

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

№ 3 (7), 2020

Тверь 2020

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2020. № 3 (7). 80 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 от 19 ноября 2018 года.

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

**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

Гультияев 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.;

Stroкова 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

Белов В.В. Опилкобетон на бесцементном композиционном вяжущем...	6
Гараников В.В., Корнильев Е.О. Исследование закономерностей деформирования по криволинейным траекториям постоянной кривизны с изменяющимся направлением процесса.....	17
Куляев П.В., Белов В.В. Роль оптимальной гранулометрии известняковой добавки с наноразмерными составляющими в производстве строительных композитов	25
Федоров В.В., Баркая Т.Р. Рандомизация актуальных проблем регионального проектно-строительного комплекса.....	32
Черемных С.В. Универсальная энергосберегающая конструкция на базе возобновляемых источников энергии	40

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Окунева В.В., Агамирзоев А.А., Корнеев К.Б. Реализация распределенной генерации посредством создания виртуальных электростанций	51
Русин А.Ю. Сокращение времени испытаний электрооборудования на надежность	60

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Качановский Ф.В. Связь электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с метеофакторами.....	69
Семеенков С.Д., Копылова Т.С., Семеенков Д.С. Влияние температурного режима вулканизации плащевых тканей на величину адгезионной прочности.....	76

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Belov V.V. Sawmilcobetone on non-cement composite binder.....	6
Garanikov V.V., Kornilev E.O. Research of the patterns of deformation along curvilinear trajectories of constant curvature with a changing process direction.....	17
Kuliaev P.V., Belov V.V. Role of optimal granulometry of limestone additive with nanosized components in production of building composites.....	25
Fedorov V.V., Barkaya T.R. Randomizing topical issues regional design and construction complex.....	32
Cheremnykh S.V. Universal energy-saving design based on renewable energy sources	40

ELECTRICAL ENGINEERING

Okuneva V.V., Agamirzoev A.A., Korneev K.B. Implementing distributed generation by creating virtual power plants	51
Rusin A.Y. Time reduction tests of reliability electrical equipment.....	60

CHEMICAL TECHNOLOGY

Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation and meteorological factors in Tver (correlation analysis)	69
Semeenkov S.D., Kopylova T.S., Semeenkov D.S. Influence of the temperature regime of vulcanization of raincoat fabrics on the value of adhesive strength	76

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.517

ОПИЛКОБЕТОН НА БЕСЦЕМЕНТНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ

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

© Белов В.В., 2020

Аннотация. Рассмотрены роль и преимущества изделий на основе бесцементного вяжущего с использованием отходов деревообработки и произведено сравнение с другими видами материалов и технологий. Цель данной работы – получение теплоизоляционного материала на основе отходов деревообработки и бесцементного вяжущего. Было выявлено, что материал на основе бесцементного вяжущего с применением опилок в качестве заполнителя эффективен в условиях реального производства.

Ключевые слова: бесцементное вяжущее, отходы деревообработки, теплоизоляционный материал, подбор состава, математическое планирование, эксперимент.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-6-16

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с резким подорожанием традиционных строительных материалов большое распространение получили изделия на основе отходов различных других производств. Количество отходов, например, в деревообрабатывающей промышленности, достаточно развитой в Тверском и соседних с ним регионах, в среднем составляет около 50 %. Естественно, встает вопрос об их эффективном использовании. Обычно утилизируют опилки и стружку. Степень их полезной утилизации в народном хозяйстве составляет от 9 до 20 % общего выхода, причем применяют их в основном в качестве топлива. В то же время при использовании отходов деревообработки в строительной индустрии можно получать широкую номенклатуру строительных материалов. Поэтому применение отходов деревообработки в производстве строительных материалов является перспективным, актуальным направлением [1, 2].

В настоящее время опилкобетон получают чаще всего с помощью бесцементного вяжущего, состоящего из известняковой муки и жидкого стекла (ЖС) [3, 4]. Кроме того, при определенных соотношениях бесцементного вяжущего и отходов деревообработки, а также их дополнительной обработке можно получать изделия без деструктивных процессов при твердении [5–7].

Физическая и химическая совместимость тонкомолотого известняка с другими реагентами при образовании вяжущей части бетона вытекают из свойств частиц известнякового порошка: способствовать лучшему и более равномерному распределению зерновых фракций внутри объема бетона; микроармировать минеральную структуру бетона; воздействовать на процесс гидратации через замедление процесса схватывания и

снижение скорости быстрого непосредственного взаимодействия с щелочными активаторами [8].

Анализ литературы показывает, что перспективным компонентом бесцементного вяжущего может выступать, кроме тонкомолотого известняка, стеклобой, который при затворении водой не проявляет вяжущих свойств, но в щелочной среде гидратируется с образованием кремниевых кислот, которые при достижении определенных значений кислотности среды начинают превращаться в гель. А гель, уплотняясь, омоноличивает крупные и мелкие фракции заполнителя. В итоге получается плотный, прочный, долговечный силикатный конгломерат – стеклобетон [9].

Как показали исследования составов пенобетона [10], наилучший эффект при формировании связки в этом материале возникает при совместном применении жидкого стекла и боя стекла. Изменения в кинетике, положительно сказавшиеся на фазовых превращениях, обусловлены, как полагается, образованием более прочных химических связей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель данной работы – получение теплоизоляционного материала на основе отходов деревообработки и бесцементного вяжущего.

Использованные сырьевые материалы:

известняковая мука с удельной поверхностью 300 м²/кг;

отходы деревообработки в виде опилок хвойных пород насыпной плотности 130 кг/м³ и влажностью 22,5 %;

молотый стеклобой с удельной поверхностью 200 м²/кг;

натриевое ЖС.

Зерновой состав опилок, полученный путем просеивания через стандартный набор сит, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Зерновой состав опилок

Остатки на ситах, %	Размеры отверстий сит, мм					
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14
Частные	2	12	40	32	12	2
Полные	2	14	54	86	98	100

На первом этапе работы изучалось влияние соотношения между ЖС и известняковой мукой на физико-механические свойства композиционного вяжущего, состоящего из известняковой муки и ЖС.

Путем уплотнения на стандартной виброплощадке получали образцы в виде кубов размером 3х3х3 см. Вибрационное уплотнение проводилось с пригрузом 4 кПа. Испытания образцов-кубиков производились в возрасте 14 суток при твердении в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С.

Постоянные контролируемые факторы:

количество воды, т. е. водовяжущее отношение (В/В), равное 0,2;

уплотнение на виброплощадке в течение трех минут.

Для получения зависимостей плотности и прочности композиционного вяжущего от состава был использован планированный эксперимент ПФЭ 3^2 .

Переменные факторы:

а) X_1 – соотношение по массе ЖС и муки (М): ЖС/М = 0,1–0,5 (среднее значение – 0,3);

б) X_2 – соотношение по массе молотого стекла (МС) и М: МС/М = 0–0,3 (среднее значение – 0,15).

На втором этапе было изучено влияние В/В на физико-механические свойства вяжущего. Уровнями варьирования данного переменного фактора выступали значения В/В, равные 0,2; 0,225; 0,25. Постоянными факторами являлись ЖС/М = 0,1; МС/М = 0,15; уплотнение на виброплощадке в течение 3 минут; твердение в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С в течение 14 суток.

На третьем этапе было установлено влияние количества воды затворения и состава композиционного вяжущего (ЖС + известняковая мука + МС) на физико-механические свойства опилкобетона.

На технических весах производилась дозирование опилок, известняковой муки и МС. Объем воды и ЖС измерялся мерным цилиндром. Для приготовления сырьевой смеси сначала отдельно перемешивали сухую смесь из известняковой муки и МС, затем добавляли ЖС и предварительно высушенные в сушильном шкафу опилки. Затем эта масса перемешивалась в течение 2–3 минут и укладывалась в собранную и смазанную форму. Отформованные образцы выдерживались в форме до достижения ими распалубочной прочности. Для скорейшего набора прочности кубики твердели в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С в течение 14 суток. Высушенные и охлажденные до комнатной температуры образцы-кубики испытывались на гидравлическом прессе ПС-100-0. Постоянными факторами были уплотнение на виброплощадке в течение 3 минут; твердение в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С в течение 14 суток. Переменными факторами на данном этапе выступали соотношение между опилками и вяжущим (ОП/В) в составе известняковой муки и ЖС, между водой и вяжущим (В/В), а также между МС (выведенном на этой стадии подбора из состава вяжущего) и остальным вяжущим (МС/В). Уровни варьирования: ОП/В = 0,4–0,6; В/В = 1,0–1,2; МС/В = 0–0,2.

На третьем этапе применяли трехфакторный планированный эксперимент В–D₁₃, который позволил получить нелинейные квадратичные модели и имел хорошие статистические характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Матрица планирования опытов и результаты экспериментов на первом этапе приведены в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

X_1	X_2	ЖС/М	МС/М	Средняя плотность, г/см ³	Средний предел прочности на сжатие, МПа
1	2	3	4	5	6
–1	–1	0,1	0	2,004	1,054
+1	–1	0,5	0	2,16	1,774

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
-1	+1	0,1	0,3	1,69	1,6
+1	+1	0,5	0,3	1,714	0,862
-1	0	0,1	0,15	1,409	1,84
+1	0	0,5	0,15	1,855	1,29
0	-1	0,3	0	1,800	1,142
0	+1	0,3	0,3	1,798	1,406
0	0	0,3	0,15	1,596	1,44

Графики зависимостей предела прочности на сжатие образцов вяжущего от ЖС/М и МС/М (рис. 1 и 2) показывают неоднозначный характер влияния соотношения между ЖС и известняковой мукой на физико-механические свойства композиционного вяжущего.

