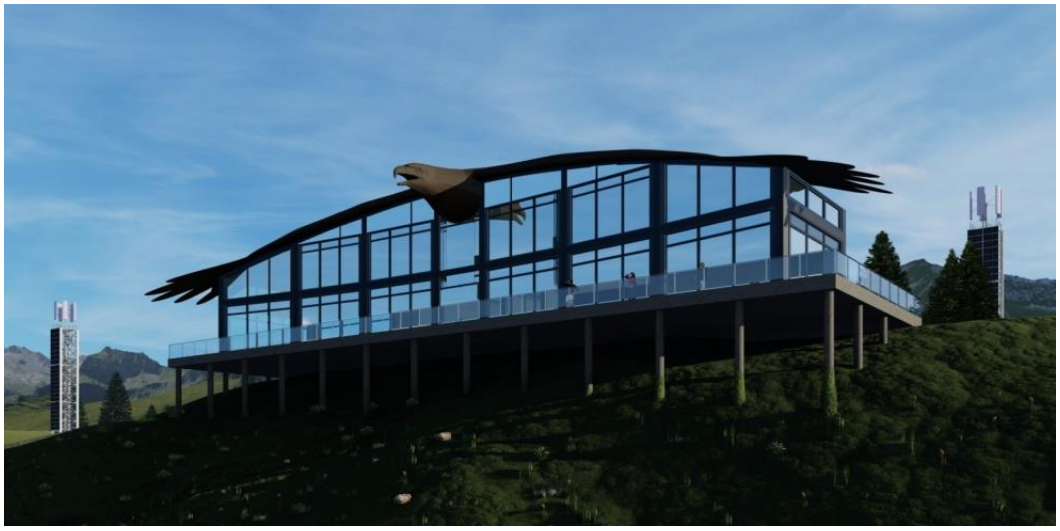


Рис. 2. Внешний вид горно-туристического комплекса
«У подножья высот “Зоркий”» (восточная часть)

Здание, выполненное из натуральных природных материалов, отличающихся качеством и экологичностью, демонстрирует прочность и долговечность (рис. 3).

Рис. 3. Внешний вид горно-туристического комплекса
«У подножья высот “Зоркий”» (западная часть)

Широкие фасады с панорамным остеклением для наблюдения за горными пейзажами, объединяющие интерьер и окружающий ландшафт в одну композицию, украшают его архитектуру.

Яркая внешняя особенность гостиничного комплекса – горизонтальное деление композиции дома на две части, изначально продиктованное агрессивной внешней средой.

Крыша здания играет роль доминанты. Она делается надежной и прочной, форма (покатая под большим углом наклона) позволяет избежать больших нагрузок от выпадающих осадков, а также обеспечивает самоочищение крыши от обильного снега.

Главной особенностью кровельного пространства является бронзовая скульптура в форме орла, которая нависает над панорамным остеклением. Эта композиция – фирменный стиль здания, поддерживающий атмосферу кавказской природы и несущий смысловую нагрузку проекта в целом (рис. 4).

Рис. 4. Бронзовая скульптура в форме орла

К характерным особенностям проектируемой территории также можно отнести наличие террасы, которая выходит за пределы периметра здания, за счет чего увеличивается полезная площадь.

Цветовая гамма здания природная, в палитре дерева и камня.

Помимо внешней красоты здания, отличительной его особенностью можно назвать функциональность. Любая конструктивная деталь практична и функциональна. Каменный нижний этаж обеспечивает защиту дома, деревянный верх дарит тепло, покатая крыша не задерживает осадки, а длинный козырек спасает от них придомовую территорию.

Интерьер «Зоркого»

Интерьер гостиницы основан на натуральности и природности используемых материалов. Доминантами и главными составляющими дизайна являются сочетание и взаимное дополнение камня и дерева. «Дышащая» древесина и камень, сохраняющий зимой тепло, а летом свежесть и прохладу, обеспечивают особый микроклимат в помещении.

Все помещения в гостинице просторные и светлые, с высокими потолками, не загроможденные мебелью и излишним декором, излучающие свежесть и чистоту.

В основе интерьера – эффектный контраст рустикальности и изысканности, грубости и благородства, простоты и высокой эстетики.

Потолки в помещении деревянные, с крупными балками темного цвета, передающими атмосферу домика в горах. В качестве материала используется древесина дуба и хвойных пород деревьев (сосны, ели, лиственницы, кедра). Рельефная поверхность дерева, как правило, изобилует трещинами, сучками и неровностями, подчеркивая естественную красоту природы.

Стены здания облицованы деревом. Жилые помещения нижнего этажа с каменными стенами обшиваются древесиной хвойных пород с частичной отделкой камнем. На

верхнем этаже стены деревянные, поэтому не нуждаются в дополнительной отделке. На стенах в качестве колонн, подпирающих потолок, выступают деревянные балки. Они обозначают границы функциональных зон или служат основой для мебели.

Полы выполнены из массивной доски, ее не красят, покрытие делают лаковым с эффектом патины, чтобы поверхность стала матовой или полуматовой. На первом этаже полы выложены мрамором и кафельной плиткой. В качестве декора лежат шкуры животных или натуральные грубые ковры с крупным плетением и узором. Все двери деревянные с резьбой, подобранные по цвету в тон мебели.

Для гостиничного комплекса характерна традиционная планировка пространств.

Первый этаж гостиницы предназначен для хозяйственных и представительских целей, на нем располагаются холл, гостиная, ресторан и галерея, различные подсобные помещения. Часть площади занята номерным фондом, второй этаж полностью предназначен для гостей.

Цветовая палитра внутри гостиницы яркая и одновременно приглушенная. Интерьеры основаны на естественных цветах, присущих дереву, камню и цвету небеленого льняного полотна. Особо распространены оттенки коричневого и бежевого, дополненные сочными пятнами красного, зеленого или синего цветов. Яркие вкрапления прослеживаются в рисунках на посуде, текстиле (чехлах стульев, салфетках, тканых коврах).

Освещение гостиницы приближено к естественному, используются старинные люстры, имитирующие, например, канделябры, а в качестве источников света – лампочки, сделанные в форме свечей.

Шторы простые, натуральные и практичные. Простота свойственна как для фасона, так и для материала. Важнейшим требованием является изготовление штор из натуральных материалов, например хлопка, ситца, льна.

Интерьер оживляют уникальные предметы и изделия ручной работы – глиняная посуда, вышитые салфетки, скатерти и занавески, плетеные предметы – вазы и мебель.

Проектируемый комплекс носит название экоотеля, так как особое внимание в проекте занимает сооружение по выработке электроэнергии, представляющее собой комплекс из надземной и подземной части под названием «Высокоуниверсальная экобашня “Лидия” на основе возобновляемых источников энергии». Сама по себе конструкция уникальна и не имеет аналогов в мире, поэтому ее использование должно вызвать небывалый интерес у отдыхающих. Помимо ее технической принадлежности, верхняя часть башни станет прекрасной обзорной площадкой [18, 19].

Перед посетителями комплекса простираются различные туристические тропы, транспортная доступность которых обеспечивается гравийными автодорогами. Только в Веденском районе Чеченской Республики можно посетить чуть меньше двадцати разнообразных исторических мест, среди которых много каменных построек. Как правило, туристическую активность вызывают места с наличием водных объектов. Для Веденского района Чеченской республики таким местом можно считать родник Девичья коса в селении Харачой, который находится на расстоянии 49 км от гостиничного комплекса «Зоркий». Родниковая вода сбегает с горы по белому желобу, который образовался из солей, осевших из воды источника.

Реки района заслуживают того, чтобы о них сказать отдельно. Это удивительно чистые, прозрачные родниковые воды, в которых водится редкая рыба – форель. Но главная водная достопримечательность района – высокогорное озеро Кезеной-Ам,

являющееся гидрологическим памятником природы регионального значения. Оно раскинулось на высоте 1 870 м над уровнем моря, а его глубина достигает 72 м. Расстояние от гостиничного комплекса «Зоркий» до озера составляет около 10 км.

В районе постройки по склонам Черных гор и по северному склону пастбищного хребта расположены леса, преимущественно буковые. Однако можно также встретить ясень, осину, дуб и множество других деревьев и кустарниковых пород, многие из которых являются лекарственными.

Район строительства богат объектами культурного наследия и материальной культуры, возникшими в результате исторических событий, представляющими собой ценность с точки зрения истории, археологии, архитектуры, градостроительства, искусства этнологии, социальной культуры и являющимися свидетельством эпохи цивилизаций, подлинными источниками информации о зарождении и развитии культуры [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все вышеперечисленное способствует привлечению посетителей гостиничного комплекса «Зоркий». Любители активного отдыха смогут взойти на живописные склоны и прочувствовать на себе, что значит быть в горах. Природа щедро наградила эту местность замечательными видами, позволяющими любоваться окрестным пейзажем в любое время года.

Помимо этого, туристам открываются шикарные панорамы склонов Кавказских гор. Вниманию посетителей предлагаются чистейшие водопады и быстрые холодные реки, множество небольших горных озер и красивые ущелья. Неотъемлемую часть занимают путешествия по объектам культурного наследия, памятникам археологии, архитектуры и историческим местам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.Г. Теория формообразования в изобразительном искусстве: учебник для вузов. СПб.: Санкт-Петербургский университет, 2017. С. 172–193.
2. Власов В.Г. Новый энциклопедический словарь изобразительного искусства: в 10 т. СПб.: Азбука-Классика, 2008. Т. 9. С. 260–270.
3. Давидич Т.Ф. Стиль как язык архитектуры. Харьков: Гуманитарный центр, 2010. 336 с.
4. Бартенев И.А., Батажкова В.Н. Очерки истории архитектурных стилей. М.: Изобразительное искусство, 1983. 384 с.
5. Prak N.L. The language of architecture: a contribution to architectural theory. The Hague-Paris: Mouton, 1968. 244 p.
6. Гутнов А.Э., Глазычев В.Л. Мир архитектуры. М.: Молодая гвардия, 1990. 351 с.
7. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1988. 57 с.
8. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1995. 347 с.
9. Серов А., Орлович Р., Морозов И. Мониторинг трещин в каменных зданиях: современные методы // *Архитектура, дизайн и строительство*. 2009. № 1 [41]. С. 62–63.
10. Деркач В.Н., Жерносек Н.М. Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений // *Вестник Белорусско-Российского университета.* 2010. № 3. С. 135–143.

11. Орлович Р., Мантегацца Д., Найчук А., Деркач В. Современные способы ремонта и усиление каменных конструкций // *Архитектура, дизайн и строительство*. 2010. № 1 (44). С. 86–87.
12. Редькин Г.М. Показатели структурной раздробленности массивов горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. Вып. 12. С. 219–225.
13. Ernout A., Meillet A. Dictionnaire etymologique de la langue latine. Paris: Klincksieck, 1951. 78 p.
14. Власов. В.Г. Новый энциклопедический словарь изобразительного искусства: в 10 т. СПб.: Азбука-Классика, 2004. Т. 1. С. 487–497.
15. Власов В.Г. Архитектура как изобразительное искусство. Теория открытой формы, принцип партиципации и синоптический подход в искусствознании // *«Архитектон: известия вузов»: научный электронный журнал*. 2018. № 61.
16. Власов В.Г. Дизайн-архитектура и XXI век // *«Архитектон: известия вузов»: научный электронный журнал*. 2013. № 41.
17. Власов В.Г. Архитектура – застывшая музыка или движущаяся мелодия? (спасет гравитация, а не крещендо) // *«Архитектон: известия вузов»: научный электронный журнал*. 2016. № 53.
18. Черемных С.В., Скудалов П.О., Бровкин А.В. Экономический эффект от применения экспериментальных металлических конструкций для размещения возобновляемых источников энергии в газотранспортной отрасли // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений*. Курск: КГУ, 2018. С. 237–242.
19. Возобновляемые источники энергии на базе солнце- и ветроэнергетических систем типа «Лидия» / Д.С. Лебедев, В.К. Панов, В.В. Венчакова, В.В. Матвейчук, С.В. Черемных // *Возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XI Научной молодежной школы, 3–6 декабря 2018 г*. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова.
20. Витрувий. Десять книг об архитектуре / пер. с лат. Ф.А. Петровского. М.: Едиториал УРСС, 2003.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЧЕРЕМНЫХ Степан Валерьевич – ст. преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: cheremnykh_s.v@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Черемных С.В. Экологический горно-туристический комплекс Северного Кавказа «У подножья высот “Зоркий”» // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 47–56.

ECOLOGICAL MOUNTAIN AND TOURIST COMPLEX OF THE NORTH CAUCASUS «U PODNOZH'YA VYSOT “ZORKIJ”»

S.V. Cheremnykh
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article discusses one of the most optimal options for the development of mountainous areas – the formation of an environment for the development of entrepreneurial activity based on the creation of tourist complexes. The Chechen Republic is replete with numerous cultural monuments. However, no matter how beautiful the nature of the wild is, the area mastered by people must develop. This can be achieved by providing employment for the able-bodied population, which is an integral component for the economic development of the Republic and Russia. Taking into account the specifics of mountainous areas, it is necessary to adopt a set of measures for the development of mountainous areas, including based on the experience of other countries

Keywords: core system, metal constructions, wind power plants, solar modules, batteries, energetics, modular design.

REFERENCES

1. Vlasov V.G. Teoriya formoobrazovaniya v izobrazitel'nom iskusstve. Uchebnik dlya vuzov. [Formation theory in the visual arts]. St. Petersburg: St. Petersburg University, 2017, pp. 172–193.
2. New Encyclopedia Dictionary of Fine Arts: in 10 vol. St. Petersburg: Azbuka-Klassika. 2008. Vol. 9, pp. 260–270.
3. David T.F. Stil' kak yazyk arkhitektury [Style as a language of architecture]. Kharkiv: Humanitarian Center Publishing House, 2010. 336 p.
4. Bartenev I.A., Batazhkova V.N. Ocherki istorii arkhitekturnykh stilei [Essays of history of architectural styles]. M.: Fine arts, 1983. 384 p.
5. Prak N.L. The language of architecture: a contribution to architectural theory. The Hague-Paris: Mouton, 1968. 244 p.
6. Gutnov A., Glazychev V. Mir arkhitektury [World of architecture]. M.: Young Guard, 1990. 351 p.
7. Rekomendatsii po obsledovaniyu i otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya krupnopanel'nykh i kamennykh zdanii [Recommendations for the survey and assessment of the technical condition of large-panel and stone buildings]. M.: TsNIISK of V.A. Kucherenko, 1988. 57 p.
8. Reiser V.D. Raschet i normirovanie nadezhnosti stroitel'nykh konstruktsii. [Calculation and standardization of reliability of building structures]. M.: Stroyizdat, 1995. 347 p.
9. Serov A., Orlovich R., Morozov I. Crack monitoring in stone buildings: modern methods. *Arkhitektura, dizain i stroitel'stvo*. 2009. No. 1 [41], pp. 62–63. (In Russian).
10. Derkach V.N., Zhernosek N.M. Methods of assessing the strength of masonry, in domestic and foreign practice of inspection of buildings and structures. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*. 2010. No. 3, pp. 135–143. (In Russian).

11. Orlovich R., Mantegatstsa D., Naichuk A., Derkach V. Modern methods of repair and reinforcement of stone structures. *Arkhitektura, dizain i stroitel'stvo*. 2010. No. 1 (44), pp. 86–87. (In Russian).
12. Redkin G.M. Indicators of structural fragmentation of rock masses. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2009. No. 12, pp. 219–225. (In Russian).
13. Ernout A., Meillet A. Dictionnaire etymologique de la langue latine. Paris: Klincksieck, 1951. 78 p.
14. Vlasov V.G. Novyi ehntsiklopedicheskii slovar' izobrazitel'nogo iskusstva. V 10 t. [New Encyclopedia Dictionary of Fine Arts. In 10 vol.]. St. Petersburg: Azbuka-Klassika. 2004. Vol. 1, pp. 487–497.
15. Vlasov V.G. Architecture as fine art. The theory of open form, the principle of participation and a synoptic approach in art history. *«Arkhitekton: izvestiya vuzov»: scientific electronic journal*. Ekaterinburg: Ural State University, 2018. No. 61. (In Russian).
16. Vlasov V.G. Design architecture and the 21st century. *«Arkhitekton: izvestiya vuzov»: scientific electronic journal*. Ekaterinburg: USAAA, 2013. No. 41. (In Russian).
17. Vlasov V.G. Architecture – frozen music or moving melody? (The gravity will save, not Crescendo). *«Arkhitekton: izvestiya vuzov»:scientific electronic journal.* Ekaterinburg: Ural State University, 2016. No. 53. (In Russian).
18. Cheremnykh S.V., Skudalov P.O., Brovkin A.V. Economic effect of using experimental metal structures to accommodate renewable energy sources in the gas transportation industry. *Safety of the construction fund of Russia. Problems and solutions: materials of International academic readings*. Kursk: KGU, 2018, pp. 237–242. (In Russian).
19. Lebedev D.S., Panov V.K., Ventakov V.V., Matveychuk V.V., Cheremnykh S.V. Renewable energy sources on the basis of solar and wind power systems of Lydia type. *Renewable energy sources: materials of the All-Russian Scientific Conference with International Participation and XI Scientific Youth School*. December 3–6, 2018. M.: Lomonosov MSU. (In Russian).
20. Vitruvii. Desyat' knig ob arkhitekture. [Ten books on architecture]. Translated from Latin by F.A. Petrovsky. M.: Editorial URSS, 2003.

ABOUT THE AUTHOR

CHEREMNYKH Stepan Valerievich – Senior Lecturer of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: stepan_1986@bk.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Cheremnykh S.V. Ecological mountain and tourist complex of the North Caucasus «U podnozh'ya vysot “Zorkij”» // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No 4 (8), pp. 47–56.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311.11

РЕКОНФИГУРАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ЗАГРУЗКЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

К.Б. Корнеев, Раймонд Осеи-Овусу
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Корнеев К.Б., Осеи-Овусу Раймонд, 2020

Аннотация. Проблема надежного и эффективного электроснабжения муниципальных потребителей может быть решена за счет моделирования и прогностического планирования развития центров потребления. Анализ статистической и перспективной информации позволяет планировать внутригородскую сеть электроснабжения, выявлять формирующиеся кластеры потребителей, проводить политику энергосбережения применительно к распределительным сетям.

Ключевые слова: электроэнергетика, трансформаторная подстанция, планирование, кластеризация, моделирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-57-65

Развитие большинства населенных пунктов Центрального федерального округа РФ в настоящий момент ведется по экстенсивному принципу: путем точечной застройки в центральных районах городов, а также присоединением прилегающих к границам города земельных участков и возведением на них как малоэтажных, так и многоэтажных жилых домов. При этом для таких населенных пунктов схема электроснабжения была заложена еще в 1950–1970 гг., а новые здания и районы просто подключаются к существующим сетям. В связи с этим энергетики, для удовлетворения спроса на присоединение электрических мощностей, вынуждены увеличивать мощность на существующих силовых подстанциях, а также прокладывать линии напряжением 0,4 и 6(10) кВ к потребителям.

Тем не менее такой подход является изначально порочным, так как направлен не на оптимальное развитие энергосистемы населенного пункта, а на решение текущих задач подключения потребителей к электрическим сетям. К сожалению, прогнозирование нагрузок и планирование развития электросетевого комплекса городов осложнено тем, что генеральные планы городов достаточно регулярно пересматриваются, а также часто направлены на решение текущих задач, определяемых короткими экономическими циклами (Китчина и Жюгляра) [1]. В связи с этим ни о каком долговременном планировании речь идти не может. Таким образом, на настоящий момент сложилась ситуация, когда в пределах одного населенного пункта наблюдается значительный дисбаланс по загрузке электрических подстанций и сетей, причем разница в загрузке

достигает трехкратной [2, 3]. В качестве примера можно рассмотреть карты технологических присоединений, в частности карту для Санкт-Петербурга (рис. 1).