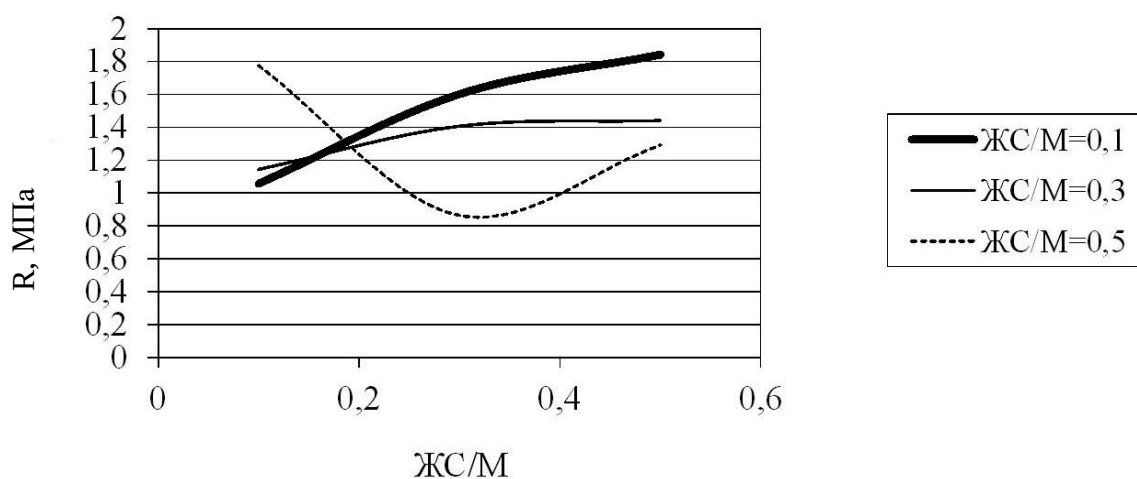


Рис. 1. Зависимости предела прочности на сжатие образцов вяжущего от ЖС/М

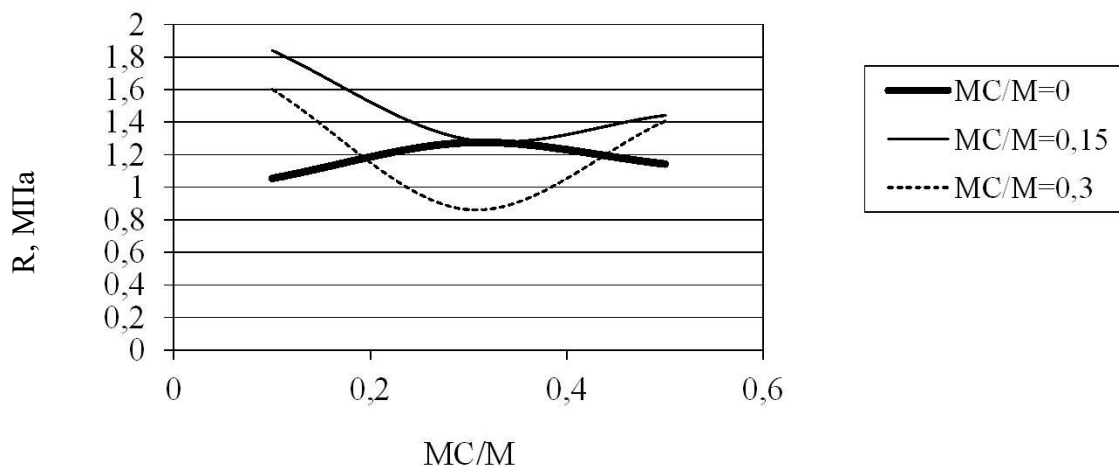


Рис. 2. Зависимости предела прочности на сжатие образцов вяжущего от МС/М

Лучший результат по прочности из приведенных графиков зависимостей предела прочности на сжатие образцов вяжущего отображен на кривой $ЖС/М = 0,1$ (см. рис. 1), где наибольший показатель по прочности составляет 1,84 МПа. При последующих соотношениях, таких, например, как $ЖС/М = 0,3$ и $ЖС/М = 0,5$, предел прочности на сжатие равен 1,44 и 1,77 МПа соответственно. Сравнивая полученные при испытаниях данные, выбираем оптимальные значения $ЖС/М$ (0,1) и $МС/М$ (0,15), соответствующие максимальному значению прочности (1,84 МПа).

Результаты эксперимента (второго этапа работы) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов вяжущего при различных значениях В/В

Варьируемый фактор В/В	Средняя плотность, г/см ³	Средний предел прочности на сжатие, МПа
0,2	1,4	1,84
0,225	1,894	2,84
0,25	2,062	3,55

Зависимость предела прочности на сжатие образцов вяжущего от В/В (рис. 3) показывает, что с увеличением водовяжущего отношения в исследованных пределах прочность возрастает, что объясняется лучшими условиями уплотнения и повышением плотности образцов.

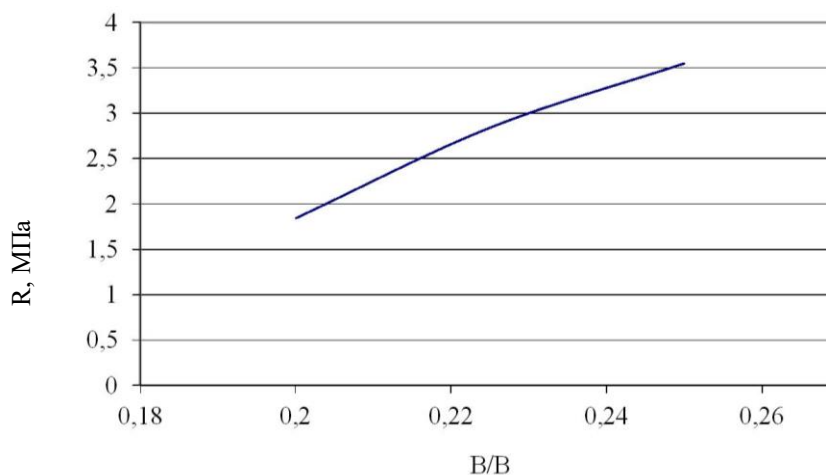


Рис. 3. Зависимость предела прочности на сжатие образцов вяжущего от В/В

Существенное увеличение прочности образцов наблюдается при $В/В = 0,25$. Наибольшее значение предела прочности на сжатие составляет 3,55 МПа. Следовательно, дальнейшие опыты следует проводить с этим значением В/В, так как его уменьшение повлечет за собой снижение этого важного показателя, что нежелательно. Поскольку опилки поглощают большую часть воды, то начальное значение В/В в опилкобетоне увеличиваем до 1–1,2, чтобы фактическое В/В в вяжущем оставалась равным примерно 0,25.

Матрица планирования опытов и результаты экспериментов на третьем этапе приведены в табл. 4.

Таблица 4

Планированный эксперимент типа В–D₁₃ и его результаты

Матрица планирования			О/В	В/В	ЖС/В	Средняя плотность, кг/м ³	Средний предел прочности на сжатие, МПа
X ₁	X ₂	X ₃					
–1	–1	–1	0,4	1	0	650	0,72
+1	–1	–1	0,6	1	0	545	0,50
–1	+1	–1	0,4	1,2	0	693	0,83
–1	–1	+1	0,4	1	0,2	680	0,85
–1	0,19	0,19	0,4	1,119	0,119	659	0,72
0,19	–1	0,19	0,519	1	0,119	539	0,53
0,19	0,19	–1	0,519	1,119	0	611	0,58
–0,29	+1	+1	0,471	1,2	0,2	607	0,68
+1	–0,29	+1	0,6	1,071	0,2	631	0,52
+1	+1	–0,29	0,6	1,2	0,071	660	0,46

Примечание. X₃ – соотношение по массе ЖС/В.

По результатам планированного эксперимента типа В–D₁₃ были получены математические модели зависимостей вида

$$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_{11} \cdot X_1^2 + B_{22} \cdot X_2^2 + B_{33} \cdot X_3^2 + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + B_{23} \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Расчет коэффициентов B₀, B₁, B₂, B₃, B₁₁, B₂₂, B₃₃, B₁₂, B₁₃, B₂₃ производили с помощью программы RBKR и получили конкретные значения по прочности и плотности (табл. 5).

Таблица 5

Результаты расчета коэффициентов с помощью программы RBKR

Наименование параметра	Значение коэффициента									
	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₁₁	B ₂₂	B ₃₃	B ₁₂	B ₁₃	B ₂₃
Прочность	0,53	–0,14	0,01	0,02	0,04	0,02	0,08	–0,01	–0,02	–0,03
Плотность	583	–23,9	27,4	0,17	52,3	–14,1	21,9	24,6	3,9	–18,7

По математическим моделям строили графики зависимостей прочности и плотности от указанных выше факторов (рис. 4–9).

Анализ зависимостей предела прочности на сжатие и плотности опилкобетона от опилковяжущего соотношения (рис. 4–5) показывает, что оптимальные значения прочности и плотности материала достигаются при О/В = 0,5. Оптимальное значение водовяжущего отношения В/В составляет 1,0.

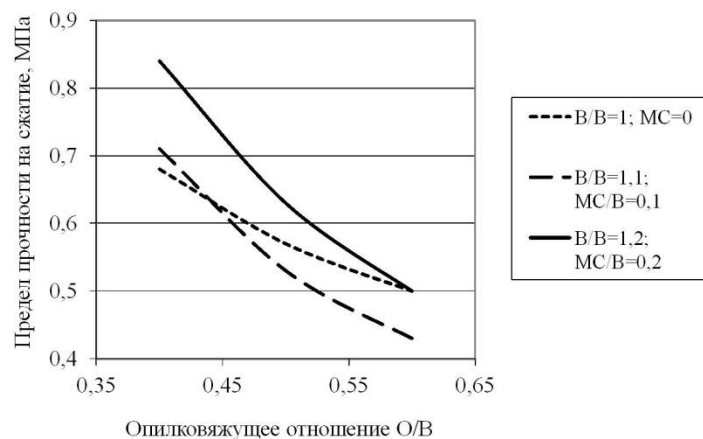


Рис. 4. Зависимости предела прочности на сжатие опилкобетона от О/В

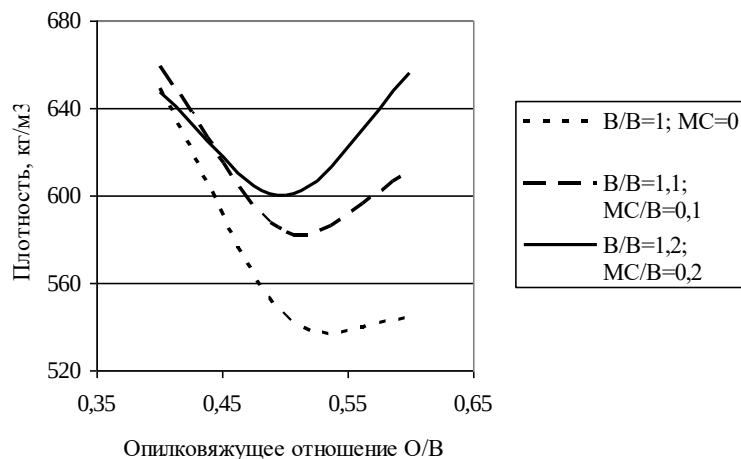


Рис. 5. Зависимости плотности опилкобетона от О/В

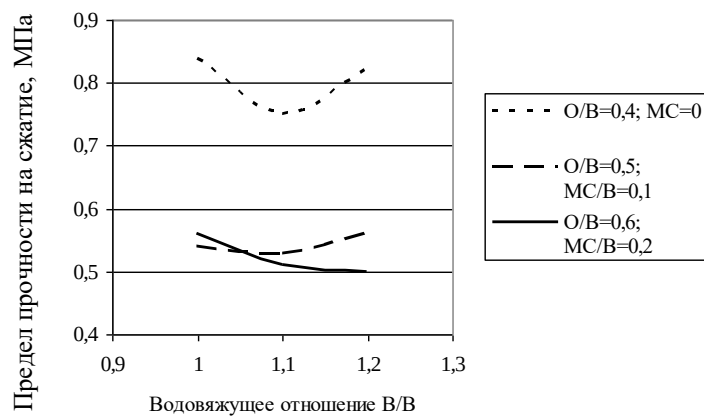
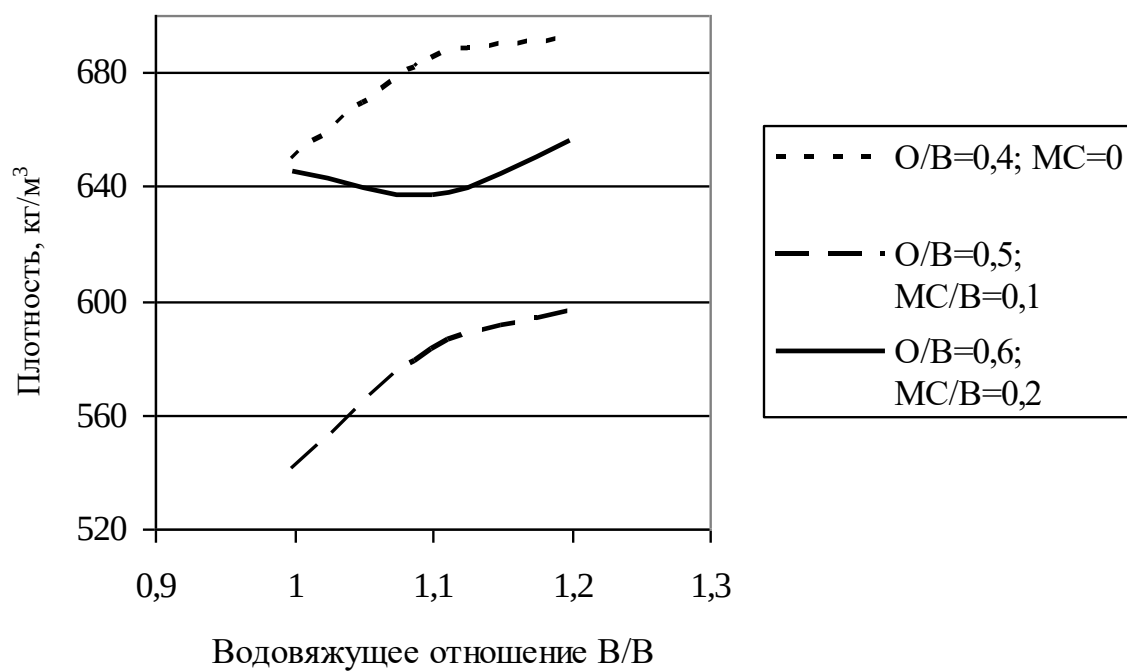
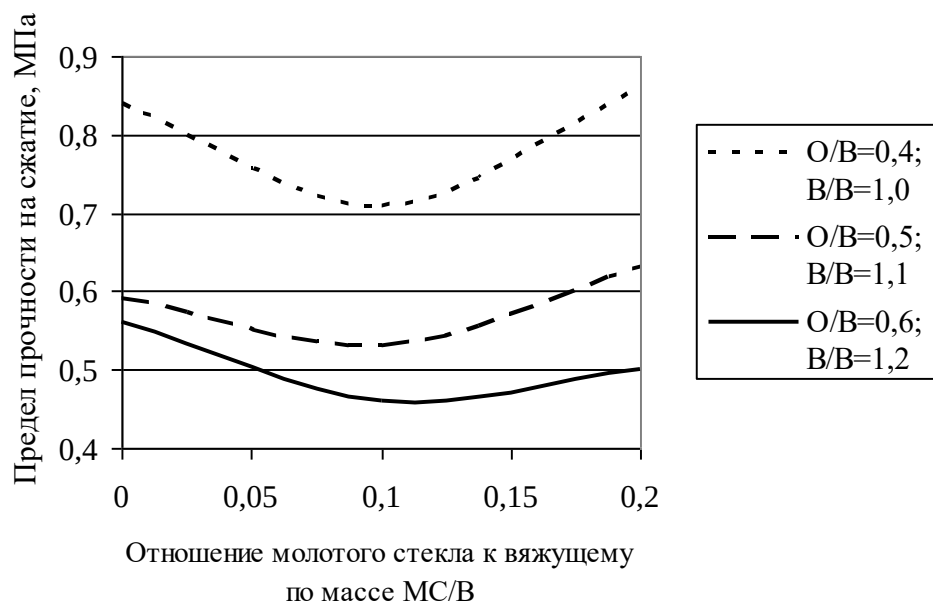


Рис. 6. Зависимости предела прочности на сжатие опилкобетона от В/В

Рис. 7. Зависимости плотности опилкобетона от В/В Рис. 8. Зависимости предела прочности на сжатие опилкобетона от MC/B

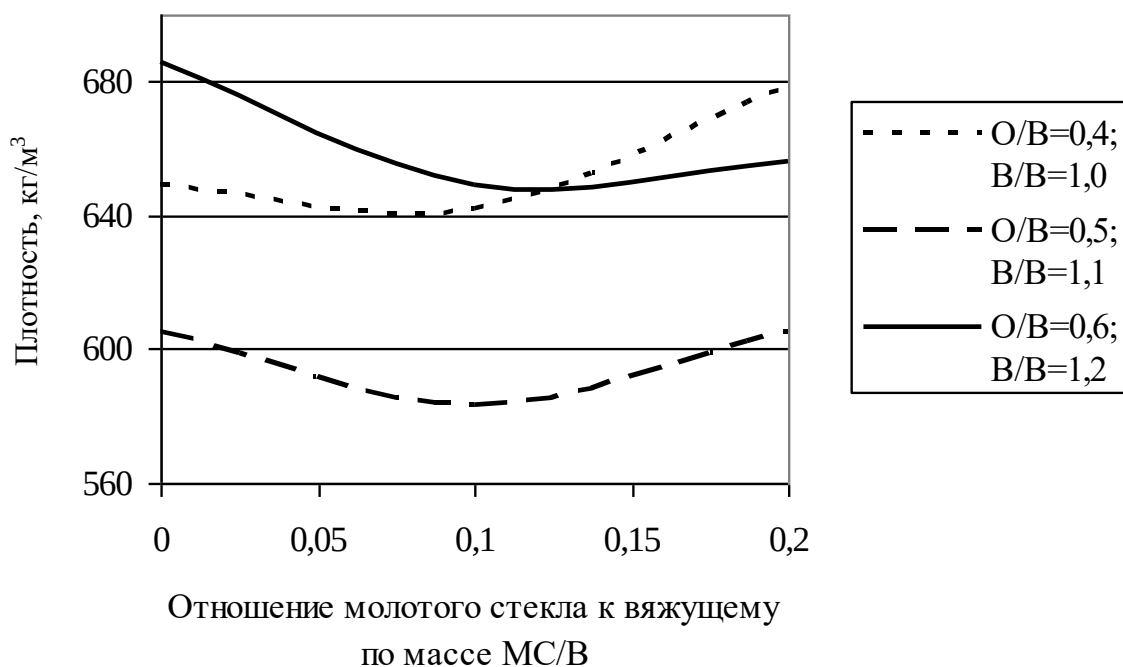


Рис. 9. Зависимости плотности опилкобетона от МС/В

Зависимости свойств опилкобетона от МС/В (см. рис. 8, 9) показывают, что в отдельности добавка молотого стеклобоя в исследованных пределах не оказывает существенного влияния и может быть исключена. Изменение свойств может объясняться армирующим влиянием опилок, которое заменяет упрочняющую роль МС как наполнителя в композиционном вяжущем.

Таким образом, были найдены достаточные для теплоизоляционного материала показатели, а именно предел прочности при сжатии 0,6 МПа и средняя плотность 540 кг/м³, которые достигаются при следующем номинальном составе материала (на 1 м³): опилки – 180 кг; известняковая мука – 327 кг; ЖС – 33 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества изделий на основе бесцементного вяжущего с использованием отходов деревообработки (по сравнению с другими видами материалов и технологий):

- отказ от привозного дорогостоящего цемента;
- упрощенная технология изготовления (не требуется какой-либо тепловой обработки, но для скорейшего набора прочности рекомендуется сушка изделий в течение одних суток при температуре 60–70 °С);
- утилизация отходов деревообработки.

Материал на основе бесцементного вяжущего с использованием опилок в качестве заполнителя является эффективным в условиях реального производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наназашвили И.Х. Арболит – эффективный строительный материал. М.: Стройиздат, 1984. 125 с.
2. Наназашвили И.Х. Строительные материалы, изделия и конструкции. М.: Высшая школа, 1990. 495 с.
3. Арболит. Производство и применение / сост. В.А. Арсенцев. М.: Стройиздат, 1977. 348 с.
4. Волков И.В. Опилкобетон: состояние и перспективы применения // *Промышленное и гражданское строительство*. № 9. 2002.
5. Куннос Г.А. Опилкобетон. Рига: Академия наук Латвийской ССР, 1960. 54 с.
6. Величко Б.П., Машкин Н.А., Петяшкин И.А., Шегай Н.Ю. Технология атмосферостойкого арболита с автоматизированной обработкой древесного заполнителя // *Известия вузов. Строительство*. 1994. № 3. С. 53–56.
7. Савенков А.И. Экологический метод изготовления отделочных материалов // *Экологические системы и приборы*. 2001. № 3. С. 37–40.
8. Moser B., Pfeifer C. Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008.
9. Дорохова Е.С., Изотова И.А. Эффективность использования стекольного боя // *Образование, наука, производство: сборник трудов конференции*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 345–349.
10. Федосов С.В., Акулова М.В., Потемкина О.В., Емелин В.Ю., Белякова Н.А. Исследование изменения фазового состава пенобетона с добавлением жидкого стекла и стеклобоя термическим методом // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2013. № 5. С. 14–20.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических 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 бесцементном композиционном вяжущем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 6–16.

SAWMILCOBETONE ON NON-CEMENT COMPOSITE BINDER

V.V. Belov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The role and advantages of products based on a non-cement binder using wood waste compared to other types of materials and technologies are considered. The purpose of this work was to obtain a heat insulation material based on wood processing waste and non-cement binder. The cement-free binder material using sawdust as an aggregate is effective under real-world production conditions.

Keywords: no-cement binder using woodworking wastes, heat insulation material, composition selection, mathematical experiment planning.

REFERENCES

1. Nanazashvili I.H. Arbolit – effektivnyj stroitel'nyj material [Arbolit is an effective building material]. M.: Stroyizdat. 1984. 125 p.
2. Nanazashvili I.H. Construction materials, products and structures [Construction materials, products and structures]. M.: Vysshaya shkola, 1990. 495 p.
3. Wood concrete. Proizvodstvo i primeneniye [Production and application] / dr. V.A. Arsentsev. M.: Stroyizdat. 1977. 348 p.
4. Volkov I.V. Pilkobeton: State and Prospects of Application. *Industrial and Civil Engineering*. 2002. No. 9. 35 p. (In Russian).
5. Kunos G.A. Opilkobeton [Opilkobeton]. Riga: Academy of Sciences of the Latvian SSR, 1960. 54 p.
6. Velichko B.P., Mashkin N.A., Petyakshin I.A., Shegaj N.Y. Technology of weatherproof arbolite with automated processing of wood aggregate. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* No. 3. 1994. 150 p. (In Russian).
7. Savenkov A.I. Ecological method of making finishing materials. *Ecological systems and instruments*. 2001. No. 3, pp. 37–40. (In Russian).
8. Moser B., Pfeifer C. Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008.
9. Dorohova E.S., Izotov I.A. Effectiveness of glass fighting. *Education, science, production: proceedings of the conference*. Belgorod: BGTU im. V.G. Shuhova. 2015, pp. 34–37. (In Russian).
10. Fedov S.V., Akulova M.V., Potemkin O.V., Emelin V.J., Belyakov N.A. Study of change of phase composition of foam concrete with addition of liquid glass and glass by thermal method. *News of South-West State University*. 2013. No. 5, pp. 14–20. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOV Vladimir Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Head of Chair 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. Sawmilcobetone on non-cement composite binder // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 3 (7), pp. 6–16.