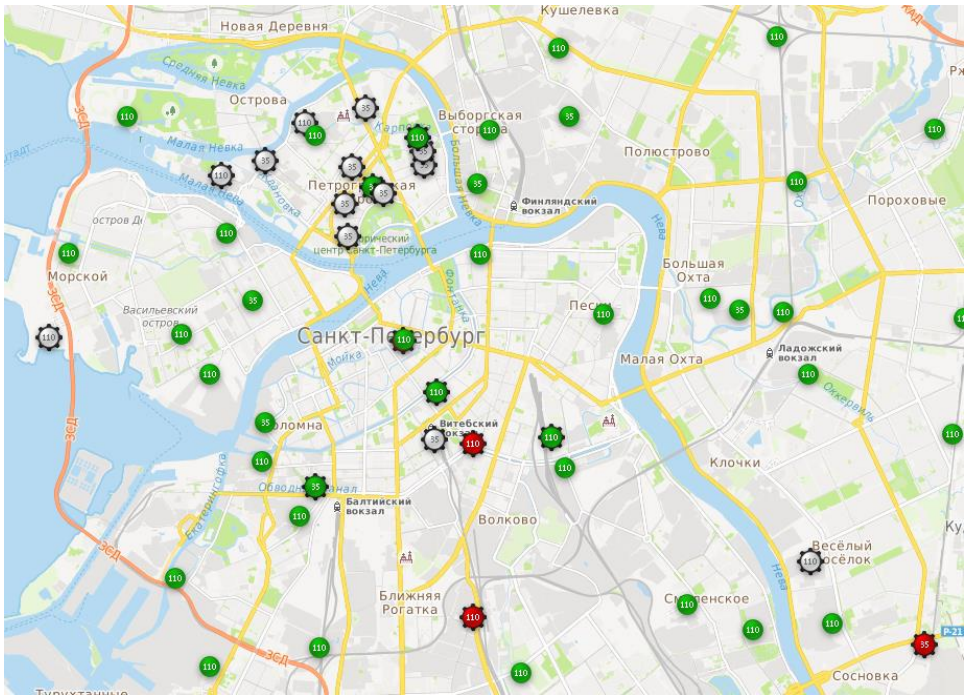


Рис. 1. Карта технологического присоединения Ленинградской области.
Район Санкт-Петербурга

Как видно на карте, в районах перспективной застройки планируется строительство и ввод в строй большого количества подстанций (например, на Петроградской стороне), в то же время для снижения загрузки подстанции 110 кВ в районе Витебского вокзала планируется строительство подстанции 35 кВ. С точки зрения снижения капитальных затрат это допустимый вариант, однако с точки зрения снижения потерь при передаче электрической энергии это малоэффективное решение [4–6]. Кроме того, постройка подстанций в районах существующей застройки сопряжена с необходимостью возведения здания подстанции в закрытом исполнении (так называемой подстанции глубокого ввода). Для таких подстанций возрастает стоимость капитального строительства, а также требуется детальная проработка вопросов дальнейшего развития электроснабжения района, что вызвано невысокой масштабируемостью данных подстанций с точки присоединения новых абонентов.

Одним из существенных недостатков существующей системы оценки энергообеспеченности территорий населенных пунктов является расчет, построенный на центрах питания (подстанциях), для которых принимается территория покрытия, описываемая окружностью с радиусом, равным экономически целесообразной длине линии на соответствующем напряжении. По факту же оказывается, что линии, в первую очередь, кабельные, проложенные не по кратчайшему расстоянию между центрами питания, а в соответствии с градостроительными регламентами, существенно искажают форму территории покрытия. Рассмотренная в качестве примера карта территорий покрытия для города Твери (рис. 2) дает наглядное представление о форме этих зон. При

этом стоит учитывать, что представленная карта дана для нормального режима, т. е. без учета оперативных переключений, приводящих к значительному смещению границ зон в случае возникновения аварий.

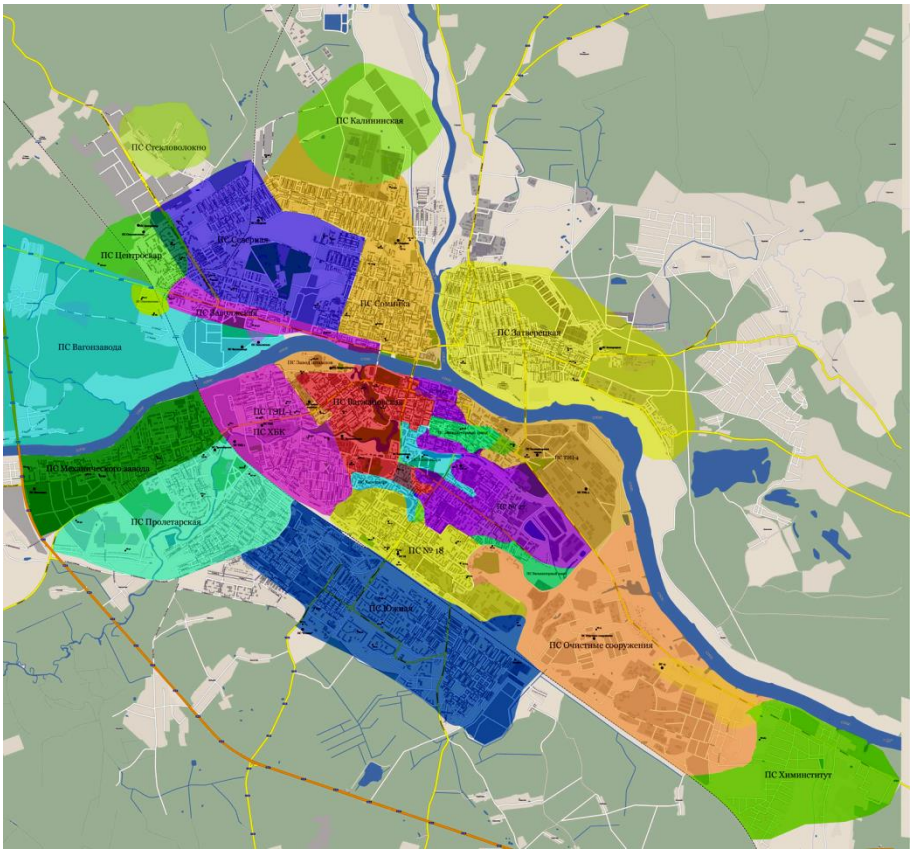


Рис. 2. Визуальное представление зон деятельности МУП «Тверьгорэлектро» по районам города (общая информация по территории обслуживания сетевой организации)

В связи с вышесказанным оптимальное расположение и мощность реконструируемых, а также вновь строящихся подстанций выходит на первый план [7]. Как уже говорилось выше, планирование места размещения ведется на основе заявок потребителей, а также наиболее крупных центров мощности, исходя из градостроительного плана. Тем не менее уже сейчас в большинстве городов, особенно крупных, наметился процесс выноса промышленных предприятий на окраину города, а то и в новые территориальные зоны, предназначенные для размещения промышленных объектов. Как правило, такие зоны закладываются с расчетом на присоединение достаточно больших мощностей, поэтому в этой статье данный вопрос не рассматривается. В то же время в частном секторе и многоквартирных жилых домах значительно возросло электропотребление, что ведет к повышению удельного показателя энергооснащенности. Особенно заметно смещение энергопотребления из промышленного сектора и торгово-офисных комплексов наблюдалось в период самоизоляции, вызванной пандемией COVID-19 [8]. Таким образом, при перспективном планировании электроэнергетической системы населенного пункта должны учитываться не только

нормальный и аварийные режимы, но также и различные форс-мажорные проявления, вызванные социальными и природными факторами.

Как видно из рис. 2, зона строительства в микрорайоне «Южный» (ниже выделенной синим территории на юге Твери) еще не имеет оцвечивания, так как процесс подключения района застройки еще идет. При этом в данном районе формируется один из основных новых центров нагрузки, не предусмотренный градостроительными планами, созданными до 2015 г. [9], а также планами развития электроэнергетики города Твери [10]. Все это приводит к вопросу о необходимости среднесрочного планирования на основе текущих данных о расходах электроэнергии, а также планируемых подключениях нагрузок разных уровней мощности.

Таким образом, задача планирования нагрузки населенных пунктов, особенно таких, в которых ведется новое строительство, должна ориентироваться на какие-то нормируемые и отслеживаемые показатели. К таким показателям относятся мгновенные расходы электроэнергии и удельная электрическая нагрузка. Проблема мгновенных расходов состоит в том, что точка учета далеко не всегда совпадает как с зоной обслуживания подстанции, так и с местом расположения потребителя. Тем не менее широкое использование автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии позволит перейти к более точному позиционированию точек потребления, а также созданию единой карты нагрузок. В качестве универсального и достаточно легко интегрируемого в современные автоматизированные среды управления и администрирования технологическими процессами показателя целесообразно выбрать «Интенсивность использования энергии» (киловатт·час на единицу площади) [11]. В этом случае показатель будет зависеть только от удельных нагрузок, а также может быть использован для оценки текущего энергопотребления и визуализации его изменения во времени. Использование для привязки электропотребляющих территорий существующих кадастровых механизмов (например, кадастровой карты местности) поспособствует интеграции показателей развития территорий в единой системе с возможностью средне- и долгосрочного планирования.

Однако следует иметь в виду, что очевидная простота формулы для расчета показателя связана с необходимостью перехода от кадастровой площади (площади здания по плану) к полезной (общей площади помещений). Использование только площади по плану приведет к сильному завышению показателя в случае для зданий высокоэтажной жилой застройки, а также многоуровневых производственных цехов для предприятий. Средняя оценка для жилого десятиэтажного газифицированного дома типовой застройки в городе Твери, по данным за 2017–2019 гг., показывает, что удельный показатель, посчитанный для площади по плану, составляет 16,8 кВт·ч/(мес.·м²), в то время как посчитанный по общей площади составил 1,52 кВт·ч/(мес.·м²). Для современного жилого частного газифицированного дома данный показатель составил 3,46 кВт·ч/(мес.·м²). Эти показатели были получены при проведении энергетических обследований и составлении энергетических паспортов сотрудниками центра «Энергоэффективность» ТвГТУ. В целом, указанные показатели достаточно точно коррелируют с данными других населенных пунктов со зданиями сопоставимой этажности [12, 13].

Использование предложенного показателя позволяет сразу решить проблему выявления низкой энергетической эффективности в рамках реализации закона об энергосбережении, а также построить для населенного пункта динамическую карту

распределения удельных нагрузок. В этом случае появляется возможность в режиме реального времени или же по усредненным за определенный отрезок времени удельным показателям выявить зоны повышенной или пониженной электрической нагрузки, определить динамику изменения в этих зонах, а также спрогнозировать изменение этих зон в зависимости от воздействия внешних факторов. Например, картина возрастания удельного показателя, полученная для праздничных и выходных дней, может быть экстраполирована на режим самоизоляции, характерный для весны 2020 г. А данные, полученные в последние две недели календарного года, достаточно точно описывают пиковое потребление для торгово-офисных помещений.

Полученные таким образом данные с учетом прослеживающейся возрастающей динамики для отдельных территорий (очищенные от сезонности, а также всплесков, вызванных авариями, социальными факторами и другими обстоятельствами) и должны использоваться для построения новых моделей электроснабжения городов. Тем не менее сложившаяся топология высоковольтных сетей в городах плохо поддается реконфигирированию, что предполагает большее внимание к мощности и маневренности подстанций, чем к их территориальному расположению. Одновременно следует обратить внимание на распределительную сеть напряжением 6–20 кВ, в которой в рамках существующей непродуманной стратегии строительства жилого фонда и торгово-офисных центров формируются протяженные участки линий, соединенных последовательно, что ведет к возрастанию токов в головных участках линий, снижает их надежность и увеличивает потери в этих участках. Выявленные на ранних этапах признаки формирования новых центров нагрузки позволят спланировать оптимальную конфигурацию распределительной сети напряжением 6–20 кВ, а также предложить места строительства городских трансформаторных подстанций в целях обеспечения экономичного и надежного электроснабжения потребителей.

Для повышения эффективности распределительной сети напряжением 6–20 кВ в населенных пунктах предлагается на стадии проектирования осуществить построение карты (дополнительного слоя картографической информации) с учетом средних коэффициентов интенсивности использования энергии. Результаты такого построения могут быть в дальнейшем использованы для создания пространственной модели сети электроснабжения.

Пространственные данные сети и потребителей электрической энергии на исследуемой территории могут быть получены от отдела планирования электроснабжающей компании. Поскольку информация не всегда бывает актуальна, то должна быть проведена проверка сформированной карты для подтверждения достоверности данных во избежание критично высоких или низких показателей.

Следующие этапы отображают используемую методологию:

1. Определяется количество кластеров (зон электроснабжения) для достижения желаемых результатов. Как правило, количество зон совпадает с предполагаемым количеством трансформаторных подстанций.

2. Нагрузки в каждой зоне группируются с использованием метода кластеризации k-means [14].

3. Определяются центры нагрузки для всех кластеров с помощью метода весовых коэффициентов k-means.

4. Совмещаются расчетные центры нагрузки с существующей или проектируемой распределительной сетью низкого напряжения (0,4 кВ) с учетом анализа ближайших соседних кластеров.

Размещение трансформаторных подстанций наиболее близко к расчетной точке центра нагрузки (центроиду) является определяющим фактором для снижения технических потерь. Однако данное допущение работает только в том случае, если коэффициенты интенсивности использования энергии объектов различаются незначительно. При значительных (более чем в 3 раза) расхождениях необходимо вводить корректирующие весовые коэффициенты. С помощью вычисленных центроидов кластеров могут быть получены центроиды взвешенных нагрузок. Расчетные центры взвешенных нагрузок не обязательно могут быть местоположением трансформаторных подстанций. Расположение существующих конструкций может препятствовать размещению трансформаторных подстанций, поэтому необходимо проверять рассчитанные точки с привязкой к местности, что удобно выполнять в картографических кадастровых программах. Согласование расчетных центров нагрузки с существующими построенными воздушными линиями низкого напряжения позволит избежать любого нарушения землепользования, которое приведет к блокированию существующих конструкций, выплате компенсации, юридическим обязательствам, остановке проекта.

Для реализации предложенной концепции потребуется активное взаимодействие муниципальных электросетевых компаний, энергосбытовых организаций, а также управлений кадастрового учета. Тем не менее данное взаимодействие позволит построить оптимальную, надежную и прогнозируемую модель электроснабжения потребителей [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монтгомери Дж. Новое богатство городов: динамика города и пятая волна. Нью-Йорк: Routledge, 2016. 436 с.

2. Оперативная коррекция графиков потребления электрической мощности в цикле планирования балансирующего рынка / Макоклюев Б.И., Полижаров А.С. [и др.] // *Электрические станции*. 2019. № 5. С. 36–44. DOI: 10.34831/EP.2019.1054.44171.

3. Вильмс Я., Федорович С., Качалов Н.А. Методы снижения потерь электроэнергии в распределительных системах // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Вып. 141. DOI: 10.1051/matecconf/201714101050.

4. Ле А., Кашем К.А., Негревицкий М. Снижение потерь электрической мощности в распределительных сетях с распределенными источниками. // *Австрало-азиатская университетская конференция по электроэнергетике*. 2005. URL: https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=5435&context=eispapers (дата обращения: 16.04.2020).

5. Стрбак Г., Джапик П. [и др.]. Стратегии снижения потерь в распределительных сетях. Лондон: Имперский колледж Лондона, 2018. 87 с. URL: https://www.ukpowernetworks.co.uk/losses/static/pdfs/strategies-for-reducing-losses-in-distribution-networks.d1b2a6f.pdf (дата обращения: 24.04.2020).

6. Бассо Т.С. Системное воздействие на взаимосвязь распределенных ресурсов: текущее состояние и определение потребностей для дальнейшего развития. Технический отчет NREL/TP-550-44727. Национальная лаборатория Министерства энергетики США, Управление по энергоэффективности и возобновляемой энергии. Январь 2009. С. 44. URL: https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44727.pdf (дата обращения: 12.04.2020).

7. Корнеев К.Б. Оптимизация конфигурации электрических сетей населенных пунктов // *Энергосбережение в электро-, теплоэнергетических и металлургических установках: сборник научно-практических трудов.* Тверь: Тверской государственный технический университет, 2014. С. 59–62.
8. Васильев А. Март-2020: электроэнергетика на развилке // *Электротехнический интернет-портал.* 21 апреля 2020. URL: https://www.elec.ru/articles/mart-2020-elektroenergetika-na-razvilke/ (дата обращения: 29.04.2020).
9. Генеральный план города Твери. Решение Тверской городской Думы № 193 (394) от 25 декабря 2012 «Об утверждении генерального плана города Твери» (официальное издание). URL: https://www.tver.ru/documents/gradostroitelstvo/ (дата обращения: 20.04.2020).
10. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Тверской области на период 2014–2018 годы (официальное издание). URL: https://минтэкижкх.тверскаяобласть.рф/kollegialnye-organy/shtab-po-obespecheniyu-bezopasnosti-elektrosnabzheniya-tverskoy-oblasti-/skhema-i-programma-perspektivnogo-razvitiya-elektroenergetiki-tverskoy-oblasti-na-period-2014-2018-g/ (дата обращения: 20.04.2020).
11. Интенсивность использования энергии (показатель). IBM TRIRIGA – интеллектуальное решение для управления недвижимостью и инфраструктурой. URL: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSFCZ3_10.6.0/com.ibm.tri.doc/wpm_metrics/r_energy_use_intensity_kilowatt_hours_gsf.html (дата обращения: 22.04.2020).
12. Постановление Правительства РФ от 23 мая 2006 г. № 306 «Об утверждении Правил установления и определения нормативов потребления коммунальных услуг и нормативов потребления коммунальных ресурсов в целях содержания общего имущества в многоквартирном доме» (с изменениями и дополнениями). URL: http://base.garant.ru/12147362/ (дата обращения: 22.04.2020).
13. Ливчак В.И. Нормирование показателей годового электропотребления жилыми зданиями, в том числе на общедомовые нужды // Журнал «АВОК». 2015. № 6. С. 46–51. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6193 (дата обращения: 20.04.2020).
14. Литвиненко Н., Мамырбаев О. [и др.]. Кластеризация методом k-средних в случае, когда k неизвестно // *Международная конференция по прикладной математике, вычислительной технике и системотехнике.* 2019. Вып. 24. DOI: 10.1051/itmconf/20192401013.
15. Корнеев К.Б., Долгополая Е.В., Осеи-Овусу Раймонд. Дифференцированные варианты надежности электроснабжения для городских распределительных сетей // *Энергоресурсосбережение в промышленности: материалы Международной научно-практической конференции.* Тверь: Тверской государственный технический университет, 2019. С. 165–170.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРНЕЕВ Константин Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: Energy-tver@mail.ru

РАЙМОНД Осеи-Овусу – аспирант кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: orajmond2008@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Корнеев К.Б., Раймонд Осеи-Овусу. Реконфигурация существующей электрической сети населенных пунктов на основе данных о загрузке потребителей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 57–65.

RECONFIGURATION OF EXISTING ELECTRIC NETWORK OF URBAN TERRITORIES BASED ON POWER CONSUMPTION DATA

K.B. Korneev, Raymond Osei-Ovusu
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The problem of reliable and efficient power supply to municipal consumers can be solved by modeling and prognostic planning of consumption centers development. Analysis of statistical and forward-looking information allows planning of intra-city power supply network, identifying of emerging consumer clusters, and pursue an energy-saving policy in relation to distribution networks.

Keywords: power supply industry, transformer substation, planning, clustering, modeling.

REFERENCES

1. Montgomery J. The new wealth of`cities: city dynamics and the fifth wave. New York: Routledge, 2016. 436 p
2. Makollyuev B.I., Polizharov A.S. [et al.]. Operational correction of electric power consumption schedules in the balancing market planning cycle. *Elektricheskie stancii*. 2019. No. 5, pp. 36–44. (In Russian) DOI: 10.34831/EP.2019.1054.44171.
3. Wilms Ya., Fedorovich S., Kachalov N.A. Methods of reducing power losses in distribution systems. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Iss 141. DOI: 10.1051/matecconf/201714101050.
4. Le A., Kashem K.A., Negnevitsky M. Minimizing power losses in distribution systems with distributed resources. *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2005. URL: https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=5435&context=eispapers (date of access: 16.04.2020).
5. Strbac G., Djapic P. [et al.]. Strategies for reducing losses in distribution networks. Imperial College London. February 2018. 87 p. URL: https://www.ukpowernetworks.co.uk/losses/static/pdfs/strategies-for-reducing-losses-in-distribution-networks.d1b2a6f.pdf (date of access: 24.04.2020).
6. Basso T.S. System impacts from interconnection of distributed resources: current status and identification of needs for further development. *Technical Report NREL/TP-550-44727*. National laboratory of the U.S. Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, January 2009. 44 p. URL: https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44727.pdf (date of access: 12.04.2020).
7. Korneev K.B. Optimization of the configuration of electric networks of settlements. *Energy saving in electric-, heat power- and metallurgical plants. Collection of scientific and practical works.* Tver: TvSTU, 2014, pp. 59–62. (In Russian).

8. Vasiljev A. March-2020: fork in the electric power industry. *Electrotechnical Internet portal. 21 April 2020.* URL: https://www.elec.ru/articles/mart-2020-elektroenergetika-na-razvilke/ (date of access: 29.04.2020). (In Russian).
9. General plan of the city of Tver. The decision of the Tver City Council № 193 (394) on 25.12.2012 «On approval of the general plan of the city of Tver» (official). URL: https://www.tver.ru/documents/gradostroitelstvo/ (date of access: 20.04.2020). (In Russian).
10. Scheme and program for the prospective development of the electric power industry in the Tver region (official). URL: https://минтэкижкх.тверскаяобласть.рф/kollegialnye-organy/shtab-po-obespecheniyu-bezopasnosti-elektrosnabzheniya-tverskoy-oblasti-/skhema-i-programma-perspektivnogo-razvitiya-elektroenergetiki-tverskoy-oblasti-na-period-2014-2018-g/ (date of access: 20.04.2020). (In Russian).
11. Energy Use Intensity (kilowatt hours / GSF) metric. IBM TRIRIGA Version 10.6.0. URL: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSFCZ3_10.6.0/com.ibm.tri.doc/wpm_metrics/r_energy_use_intensity_kilowatt_hours_gsf.html (date of access: 22.04.2020).
12. Decree of the Government of the Russian Federation of May 23, 2006 № 306 «On approval of the Rules for the establishment and determination of standards for the consumption of communal services and standards for the consumption of communal resources in order to maintain common property in an apartment building» (as amended). URL: http://base.garant.ru/12147362/ (date of access: 22.04.2020). (In Russian).
13. Livchak V.I. Regulation of annual electricity consumption in residential buildings including for common needs. *ABOK Journal*. 2015. No. 6, pp. 46–51. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6193 (date of access: 20.04.2020). (In Russian).
14. Litvinenko N., Mamyrbayev O. [et al.]. Clusterization by the K-means method when K is unknown. *AMCSE 2018 – International Conference on Applied Mathematics, Computational Science and Systems Engineering.* 2019. Vol. 24. DOI: 10.1051/itmconf/20192401013.
15. Korneev K.B., Dolgopolaya E.V., Raymond Osei-Owusu. Differentiated power supply reliability options for urban distribution networks. *Energy and resource saving in industry. Materials of the International scientific-practical conference.* Tver: Tver State Technical University. 2019, pp. 165–170. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru
RAYMOND Osei-Ovusu – Postgraduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: orajmond2008@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Osei-Ovusu Raymond. Reconfiguration of existing electric network of urban territories based on power consumption data // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 57–65.

УДК 669.187:621.186

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ ШЛАКА НА КПД ДУГ И РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

А.Н. Макаров
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2020

Аннотация. Исследовано влияние высоты слоя шлака во всем номенклатурном ряде дуговых сталеплавильных печей (емкостью от 0,5 до 120 тонн) на КПД дуг и удельный расход электроэнергии в печах. Установлено, что с ростом высоты слоя шлака КПД дуг в малотоннажных и большегрузных печах возрастает и достигает 78…80 % при полном погружении дуг в шлак, а удельный расход электроэнергии уменьшается. При увеличении высоты слоя шлака и увеличении КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии в печах снижается на 0,75…1,0 %.

Ключевые слова: электрическая дуга, сталь, печь, теплообмен, энергосбережение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-66-72

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в высокомощных большегрузных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) большую часть времени расплавления шихты дуги горят на ванну металла, покрытую толстым слоем шлака, для чего используют инжекторы угольного порошка и кислород для вспенивания шлака. В результате вспенивания высота слоя шлака в большегрузных ДСП может достигать 400…500 мм. В печах малой вместимости инжекторы для вспенивания шлака не используют, высота слоя шлака невелика и составляет 40 мм в ДСП-6. Проведено исследование влияния высоты слоя шлака в дуговых сталеплавильных печах всего ряда вместимостей от 0,5 до 120 тонн на КПД дуг и удельный расход электроэнергии в печах.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КПД ДУГ В 6- И 120-ТОННЫХ ДСП

По методике расчета КПД дуг [1] вычислили и исследовали влияние высоты слоя шлака $h_ш$, высоты заглубления дуги в металл $h_м$ и шлак: $h_з = h_м + h_ш$, на КПД дуг в дуговых сталеплавильных печах вместимостью 6 и 100 тонн (ДСП-6 и ДСП-100). Результаты расчета представлены на рис. 1, где график I характеризует изменение КПД дуг в зависимости от отношения высоты заглубления дуги к длине дуги: $\eta_д = h_з/l_д$, в ДСП-100; график II – изменение КПД: $\eta_д = f(h_з/l_д)$, в ДСП-6.

В ДСП-100 используются инжекторы для вспенивания шлака. Как видно из графика I на рис. 1, с ростом высоты слоя шлака и высоты заглубления дуги в шлак в ДСП-100 КПД дуги увеличивается неравномерно. При напряжении на дуге 280 В [2] и длине дуги 325 мм рост высоты слоя шлака от 0 до 195 мм, при которой $h_з/l_д$ = 0,6, малоэффективен, так как КПД дуги возрастает лишь на 8 % (с 0,45 до 0,49). Дальнейшее увеличение высоты слоя шлака в печи ДСП-100 с 195 до 325 мм, при которой $h_з/l_д$ = 1,0, приводит к возрастанию КПД дуги на 35 % (с 0,49 до 0,75). С увеличением слоя шлака

возрастает КПД дуг и уменьшается удельный расход электроэнергии ($G_э$) [3–15], который в ДСП-100 составляет 385 кВт·ч/т при расплавлении твердой шихты.

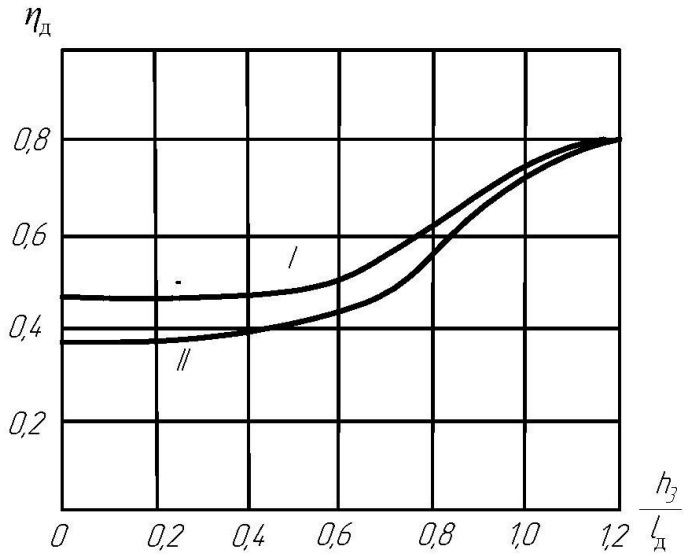


Рис. 1. Зависимость КПД дуг печей ДСП-100 (I), ДСП-6 (II) от заглубления дуг в ванну металла и шлак

Результаты расчета КПД дуг подтверждены экспериментальными исследованиями на ДСП-120 ОАО «Уральская сталь» [16]. Металлошихта, загружаемая в ДСП-120, состояла из 60 % металлолома и 40 % жидкого чугуна. На опытных плавках вспенивание шлака проводили вдуванием углеродосодержащего материала с помощью инжекторов и присадкой коксовой мелочи через отверстие в своде. Анализировали изменение технико-экономических показателей работы ДСП в зависимости от толщины вспененного шлака. Из результатов исследования [16] следует, что при увеличении высоты слоя шлака с 238 до 356 мм удельный расход электроэнергии снизился с 260 до 203 кВт·ч/т жидкой стали, что объясняется уменьшением тепловых потерь дуг, повышением КПД дуг вследствие увеличения экранизирования излучения дуг шлаком.

Так как параметры дуг ДСП-100, ДСП-120 близкие, то воспользуемся графиком I на рис. 1 для определения КПД дуг печи ДСП-120 ОАО «Уральская сталь». При $h_з$ = 238 мм и $l_д$ = 325 мм $h_з/l_д$ = 0,73, из рис. 1 график I следует $\eta_д$ = 0,55, $G_э$ = 260 кВт·ч/т. При $h_з$ = 356 мм $h_з/l_д$ = 1,1, по графику I определяем $\eta_д$ = 0,77, $G_э$ = 203 кВт·ч/т. При увеличении высоты слоя шлака с 238 до 356 мм КПД дуг увеличился с 0,55 до 0,77, т. е. на 29 %, а удельный расход электроэнергии снизился с 260 до 203 кВт·ч/т, т. е. на 22 %.

Таким образом, расчетными и экспериментальными данными подтверждено, что между КПД дуг и удельным расходом электроэнергии существует обратно пропорциональная связь: при каждом увеличении КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии печью уменьшается на 0,75…1 %. Из рис. 1 следует, что достичь КПД дуг больше 0,78…0,8 практически невозможно, так как при дальнейшем увеличении высоты слоя шлака и достижении $h_з/l_д$ = 1,2…1,4 КПД дуг достигает максимума $\eta_д$ = 0,8 и далее остается практически неизменным, что объясняется электромагнитным выдуванием дуг. Под воздействием электромагнитного поля дуга выбрасывает из углубления металл, шлак,

при этом экранирующее действие шлака снижается и дуга излучает 20 % своей мощности в верхнюю часть объема печи, на водоохлаждаемые панели стен, свода. При полностью погруженной в металл и шлак дуге вследствие ее электромагнитного выдувания 20 % мощности дуги излучается в свободное пространство печи и поглощается внутрипечными газами и водой стеновых и сводовых панелей и уносится из печи (тепловые потери).

На рис. 1 график II характеризует изменение КПД дуг в зависимости $\eta_д = f(h_з/l_д)$ в ДСП-6. В ДСП-6 расстояние от дуг до стен 0,69 м (в 3 раза меньше по сравнению с ДСП-100), что сказывается на КПД дуг, который в ДСП-6 изменяется от $\eta_д = 0{,}35$ при отсутствии шлака (на 24 % меньше КПД дуги печи ДСП-100) до $\eta_д = 0{,}42$ при $h_з/l_д = 0{,}6$. В ДСП-6 устройства для вспенивания шлака отсутствуют, высота слоя шлака составляет 35…40 мм и дуги длительное время плавки работают с параметрами $h_з/l_д = 0{,}4…0{,}8$ и низким КПД $\eta_д = 0{,}38…0{,}55$, в результате чего в ДСП-6 возрастает расход электроэнергии до 475 кВт·ч/т на расплавление шихты и до 750 кВт·ч/т за плавку.

При использовании в ДСП-6 устройства для вспенивания шлака и повышении в результате вспенивания шлака среднего за период расплавления и за плавку в целом КПД дуг на 15 % до $\eta_{дс} = 0{,}67$ можно сократить удельный расход электроэнергии на расплавление и за плавку в целом на [15 % (0,75…1,0)] = 11…15 %, так как при каждом увеличении КПД дуги на 1 % удельный расход электроэнергии сокращается на 0,75…1 %. Таким образом, при использовании в ДСП-6 устройств для вспенивания шлака и заглублении дуг в шлак до значения $h_з/l_д = 0{,}9…1{,}0$ можно снизить в ДСП-6 удельный расход электроэнергии на расплавление ($G_{эр}$) и за плавку в целом ($G_э$) до значений:

$$G_{эр} = 475\ (0{,}89…0{,}85) = 423…404\ кВт·ч/т;$$

$$G_э = 750\ (0{,}89…0{,}85) = 667…638\ кВт·ч/т.$$

На практике при рассмотрении вопроса о целесообразности использования на малотоннажных печах устройств для вспенивания шлака анализируются капиталовложения на газоочистку, количество простоев печи, влияние вдувания кислорода и углеродосодержащего материала на повышение угара дорогостоящих легирующих элементов (хрома, молибдена, ванадия и других) на качество готового металла.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КПД ДУГ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ДСП

Рассчитали средний КПД дуг за период расплавления ДСП (вместимостью от 0,5 до 120 тонн) и сравнили со статическими данными об удельном расходе электроэнергии в действующих дуговых сталеплавильных печах [1–11, 15, 16]. По расчетным данным построили зависимость удельного расхода электроэнергии $G_э$ на расплавление от расстояния от дуг до стен $r_{ст}$ и вместимости печей G. Зависимость $G_э = f(r_{ст}, G)$ носит линейный характер до значения расстояния от дуг до стен в печи ДСП-6 $r_{ст} = 0{,}69$ м, после которого удельный расход электроэнергии резко возрастает (рис. 2).

Причины большого удельного расхода электроэнергии в малотоннажных печах по сравнению с большегрузными печами следующие. В большегрузных ДСП-100, ДСП-120 расстояние от дуг до стен 2…2,5 м. В процессе прорезки колодцев и горения дуг в колодцах в период расплавления шихты тепловое излучение дуг при горизонтальном слое шихты 2…2,5 м не достигает стен и тепловое излучение дуг полезно расходится на расплавление шихты и нагрев ванны металла.

В печах ДСП-0,5…ДСП-6 расстояние от дуг до стен очень маленькое: $r_{ст} = 0{,}31…0{,}69$ м, и в процессе прорезки колодцев и горения дуг в колодцах часть теплового излучения дуг, проходя через полости между кусками шихты, достигает

футеровки стен, вызывая нагрев огнеупоров, КПД дуг снижается, удельный расход электроэнергии увеличивается.

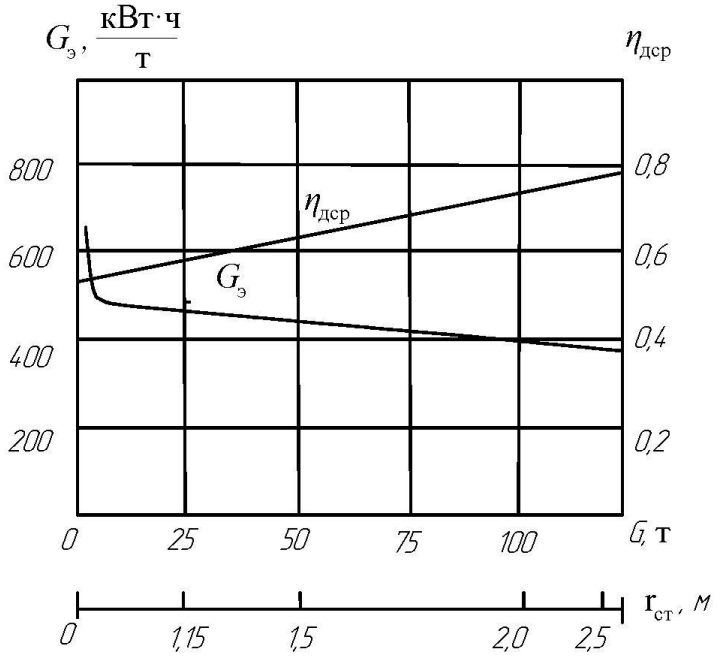


Рис. 2. Зависимость удельного расхода электроэнергии на расплавление и среднего за период расплавления КПД дуг от расстояния от дуг до стен и вместимости печей

Средний КПД дуг и удельный расход электроэнергии печей (см. рис. 2) в ДСП-120 $\eta_{дсп}$ = 0,78, $G_э$ = 375 кВт·ч/т; ДСП-6 $\eta_{дсп}$ = 0,57, $G_э$ = 475 кВт·ч/т. Зависимость $\eta_{дср} = f(r_{ст}, G)$ носит линейный характер. У ДСП-6 КПД дуг меньше, чем у ДСП-120 на 27 % (так как 0,57/0,78 = 0,73). В результате снижения среднего за период расплавления КПД дуг в ДСП-6 на 27 % по сравнению с средним КПД дуг ДСП-120 удельный расход электроэнергии на расплавление $\Delta G_э$ в ДСП-6 увеличивается на 27 %, так как $\Delta G_э$ = 475/375 = 1,27.

Ранее линейная зависимость удельного расхода электроэнергии и КПД дуг, высоты слоя шлака подтверждена экспериментальными исследованиями на ДСП-120 ОАО «Уральская сталь» [10]: при каждом увеличении КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии печью уменьшался на 0,75…1,0 %. Современные ДСП-100, оснащенные устройствами для вспенивания шлака, современными устройствами автоматизации, работают со средним за плавку КПД дуг $\eta_{дс}$ = 0,74…0,78, имеют удельный расход электроэнергии $G_э$ = 360…385 кВт·ч/т.

Показатели КПД дуг и удельного расхода электроэнергии у других печей следующие: ДСП-50 $\eta_{дс}$ = 0,63…0,65, $G_э$ = 420 кВт·ч/т; ДСП-25 $\eta_{дс}$ = 0,59…0,62, $G_э$ = 440 кВт·ч/т; ДСП-12 $\eta_{дс}$ = 0,57…0,60, $G_э$ = 450 кВт·ч/т. Данные эксплуатационные показатели дуговых сталеплавильных печей подтверждают линейную зависимость удельного расхода электроэнергии от расчетного КПД дуг печей, подтверждают правильность расчетов КПД дуг ДСП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными аналитическими исследованиями установлено, что с увеличением высоты слоя шлака от 0 до 325 мм в 100-тонных ДСП КПД дуг возрастает с 0,45 до 0,75. С ростом высоты слоя шлака и высоты заглубления дуги в шлак КПД дуг в малотоннажных и большегрузных печах возрастает и достигает при полном погружении дуг в шлак 78...80 %, а удельный расход электроэнергии с ростом высоты слоя шлака, с ростом КПД дуг уменьшается. Аналитические исследования подтверждают экспериментальные исследования на 120-тонной ДСП ОАО «Уральская сталь»: при увеличении высоты слоя шлака и КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии печью уменьшался на 0,75…1,0 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makarov A.N. Effect of the Architecture on Energy Efficiency of Electric Arc Furnaces of Conventional and Consteel Designs // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9, pp. 882–891. DOI: 10.1007/s11015-019-00743-9.
2. Makarov A.N. Calculation and Analysis of Energy Parameters of Meltings in EAFS of Conventional and Consteel Design // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9-10, pp. 974–978. DOI: 10.1007/s11015-019-00733-x.
3. Макаров А.Н. Влияние конструктивного исполнения на энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel // *Металлург.* 2018. № 9. С. 30–36.
4. Макаров А.Н. Расчет и анализ энергетических параметров плавок в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel // *Металлург.* 2018. № 10. С. 13–15.
5. Евстратов В.Г., Киселев А.Д., Зинуров И.Ю. [и др.]. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе // *Электрометаллургия.* 2012. № 8. С. 2–6.
6. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
7. Окороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
8. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
9. Сойфер В.М. Выплавка стали в кислых электропечах. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.
10. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
11. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг горящих в парах металлов // *Электрометаллургия.* 2009. № 11. С. 19–24.
12. Волохонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
13. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
14. Тиходеев Г.М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги. М.: АН СССР, 1961. 236 с.
15. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубление в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах / Макаров А.Н [и др.] // *Промышленная энергетика*. 2014. № 1. С. 10– 95.

16. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи / Кузнецов М.С.[и др.]. // *Электрометаллургия.* 2010. № 2. С. 2–6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Влияние высоты слоя шлака на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 66–72.