УДК 539

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ ПОСТОЯННОЙ КРИВИЗНЫ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ НАПРАВЛЕНИЕМ ПРОЦЕССА

В.В. Гараников, Е.О. Корнильев

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Гараников В.В., Корнильев Е.О., 2020

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование векторных и скалярных свойств при смене направления деформирования на образцах из стали 9Х2. Показано, что по исчерпанию некоторого интервала длины траектории скалярные и векторные свойства как бы «забывают» сменить направление деформирования и соответствуют траекториям без смены направления.

Ключевые слова: исследование, траектория, скалярные свойства, векторные свойства, деформация, направление деформирования, след запаздывания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-17-24

ВВЕДЕНИЕ

Целью экспериментов, направленных на исследование закономерностей деформирования по криволинейным траекториям постоянной кривизны с изменяющимся направлением вектора, было изучение влияния смены направления деформирования на векторные и скалярные свойства стали 9Х2. Реализованы две программы испытаний. Проведено сравнение скалярных и векторных свойств по траекториям деформаций с изменением и без изменения направления процесса. В работе также уделено особое влияние изучения перемещений гипотетической поверхности текучести и нагружения [1–3].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПО ПЕРВОЙ ПРОГРАММЕ

Реализованы две программы испытаний. Испытания проводились на комплексе [4]. В опыте образец вначале растягивался до уровня $\varepsilon_1 = 0,01$, а затем были выполнены два витка против часовой стрелки и один виток по часовой стрелки (рис. 1). На рис. 1 цифры в кружках обозначают начало соответствующих витков. Условные символы в виде кружка с внутренним и внешним крестиком соответствуют первому и второму витку, темный кружок – соответствует третьему (в обратном направлении). Отклик на данную траекторию представлен на рис. 2.

В процессе деформирования на первом и втором витке наблюдается рост модуля вектора напряжений, т. е. происходит процесс упрочнения. Экспериментальная точка, отмеченная цифрой 3 в кружке, отвечает смене направления процесса деформирования. После смены направления процесса наблюдается вначале уменьшение модуля вектора напряжений, т. е. разгрузка, которая заканчивается в точках, отмеченных на рис. 1–2 буквой Н. При этом траектория напряжений проходит от начала координат девиаторной плоскости на удалении порядка 170 МПа. Затем реализуется активный процесс нагружения в обратном направлении; траектория напряжений быстро выходит на траекторию, отвечающую виткам в первоначальном направлении, и уже во второй половине третьего витка наблюдается процесс упрочнения.

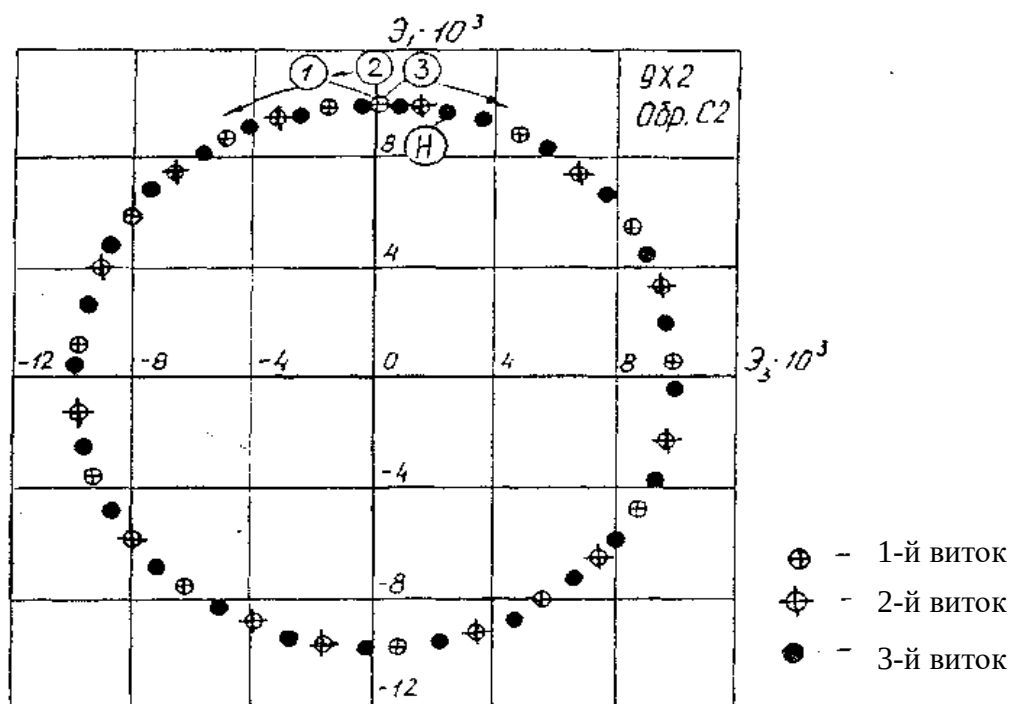


Рис. 1. Программа испытаний с изменяющимся направлением процесса

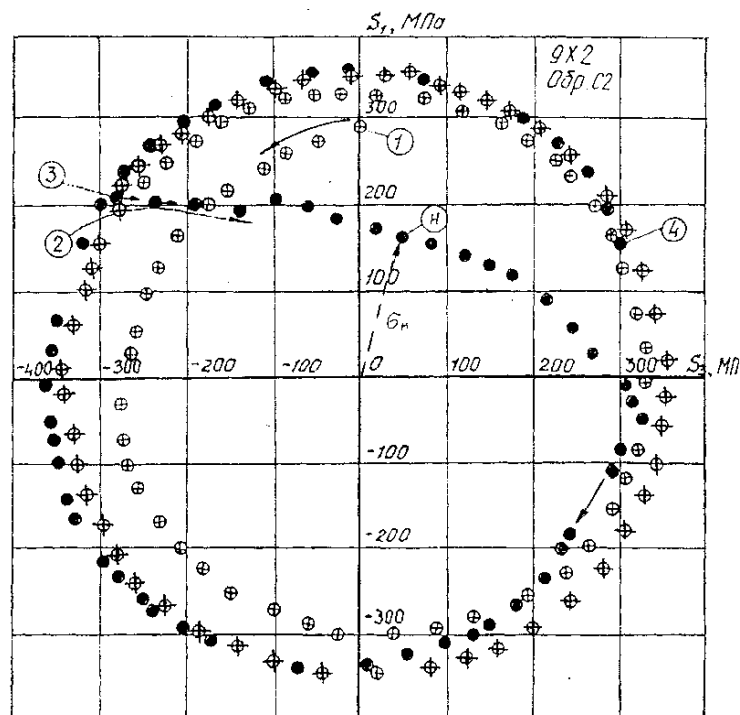


Рис. 2. Траектория нагружения

Скалярные и векторные свойства при деформировании по данной программе отражены на рис. 3–4. На рис. 3 представлена диаграмма деформирования $\sigma \sim \varepsilon$. Стрелками показаны направления процесса деформирования. После «нырка» напряжений на первом витке, связанного с изломом траектории деформации при переходе от простого растяжения к сложному нагружению по криволинейной траектории постоянной кривизны, наблюдается процесс упрочнения. На втором витке диаграмма характеризуется тем, что модуль вектора деформаций ε в процессе деформирования изменяется (рис. 3б). Данное обстоятельство можно объяснить появлением третьей компоненты модуля вектора деформации $\varepsilon_2 \neq 0$, причем к концу данного витка эта компонента уменьшается. После смены направления процесса происходит разгрузка, которая заканчивается в точке, отмеченной буквой Н (рис. 3в). Затем наблюдается рост модуля вектора напряжений до значения, соответствующего его максимального уровня на втором витке.

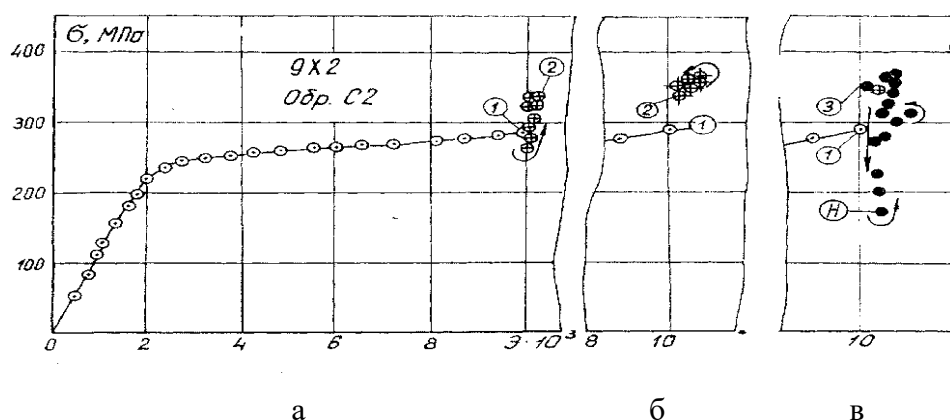


Рис. 3. Диаграмма деформирования материала по виткам: а – первому с упрочнением; б – второму с измененным модулем деформации ε ; в – третьему со сменой направления процесса

На рис. 4 представлены зависимости угла сближения от приращения длины траектории деформации. Хорошо видно, что данные зависимости с ростом ΔS стабилизируются. Начало режима $v_1 = \text{const}$ на кривых можно принять за условный след запаздывания векторных свойств материала как функции кривизны. Для данных испытаний $h = 0,015$.

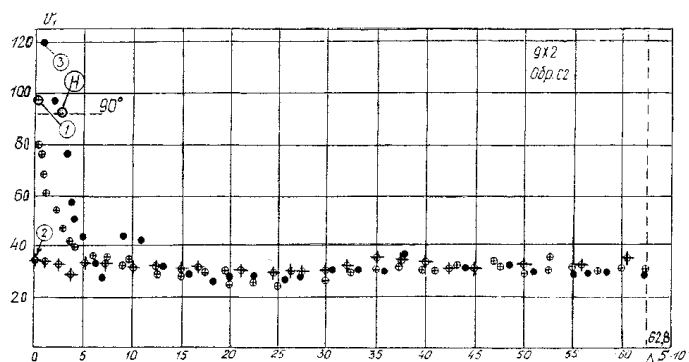


Рис. 4. Графики изменения угла сближения

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ НАПРАВЛЕНИЕМ ПРОЦЕССА

Более сложная программа испытаний, состоящая из двенадцати участков, была реализована для образца с17 (рис. 5). Выход на криволинейную траекторию деформаций постоянной кривизны был осуществлен после предварительного растяжения до уровня $\Theta_1 = 0,02$, разгрузки ($\sigma = 0$), а затем повторного нагружения до уровня, соответствующего началу гипотетической поверхности текучести $\Theta = 0,02 \cdot \Theta^T$ ($\sigma_{0.01}^T = 147$ МПа, $\Theta^T = 1,19 \cdot 10^{-3}$).

Испытания по криволинейной траектории состояли из трех циклов: последовательное нагружение против часовой стрелки до $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$; изменение направления процесса на противоположное и возврат в исходную точку. Точки 4, 6, 8 на рис. 5 отвечают началу цикла нагружения, а точки 5, 7, 9 соответствуют моменту смены направления процесса деформирования. Здесь же показаны экспериментальные точки и для четвертого цикла $\theta = 270^\circ$ (треугольники). Но из-за значительного роста компоненты деформации ε_2 в процессе нагружения данный цикл не рассматривался.