INFLUENCE OF THE HEIGHT OF THE SLAG LAYER ON THE EFFICIENCY OF ARCS AND ELECTRICITY CONSUMPTION IN EAF

A.N. Makarov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Investigated the influence of the height of the slag layer in the nomenclature row EAFs, with a capacity from 0.5 to 120 tons, on the efficiency of arcs and specific power consumption in the furnaces. It was found that with an increase in the height of the slag layer, the efficiency of arcs in low-tonnage and heavy-duty furnaces increases and reaches 78…80 % when the arcs are completely immersed in the slag, and the specific power consumption decreases. With an increase in the height of the slag layer and an increase in the efficiency of arcs by 1%, the specific power consumption in the furnaces decreases by 0.75…1.0 %.

Keywords: electric arc, steel, furnace, heat exchange, energy saving.

REFERENCES

1. Makarov A.N. Effect of the architecture on energy efficiency of electric arc furnaces of conventional and Consteel designs. *Metallurgist.* 2019. Vol. 62. № 9, pp. 882–891. DOI: 10.1007/s11015-019-00743-9.
2. Makarov A.N. Calculation and analysis of energy parameters of meltings in EAFS of conventional and Consteel design. *Metallurgist.* 2019. Vol. 62. № 9-10, pp. 974–978. DOI: 10.1007/s11015-019-00733-x.
3. Makarov A.N. Influence of design on energy efficiency of EAF of conventional design and Consteel. *Metallurg.* 2018. № 9, pp. 30–36.
4. Makarov A.N. Calculation and analysis of energy parameters of smelting in EAF of conventional design and Consteel. *Metallurg.* 2018. № 10, pp. 13–15.
5. Evstratov V.G., Kiselev A.D., Zinurov I.Yu. [at al.]. Features of thermal operation of the an electric furnace EAF-120 Consteel at the Ashinsky Metallurgical Plant. *Electrometallurgy*. 2012. № 8, pp. 2–6.

6. Nikolsky L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. Thermal work of EAF. M.: Metallurgy, 1981. 344 p.
7. Okorokov N.V. EAF. M.: Metallurgy, 1971. 347 p.
8. Egorov A.V. Electrosmelting furnaces of ferrous metallurgy. M.: Metallurgy, 1985. 280 p.
9. Soifer V.M. Smelting steel in acidic electric furnaces. M.: Mechanical engineering, 2009. 480 p.
10. Makarov A.N. Heat exchange in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants. St. Petersburg: Lan, 2014. 384 p.
11. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. Electrical, geometric, thermal parameters of arcs burning in metal vapors. *Electrometallurgy*. 2009. № 11, pp. 19–24.
12. Volokhonsky L.A. Vacuum arc furnaces. M.: Energoatomizdat, 1985. 232 p.
13. Leskov G.I. Electric welding arc. M.: Mechanical Engineering, 1970. 335 p.
14. Tikhodeev G.M. Energy properties of electric welding arc. M.: USSR Academy of Sciences, 1961. 236 p.
15. Makarov A.N., Kuznetsov A.V., Rybakova V.V. [at al.]. On influence of electrode shape and arc parameters on its deepening into metal bath in EAF. *Industrial energy*. 2014. № 1, pp. 10–95.
16. Kuznetsov M.S., Yakushev E.V., Kulagin S.A. [at al.]. Influence of metal charge weight and slag thickness on steel smelting technology in arc furnace. *Electrometallurgy*. 2010. № 2, pp. 2–6.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Influence of the height of the slag layer on the efficiency of arcs and electricity consumption in electric arc furnace // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 66–72.

УДК 669.187:621.186

ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТИ, РАССТОЯНИЯ ОТ ДУГ ДО СТЕН НА КПД ДУГ И РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

А.Н. Макаров
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2020

Аннотация. Исследовано влияние расстояния от дуги до стен во всем номенклатурном ряде дуговых сталеплавильных печей (емкостью от 0,5 до 120 тонн) на КПД дуг и удельный расход электроэнергии в печах. В малотоннажных дуговых сталеплавильных печах дуги близко расположены к стенам, КПД дуг мал и составляет 30…35 %, а удельный расход электроэнергии на расплавление – 650 кВт·ч/т.

В большегрузных дуговых сталеплавильных печах дуги расположены от стен далеко, КПД дуг составляет 46…49 % при отсутствии слоя шлака, а удельный расход электроэнергии на расплавление – 375…385 кВт·ч/т.

Ключевые слова: электрическая дуга, сталь, печь, теплообмен, энергосбережение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-72-81

ВВЕДЕНИЕ

В [1] изложены результаты расчета и анализа теплообмена в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) малой и большой емкости, однако отсутствует объяснение значительно большого удельного расхода электроэнергии в ДСП малой емкости по сравнению с ДСП большой емкости. Необходимо исследовать влияние расстояния от дуг до стен во всем номенклатурном ряде дуговых сталеплавильных печей от 0,5 до 120 тонн на КПД дуг и удельный расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах, а также установить пропорциональную взаимосвязь между КПД дуг и удельным потреблением электроэнергии печами.

ТЕПЛООБМЕН И КПД ДУГ В ДСП

Электрические дуги являются основными источниками тепловой энергии в дуговых сталеплавильных печах, на их долю приходится 55…65 % тепловой энергии, поступающей в современную высокомощную ДСП [1]. От газокислородных горелок, экзотермических реакций окисления железа и других элементов шихты кислородом, реакций окисления кокса и электродов в ДСП поступает 35…45 % энергии [1, 2]. Вся электрическая энергия в дугах ДСП преобразуется в тепловую энергию, тепловой поток. По результатам многочисленных экспериментальных исследований тепловой поток дуг на 90…96 % формируется тепловым излучением [3–11, 13–16]. На долю теплопроводности, конвекции приходится 4…10 % мощности дуг. В дугах, горящих в вакууме, на теплопроводность приходится 91 %, на тепловое излучение 9 % [12].

Мощность, выделяющаяся в дуге $P_Д$, распределяется следующим образом: большая часть мощности выделяется в столбе дуги $P_{ст}$, часть мощности выделяется в анодно-катодных пятнах $P_{ак}$, высота которых составляет несколько микрон, часть мощности забирают конвекцией омывающие дугу печные газы $P_к$:

$$P_Д = P_{ак} + P_к + P_{ст}. \quad (1)$$

На основании результатов исследований В. Пашкис, Н.В. Окоров [7], А.В. Егоров [8], Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Н.Л. Кузнецов [6], А.Н.Макаров [10] принимают, что в дугах высокомощных большегрузных дуговых сталеплавильных печей в столбе дуги выделяются 90 % мощности дуги в виде потока теплового излучения. На долю анодно-катодных пятен и омывающих дугу газов приходится 10 % мощности дуги:

$$P_Д = P_{ак} + P_к + P_{ст} = 0{,}1P_Д + 0{,}9P_Д. \quad (2)$$

Отношение полезной мощности дуги $P_{пол}$, идущей на нагрев, расплавление металла и шлака, к мощности дуги $P_Д$ характеризует коэффициент полезного использования тепла дуги или коэффициент полезного действия дуги:

$$\eta_Д = \frac{P_{пол}}{P_Д}. \quad (3)$$

Так как опорное анодно-катодное пятно дуги на ванне теплопроводностью передает всю выделяющуюся в нем мощность металлу, опорное пятно на графитовом электроде, интенсивно излучающее на ванну металла, и газ, омывающий дугу, передают не менее

80 % выделяющейся в них мощности ванне металла, то выражение для расчета КПД дуги большегрузных ДСП имеет вид [1]

$$\eta_Д = \frac{P_{пол}}{P_Д} = \frac{(0{,}8 \cdot 0{,}1)P_Д + 0{,}9 P_Д \varphi_{ДМ}}{P_Д} = 0{,}08 + 0{,}9\varphi_{ДМ}, \quad (4)$$

где $\varphi_{ДМ}$ – средний угловой коэффициент излучения столба дуги на металл, показывающий долю мощности, излучаемую столбом дуги на ванну металла и металлошихту.

В формуле (4), по которой определяли КПД дуг большегрузных 100-тонных ДСП в конце 1990-х – начале 2000-х гг., доля мощности, выделяющейся в столбе дуги, принята равной 0,9, в анодно-катодных областях – 0,1. В 2000-е гг. мощность электропечных трансформаторов, питающих 100-тонные ДСП, увеличили, с этого времени начали использовать при плавлении металла длинные дуги. При использовании длинных дуг доля мощности, выделяющейся в столбе дуги, увеличилась, следовательно, необходима корректировка выражения (4) для расчета КПД дуг. В печах вместимостью 3…50 тонн доля мощности дуги, выделяющейся в столбе дуги, несколько меньше 90 %, следовательно, выражение (4) для них должно быть скорректировано.

ИССЛЕДОВАНИЕ КПД ДУГ ДСП

Долю мощности, выделяющейся в столбе дуги, определяли по выражению

$$\frac{P_{ст}}{P_Д} = \frac{I_Д U_{ст}}{I_Д U_Д} = \frac{U_{ст}}{U_Д}, \quad (5)$$

где $I_Д$, $U_{СТ}$ – соответственно ток дуги и напряжение на столбе дуги.

Долю мощности, выделяющуюся в анодно-катодных пятнах, определяли по выражению

$$\frac{P_{ак}}{P_Д} = \frac{I_Д U_{ак}}{I_Д U_Д} = \frac{U_{ак}}{U_Д}, \quad (6)$$

где $U_{ак}$ – анодно-катодное падение напряжения, $U_{ак}$ = 20 В [1].

Результаты расчета распределения мощности дуги в столбе и анодно-катодных областях для окончания периода расплавления шихты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Распределение падения напряжения в столбе
и анодно-катодных областях дуги ДСП
всего номенклаткурного ряда вместимостей

ДСП / Параметр	ДСП-0,5	ДСП-3	ДСП-6	ДСП-25	ДСП-50	ДСП-100 короткие дуги	ДСП-100 длинные дуги	ДСП-120
$U_д$, В	111	128	140	163	185	200	280	320
$U_{ст}$, В	91	108	120	143	165	180	260	300
$U_{ак}/U_д$	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,07	0,06
$U_{ст}/U_д$	0,82	0,84	0,88	0,88	0,89	0,90	0,93	0,94

Из результатов расчета и анализа расчетных данных табл. 1 следует, что доля мощности, выделяющейся в столбе дуги, изменяется от 0,82 в ДСП-0,5 до 0,94 в ДСП-120. Доля мощности, выделяющаяся в анодно-катодных пятнах дуги, изменяется от 0,18 в ДСП-0,5 до 0,06 в ДСП-120.

С учетом вышеизложенного аналитическое выражение (4) для расчета КПД дуг ДСП всего номенклатурного ряда вместимости печей принимает вид

$$\eta_Д = \frac{P_{пол}}{P_Д} = \frac{0{,}8\left(\frac{P_{пол}}{P_Д}\right)P_Д + \left(\frac{U_{ст}}{U_Д}\right)P_Д\,\varphi_Д}{P_Д} = 0{,}8\left(\frac{U_{ак}}{U_Д}\right) + \left(\frac{U_{ст}}{U_Д}\right)\varphi_{ДМ}. \quad (7)$$

Исследовали влияние конструкции печей, в частности влияние диаметра распада и электродов и расстояния от дуг до стен печей на КПД дуг всего номенклатурного ряда вместимостей от 0,5 до 120 тонн (рис. 1). На рис. 1 построена часть рабочего пространства ДСП, стена, ванна металла, электроды, электрические дуги. Футеровка пода, откосов, водоохлаждаемые панели стен не показаны. На рис. 1 совмещены ДСП-0,5…ДСП-120. Расположение электродов, дуг и стен печей в масштабе повторяет их расположение в печах ДСП-0,5…ДСП-120. Технические данные ДСП приведены в табл. 2. На рис. 1 приведен пример нахождения дуги печи ДСП-100 под толстым слоем шлака.

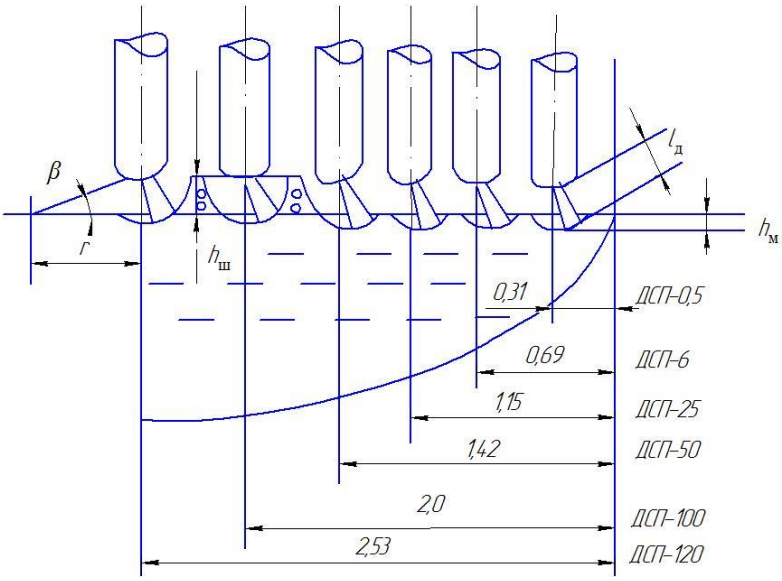


Рис. 1. Расположение дуг в печах малой и большой вместимости ДСП-0,5…ДСП-120 и расстояние от дуг до стен

Таблица 2

Технические данные дуговых сталеплавильных печей

Параметр / Печь	G, т	S, МВА	$D_в$, м	$d_р$, м	$r_{ст}$, м	$G_э$, кВт·ч/т	$U_{2л}$, В	$I_Д$, кА
ДСП-0,5	0,5	0,63	1,1	0,48	0,31	650	98…216	1,7
ДСП-1,5	1,5	1,25	1,5	0,52	0,49	540	103…225	3,2
ДСП-3	3	2,5	1,8	0,7	0,55	520	140…245	5
ДСП-6	6	5,0	2,27	0,9	0,69	475	130…291	9

Окончание табл. 2

Параметр / Печь	G, т	S, МВА	$D_в$, м	$d_р$, м	$r_{ст}$, м	$G_э$, кВт·ч/т	$U_{2л}$, В	$I_Д$, кА
ДСП-12	12	9,0	2,7	1,0	0,85	450	115…318	17
ДСП-25	25	15,0	3,54	1,25	1,15	440	130…390	23
ДСП-50	50	40,0	4,56	1,6	1,48	420	133…417	50
ДСП-100	100	80	5,4	1,4	2,0	385	300…829	80
ДСП-120	120	100	6,8	1,75	2,53	375	600…1 100	75

Примечание. G – вместимость, т; S – мощность трансформатора, МВА; $D_в$ – диаметр ванны на уровне откосов, м; $d_р$ – диаметр распада электродов, м; $r_{ст}$ – расстояние от стен до дуг, м; $G_э$ – удельный расход электроэнергии на расплавление, кВт·ч/т; $U_{2л}$ – вторичное линейное напряжение электропечного трансформатора, В; $I_Д$ – ток дуги, кА.

Для того чтобы исключить влияние высоты слоя шлака на КПД дуг и выявить влияние конструктивных особенностей печей, расстояния от дуг до стен на КПД дуг, расчет КПД дуг осуществляли для окончания периода расплавления при отсутствии во всех печах слоя шлака $h_ш$ на ванне металла. Длину дуги определяли по выражению [1]

$$l_Д = \frac{U_Д - U_{ак}}{grad\,U_{ст}}\ , \tag{8}$$

где $gradU_{ст}$ = 0,8 В/мм – градиент напряжения в столбе дуги.

Высота заглубления дуги $h_з$ при отсутствии шлака равна высоте заглубления дуги в металл $h_м$:

$$h_з = h_м\ , h_з = к_з I_Д\ , \tag{9}$$

где $к_з$ – коэффициент заглубления дуги в ванну металла, определяется по графикам [1], $к_з$ = 0,8 мм/кА для токов до 10 кА, $к_з$ = 1,25…1,40 для токов 60…80 кА соответственно.

Расчет КПД дуг ДСП-0,5, ДСП-100, ДСП-120 осуществляли по выражению (7). Для расчетов использовали данные табл. 1 и 2. Средний угловой коэффициент излучения дуги на ванну металла определяли по методике, изложенной в [10], в соответствии с которой поверхность ванны металла разбивается на несколько сотен расчетных площадок одинаковой площади $F_к$ (в данном случае расчета на 216 площадок (рис. 2)), на каждую из которых по формулам, изложенным в [10], определяется доля излучения столба дуги с учетом его заглубления в ванну металла, т. е. определяется локальный угловой коэффициент излучения столба дуги на расчетную площадку. Для расчета локальных и среднего углового коэффициента излучения дуги на ванну металла использовали пакет программ Microsoft, Excel, MathCad, Visual Fortran 6.0.

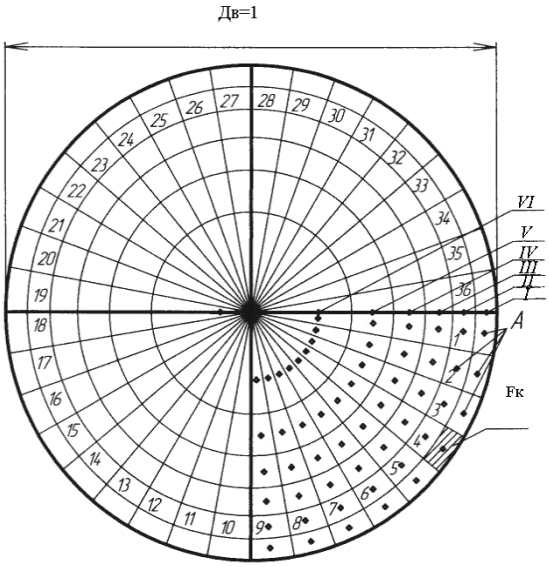


Рис. 2. Разбиение ванны металла на 216 элементарных расчетных площадок $F_к$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КПД ДУГ В ДСП

На рис. 3 представлены результаты расчета средних угловых коэффициентов излучения дуги на ванну металла $\varphi_{ДМ}$, средних угловых коэффициентов излучения дуги на стены и свод печи $\varphi_{ДС}$, КПД дуг $\eta_Д$. Как видно из рис. 3, чем ближе дуги расположены к стенам ДСП, тем меньше средний угловой коэффициент излучения дуги на ванну металла и КПД дуги и тем больше средний угловой коэффициент излучения дуги на стены и свод печи и удельный расход электроэнергии на расплавление.

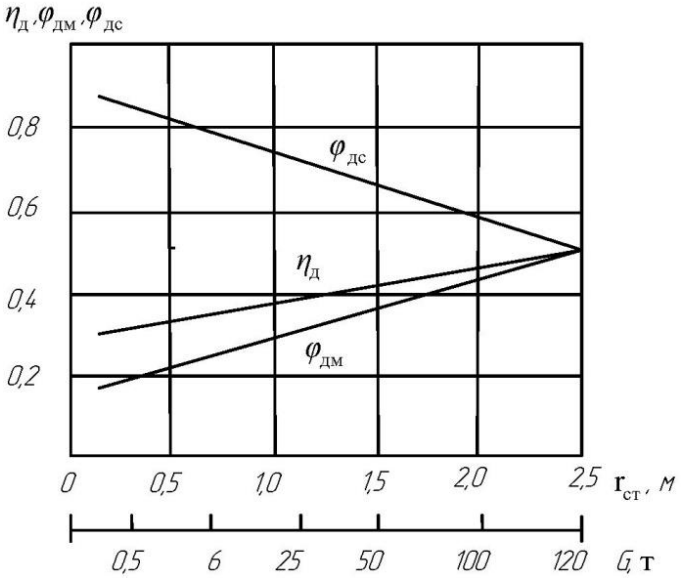


Рис. 3. Зависимость КПД дуг, средних угловых коэффициентов излучения столба дуг на ванну металла, стены и свод от расстояния от дуг до стен и емкости печей

В ДСП-0,5 дуги очень близко расположены к стенам: $r_{ст}$ = 0,31 м, поэтому доля теплового излучения дуги на стены и свод велика и составляет $\varphi_{ДС}$ = 0,82, доля полезного теплового излучения дуги на ванну металла мала: $\varphi_{ДМ}$ = 0,18, поэтому КПД дуг ДСП-0,5 очень низок: $\eta_{Д}$ = 0,31, а удельный расход электроэнергии высок и составляет $G_{э}$ = 650 кВт·ч/т на расплавление шихты. В печи ДСП-6 расстояние от дуги до стен $r_{ст}$ = 0,69 м больше, чем в печи ДСП-0,5, соответственно, меньше доля теплового излучения дуги на стены и свод: $\varphi_{ДС}$ = 0,75, больше на ванну металла: $\varphi_{ДМ}$ = 0,25 и больше КПД дуги: $\eta_{Д}$ = 0,35, меньше удельный расход электроэнергии на расплавление: $G_{э}$ = 475 кВт·ч/т по сравнению с печью ДСП-0,5.

В ДСП-100, ДСП-120, диаметр ванны которых 5,4 и 6,8 м соответственно, соотношение $d_{р}/Д_{в}$ = 0,26, что соответствует рекомендуемому, дуги приближены к центру ванны и удалены от стен на расстояние 2,0 и 2,53 м соответственно, что сказалось на повышении КПД дуг до 0,46 и 0,49 соответственно и снижении удельного расхода электроэнергии на расплавление до 385 и 375 кВт·ч/т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными аналитическими исследованиями КПД дуг установлено следующее. В печах малой емкости диаметр кожуха, ванны металла мал, дуги близко расположены к стенам и доля теплового излучения дуг на стены и свод в 4 раза больше доли теплового излучения дуг на ванну металла. У печей малой емкости КПД дуг мал, а удельный расход электроэнергии велик. В печах большой вместимости диаметр кожуха и ванны металла 5…7 м, дуги удалены от стен, доля теплового излучения дуг на ванну металла, КПД дуг возрастают по сравнению с печами малой емкости, а удельный расход электроэнергии снижается. Результаты расчета КПД дуг подтверждает практика эксплуатации ДСП. Удельный расход электроэнергии на расплавление составляет в печах малой емкости 650…700 кВт·ч/т, в печах большой емкости 375…385 кВт·ч/т.

Таким образом, теоретические исследования, результаты расчета угловых коэффициентов теплового излучения дуг на ванну, стены, свод, КПД дуг и практика эксплуатации ДСП находятся в гармоничном соответствии друг другу, результаты расчета подтверждены практикой эксплуатации печей: чем больше КПД дуг в ДСП, полученный расчетным путем, тем меньше удельный расход электроэнергии на расплавление шихты, полученный в результате практики эксплуатации печей. Так как практика является критерием истинности теоретических разработок, то в данном случае практика эксплуатации печей подтверждает правильность методики и выполненных расчетов средних угловых коэффициентов излучения дуг на ванну металла, стены, свод, КПД дуг дуговых сталеплавильных печей всего номенклатурного ряда вместимости от 0,5 до 120 тонн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makarov A.N. Calculation and analysis the relationship between the efficiency and position of electrical arcs furnace (EAF) of smaller and harger capacity. Part I. Calculation and analysis of the relationship between arc efficiency and power consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. № 3-4, pp. 341–349. DOI: 10.1007/s11015-019-00829-4.
2. Makarov A.N. Calculation and analysis the relationship between the efficiency and position of electrical arcs furnace (EAF) of smaller and harger capacity. Part II. Calculation and analysis of the relationship between position of arcs, walls and power consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. № 5-6, pp. 441–450. DOI: 10.1007/s11015-019-00844-5.

3. Макаров А.Н. Влияние конструктивного исполнения на энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel // *Металлург.* 2018. № 9. С. 30–36.
4. Макаров А.Н. Расчет и анализ энергетических параметров плавок в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel // *Металлург.* 2018. № 10. С. 13–15.
5. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / Евстратов В.Г. [и др.] // *Электрометаллургия.* 2012. № 8. С. 2–6.
6. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
7. Окороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
8. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
9. Сойфер В.М. Выплавка стали в кислых электропечах. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.
10. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
11. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг горящих в парах металлов // *Электрометаллургия.* 2009. № 11. С. 19–24.
12. Волохонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
13. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
14. Тиходеев Г.М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги. М.: АН СССР, 1961. 236 с.
15. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубление в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах / Макаров А.Н. [и др.] // *Промышленная энергетика*. 2014. № 1. С. 10– 95.
16. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи / Кузнецов М.С. [и др.] // *Электрометаллургия.* 2010. № 2. С. 2–6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Влияние емкости, расстояния от дуг до стен на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 72–81.

INFLUENCE OF CAPACITANCE, DISTANCE FROM ARCS TO WALLS ON THE EFFICIENCY OF ARCS AND ELECTRICITY CONSUMPTION IN EAF

A.N. Makarov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The influence of the distance from the arc to the walls in the entire nomenclature row of arc steelmaking furnaces with a capacity of 0.5 to 120 tons on the efficiency of the arcs and the specific consumption of electricity in the furnaces was investigated. In low-tonnage EAF, the arcs are close to the walls and the efficiency of the arcs is small and amounts to 30…35 %, and the specific electric power consumption for melting is 650 kWh/t. In heavy-duty EAF, the arcs are located far from the walls, the arc efficiency is 46…49 % in the absence of a slag layer, and the specific electric power consumption for melting is 375…385 kWh/t.

Keywords: electric arc, steel, furnace, heat exchange, energy saving.

REFERENCES

1. Makarov A.N. Calculation and analysis the relationship between the efficiency and position of electrical arcs furnace (EAF) of smaller and harger capacity. Part I. Calculation and analysis of the relationship between arc efficiency and power consumption // *Metallurgist.* 2019. Vol. 63. № 3-4, pp. 341–349. DOI: 10.1007/s11015-019-00829-4.
2. Makarov A.N. Calculation and analysis the relationship between the efficiency and position of electrical arcs furnace (EAF) of smaller and harger capacity. Part II. Calculation and analysis of the relationship between position of arcs, walls and power consumption // *Metallurgist.* 2019. Vol. 63. № 5-6, pp. 441–450. DOI: 10.1007/s11015-019-00844-5.
3. Makarov A.N. Influence of design on energy efficiency of EAF of conventional design and Consteel. *Metallurg.* 2018. № 9, pp. 30–36.
4. Makarov A.N. Calculation and analysis of energy parameters of smelting in EAF of conventional design and Consteel. *Metallurg.* 2018. № 10, pp. 13–15.
5. Evstratov V.G., Kiselev A.D., Zinurov I.Yu. [et al.]. Features of thermal operation of the an electric furnace EAF-120 Consteel at the Ashinsky Metallurgical Plant. *Electrometallurgy*. 2012. № 8, pp. 2–6.
6. Nikolsky L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. Thermal work of EAF. M.: Metallurgy, 1981. 344 p.
7. Okorokov N.V. EAF. M.: Metallurgy, 1971. 347 p.
8. Egorov A.V. Electrosmelting furnaces of ferrous metallurgy. M.: Metallurgy, 1985. 280 p.
9. Soifer V.M. Smelting steel in acidic electric furnaces. M.: Mechanical engineering, 2009. 480 p.
10. Makarov A.N. Heat exchange in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants. St. Petersburg: Lan, 2014. 384 p.
11. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. Electrical, geometric, thermal parameters of arcs burning in metal vapors. *Electrometallurgy.* 2009. № 11, pp. 19–24.
12. Volokhonsky L.A. Vacuum arc furnaces. M.: Energoatomizdat, 1985. 232 p.
13. Leskov G.I. Electric welding arc. M.: Mechanical Engineering, 1970. 335 p.
14. Tikhodeev G.M. Energy properties of electric welding arc. M.: USSR Academy of Sciences, 1961. 236 p.

15. Makarov A.N., Kuznetsov A.V., Rybakova V.V. [at al.]. On influence of electrode shape and arc parameters on its deepening into metal bath in EAF. *Industrial energy*. 2014. № 1, pp. 10–95.
16. Kuznetsov M.S., Yakushev E.V., Kulagin S.A. [at al.]. Influence of metal charge weight and slag thickness on steel smelting technology in arc furnace. *Electrometallurgy*. 2010. № 2, pp. 2–6.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Head of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Influence of capacitance, distance from arcs to walls on the efficiency of arcs and electricity consumption in electric arc furnace // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 72–81.

УДК 621.314.21.042.52

РАССЕЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ТРАНСФОРМАТОРАХ

И.П. Попов
Курганский государственный университет (г. Курган)

© Попов И.П., 2020

Аннотация. Существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности, поэтому часто для простоты полагают их равными друг другу. Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности, которое может быть выполнено по крайней мере тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов. Почти парадоксальный результат – емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки трансформатора получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток. Обобщать его на другие типы обмоток не следует. Представленные экспериментальные методы не привязаны к характеру реактивности сопротивлений рассеяния. Они являются универсальными – их можно использовать при любых типах обмоток. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, рассеяние, индуктивность, емкостность, потокосцепление, магнитный поток.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-81-88

ВВЕДЕНИЕ

Суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками

$$x = \frac{\omega\mu_0\pi D w^2}{l}\left(\frac{a_1}{3} + a_0 + \frac{a_2}{3}\right), \tag{1}$$

где ω – циклическая частота тока; μ_0 – постоянная магнитная; D – средний диаметр обмотки; w – число витков (приведенное); l – высота обмотки; a_0 – зазор между катушками; a_1, a_2 – толщины катушек.

Существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки в отдельности, поэтому часто для простоты полагают их равными половине от полученных в выражении (1). В действительности, применительно к рассматриваемому случаю, они существенно не равны.

Потокосцепление внешней обмотки

$$\Psi_2 = \frac{\mu_0\pi D}{l}\left(\int_0^{a_1} w_2 i \frac{w_1}{a_1} x dx + \int_0^{a_0} w_2 i w_2 dx + \int_0^{a_2} \frac{w_2}{a_2} x \frac{w_2}{a_2} x dx\right) = \frac{i\mu_0\pi D w^2}{l}\left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3}\right),$$

где i – приведенный ток; $w_1 = w_2 = w$ (индексы показаны для наглядности интегрирования). Отсюда реактивное сопротивление рассеяния внешней обмотки

$$x_2 = \frac{\omega\mu_0\pi D w^2}{l}\left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3}\right). \tag{2}$$

Вычитание его из формулы (1) дает реактивное сопротивление рассеяния внутренней обмотки

$$x_1 = -\frac{\omega\mu_0\pi D w^2}{l}\frac{a_1}{6}. \tag{3}$$

К такому результату пришел Е.Г. Марквардт, однако из-за отсутствия экспериментальной проверки признания он не получил.

Знак «–» в выражении (3) указывает на два обстоятельства:

1) внутренняя обмотка поглощает магнитный поток [1–5] в большей степени, чем рассеивает (рассеивает свой, поглощает от внешней обмотки);

2) ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным.

Из (2) и (3) следует, что

$$L_2 = \frac{\mu_0\pi D w^2}{l}\left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3}\right); \tag{4}$$

$$C_1 = \frac{6l}{\omega^2\mu_0\pi D w^2 a_1}. \tag{5}$$

Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки в отдельности и в

частности верификации выражений (2)–(5). *Актуальность работы* обусловлена повсеместным распространением трансформаторов.

С экспериментальным определением активных сопротивлений R_1 и R_2 обмоток нет никаких проблем.

Реактивное сопротивление рассеяния любой обмотки можно определить из формулы

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}\ .$$

Полное сопротивление z, казалось бы, можно определить в соответствии с законом Ома для участка цепи. Однако при коротком замыкании, при котором принято измерять реактивное сопротивление рассеяния, напряжение на вторичной обмотке равно нулю. По этой причине не следует раздельно измерять рассеяния обмоток.

Вместе с тем проблему можно решить несколькими способами. Это является основной *задачей работы*.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе исследования применялись общенаучные и математизированные методы, а также электротехнические расчеты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Высокоточный метод холостого хода

Из схемы замещения трансформатора (рис. 1) следует, что приведенное напряжение на вторичной обмотке

$$\dot{U}_2' = \dot{U}_0 = \dot{I}_0\, \underline{z}_0\,.$$

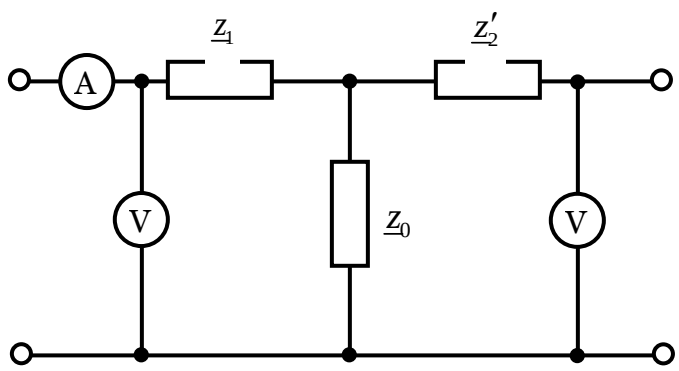


Рис. 1. Схема замещения трансформатора

Отсюда следует, что

$$\dot{U}_{z1} = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \dot{U}_1 - \dot{U}_2' = \dot{I}_1\, \underline{z}_1\,; \quad \underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2'}{\dot{I}_1}\,.$$

Из обратимости трансформатора вытекает, что

$$\underline{z}_2' = \frac{{}^2\dot{U}_2' - {}^2\dot{U}_1}{\dot{I}_2'}\,.$$

Здесь и далее верхний левый индекс «2» указывает, что величина получена во втором (обратимом) эксперименте.

Пример 1. Определить сопротивления рассеяния для трансформатора ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины: $\dot{U}_1 = 219{,}138\,\text{В}$; $\dot{U}'_2 = 219{,}054e^{j0{,}23^\circ}$ В; $\dot{I}_1 = 0{,}819e^{-j80{,}12^\circ}$ А; ${}^2\dot{U}'_2 = 218{,}825\,\text{В}$; ${}^2\dot{U}_1 = 218{,}343e^{j0{,}02^\circ}$ В; $\dot{I}'_2 = 0{,}817e^{-j80{,}32^\circ}$ А.

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}'_2}{\dot{I}_1} = \frac{219{,}138 - 219{,}054e^{j0{,}23^\circ}}{0{,}819e^{-j80{,}12^\circ}} = 1{,}075e^{-j4{,}33^\circ}\ \text{Ом};$$

$$r_1 = 1{,}072\,\text{Ом};\quad x_1 = -0{,}081\,\text{Ом};\quad C_1 = -\frac{1}{2\pi f x_1} = \frac{1}{2\pi\cdot 50\cdot 0{,}081} = 0{,}039\ \text{Ф};$$

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 - {}^2\dot{U}_1}{\dot{I}'_2} = \frac{218{,}825 - 218{,}343e^{j0{,}02^\circ}}{0{,}817e^{-j80{,}32^\circ}} = 0{,}601e^{j69{,}39^\circ}\ \text{Ом};$$

$$r'_2 = 0{,}211\,\text{Ом};\quad x'_2 = 0{,}562\,\text{Ом};$$

$$L'_2 = \frac{x'_2}{2\pi f} = \frac{0{,}562}{2\pi\cdot 50} = 1{,}790\cdot 10^{-3}\ \text{Гн}.$$

Высокоточный метод короткого замыкания

Из схемы замещения трансформатора следует, что

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0\,\underline{z}_0 = \dot{I}'_2\,\underline{z}'_2;\quad \underline{z}_0 = \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_0}\,\underline{z}'_2.$$

Полное сопротивление при коротком замыкании:

$$\underline{z} = z_1 + \frac{\underline{z}_0\underline{z}'_2}{\underline{z}_0 + \underline{z}'_2} = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0\,\underline{z}'^2_2}{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0\,\underline{z}'_2 + \underline{z}'_2} = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_0}\,\underline{z}'_2 = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_1 - \dot{I}'_2}\,\underline{z}'_2 = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1}\,\underline{z}'_2;$$

$$\underline{z} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1}\,\underline{z}'_2.$$

Отсюда следует, что

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1}\,\underline{z}'_2.$$

Из обратимости трансформатора вытекает, что

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_2}\,\underline{z}_1;\quad \underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1}\left(\frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_2}\,\underline{z}_1\right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1}\frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1}\frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_2}\,\underline{z}_1;$$

$$\underline{z}_1\left(1 - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1}\frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_2}\right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1}\frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2};\quad \underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1\,{}^2\dot{I}'_2 - {}^2\dot{U}'_2\,\dot{I}'_2}{\dot{I}_1\,{}^2\dot{I}'_2 - \dot{I}'_2\,{}^2\dot{I}_1}.$$

Из обратимости трансформатора следует, что

$$\underline{z}_2' = \frac{{}^2\dot{U}_2' \dot{I}_1 - \dot{U}_1 {}^2\dot{I}_1}{\dot{I}_1 {}^2\dot{I}_2' - \dot{I}_2' {}^2\dot{I}_1}.$$

Пример 2. Трансформатор ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины: $\dot{U}_1 = 5,513$ В; $\dot{I}_1 = 4,025e^{-j20,50°}$ А; $\dot{I}_2' = 4,016e^{-j20,48°}$ А; ${}^2\dot{U}_2' = 5,572$ В; ${}^2I_2' = 4,061e^{j20,71°}$ А; ${}^2\dot{I}_1 = 5,660e^{-j19,29°}$ А.

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 {}^2\dot{I}_2' - {}^2\dot{U}_2' \dot{I}_2'}{\dot{I}_1 {}^2\dot{I}_2' - \dot{I}_2' {}^2\dot{I}_1} = \frac{5,513 \cdot 4,061e^{j20,71°} - 5,572 \cdot 4,016e^{-j20,48°}}{4,025e^{-j20,50°} \cdot 4,061e^{j20,71°} - 4,016e^{-j20,48°} \cdot 5,660e^{-j19,29°}} = 1,072e^{-j4,29°} \text{ Ом};$$

$$r_1 = 1,069 \text{ Ом}; \quad x_1 = -0,080 \text{ Ом};$$

$$\underline{z}_2' = \frac{{}^2\dot{U}_2' \dot{I}_1 - \dot{U}_1 {}^2\dot{I}_1}{\dot{I}_1 {}^2\dot{I}_2' - \dot{I}_2' {}^2\dot{I}_1} = \frac{5,572 \cdot 4,025e^{-j20,50°} - 5,513 \cdot 5,660e^{-j19,29°}}{4,025e^{-j20,50°} \cdot 4,061e^{j20,71°} - 4,016e^{-j20,48°} \cdot 5,660e^{-j19,29°}} = 0,597e^{j69,42°} \text{ Ом};$$

$$r_2' = 0,210 \text{ Ом}; \quad x_2' = 0,559 \text{ Ом}.$$

Приближенный метод короткого замыкания при последовательном соединении

У двух идентичных трансформаторов последовательно соединяются как первичные, так и вторичные обмотки. В результате схема принимает вид, представленный на рис. 2.