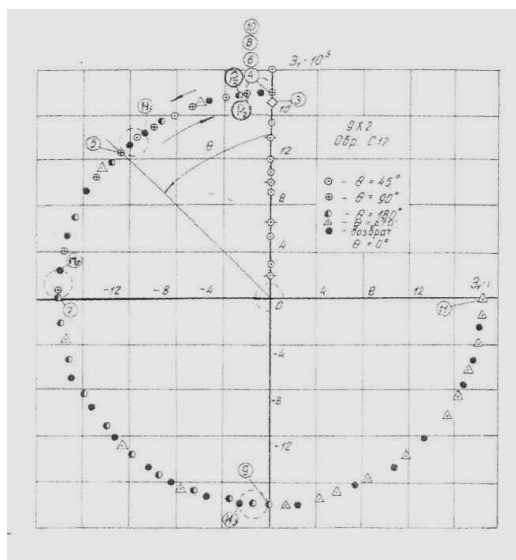


Рис. 5. Программа испытания
с периодически изменяющимся направлением процесса

Траектория нагружения, соответствующая реализованной траектории деформаций, представлена на рис. 6.

Условные символы для каждого цикла траектории нагружения соответствуют обозначениям экспериментальных точек траекторий деформаций. Темные точки обозначают траектории напряжений после смены направления процесса. Вначале (после смены направления деформаций) наблюдается разгрузка, которая меняется на активный процесс в точках, отмеченных буквами H_i и заканчивающийся в точках 6, 8, 10. Причем длина модуля вектора напряжений для первых двух циклов ($\theta = 45^\circ, 90^\circ$) не успевает восстановиться до своего прежнего значения в точке излома. Только для третьего цикла программы ($\theta = 180^\circ$) модуль вектора напряжений достигает своего прежнего значения к моменту окончания цикла. Данный результат также характерен для предыдущего

эксперимента (образец с2). В точках 6, 8, 10 вновь происходит смена направления деформирования, соответствующая исходному направлению (против часовой стрелки). В этом случае разгрузка заканчивается в точках, отмеченных буквами P_i . Для всех циклов наблюдается выход траекторий нагружения на некоторую стабилизированную траекторию. Кроме того, в данном эксперименте сделана попытка изучить перемещения гипотетической поверхности текучести и нагружения.

На рис. 5–6 окружности, проведенные вокруг начала координат девиаторной плоскости, соответствуют начальным поверхностям текучести и нагружения. Пунктирными линиями отмечены положения поверхности текучести для точек, где происходит смена направления процесса (см. рис. 5). Как видно из рис. 5, заметного изменения размеров поверхности текучести не происходит. Перемещения гипотетической поверхности нагружения с целью большей наглядности представлены только для третьего цикла программы (рис. 6). Здесь можно отметить некоторое увеличение данной поверхности в процессе деформирования.

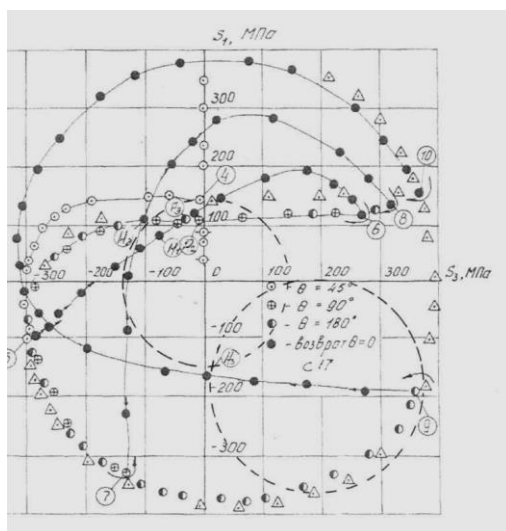


Рис. 6. Траектория нагружения

На рис. 7 показана диаграмма материала при деформировании по данной программе. Для наглядности каждый цикл представлен отдельно.

Сплошная линия соответствует предварительно простому растяжению до уровня $\varepsilon = 2\%$. Условные символы в виде ромбиков отвечают простой разгрузке, а кружки с внешним крестиком – повторному нагружению до уровня $\varepsilon_1 = 0,02 - \varepsilon^T$. Здесь можно отметить то, что наименьший уровень модуля вектора напряжений при разгрузке соответствует первому циклу, имеющую наименьшую длину траектории деформаций до точки смены направления процесса. Векторные свойства отражены на рис. 8. Точки, в которых происходит смена направления процесса нагружения (5, 7, 9), не совмещены с началом координат. Это позволяет более наглядно проследить за закономерностью изменения угла сближения для каждого цикла. Угол сближения после смены направления процесса быстро убывает и стремится к значению $\nu_1 = 20^\circ$.

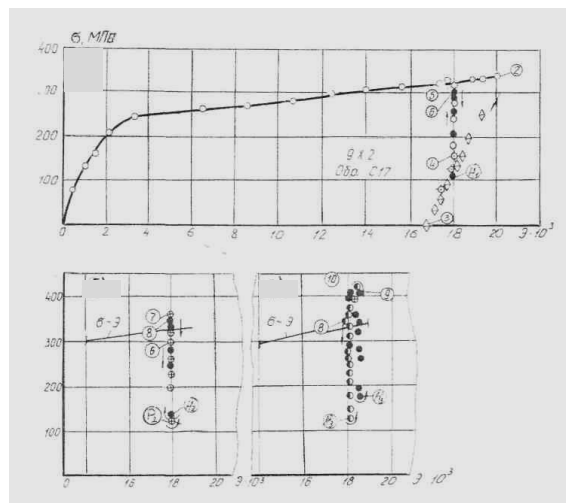


Рис. 7. Диаграмма деформирования образца

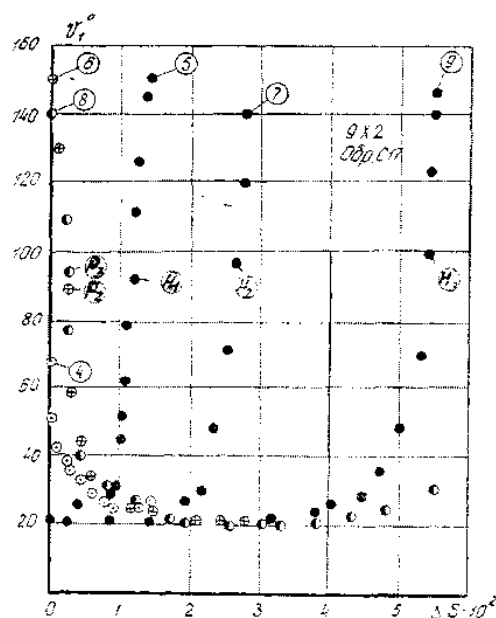


Рис. 8. Графики изменения угла сближения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом полученных экспериментальных результатов по двум реализованным программам можно отметить, что по исчерпанию некоторого интервала длины траектории (в данных случаях порядка половины длины дуги окружности) скалярные и векторные свойства как бы «забывают» сменить направление деформирования и соответствуют траекториям без смены направления деформирования. Поэтому здесь можно говорить о следе запаздывания для траектории постоянной кривизны как отрезке окружности S_h , при котором процесс после смены направления стабилизируется. Данный результат полностью соответствует выводам, которые были получены ранее [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубчанинов В.Г. Определяющие соотношения теории неупругих процессов в пространстве напряжений. Сообщение 1: теоретические основы // *Проблемы прочности*. 1992. № 5. С. 3–13.
2. Зубчанинов В.Г. Определяющие соотношения теории неупругих процессов в пространстве напряжений. Сообщение 2: экспериментальные основы // *Проблемы прочности*. 1992. № 6. С. 3–12.
3. Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 352 с.
4. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластичных свойств материалов при сложном нагружении: пат. 7202 U1 Рос. Федерация № 97108023/20(008702) / Зубчанинов В.Г., Акимов А.В., Охлопков Н.Л.; заявл. 20.05.1997; опубл. 16.07.1998.
5. Зубчанинов В.Г., Гараников В.В., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: монография: в 2 кн. Тверь: ТГТУ, 2003. Кн. 1: Процессы сложного деформирования. 172 с.
6. Зубчанинов В.Г., Гараников В.В., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: монография: в 2 кн. Тверь: ТГТУ, 2004. Кн. 2: Процессы сложного нагружения. 184 с.
7. Гараников В.В. Исследование векторных и скалярных свойств при изменении направления процесса деформирования // *Фундаментальные основы механики*. 2018. № 3. С. 112–114.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАРАНИКОВ Валерий Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: mehanika06@mail.ru
КОРНИЛЬЕВ Егор Олегович – ассистент кафедры технической механики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: mehanika06@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Гараников В.В., Корнильев Е.О. Исследование закономерностей деформирования по криволинейным траекториям постоянной кривизны с изменяющимся направлением процесса // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 3 (7). С. 17–24.

RESEARCH OF THE PATTERNS OF DEFORMATION ALONG CURVILINEAR TRAJECTORIES OF CONSTANT CURVATURE WITH A CHANGING PROCESS DIRECTION

V.V. Garanikov, E.O. Kornilev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. An experimental study of the vector and scalar properties was carried out when changing the direction of deformation on samples made of 9X2 steel. It is shown that after the exhaustion of a certain interval of the trajectory lengths, scalar and vector properties seem to forget the change in the direction of deformation and correspond to the trajectories without changing the direction.

Keywords: research, trajectory, scalar properties, vector properties, deformation, direction of deformation, delay trace.

REFERENCES

1. Zubchaninov V.G. Determining relations of the theory of inelastic processes in stress space. Message 1: Theoretical Foundations. *Problemy prochnosti*. 1992. No. 5, pp. 3–13. (In Russian).
2. Zubchaninov V.G. Determining relations of the theory of inelastic processes in stress space. Message 2: Experimental Basics. *Problemy prochnosti*. 1992. No. 6, pp. 3–12. (In Russian).
3. Zubchaninov V.G. *Mekhanika processov plasticheskikh sred* [Mechanics of processes of plastic media]. M.: Fizmatlit, 2010. 352 p.
4. Avtomatizirovannyj kompleks dlya issledovaniya uprugovyazkoplastichnykh svoystv materialov pri slozhnom nagruzhении [Automated complex for the study of elastic-viscoplastic properties of materials under complex loading]: Pat. 7202 U1 Rus. Federation No. 97108023/20 (008702) / Zubchaninov V. G., Akimov A.V., Okhlopkov N. L.; declared 20.05.1997; published 16.07.1998.
5. Zubchaninov V.G., Garanikov V.V., Ohlopkov N.L. Eksperimental'naya plastichnost': Monografiya [Experimental plasticity: monograph]: in 2 books. Tver: TGTU. 2003. Book 1: Processy slozhnogo deformirovaniya [Complex Deformation Processes]. 172 p.
6. Zubchaninov V.G., Garanikov V.V., Ohlopkov N.L. Eksperimental'naya plastichnost': Monografiya [Experimental plasticity: monograph]: in 2 books. Tver: TGTU, 2004. Book 2: Processy slozhnogo nagruzheniya [Complex loading processes]. 184 p.
7. Garanikov V.V. Issledovanie vektornykh i skalyarnykh svoystv pri izmenenii napravleniya processa deformirovaniya. *Fundamental'nye osnovy mekhaniki*. 2018. No. 3, pp. 112–114. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

GARANIKOV Valeriy Vladimirovich – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Head of Department of Technical Mechanics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mexanika06@yandex.ru

KORNILYEV Egor Olegovich – Assistant of Department of Technical Mechanics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mexanika06@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Garanikov V.V., Kornilev E.O. Research of the patterns of deformation along curvilinear trajectories of constant curvature with a changing process direction // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 3 (7), pp. 17–24.