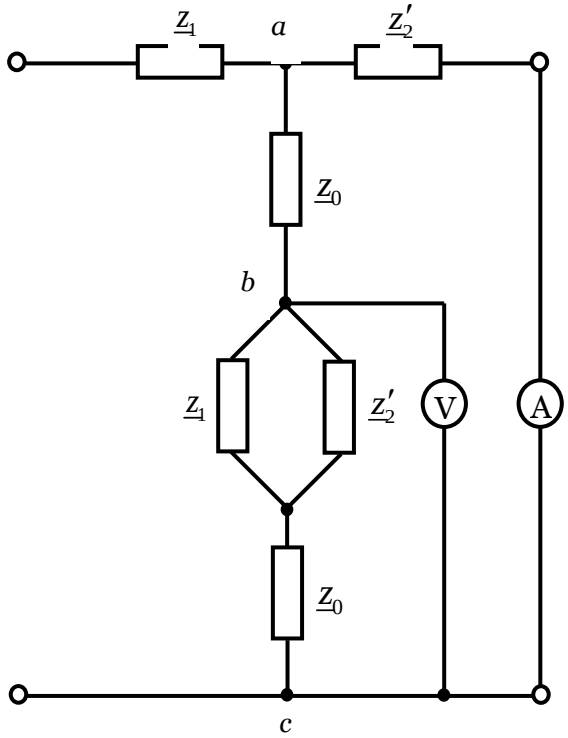


Рис. 2. Схема замещения
для последовательного соединения

Ввиду того, что величины z_1 и z_2 значительно меньше z_0, справедливо соотношение

$$U_{bc} \approx 0,5U_{ac}.$$

Учитывая, что $U_{ac} = U_{z2}$:

$$z_2 = \frac{2U_{bc}}{I_2'}.$$

Величины r_1, r_2, $x_k = x_1 + x_2$ определяются известными экспериментальными методами:

$$x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}; \quad x_1 = x_k - x_2.$$

Кроме того, последний результат может быть получен с использованием обратимости трансформатора:

$$z_1 = \frac{2\,{}^2U_{bc}}{{}^2I_1}; \quad x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}.$$

Пример 3. Два идентичных трансформатора ОСМ-1,00 соединены по схеме в соответствии с рис. 2. Измеренные величины: $U_{bc} = 1,2$ В; $I_2' = 3,9$ А; r_1 = 1,1 Ом; r_2' = 0,2 Ом; x_k = 0,52 Ом.

$$z_2' = \frac{2U_{bc}}{I_2'} = \frac{2 \cdot 1,2}{3,9} = 0,62 \text{ Ом};$$

$$x_2' = \sqrt{z_2'^2 - r_2'^2} = \sqrt{0,62^2 - 0,2^2} = 0,59 \text{ Ом};$$

$$x_1 = x_k - x_2' = 0,52 - 0,59 = -0,07 \text{ Ом}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реактивное сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено по крайней мере тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов.

Почти парадоксальный результат – емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток. Обобщать его на другие типы обмоток не следует. Этот результат не является беспрецедентным [6–10]. Индуктивная электрическая машина – синхронный компенсатор в перевозбужденном состоянии тоже имеет емкостный характер.

Представленные экспериментальные методы не привязаны к характеру реактивности сопротивлений рассеяния. Они являются универсальными: их можно применять при любых типах обмоток.

Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Дуально-инверсный аналог силы Ампера для магнитопровода с изменяющимся магнитным потоком, находящегося в электрическом поле // *Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки*. Вып. 2. 2009. № 1 (15). С. 51–52.
2. Попов И.П. Комбинированные векторы и магнитный заряд // *Прикладная физика и математика*. 2018. № 6. С. 12–20. DOI: 10.25791/pfim.06.2018.329.

3. Попов И.П. Математическое моделирование формального аналога электромагнитного поля // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2016. № 4. С. 36–60.
4. Попов И.П. Построение модели квазиэлектромагнитного поля. Часть 2 // *Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки*. Вып. 9. 2016. № 4 (43). С. 73–79.
5. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
6. Попов И.П. Математическая модель искусственной электрической емкости для снижения пиковой нагрузки маневрового тепловоза // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2019. № 3. С. 57–64. DOI: 10.15593/2499-9873/2019.3.03.
7. Попов И.П. Установление частной функциональной зависимости между емкостью и массой // *Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки*. Вып. 4. 2011. № 2 (21). С. 85–87.
8. Попов И.П., Попов Д.П., Кубарева С.Ю. Реактивность термопары // *Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки*. Вып. 6. 2013. № 3 (30). С. 47–48.
9. Попов И.П., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. О емкостных и индуктивных свойствах электромеханических преобразователей // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. Вып. 6. 2011. № 1 (20). С. 102–103.
10. Попов И.П., Попов Д.П., Кубарева С.Ю. Вращательное инертно-емкостное зарядно-разрядное устройство // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. Вып. 7. 2012. № 2 (24). С. 85–86.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Игорь Павлович – ст. преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Рассеяние магнитного потока в трансформаторах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 81–88.

MAGNETIC FLUX SCATTERING IN TRANSFORMERS

I.P. Popov
Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. Existing methods do not allow measuring leakage reactance for each transformer winding separately, therefore, for simplicity, they are often assumed to be equal to each other. The purpose of the study is to substantiate the possibility of experimental determination of leakage reactance for each transformer winding separately. The dissipation reactance of each transformer winding separately can be determined by at least three experimental methods that give satisfactory agreement of the results. An almost paradoxical

result – the capacitive nature of the leakage resistance of the inner winding of the transformer was obtained only for concentric cylindrical windings. It should not be generalized to other types of windings. The presented experimental methods are not tied to the character of the leakage resistance reactivity. They are universal - they can be used with any type of winding. The results obtained are recommended for use in the design and study of transformers.

Keywords: transformer, winding, dissipation, inductance, capacitance, flux linkage, magnetic flux.

REFERENCES

1. Popov I.P. A dual-inverse analogue of the Ampere force for a magnetic circuit with a changing magnetic flux in an electric field. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennyye nauki*. Iss. 2. 2009. No. 1 (15), pp. 51, 52. (In Russian).
2. Popov I.P. Combined vectors and magnetic charge. *Prikladnaya fizika i matematika*. 2018. No. 6. pp. 12–20. DOI: 10.25791/pfim.06.2018.329. (In Russian).
3. Popov I.P. Mathematical modeling of the formal analogue of the electromagnetic field. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya*. 2016. No. 4, pp. 36–60. (In Russian).
4. Popov I.P. Building a model of a quasi-electromagnetic field. Part 2. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennyye nauki*. Iss. 9. 2016. No. 4 (43), pp. 73–79. (In Russian).
5. Popov I.P. Amplitude-frequency features of the load modes of a synchronous electric machine. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 49–56. (In Russian).
6. Popov I.P. Mathematical model of artificial electric capacity to reduce the peak load of a shunting locomotive. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya*. 2019. No. 3, pp. 57–64. DOI: 10.15593/2499-9873/2019.3.03. (In Russian).
7. Popov I.P. Establishment of a particular functional relationship between capacity and mass. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennyye nauki*. Iss. 4. 2011. No. 2 (21), pp. 85–87. (In Russian).
8. Popov I.P., Popov D.P., Kubareva S.Yu. Thermocouple reactivity. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennyye nauki*. Iss. 6. 2013. No. 3 (30), pp. 47, 48. (In Russian).
9. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. On the capacitive and inductive properties of electromechanical converters. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. Iss. 6. 2011. No. 1 (20), pp. 102, 103. (In Russian).
10. Popov I.P., Popov D.P., Kubareva S.Yu. Rotary Inert Capacitive Charger. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. Iss. 7. 2012. No. 2 (24), pp. 85, 86. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – Senior Lecturer of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, Kurgan State University, 640020, 63/4, Sovetskaja, Kurgan, Russian Federation.

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Magnetic flux scattering in transformers // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 81–88.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 674.093

УДЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ

Ф.В. Качановский
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Качановский Ф.В., 2020

Аннотация. Проведен статистический анализ динамики удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2019 гг. Построена математическая модель статистического ряда удельной электропроводности осадков. Установлен слабый рост удельной электропроводности в 2016–2019 гг.

Ключевые слова: удельная электропроводность, кислотность, атмосферные осадки, модель, временной ряд, тренд, циклическая компонента, сезонная компонента, случайная компонента, показатель кислотности *pH*, направление ветра.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-89-97

Существенной количественной оценкой способности водного раствора проводить электрический ток является электропроводность воды. В природных условиях она обусловлена содержанием растворенных минеральных солей и температурой. Удельная электропроводность воды (мкСм/см) – приблизительный показатель суммарной концентрации электролитов – используется в наблюдениях за состоянием водной среды и служит суммарным индикатором антропогенного воздействия.

Наблюдения за электропроводностью осадков, выпадающих в Твери, проводятся лабораторией мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии с 2016 г. За четыре года (2016–2019) произведены 494 измерения (около 10 измерений в месяц). Интервалы между срочными измерениями изменяются от одних суток до двух декад. Временная последовательность срочных значений удельной электропроводности, здесь и далее обозначаемая как *cw*, представлена на рис. 1. Значения *cw* группируются в основном в интервале 0–25 мкСм/см, хотя отдельные редкие «выбросы» превышают 70 мкСм/см.

Одновременно с наблюдениями за *cw* проводятся наблюдения за показателем кислотности *pH*, количеством выпадающих осадков *pre*, температурой воздуха *t*, а также направлением *win* и скоростью ветра *v*.

Настоящая публикация содержит результаты статистического анализа удельной электропроводности осадков *cw*, выпавших в Твери в 2016–2019 гг. Анализ начат в 2019 г., результаты анализа трехлетних наблюдений опубликованы в [1]. Последовательность *cw* рассматривается как нестационарный временной ряд [2].

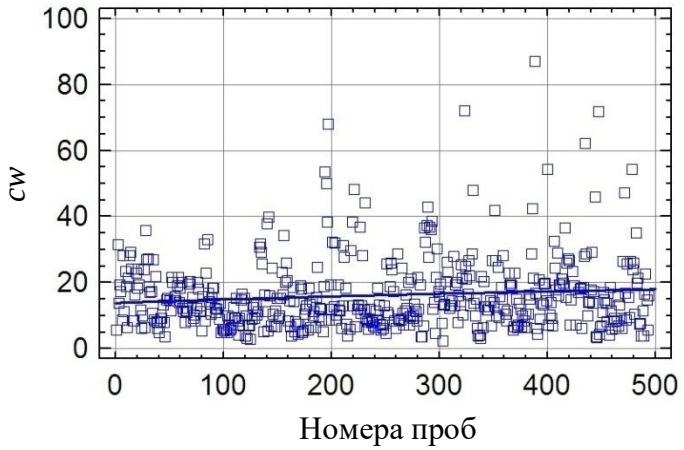


Рис. 1. Ряд срочных значений и квадратический тренд удельной электропроводности *cw* за 2016–2019 гг.

Наибольший практический интерес представляет тренд ряда. В качестве модели тренда принята полиномиальная кривая регрессии. Характер значений *cw* показывает (см. рис. 1), что для предварительного анализа приемлемы модели 1-го и 2-го порядка. Уравнения моделей имеют вид:

$$cw = 14{,}9013 + 0{,}00467758n; \quad (1)$$

$$cw = 13{,}8331 + 0{,}0109582n - 0{,}00000549024n^2, \quad (2)$$

где n – порядковый номер члена ряда. Уравнения (1) и (2) свидетельствуют о медленном росте значений *cw* с течением времени, причем квадратическая модель (показана на рис. 1) обнаруживает некоторое замедление роста.

Установлена умеренно слабая положительная связь между срочными значениями удельной электропроводности *cw* и показателя кислотности *pH*, оцениваемая коэффициентом корреляции 0,20234 (на доверительном уровне 95 %). С ростом показателя *pH* электропроводность *cw* растет (рис. 2), значит, электропроводность осадков увеличивается при снижении их кислотности.

Относительно слабая зависимость удельной электропроводности *cw* от суточного количества выпадающих осадков *pre* (в мм) характеризуется коэффициентом корреляции – 0,210906 (на 95%-м уровне доверительной вероятности) и показана на рис. 3.

Уравнение связи имеет вид

$$cw = 18{,}2157 - 0{,}429436pre. \quad (3)$$

Для установления связи между срочными значениями электропроводности *cw* и направления ветра *win* построены модели 1-го и 2-го порядка, т. е. линейная и квадратическая. Коэффициент корреляции для линейной модели составляет –0,0227416. Уравнения моделей имеют вид:

$$cw = 16{,}583 - 0{,}00290706win; \quad (4)$$

$$cw = 16{,}48 - 0{,}00131491win - 0{,}00000460959win^2. \quad (5)$$

Таким образом, статистически значимая связь между срочными значениями электропроводности *cw* и срочными значениями направления ветра *win* на доверительном уровне 90 % (или выше) не установлена (не существует?).

Установлена относительно слабая положительная связь (рис. 4) электропроводности *cw* со среднесуточными температурами воздуха *t* (град).

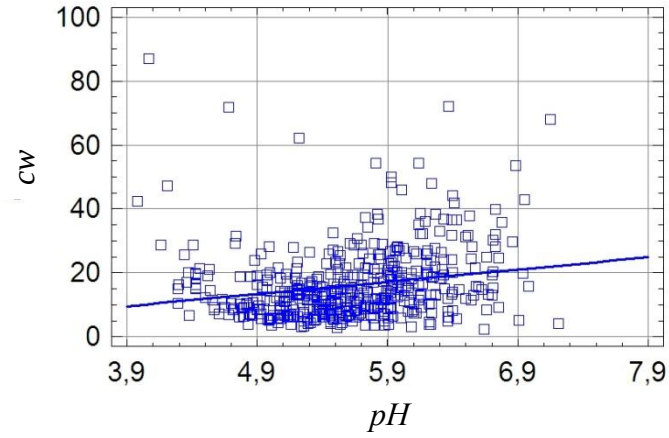


Рис. 2. Связь срочных значений электропроводности *cw* и показателя кислотности осадков *pH* за 2016–2019 гг.

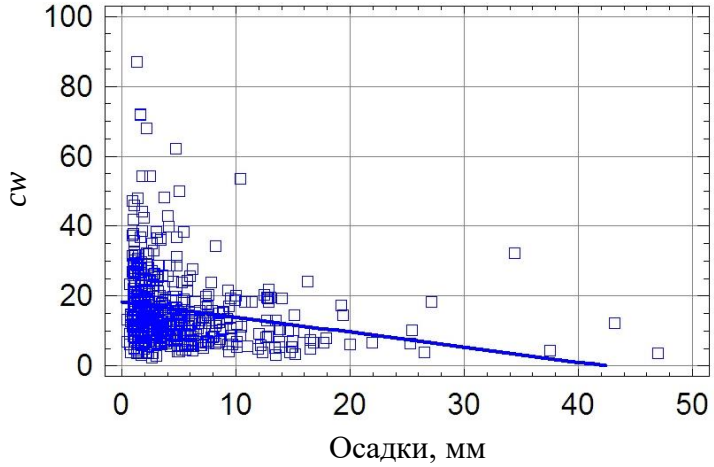


Рис. 3. Связь срочных значений электропроводности *cw* и суточного количества осадков *pre* за 2016–2019 гг.

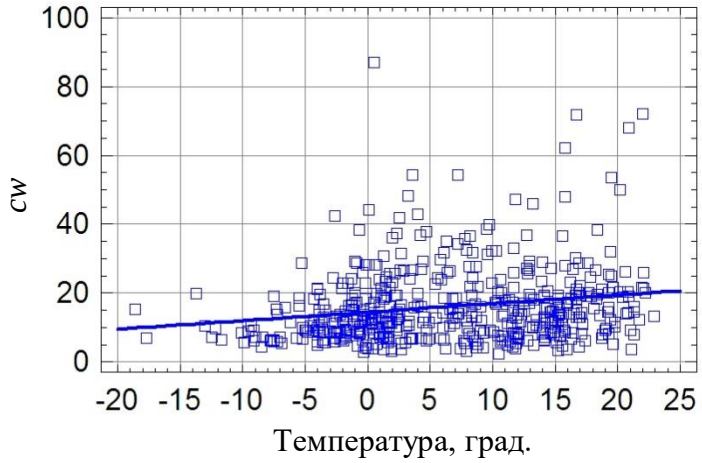


Рис. 4. Связь срочных значений электропроводности *cw* и среднесуточных температур воздуха *t* за 2016–2019 гг.

Коэффициент корреляции равен 0,19183, уравнение связи имеет вид

$$cw = 14{,}4524 + 0{,}249723t. \quad (6)$$

Переход от наблюдавшихся (срочных) значений *cw* к среднемесячным *amcw* позволяет рассматривать совокупность среднемесячных значений удельной электропроводности как нестационарный временной ряд из 48 членов (месяцев), показанный на рис. 5. Такой переход дает возможность обнаружить некоторые важные свойства исследуемой величины. Из содержательных соображений относительно причин изменчивости *amcw* принята аддитивная модель ряда *amcw*, состоящая из 4 компонент: тренда, циклической, сезонной и случайной.

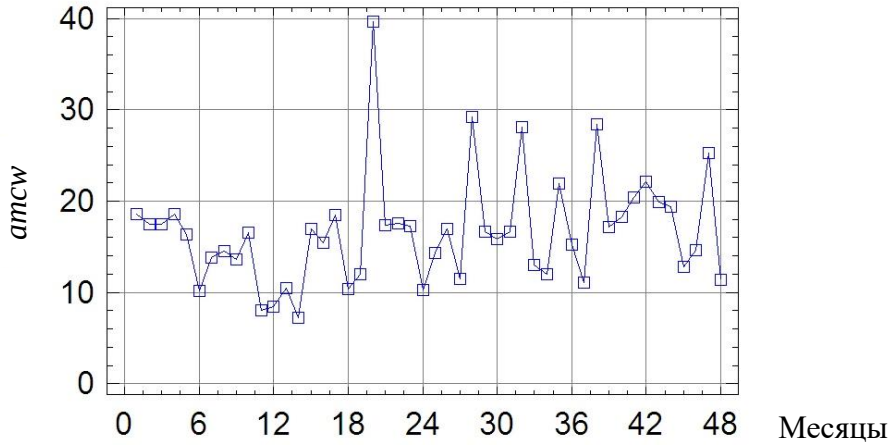


Рис. 5. Ряд среднемесячных значений
удельной электропроводности *amcw* за 2016–2019 гг.

При построении модели ряда *amcw* видимая (наблюдаемая) изменчивость ряда в соответствии с основной идеей статистики разделена на закономерную (детерминированную) d_t и случайную ε_t составляющие:

$$amcw_t = d_t + \varepsilon_t. \quad (7)$$

Закономерная составляющая d_t может быть представлена как функция времени *t*. Для описания случайной составляющей ε_t необходим статистический подход.

Закономерная составляющая d_t, в свою очередь, представлена трехчленной аддитивной моделью общего вида [2]:

$$d_t = tr_t + c_t + s_t, \quad (8)$$

где tr_t, c_t, s_t – тренд, циклическая и сезонная компоненты.

На 1-м этапе декомпозиции исходного ряда *amcw* определена сумма trc_t двух первых членов уравнения (8):

$$trc_t = tr_t + c_t. \quad (9)$$

На 2-м этапе из суммарной компоненты trc_t вычтен тренд tr_t и выделена циклическая составляющая c_t ряда *amcw*:

$$c_t = trc_t - tr_t. \quad (10)$$

Суммарная компонента trc_t (показана на рис. 6) получена сглаживанием исходного ряда *amcw* с помощью простого арифметического скользящего среднего с интервалом сглаживания 12 значений. При этом сглаженный ряд стал короче исходного на 12 членов (не определены 6 членов в начале ряда и 6 в конце).

Наибольший интерес представляет тренд ряда *amcw*. В качестве общей модели тренда принята полиномиальная кривая регрессии. Характер значений *amcw* в ряду показывает (см. рис. 5), что для предварительного анализа этого сравнительно короткого ряда подходят модели 2-го и 3-го порядка, т. е. квадратическая и кубическая (показаны на рис. 6).

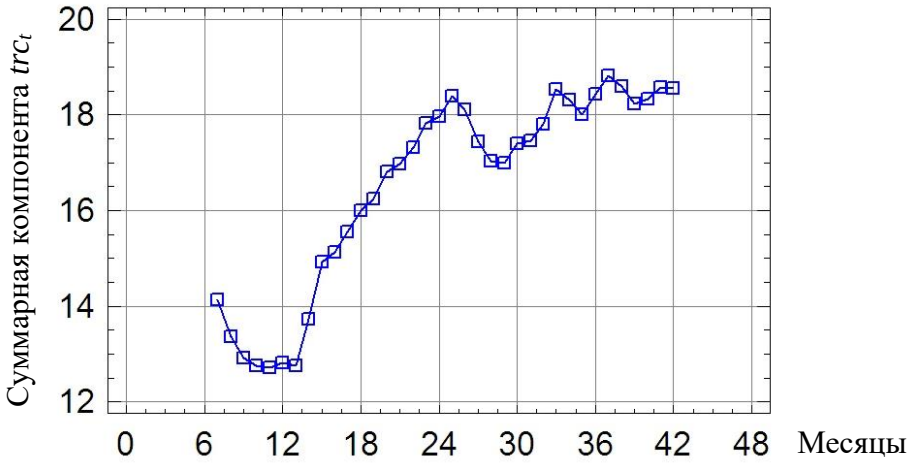


Рис. 6. Суммарная компонента trc_t (тренд + циклическая компонента) ряда *amcw* за 2016–2019 гг.

Уравнение квадратической модели:

$$tr_{\text{ква}} = 14{,}1556 + 0{,}109514n - 0{,}000253528n^2\,; \qquad (11)$$

уравнение кубической модели:

$$tr_{\text{куб}} = 18{,}3529 - 0{,}868436n + 0{,}0491265n^2 - 0{,}000671838n^3, \qquad (12)$$

где n – порядковый номер члена ряда (месяца).

Квадратический тренд отражает основную (и важную) черту поведения ряда *amcw* и его суммарной компоненты trc_t – рост значений с течением времени.

Очертания кубического тренда $tr_{\text{куб}}$ весьма схожи с таковыми у суммарной компоненты trc_t. Кроме того, совпадают по времени локальный минимум и локальный максимум обеих кривых.

Циклическая компонента c_t получена по формуле (10) в двух вариантах: А – вычитанием из trc_t квадратического тренда $tr_{\text{ква}}$; Б – вычитанием из trc_t кубического тренда $tr_{\text{куб}}$. Оба варианта c_t и соответствующие им тренды показаны на рис. 7.

Компоненту c_t, описывающую длительные подъемы и спады значений *amcw*, можно качественно оценить по ее отклонению от трендов. Продолжительность единственного цикла составляет около 24 месяцев, или около 2 лет. Значения обоих трендов на порядок больше соответствующих значений компоненты c_t. Это означает, что тренды (особенно кубический) описывают основную долю (более 90 %) детерминированной части ряда *amcw*. Стоит обратить внимание, что локальные минимум и максимум циклической компоненты практически совпадают по времени с таковыми у кубического тренда. Таким образом, кубический тренд представляется более предпочтительным для описания ряда *amcw*, чем квадратический. Что касается причин наблюдаемого характера поведения циклической компоненты, то судить о них сложно без привлечения дополнительной (не гидрометеорологической) информации.

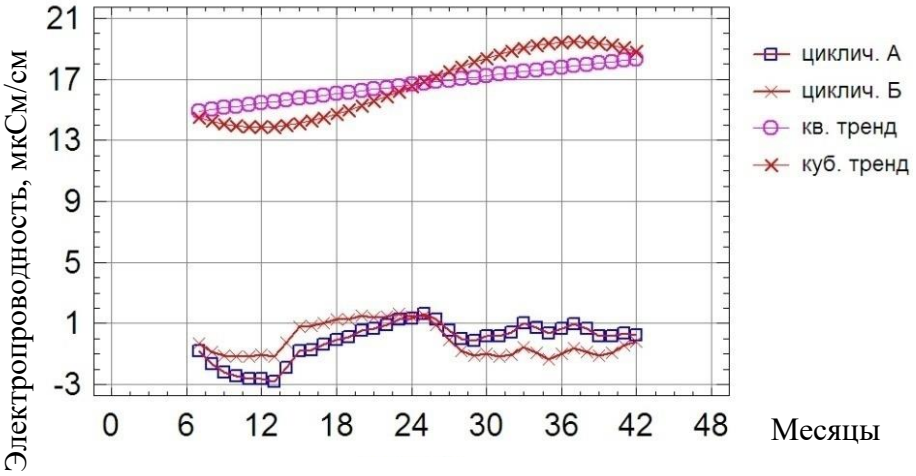


Рис. 7. Варианты циклической компоненты c_t ряда *amcw* и соответствующие им тренды $tr_{ква}$ и $tr_{куб}$

Оба варианта тренда, квадратический и кубический, указывают на слабый, но заметный рост с течением времени удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2019 гг.

Сезонная компонента s_t моделировалась в предположении связи поведения *cw* с годовым ходом метеофакторов, прежде всего, температур воздуха. Период сезонных колебаний *p* принят равным 12 месяцам. В качестве оценки сезонной компоненты использовано среднее $\hat{s}_i$ отклонений значений *cw* от тренда, т. е. положено [2], что

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^{m} \left(cw_{i+lp} - \widehat{tr}_{i+lp} \right) \text{ для } i = 1, \ldots, p, \qquad (13)$$

где $m + 1 = 4$ – число (годовых) периодов в ряду наблюдений.

Годовой ход сезонной компоненты (месячные индексы, вычисленные по формуле (13)), показан на рис. 8. В течение года локальные минимумы (в 3-м, 7-м и 9-м месяцах) чередуются с локальными максимумами (во 2-м, 4-м, 8-м и 11-м месяцах). Глобальный максимум соответствует 8-му месяцу года (августу), а глобальный минимум – 12-му (декабрю).

Оценена связь среднемесячных значений электропроводности *amcw* со среднемесячными показателями кислотности *ampH*, месячными суммами осадков *sumpre* и среднемесячными температурами воздуха *amt*. Установлено существование умеренно слабой положительной связи между *amcw* и *ampH* с коэффициентом корреляции 0,272486 (на доверительном уровне 95 %). У срочных значений *cw* и *pH* эта связь проявляется еще слабее. Как уже отмечалось, коэффициент ее корреляции составляет всего 0,20234. Таким образом, с ростом показателя *pH* (и *ampH*) растет и электропроводность *cw* (и *amcw*), значит, электропроводность осадков увеличивается при снижении их кислотности.

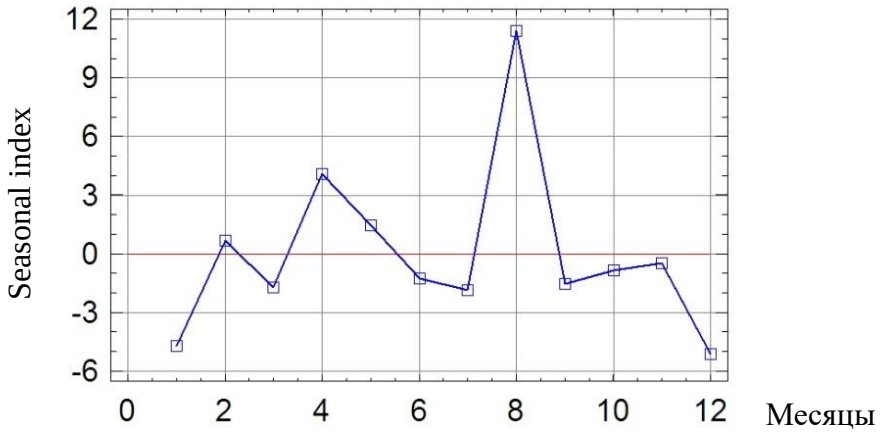


Рис. 8. Годовой ход сезонной компоненты
(месячные индексы) ряда *amcw* за 2016–2019 гг.

Существование этой связи позволяет предположить, что характер тренда *amcw* в течение двух десятилетий, предшествовавших началу наблюдений за электропроводностью осадков *cw*, имел существенное сходство с характером тренда ряда *pH*, наблюдавшегося в этот период.

Связь *amcw* с месячным количеством осадков *sumpre* сравнительно слабая отрицательная, ее коэффициент корреляции составляет –0,240857 (на доверительном уровне 95 %). Однако она сильнее связи электропроводности *cw* с суточным количеством осадков *pre*, коэффициент корреляции которой составляет всего –0,210906. В обоих случаях с ростом количества осадков их электропроводность уменьшается (по-видимому, сказывается эффект разбавления).

Связь электропроводности *amcw* со среднемесячными температурами воздуха *amt* слабая положительная, ее коэффициент корреляции составляет 0,256527 (на доверительном уровне 95 %). Связь срочных значений *cw* с суточными температурами воздуха *t* тоже слабая положительная и характеризуется еще меньшим коэффициентом корреляции 0,19183, т. е. и эта связь слабее, чем между среднемесячными величинами, *amcw* и *amt*.

Сравнение коэффициентов корреляции срочных значений обсуждаемых величин с коэффициентами корреляции среднемесячных значений этих величин показывает, что теснота связи между среднемесячными значениями существенно больше, чем между срочными значениями. Можно объяснить это снижением влияния случайных колебаний в результате осреднения срочных значений.

Случайная компонента ряда *pH* (показана на рис. 9) моделирована комбинированным случайным процессом авторегрессии – скользящего среднего ARMA (*p*, *q*) [2]:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{p} \varphi_i \cdot X(t-i) + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \cdot \varepsilon_{t-j}, \qquad (14)$$

где параметры *p* и *q* задают порядок процесса; ε_t – процесс белого шума (среднее $M\varepsilon_t = 0$, дисперсия $D\varepsilon_t = 0$); φ, θ – параметры (коэффициенты) процессов авторегрессии и скользящего среднего соответственно.

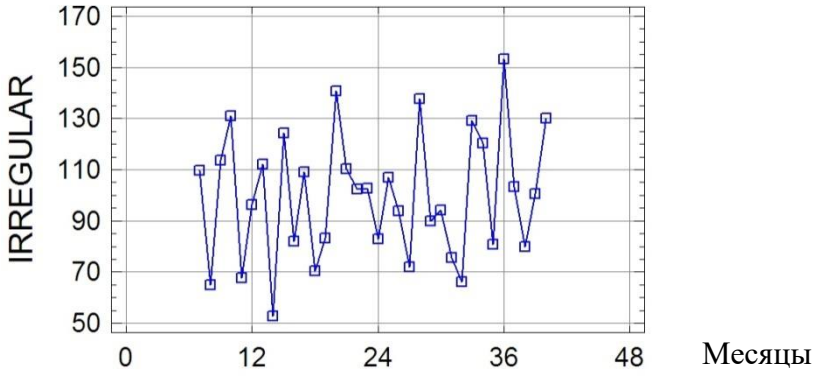


Рис. 9. Случайная компонента ряда *amcw* за 2016–2019 гг.

Адекватное описание случайного остатка ряда *amcw* достигается (при доверительной вероятности 95 %) при $p = 4$ и $q = 3$, что говорит о достаточно длинной (около четырехмесячной) «памяти» комбинируемых процессов.

Построенная статистическая модель удельной электропроводности *amcw* по мере накопления данных и удлинения ряда будет эволюционировать. Однако ее структура представляется достаточно устойчивой, и модель пригодна как для прогнозирования динамики *cw*, так и для исследования ее связей с факторами, влияющими на электропроводность.

ВЫВОДЫ

1. Построена аддитивная статистическая модель ряда удельной электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2019 гг. Модель включает тренд, циклическую, сезонную и случайную компоненты.

2. Установлены связи срочных и среднемесячных значений удельной электропроводности осадков, выпадавших в Твери в 2016–2019 гг., с соответствующими значениями показателя кислотности *pH*, суточного количества осадков, температуры воздуха.

3. Установлено, что направление ветра не оказывает на электропроводность осадков существенного влияния.

4. Наиболее тесная положительная связь существует между среднемесячными значениями удельной электропроводности и среднемесячными значениями показателя кислотности *pH*. Коэффициент корреляции связи составляет 0,272486 (на доверительном уровне 95 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета, Серия «Строительство, электротехника и химические технологии».* 2019. № 3 (3). С. 65–71.
2. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 1998. 528 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КАЧАНОВСКИЙ Феликс Вячеславович – доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. Удельная электропроводность осадков, выпадающих в Твери // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 89–97.

ELECTRICAL SPECIFIC CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION IN TVER

F.V. Kachanovsky
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of the precipitation′s electrical specific conductivity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 2016–2019 years). Time series models of the electrical specific conductivity and her evolution were examined. Cubic model has considered as adequate.

Keywords: conductivity, acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cycle component, seasonal component, residuals.

REFERENCES

1. Kachanovsky F.V. Electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology».* 2019. No. 3 (3), pp. 65–71.

2. Tyurin Y.N., Makarov A.A. Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere [Statistical analysis of data on the computer]. M.: INFRA-M, 1998. 528 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Heat Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 89–97.

УДК 691.32

ВЛИЯНИЕ КАРБОНАТА НАТРИЯ НА ПРОЦЕСС ТВЕРДЕНИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА

П.В. Куляев, А.В. Бровкин, Р.З. Цыбина, А.В. Гавриленко
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Куляев П.В., Бровкин А.В.,
Цыбина Р.З., Гавриленко А.В., 2020

Аннотация. Статья освещает ряд химических превращений при гидратации портландцемента, модифицированного карбонатом натрия. Избыток ионов CO_3 замедляют развитие портландита (гидроксида кальция) и обеспечивают интенсивный рост кристаллов карбоната кальция (кальцита) в гидратированном цементе, особенно в первые сутки твердения. Показано, что при этом наблюдаются различия в прочности между затвердевшей портландцементной смесью без добавления и с добавлением Na_2CO_3. Сода модифицирует порядок вступления в реакцию гидратации клинкерных компонентов портландцемента. С некоторым повышением содержания ее в составе смеси наблюдается прирост кубиковой прочности образцов, твердеющих в сухих условиях.

Ключевые слова: карбонат натрия, гидратация, кубиковая прочность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-98-103

ВВЕДЕНИЕ

В процессе гидратации портландцемента, модифицированного содой, высокая конверсия непрореагировавших клинкерных минералов до продуктов гидратации в цементно-содовой суспензии происходит в течение первых суток. Спустя сутки конверсия клинкерных минералов в гидратную фазу снижается и повышается относительное содержание кальцита. Вследствие этого наблюдаются различия в прочности между затвердевшей портландцементной смесью без добавления и с добавлением Na_2CO_3. Снижение ранней прочности при сжатии цемента с добавкой Na_2CO_3 по сравнению с обычным портландцементом обусловлены потерей связующей способности из-за преимущественного образования $CaCO_3$ при ранней стадии гидратации цемента и последующего роста кристаллов $CaCO_3$ вследствие постепенной карбонизации. В этом отношении более высокий объем незатронутых влиянием CO_2 продуктов процесса гидратации повышает прочность на сжатие.

Для того чтобы полнее оценить химизм гидратации портландцемента, необходимо учитывать процессы гидратации всех компонентов клинкера. Трехкальциевый силикат (C_3S) является основным цементирующим веществом портландцемента. Его реакция гидратации представлена уравнением

$$2Ca_3SiO_5 + 6H_2O \rightarrow Ca_3Si_2O_7 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2,$$

или в номенклатуре клинкера

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH. \quad (1)$$

Образующиеся продукты представляют собой гидрат силиката кальция, известный как C-S-H и гидроксид кальция. Формула для C-S-H дает очень грубое приближение, так как при этом образуется еще одна разновидность C-S-H во время реакции гидратации.

Двухкальциевый силикат (β-C_2S) гидратируется гораздо медленнее, чем C_3S, образуя аналогичный подтип C-S-H и $Ca(OH)_2$.

$$2Ca2SiO_4 + 4H_2O \rightarrow Ca_3Si_2O_7 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2;$$

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH. \quad (2)$$

Что касается гидратации C_3S, то формула, приведенная для C-S-H, является также аппроксимативной. Гидратированный C_3S являет основной вклад в раннюю прочность на сжатие, тогда как β-C_2S способствует росту долгосрочной прочности на сжатие. Меньше гидроксида кальция образуется при гидратации β-C_2S, чем C_3S, что имеет определенные преимущества для развития прочности.

Трехкальциевый алюминат (C_3A) очень быстро гидратируется с формированием C_2AH_8 и C_4AH_{13}, которые затем преобразуются со временем до стабильного C_3AH_6 [1]:

$$2Ca_3Al_2O_6 + 21H_2O \rightarrow Ca_2[Al(OH)_5]_2 \cdot 3H_2O + 2[Ca_2Al(OH)_7 \cdot 3H_2O] \rightarrow$$
$$\rightarrow 2\{Ca_3[Al(OH)_6]_2\} + 9H_2O\ (3) \rightarrow 2C_3A + 21H \rightarrow C_2AH_8 + C_4AH_{13} \rightarrow$$
$$\rightarrow C_3AH_6 + 9H. \quad (3)$$

Данные превращения сразу следуют за реакцией между сульфатом кальция в растворе и гидрат-алюминатом кальция с образованием эттрингита $C_3A \cdot 3CS$:

$$2[Ca_2Al(OH)_7 \cdot 3H_2O] + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 14H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow Ca_6[Al(OH)_6]_2(SO4)_3 \cdot 26H_2O + Ca(OH)_2;$$
$$C_4AH_{13} + 3CS{-}H_2 + 14H \rightarrow C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32} + CH. \quad (4)$$

Алюмоферрит кальция представляет собой твердый раствор внутри системы C_2A – C_2F, состав которой в портландцементе приближается к C_4AF. Гидратация C_4AF очень похожа на таковую C_3A. Реакция протекает медленнее, чем для C_3A, но увеличивается с ростом отношения A/F. C_3A и C_4AF вносят незначительный вклад в прочность портландцементного композита.

Все указывает на то, что углекислый газ реагирует главным образом с гидроксидом кальция до образования карбоната кальция. Другие продукты гидратации реагируют только при определенных условиях [2]. Но химические реакции, характеризующие карбонизацию, выглядят следующим образом:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O. \quad (5)$$

Эта экзотермическая реакция и сопровождается выделением тепла порядка 2 306 Дж на грамм прореагировавшего CAO [3]:

$$C_3SH_3 + 3CO_2 \rightarrow 3CaCO_3 + S_2 + 3H_2O; \quad (6)$$

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2. \quad (7)$$

Часть бикарбоната кальция вымывается, но часть в растворе вступает в соединение с $Ca(OH)_2$ до образования карбоната кальция:

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O. \quad (8)$$

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Тверском государственном техническом университете был проведен тест на влияние соды на механические характеристики портландцементного композита. Девять бетонных кубиков размером 2×2×2 см были протестированы на сжатие. В опытах были использованы портландцемент (CEM I 42.5) и беспримесный карбонат натрия Na_2CO_3. Соотношение цемента и Na_2CO_3 составляло 100 % / 0 % (3 контрольных куба, принято среднеарифметическое значение), 100 % / 3 % (3 куба) и 100 % / 4,5 % (3 куба) по весу, а

водоцементное отношение составляло 0,35. Образцы хранились 24 ч в естественных условиях, при температуре 20 °С и влажности 100 %. Образцы подвергались сжатию на испытательном стенде ИП- 1000 в возрасте 28 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные в таблице показывают, что сода не только негативно влияет на прочность портландцементного раствора, через катион карбонизируя раствор, но в сухих условиях способна несколько повышать ее значение. Это объясняется анион-связыванием, в гидратных фазах и среднесрочном периоде, портландита и высвобождением внутренней энергии на кратковременное поддержание основной линии набора прочности при твердении – гидратации алита. Этот процесс нестабилен и в долгосрочном периоде положительный эффект утрачивает силу. Важным аспектом при этих превращениях является роль воды в механизмах реакции гидратации.

Результаты экспериментальных испытаний

Образцы	Прочность на сжатие при хранении в состоянии, МПа	
	Водонасыщ.	Сухом
Контрольные	16,4	10,2
С 3 % Na_2CO_3	13,4	8,7
С 4,5 % Na_2CO_3	11,3	9,2

При смешивании с водой портландцемент претерпевает пятиступенчатое последовательное изменение микроструктуры с формированием в процессе схватывания и твердения следующих превращений:

быстрая реакция с переходом ионов Ca_2^+ в раствор;

период «покоя», определяемый медленным повышением содержания катионов Ca_2^+ с их концентрацией вплоть до пересыщения раствора;

быстрый процесс, характеризующийся образованием островков C-S-H и кристаллизацией $Ca(OH)_2$;

период замедления, являющийся следствием образования гидратных фазовых слоев;

диффузионный процесс гидратации с уменьшением количества $Ca(OH)_2$ и увеличением образования карбонатов, в противоположность таковым в контрольном составе;

свободные Ca_2^+ и CO_3 ионы преимущественно вступают в реакцию в пересыщенном состоянии.