УДК 691.517

РОЛЬ ОПТИМАЛЬНОЙ ГРАНУЛОМЕТРИИ ИЗВЕСТНЯКОВОЙ ДОБАВКИ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

П.В. Куляев, В.В. Белов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Куляев П.В., Белов В.В., 2020

Аннотация. В статье показана роль наноразмерной составляющей известняковой добавки и различные аспекты ее применения. Карбонатные добавки относятся к наиболее значимым инертным и псевдоинертным добавкам в бетон. Отмечается, что частицы наноразмерной составляющей тонкомолотого известнякового порошка при условии равномерного распределения внутри матрицы композита выполняют важную функцию в управлении процессом твердения бетона. Вопрос об известняковой добавке рассматривается в свете внутренних процессов заполнения известняковым порошком матрицы, уплотнения структуры композита через воздействие на процесс гидратации и окутывания цементных ядер, армирования матрицы на микроуровне (все это в целом повышает прочность, трещино- и кислотостойкость бетона).

Ключевые слова: наночастицы, наноразмерная составляющая, тонкомолотый известняковый порошок, окутывание ядер, ядра цемента, армирование на микроуровне, оптимальная гранулометрия, упаковка частиц, программное моделирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-25-31

В настоящее время использование мелкозернистого известнякового порошка с микро- и наноразмерными компонентами крайне необходимо для повышения эксплуатационно-технологических свойств бетона. Это требование обусловлено способностью тонкозернистого карбонатного порошка и наноразмерных дисперсий химически связываться с трехкальциевым алюминатом и алюмоферритом и при этом создавать синтерные микрзоны (зоны спекания) на физическом уровне. Эти зоны и сложные соли из гидратных микрокристаллов клинкера образуют внутреннюю структуру композита, представляющую собой соты и заполненную вяжущим компонентом и добавками [1].

Дисперсную часть мелкозернистого бетона составляют различные минеральные полидисперсные добавки (наполнители) и основное вяжущее. Наполнители – полидисперсные и полиморфные частицы. Их габариты не формируют явным образом картину распределения внутреннего напряженно-деформированного состояния, которое бы существенно отражалось на свойствах матрицы и каркаса-сот из крупно- и среднеразмерных заполнителей. Их свойства тем самым определяются характеристиками сыпучих дисперсных систем, критически не влияющих на собственные свойства связующего. Влияние наполнителей на свойства бетонов рассматривалось в предыдущих публикациях [2, 3], где было показано, в частности, что применение в качестве наполнителя цементных систем молотого известняка и суперпластификатора позволяет регулировать свойства мелкозернистых карбонатных бетонов.

Физико-химическая совместимость наноразмерного компонента мелкозернистого известняка с вяжущим и твердыми дисперсными структурами карбонатного бетона приводит к появлению у него ряда свойств, таких как равномерное заполнение объема композита микродисперсным минеральным компонентом и внутреннее, структурное микроармирование «межсотовых» перегородок – продуктов комплексной гидратации компонентов бетона и их частичного синтер-взаимодействия. Модели плотнейших структур упаковок представлены на рис. 1.

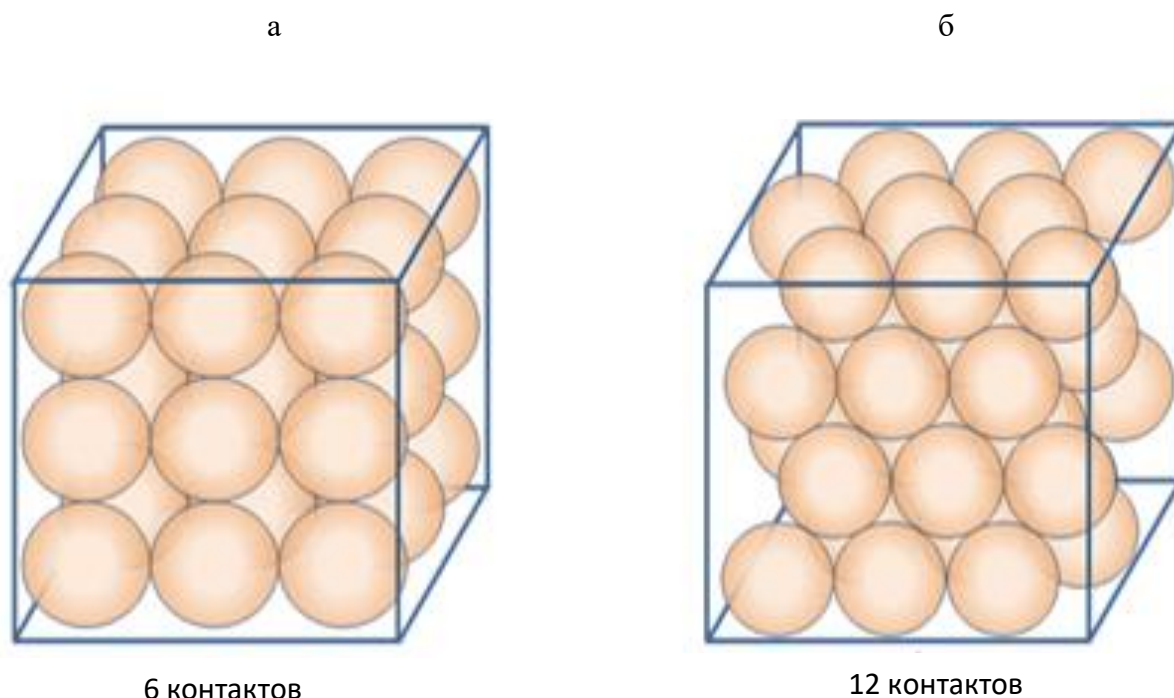


Рис. 1. Одномодальная плотная упаковка частиц:
а – кубическая; б – гексагональная [4]

На кафедре производства строительных изделий и конструкций Тверского государственного технического университета (руководитель – профессор В.В. Белов) теоретические положения были апробированы в рамках исследования механизмов модификации мелкозернистых бетонов. Изучение компьютерных моделей наиплотнейших упаковок дисперсных зерновых систем было выполнено инженером кафедры И.В. Образцовым. Процесс заполнения бункера одномодальными сферическими частицами различной дисперсности представлен на рис. 2 (позволяет проследить влияние масштабного фактора). С уменьшением размеров частиц их упаковка становится более плотной за счет уменьшения сдерживающего влияния силами трения стенок бункера и количественно по пустотности находится между правильными кубической и гексагональной упаковками.

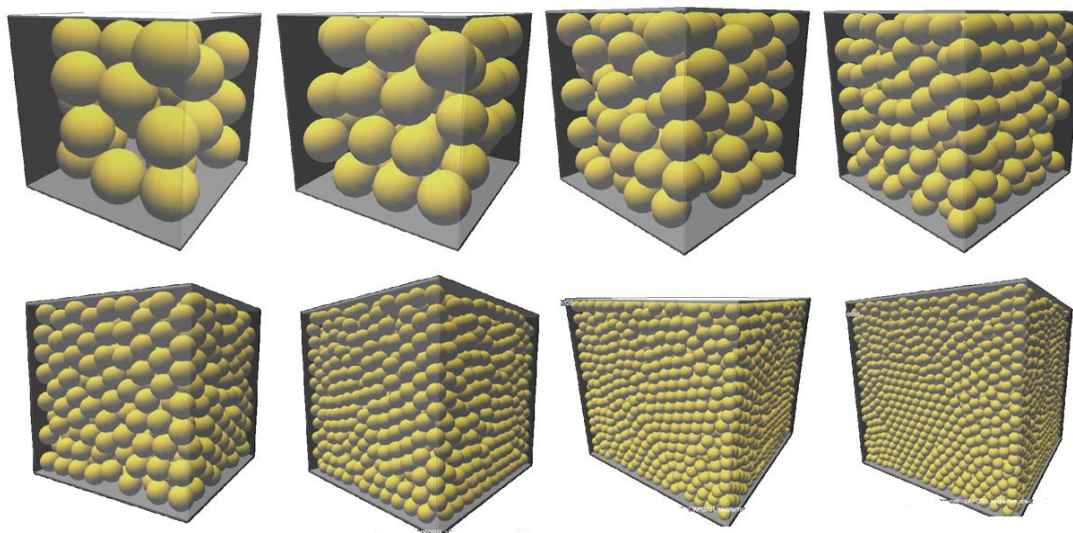


Рис. 2. Модели случайных одномодальных упаковок частиц

Двухмодальная упаковка частиц размером 0,63 и 0,16 относительных единиц (D_1 и D_2 соответственно) при различном их соотношении по количеству (N_1 и N_2 соответственно) представлена на рис. 3.

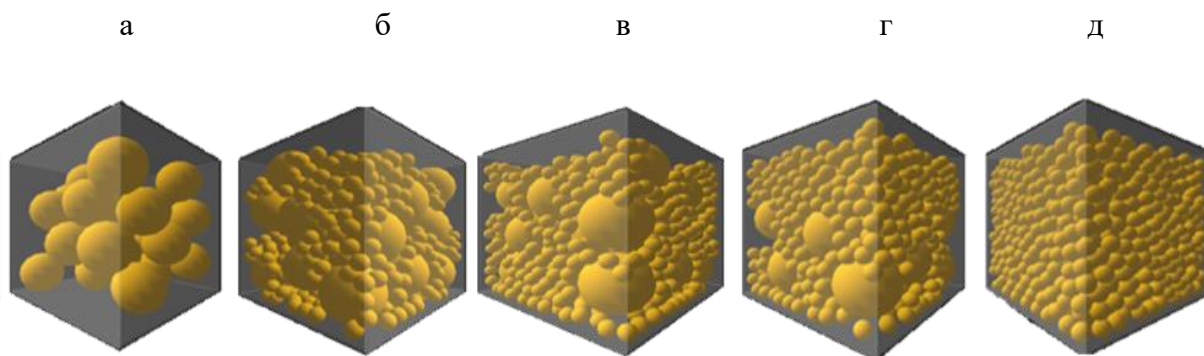


Рис. 3. Модели случайных двухмодальных упаковок частиц и их пустотности Π при соотношении размеров частиц $D_1:D_2 = 0,63:0,16$ и различном их соотношении по количеству: а – $N_1:N_2 = 100:0$ %, $\Pi = 61,6$ %; б – $N_1:N_2 = 80:20$ %, $\Pi = 46,4$ %; в – $N_1:N_2 = 50:50$ %, $\Pi = 43,1$ %; г – $N_1:N_2 = 20:80$ %, $\Pi = 46,0$ %; д – $N_1:N_2 = 0:100$ %, $\Pi = 48,8$ %

Наименьшая пустотность двухмодальных систем имеет место в нашем случае при одинаковой пропорции крупных и мелких частиц (рис. 4), что подтверждает представления о том, что наименьшая пустотность двухмодальных систем, как правило, соответствует соотношению больших и малых фракций по объему 70:30 %. При этом учитываются их объемно-массовые показатели. В то же время это правило, по нашим данным, не является универсальным и должно быть скорректировано с помощью компьютерного моделирования с учетом реального гранулометрического состава фракций.