Отмечается заметное ускорение образования $CaCO_3$ в растворах с содержанием Na_2CO_3 на ранних стадиях гидратации. Содержание продуктов карбонизации замечено меньше всего в контрольном замесе. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что содержащиеся в цементом тесте $CaCO_3$ интенсивнее всего отверждаются при температуре 20 °С и 60 % влажности воздуха.

Все указывает на наличие двух отчетливых стадий в ходе реакции гидратации цементных смесей с добавкой Na_2CO_3. Первый касается образования гелеобразных сгустков продуктов гидратации с последующим микрокристаллическим образованием частиц $Ca(OH)_2$. Высокоизвестковые продукты реакции процесса гидратации нестабильны по отношению к своему базисному составу из-за избытка CO_3 в воздухе и быстро

превращаются в кальцит. Этот процесс длится очень интенсивно в пределах первых суток гидратации, а затем замедляется к 28-му дню твердения.

На второй стадии процесса гидратации карбонизация инициируется избытком анионов CO_3 и в начале гидратации цементных паст с Na_2CO_3 происходит более интенсивный процесс образования $CaCO_3$.

В растворе, модифицированном Na_2CO_3, на ранней стадии гидратация происходит прогрессирующее образование кристаллов $CaCO_3$ на единицу объема гидратированной цементной смеси, способной постепенно вступать в реакцию с атмосферным углекислым газом CO_2. Скорость реакции карбонизации и объем образующихся продуктов карбонизации выше в цементных растворах, модифицированных Na_2CO_3 по сравнению с контрольным замесом без соды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Более низкий уровень карбонизации происходит в цементных растворах, твердеющих на влажном воздухе. Такие растворы менее восприимчивы к последствиям самого процесса по сравнению с растворами, подвергающимися воздействию сухого воздуха.

2. Скорость карбонизации раствора, модифицированного Na_2CO_3, постепенно нарастает, и каждый временной переходный интервал этого роста обусловлен переизбытком ионов CO_3 в составе смеси на ранней стадии развития гидратация по отношению к контрольному составу. Разрушительное действие карбонизации проявляется снижением прочности на сжатие, повышенной общей пористостью в модифицированном Na_2CO_3 составе.

3. Механизм реакции карбонизации цементных растворов, модифицированных Na_2CO_3, должен быть выделен в два отдельных этапа. Первый – это стадия, связанная с преимущественным формированием продуктов процесса гидратации, которые являются неустойчивыми по отношению к своему окружению и быстро переходят в карбонатную фазу. Этот этап длится 28 дней, но решающее значение имеют первые 24 ч. Вторая стадия характеризуется потерей смесью способности связывания за счет постепенной карбонизации. Скорость снижение прочности и модуля упругости для цементных паст с содержанием Na_2CO_3 гораздо больше в каждый момент сухого или влажного процесса твердения.

4. Сода не только негативно влияет на прочность портландцементного раствора, через катион карбонизируя раствор, но в сухих условиях на определенных интервалах времени твердения способна несколько повышать ее значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бэнстед Дж. Критические обзоры и тематические исследования по производству, контролю качества, оптимизации и использованию в строительстве модифицированных портландцементов / под ред. С.Н. Гоша. 1989. С. 308–343.
2. Сурьяванский А.К., Свами. Н. Успехи цементных исследований. 1997. № 9. С. 35.
3. Ричардсон М. Карбонизация железобетона: ее причины и управление. Лондон: CITIS Ltd., 1988. С. 125.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЛЯЕВ Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

БРОВКИН Андрей Викторович – доцент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: a.brovkin82@gmail.com
ЦЫБИНА Раиса Захаровна – ст. преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: zubina-rz@mail.ru
ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович – ассистент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: gawaw@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Куляев П.В., Бровкин А.В., Цыбина Р.З., Гавриленко А.В. Влияние карбоната натрия на процесс твердения портландцементного композита // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 98–103.

EFFECT OF SODIUM CARBONATE ON THE HARDENING PROCESS OF THE PORTLAND CEMENT COMPOSITE

P.V. Kulyaev, A.V. Brovkin, R. Z. Tsybina, A.V. Gavrilenko
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article enlightens a number of chemical transformations during hydration of Portland cement blended with sodium carbonate. Excess of ions CO_3 in solution slows down the development of portlandite (calcium hydroxide) and provide intensive growth of calcium carbonate (calcite) crystals in hydrated cement, especially during the first day of hardening. It is shown that there are differences in strength between the solidified Portland cement mixture without and with the addition of Na_2CO_3. Soda modifies the procedure for the entry into the hydration reaction of the clinker components of the cement. With a certain increase in its content in the mixture, a slight increase in cubic strength for the dry-hardening specimens is also observed.

Keywords: sodium carbonate, hydration, cubic strength.

REFERENCES

1. Bensted J. Critical reviews and case studies on manufacturing, quality control, optimisation and use / edited by S.N. Ghosh. 1989, pp. 308–343.
2. Suryavanski A.K., Swamy R.N. Advances in cement research. 1997. № 9, pp. 35.
3. Richardson M. Carbonation of reinforced concrete: its causes and management. London: CITIS ltd., 1988. P. 125.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KULIAEV Pavel Victorovitch – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

BROVKIN Andrey Victorovich – Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: a.brovkin82@gmail.com
TSYBINA Raisa Zakharovna – Lecturer in the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: zubina-rz@mail.ru
GAVRILENKO Alexey Vladimirovich – Assistant of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: gawaw@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE
Kulyaev P.V., Brovkin A.V., Tsybina R. Z., Gavrilenko A.V. Effect of sodium carbonate on the hardening process of the portland cement composite // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 98–103.

УДК 691.2

СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ БЕТОННОГО ЛОМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ЩЕБНЯ В КАЧЕСТВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Ю.Ю. Курятников
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Курятников Ю.Ю., 2020

Аннотация. В статье представлены технологии переработки бетонного лома во вторичное сырье, описаны области применения полученной продукции. Приведены результаты исследований физико-механических свойств вторичного щебня в сравнении с природным щебнем.

Ключевые слова: минеральный заполнитель, переработка бетонного лома, вторичное сырье, механоактивация, зерновой состав, физико-механические свойства.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-103-109

ВВЕДЕНИЕ

По существующим технологиям невозможно производить из лома бетонных конструкций качественный минеральный заполнитель для бетона из-за его низких физико-механических свойств. Улучшить характеристики вторичного щебня позволяет его активация, которая состоит в разрушении слабых зерен щебня и удалении остатков цементного камня, что приводит к повышению технических характеристик бетонов за счет улучшения качества контактной зоны. В качестве методов активации в основном используются механические и химические [1].

Механический метод заключается в самоизмельчении при перемешивании щебня в смесительных установках или его обработка в шаровых мельницах с металлическими

шарами. Удаление части ослабленных зерен, полученных в процессе дробления отходов из бетона и железобетона, может производиться предварительным интенсивным сухим перемешиванием крупного заполнителя в бетоносмесительных устройствах.

Химический метод заключается в «вымывании» из вторичного щебня остатков цементного камня при помощи безводных и гидратированных оксидов, что также ведет к повышению качества щебня из дробленого бетона.

Переработка бетонного лома по технологии многостадийного дробления позволяет значительно повысить характеристики вторичного заполнителя бетона, в частности дробимость, водопоглощение и пустотность. Это достигается за счет снижения содержания во вторичном щебне цементного камня [2].

Повышение прочностных и других характеристик вторичного щебня возможно за счет применения эффективных виброщековых или конусных инерционных дробилок и пропитки упрочняющими полимерными растворами [3].

Повысить прочностные характеристики щебня из дробленного бетонного лома можно путем раздельного перемешивания и поличастотного виброуплотнения смеси [4].

В табл. 1 сведены основные технологические приемы получения и оптимизации вторичного щебня и его области применения. Анализ литературных источников показал, что применяя оптимальные способы переработки и активации бетонного лома, можно изготовить бетоны разных видов: тяжелые, мелкозернистые, самоуплотняющиеся, а также растворы в широком диапазоне сфер применения с классами по прочности от В7,5 до В40.

Таблица 1

Области применения вторичного щебня из дробленого бетона

Вид заполнителя	Технология получения	Области применения	Источник информации
Вторичный щебень фракции 5–20 мм	Одностадийное дробление	Бетоны классов до В30	[5]
Вторичный щебень фракций 5–10 и 10–20 мм	Многостадийное дробления по «мягкому» режиму с разделением по фракциям	Самоуплотняющийся бетон класса В40 включительно	[2]
Отсев дробления бетонного лома фракции < 5 мм	Механоактивация смеси (раздельное перемешивание и поличастотное виброуплотнение смеси)	Мелкозернистый бетон до В25 включительно	[4]
Вторичный щебень фракций 0–20 и 0–40 мм	Одностадийное дробление с разделением по фракциям	Фундаментные стеновые блоки и мелкоштучные изделия	[6]
Вторичный щебень фракций 5–10, 10–20, 5–20 мм	Одностадийное дробление с разделением по фракциям. Механоактивация в шаровой мельнице	Дорожные плиты, плиты ленточных фундаментов	[1]

Окончание табл. 1

Вид заполнителя	Технология получения	Области применения	Источник информации
Вторичный щебень фракции 5–20 мм отдельно и в смеси с природным щебнем в количестве до 30 %	Одностадийное дробление	Бетоны классов по прочности до В30, марки по морозостойкости до F150	[7]
Вторичный щебень фракций 5–10 и 10–20 мм	Одностадийное дробление с разделением по фракциям	Железобетонные перемычки	[8]
Отсев дробления бетонного лома фракции < 80 мкм	Одностадийное дробление, просев	Строительные растворы	[9]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях применяли вторичный щебень, полученный путем переработки железобетонных изделий, которые не соответствуют стандартам и техническим характеристикам (рис. 1). Такие изделия измельчали гидромолотом, отделяли арматурный лом, дробили в специальном дробильном ковше, отбирали фракцию 0–60 мм. Вторичный щебень фракции 5–20 мм получали путем двухстадийного дробления и отсева частиц менее 5 мм.

Рис. 1. Бетонный лом

Дробильный ковш устанавливается на экскаватор. Оборудование состоит из металлической рамы с двумя дробящими щеками, одна из которых подвижная, а вторая неподвижная. Подвижная щека, соединенная к эксцентриковому валу и маховику, и коленчатый рычаг в верхнем положении создают четырехнаправленное движение таким образом, что подвижная щека смыкается с неподвижной и в то же время создает вертикально-маятниковое движение, способствуя разрушению материала. Вторичный щебень представлен на рис. 2.

Рис. 2. Вторичный бетонный щебень

Производительность ковша зависит от максимальной крупности щебня и представлена на рис. 3.

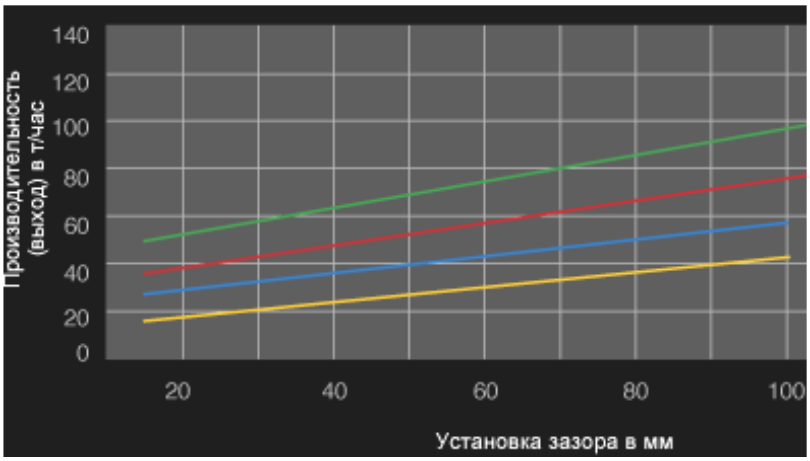


Рис. 3. Производительность в зависимости от максимальной крупности щебня

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительные характеристики применяемого вторичного щебня, щебня из гравия и гравия приведены в табл. 2. Зерновой состав заполнителей приведен в табл. 3.

Исследования физико-механических характеристик вторичного щебня показали, что по дробимости он имеет марку 400–600, то есть ниже, чем у щебня из гравия и гравия. Насыпная плотность вторичного щебня несколько ниже, содержание пылевидных частиц выше, что свидетельствует о более пористой структуре вторичного щебня и подтверждается данными его водопоглощения. Содержание зерен пластинчатой и игловатой форм вторичного щебня соответствует щебню из гравию и гравию. Содержание зерен слабых пород во вторичном щебне фракции 5–20 мм меньше, чем у вторичной щебеночно-песчаной смеси фракции 0–60 мм, что подтверждает эффективность многостадийного измельчения бетонного лома со снижением количества цементного камня на зернах щебня.

Таблица 2

Физико-механические свойства крупных заполнителей

Показатель	Значение показателя			
	Вторичный щебень 5–20 мм	Вторичная ЩПС 0–60 мм	Щебень из гравия 5–20 мм	Гравий 5–20 мм
Насыпная плотность, тн/м^3	1,41	1,43	1,55	1,53
Марка по дробимости	600	400	1 000	1 000
Содержание пылевидных частиц, %	3,5	3,5	0,7	0,8
Содержание зерен пластинчатой и игловатой форм, %	19,1	19,4	19,7	18,3
Содержание слабых зерен, %	3,6	9,1	2,0	2,5
Содержание засоряющих примесей, %	Отсут-ствуют	Отсут-ствуют	Отсут-ствуют	Отсут-ствуют
Водопоглощение, %	5,8	5,2	1,6	1,3

Таблица 3

Зерновой состав крупных заполнителей

Вид заполнителя	Полные остатки, %					
	60	40	20	12,5	10	5
Вторичная ЩПС 0–60 мм	0	30,7	42,4	–	53,5	77,2
Вторичный щебень 5–20 мм	0	0	2,0	43,7	61,0	100
Щебень из гравия 5–20 мм	0	0	9,9	54,4	69,9	98,6
Гравий 5–20 мм	0	0	1,5	30,0	39,5	90,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ физико-механических свойств щебеночно-песчаной смеси фракции 0–60 мм, полученной одностадийным дроблением в дробильном ковше, установленным на экскаватор, и вторичного щебня фракции 5–20 мм, полученного двухстадийным дроблением и отсевом частиц менее 5 мм, показал, что они могут быть использованы для изготовления бетонов классов по прочности от В7,5 до В22,5. Щебеночно-песчаная смесь из дробленого бетона по зерновому составу соответствует требованиям ГОСТ 25607-2009 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия» для смесей оснований номер С4; по показателям «содержание пылевидных частиц», «содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм», «содержание слабых зерен, прочностью менее 20 МПа» соответствует требованиям ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия» для смесей из дробленого бетона для дорожного строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фархатов М.А. Организация переработки отходов бетона и вторичное использование бетонов в строительстве // *Системные технологии*. 2018. № 26. С. 100–103.

2. Коровкин М.О., Шестернин А.И., Ерошкина Н.А. Использование дробленого бетонного лома в качестве заполнителя для самоуплотняющегося бетона // *Инженерный*

вестник Дона. 2015. № 3. URL: http://www.ivdon.ru/uloads/article/pdf/IVD_31_Korovkin.pdf_26679ca420.pdf (дата обращения: 17.08.2020).
3. Магсумов А.Н., Шаритяпов Н.М. Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей // *Символ науки*. 2018. № 6. С. 29–32.
4. Муртазаев С.-А.Ю., Сайдумов М.С., Абдуллаев М.А.-В., Хасиев А.А. Использование механоактивированных отсевов дробления бетонного лома в производстве бетонокомпозитов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2011. № 22. С. 136–140.
5. Баженов Ю.М., Муртазаев С.-А.Ю. Эффективные бетоны для строительных и восстановительных работ с использованием бетонного лома и отвальных зол ТЭС // *Вестник МГСУ*. 2008. № 3. С. 124–127.
6. Шевченко В.А., Шатрова С.А. Исследование возможности получения заполнителя для бетонов из бетонного лома // *Эпоха науки. Технические науки*. 2017. № 9. С. 165–168.
7. Головин Н.Г., Алимов Л.А., Воронин В.В. Проблема утилизации железобетона и поиск эффективных путей ее решения // *Вестник МГСУ*. 2011. № 2-1. С. 65–71.
8. Бедов А.И., Ткач Е.В., Пахратдинов А.А. Вопросы утилизации отходов бетонного лома для получения крупного заполнителя в производстве железобетонных изгибаемых элементов // *Вестник МГСУ*. 2016. № 7. С. 91–100.
9. Файзрахманов И.И., Халиуллин М.И., Леклу А.-Н., Амири О. Использование тонкодисперсных отсевов бетонного лома в цементных композициях для получения строительных растворов // *Известия КГАСУ*. 2016. № 4 (38). С. 395–401.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курятников Ю.Ю. Способы переработки бетонного лома для получения вторичного щебня в качестве минерального сырья // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 103–109.

METHODS FOR PROCESSING CONCRETE SCRAP TO OBTAIN SECONDARY CRUSHED STONE AS MINERAL RAW MATERIAL

Y.Y. Kuryatnikov
Tver State Technical University, Russia, Tver

Abstract. The article presents technologies for processing concrete scrap into secondary raw materials, describes the areas of application of the resulting products. The results of studies of the physical and mechanical properties of secondary crushed stone in comparison with natural crushed stone are presented.

Keywords: mineral filler, processing of concrete scrap, secondary raw materials, mechanical activation, grain size composition, physical and mechanical properties.

REFERENCES

1. Farkhatov M.A. Organization of concrete waste recycling and concrete recycling in construction. *System technologies*. 2018. No. 26, pp. 100–103.
2. Korovkin M.O., Shesternin A.I., Eroshkina N.A. The use of crushed concrete scrap as a filler for self-compacting concrete. *Engineering Bulletin of the Don*. 2015. No. 3. URL: http://www.ivdon.ru/uloads/article/pdf/IVD_31_Korovkin.pdf_26679ca420.pdf (date of access: 17.08.2020).
3. Magsumov A.N., Sharityapov N.M. The use of concrete scrap as a large aggregate for the production of concrete mixtures. *Symbol of Science*. 2018. No. 6, pp. 29–32.
4. Murtazaev S.-A.Yu., Saidumov M.S., Abdullaev M.A.-V., Khasiev A.A. The use of mechanically activated screenings of crushing of concrete scrap in the production of concrete composites. *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2011. No. 22, pp. 136–140.
5. Bazhenov Yu.M., Murtazaev S.-A.Yu. Effective concretes for construction and restoration work with the use of concrete scrap and waste ash from TPPs. *Vestnik MGSU*. 2008. No. 3, pp. 124–127.
6. Shevchenko V.A., Shatrova S.A. Investigation of the possibility of obtaining aggregate for concrete from concrete scrap. *Epoch of Science. Technical science*. 2017. No. 9, pp. 165–168.
7. Golovin N.G., Alimov L.A., Voronin V.V. The problem of recycling reinforced concrete and the search for effective ways to solve it. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 2-1, pp. 65–71.
8. Bedov A.I., Tkach E.V., Pakhratdinov A.A. Issues of recycling waste concrete scrap to obtain a large aggregate in the production of reinforced concrete bending elements. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 7, pp. 91–100.
9. Fayzrakhmanov I.I., Khaliullin M.I., Leklu A.-N., Amiri O. The use of fine screenings of concrete scrap in cement compositions for obtaining mortars. *Izvestiya KGASU*. 2016. No. 4 (38), pp. 395–401.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Y.Y. Methods for processing concrete scrap to obtain secondary crushed stone as mineral raw material // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 103–109.

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 4 (8), 2020

Редактор Я.А. Петрова
Корректор А.В. Смирнов

Подписано в печать 21.12.2020		
Формат 60x84 1/8		Бумага писчая
Физ. п. л. 13,75	Усл. п. л. 12,79	Уч.-изд. л. 11,96
Тираж 500 экз.	Заказ № 336	С – 110

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»
Центр инженерной печати
170024, г. Тверь, ул. Академическая, д. 14