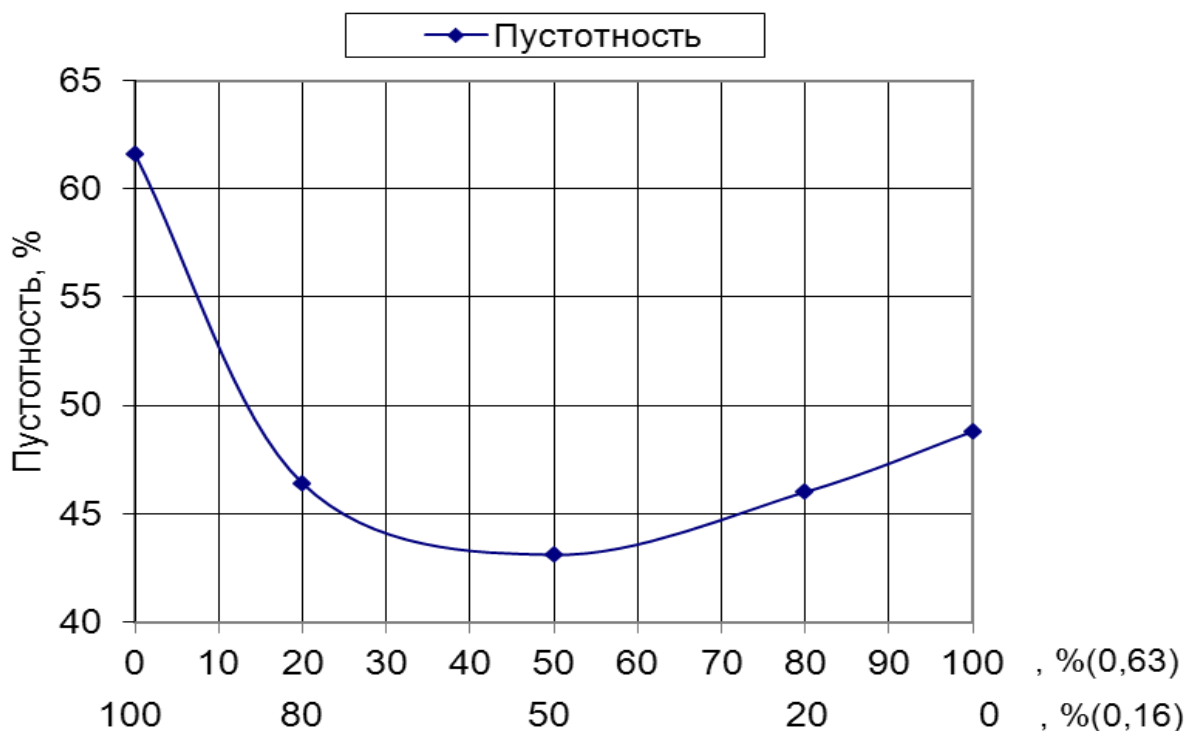


Рис. 4. Изменение пустотности двухмодальной упаковки частиц в зависимости от их относительного количества в смеси по данным компьютерного моделирования

Оптимальный гранулометрический состав многомодальных систем описывают известным уравнением Функа – Дингера:

$$G_{np} = 100 \cdot \left(\alpha + (1 - \alpha) \frac{D^n - D_{\min}^n}{D_{\max}^n - D_{\min}^n} \right),$$

где G_{np} – проход частиц, %, через сито размером D , мм; $D_{\max}$ $D_{\min}$ – наибольшая и наименьшая крупность зерна в смеси соответственно, мм; n – коэффициент распределения; α – коэффициент, учитывающий форму частиц: $\alpha = 1$ (для реальных частиц сыпучих систем может изменяться в пределах от 0,08 до 0,14).

Экспериментально полученным соотношениям фракционного состава модельной двухфракционной песчаной смеси ставится в соответствие расчет ее зернового состава с использованием уравнения Функа – Дингера. Расчет зернового состава тонкодисперсной смеси цемента и микронаполнителя – тонкомолотого известняка – по уравнению Функа-Дингера позволяет достигнуть плотной упаковки частиц на тонкодисперсном уровне. Пропорции компонентов, соответствующие оптимальному зерновому составу, а именно 88 % портландцемента и 12 % молотого известняка, способствуют не только сохранению прочности на прежнем уровне, что уже является новым и весьма неожиданным результатом, но и повышению прочности вяжущей части до 50 %. Оптимизация гранулометрического состава позволяет добиться приведенных результатов. При этом такой синергетический эффект, по-видимому, во многом обусловлен наличием в молотом

известняке наноразмерных составляющих в количестве до 5 % (рис. 5), которые обеспечивают повышенную реакционную способность материала.

На повышение прочностных характеристик композита влияют, наряду с гранулометрией минеральной части композита, дополнительные факторы. Оценивалось соотношение суперпластификатора, цемента и известнякового порошка. На графике (рис. 6) показано влияние удельной поверхности и способа измельчения на физико-механические параметры бетона. Оправдала себя схема совместного помола цемента, карбонатной крошки и суперпластификатора.

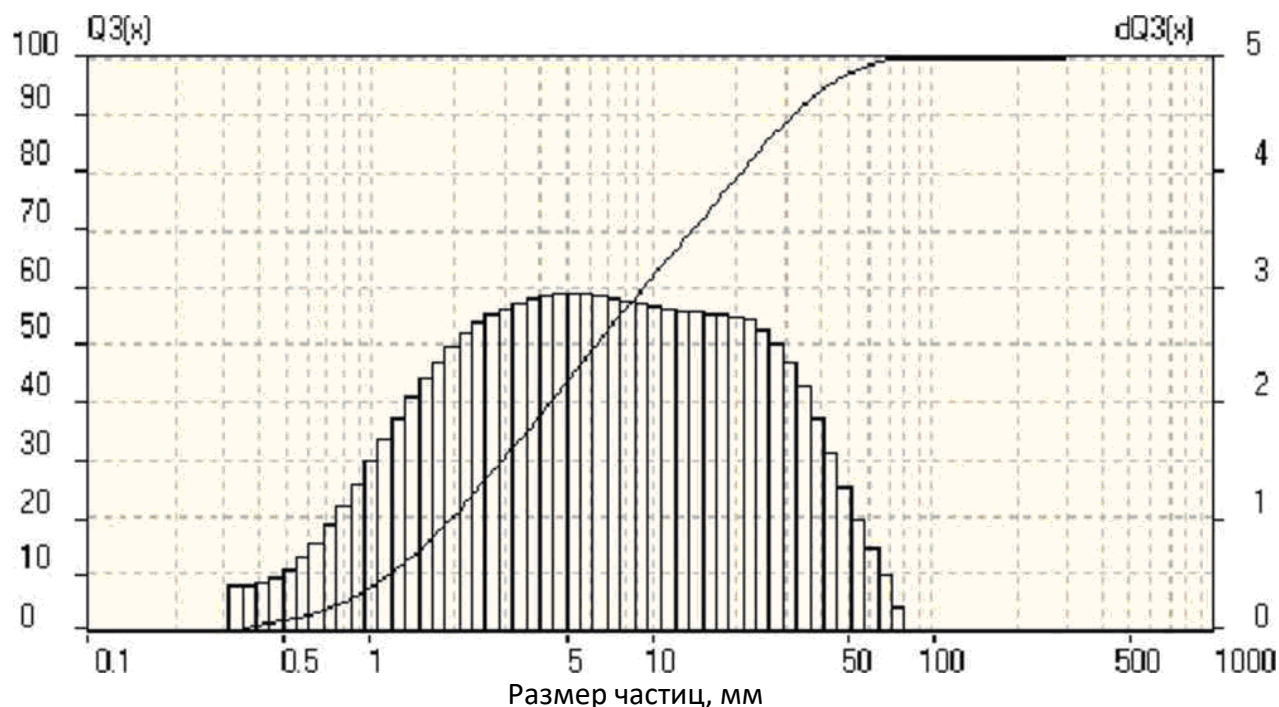


Рис. 5. Гранулометрическая кривая известнякового наполнителя с удельной поверхностью $600 \text{ м}^2/\text{кг}$

Оптимизация зернового состава исходной смеси и регулирование содержания в системе определенного количества нанодисперсных частиц способствуют заполнению нанодисперсными частицами известняка мельчайших пор между наночастицами цемента с высвобождением «свободной воды» и переводу пористости из капиллярной в гелевую области; улучшению структуры контактной зоны заполнителя, что выражается в повышении сцепления между заполнителем и цементным камнем.

Таким образом, мелкодисперсная известняковая добавка к бетону с наноразмерным компонентом имеет ряд следующих преимуществ: экономию до 25 % дорогостоящего вяжущего с повышенными физико-механическими свойствами бетона; повышение сульфатной стойкости бетона благодаря пролонгированию процесса твердения и синтервзаимодействию компонентов клинкера и нанодисперсной минеральной составляющей; улучшение структуры бетона, обусловленное переключением зон пористости (воздушно-капиллярной и гелевой).

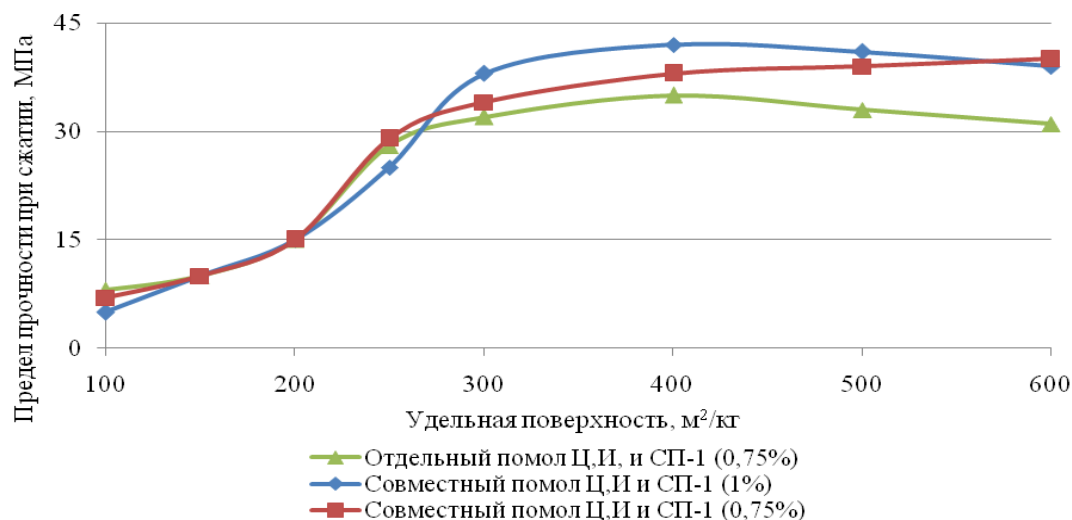


Рис. 6. Зависимость предела прочности мелкозернистого бетона при сжатии от удельной поверхности известнякового наполнителя и способа помола компонентов смеси

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хозин В.Г., Хохряков О.В. Карбонатные цементы низкой водопотребности // *Технологии бетонов*. 2009. № 11–12. С. 25.
2. Белов В.В., Смирнов М.А. Сухие строительные смеси оптимальной гранулометрии // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2004. № 5. С. 28–31.
3. Белов В.В., Смирнов М.А. Влияние фракционного состава сухих зернисто-дисперсных систем на их упаковку в свободном и уплотненном состояниях // *Восьмые Академические чтения отделения строительных наук РААСН*. Самара. 2004. С. 63–65.
4. Moser B., Pfeifer C. Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических 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

Куляев П.В., Белов В.В. Роль оптимальной гранулометрии известняковой добавки с наноразмерными составляющими в производстве строительных композитов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 25–31.

ROLE OF OPTIMAL GRANULOMETRY OF LIMESTONE ADDITIVE WITH NANOSIZED COMPONENTS IN PRODUCTION OF BUILDING COMPOSITES

P.V. Kuliaev, V.V. Belov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article highlights the role of the nanoscale component of the western additive in various aspects of its application. Among inert and pseudoinert additives in concrete, carbonate additives are among the most significant. It is noted that particles of nano-sized composite of finely ground limestone powder under condition of uniform distribution inside matrix of composite play an important role in control of concrete hardening process. This issue is considered in light of internal processes of filling with limestone powder of matrix, strengthening of composite structure through influence on process of hydration and wrapping of cement nuclei reinforcement of matrix at micro level (increases strength, cracking and acid resistance of concrete).

Keywords: nanoparticles, nanoscale component, toned limestone powder, cement cores wrapping, reinforcement at micro level, optimal granulometry, highest particle packing, software modeling.

REFERENCES

1. Khozin V.G., Khochryakov O.V. Carbonate cements of low water consumption. *Concrete technologies*. 2009. No. 11–12, pp. 25. (In Russian).
2. Belov V.V., Smyrnov M.A. Dry construction mixtures of optimal granulometry. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004. No. 5, pp. 28–31. (In Russian).
3. Belov V.V., Smyrnov M.A. Influence of fractional composition of dry grain-dispersion systems on their packaging in free and compacted states. *Eighth academic readings of the building sciences department of RAASN*. Samara. 2004, pp. 63–65. (In Russian).
4. Moser B., Pfeifer C. Microstructure and Durability of Ultra-High Per-formance Concrete. Proceedings of the Second International Symposium on Ul-tra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

BELOV Vladimir Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Pead of Chair 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

Kuliaev P.V., Belov V.V. Role of optimal granulometry of limestone additive with nanosized components in production of building composites // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 3 (7), pp. 25–31.

УДК 332.1

РАНДОМИЗАЦИЯ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТНО-СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

*В.В. Федоров, Т.Р. Баркая**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Федоров В.В., Баркая Т.Р., 2020

Аннотация. Оценивается уровень инновационности проектно-строительной и технико-эксплуатационной деятельности в современных городах. Отмечается необходимость системного подхода в выявлении и решении ключевых проблем отрасли. Возможная методология включает выбор и обоснование принимаемых технологий, объемно-планировочных и архитектурно-конструктивных решений; анализ взаимодействия архитектурно-ландшафтной среды с искусственно вводимыми абстракциями, мифами, символами, идеальными моделями и знаковыми объектами; сопряжение результатов эмпирических данных с выводами и следствиями «мысленных экспериментов», основывающихся на использовании современных IT-технологий. Показано, что характерной особенностью сферы профессиональной деятельности является сопоставимый масштаб актуальных проблем, решаемых на региональном и национальном уровнях. Рассматривается вариант рандомизации проблем, следующей релевантному плану привязки к этапам жизненного цикла здания/сооружения. Представлены результаты компаративного анализа отраслевых комплексов разных субъектов Российской Федерации. Описывается феномен «нереализуемости» завершенных и финансируемых проектов.

Ключевые слова: проектно-строительный комплекс, объект строительства, жизненный цикл здания/сооружения, рандомизация актуальных проблем отрасли.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-32-40

Важность и масштаб задач, решаемых сферой строительства и жилищно-коммунального хозяйства, определяют актуальность осмысления проблемного поля региональных архитектурно-строительных комплексов.

Перечень системообразующих организаций в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (по состоянию на 2020 год):

а) 76 групп строительных компаний по критериям объема строительства зданий и выручки от строительства инженерных сооружений;

б) 22 предприятия (компании) в сфере ЖКХ, отвечающие критериям по объемам забора, очистки и распределению воды, сбору и обработке сточных вод, выручки от осуществления деятельности в городах федерального значения и административных центрах.

Архитектура, строительство и ЖКХ страны по большому счету продолжают функционировать по стандартам XIX–XX веков. Используются сформированные за десятилетия конструктивные системы и схемы, технологии, давно известные материалы, объемно-планировочные и конструктивные решения. Показательно, что в современной России на исследования и проектные разработки в этой сфере человеческой деятельности

направляется менее 1 % общего объема задействованных средств (для сравнения: в автомобилестроении, авиации, электронике этот показатель на порядок больше).

Всесторонний анализ сложившейся ситуации выявляет необходимость глубокого рассмотрения самого широкого спектра социально-философских, организационно-технических, экологических и методологических аспектов [1, с. 7–9]:

1) способов выбора, обоснования и проверки принимаемых технологий, объемно-планировочных и архитектурно-конструктивных решений;

2) взаимодействия архитектурно-ландшафтной среды с искусственно вводимыми абстракциями, мифами, символами, идеальными моделями и знаковыми объектами;

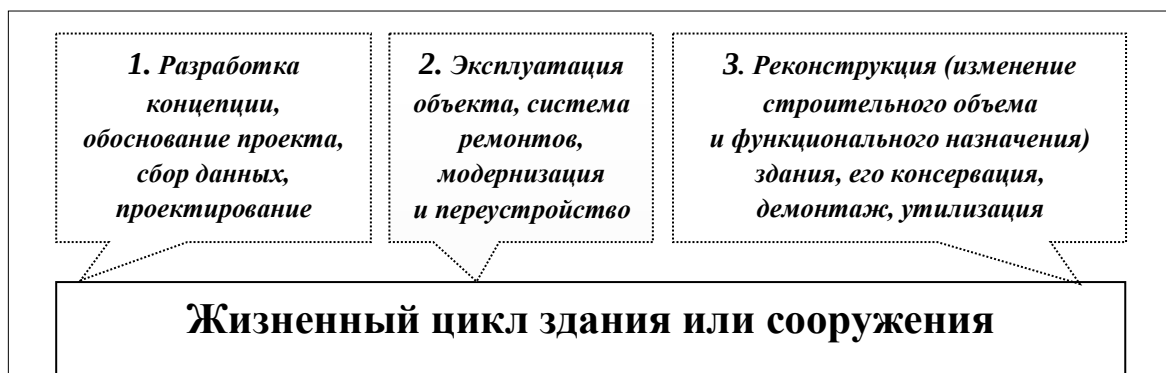
3) сопряжения результатов эмпирических данных (опыта проектирования, строительства, эксплуатации и демонтажа) с выводами и следствиями «мысленных экспериментов», основывающихся на все более широком использовании современных IT-технологий.

Подчеркнем, что методологический анализ позволяет обнаружить приемы совмещения знаний и практической деятельности, а также организацию, способы получения и обоснования новых данных. С помощью этого анализа найденные условия и предпосылки познавательной деятельности превращаются в инструмент осознанного выбора и научного поиска. Причем сегодня уже на региональном уровне необходимо решать проблемы практически мировоззренческого масштаба: от вопросов рационального выбора строительных материалов и конструктивных решений, а также характерных особенностей технической эксплуатации и реконструкции зданий, сооружений и городской застройки, до типологии и организации застройки и среды жизнедеятельности.

Главная цель строительной науки – получение данных, способствующих оптимизации технических решений и эффективной эксплуатации зданий. В более широком плане речь идет о наиболее полном понимании процессов, протекающих в строительных объектах в процессе их возведения и эксплуатации, а также о предотвращении ошибок и нерациональных проектных решений. Разнообразие и изменчивость проблем, связанных с архитектурно-строительной деятельностью, предполагает их упорядочение по тем или иным основаниям (масштабу, характеру возникновения и возможного решения, возможным социальным и экологическим последствиям и т. д.). Полагаем, что рандомизация актуальных проблем проектно-строительного комплекса по сути означает отнесение требующих безотлагательного решения вопросов и задач к тем или иным этапам жизненного цикла здания/сооружения для их научной, проектной или опытной отработки (рисунок). В пределах случайной изменчивости подобная рандомизация должна обеспечить сопоставимость кластеров данных по различным основаниям и гарантировать, что личные суждения и предвзятость исследователей (проектировщиков) не являются решающим моментом «сортировки». Поэтому рандомизация не выступает как исключительно произвольное или, напротив, систематическое распределение, а следует определенному релевантному плану привязки проблем к тому или иному этапу жизненного цикла здания/сооружения.

Во всех отраслях гражданского, промышленного, транспортного, гидро-технического, гидромелиоративного, военного или сельскохозяйственного строительства жизненный цикл объекта строительства включает организационные, изыскательские, проектные, строительные-монтажные и пусконаладочные работы, связанные с созданием, изменением или сносом объекта, а также взаимодействие с компетентными органами по поводу производства таких работ [2, с. 3]. Результатом является возведенное здание

(сооружение) с внутренней отделкой, действующими инженерно-технологическими системами и полным комплектом документации, предусмотренным законом. Причем в последние годы именно начальный и завершающий этапы жизненного цикла (первый и третий блоки структуры) приобретают все большее значение по затратам времени, финансовых средств и человеческих ресурсов.



Структура жизненного цикла здания или инженерного сооружения

Начальный этап жизненного цикла строительного объекта

В современном строительстве регулирование отношений осуществляется актами технического нормирования, не содержащими правовых норм (т. е. процесс регулирования основан исключительно на применении норм технических, а не права). Правовой нормой является только правило поведения, установленное государством и защищаемое от нарушений с помощью мер государственного принуждения. Такая норма воспринимается как разновидность общественной нормы, регулирующей социально значимое поведение членов общества. В этом смысле технические нормы не являются социальными и не имеют юридического значения, так как обуславливают только порядок обращения с орудиями и предметами труда, объектами материального мира или силами природы. Их нарушение само по себе не приводит к наступлению юридической ответственности (ГОСТы, СНИПы, СанПиНы – это акты нормативно-технического характера, не содержащие правовых норм). Поэтому именно технический регламент, закрепленный федеральным законом, должен устанавливать минимальные требования безопасности, необходимый уровень показателей безопасности, учитывать риски и минимизировать их, отвечать требованиям законодательной техники, быть доступным для понимания широкому кругу лиц.

Федеральный закон от 27 декабря 2012 года № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (ст. 7 и др.) определяет, что технические регламенты должны устанавливаться в целях обеспечения безопасности жизни и здоровья граждан при производстве строительной продукции и длительной эксплуатации сооружений [3]. Правовое закрепление норм о безопасности той или иной продукции или процессов в соотнесении с ее реализацией, производством, эксплуатацией, хранением, переработкой, утилизацией связано с необходимостью установления в них норм технического плана. При этом речь идет о правилах, которые регламентируют процессы производства, принципы построения и действия различного рода механизмов и определяют порядок обращения человека с природными материалами, различного рода веществами и техническими устройствами. Приобретая юридическую силу, регламенты становятся технико-правовыми

нормами, нарушение которых несет юридическую ответственность, в том числе и компенсационно-штрафного характера в пользу потерпевшего.

Текущая эксплуатация здания/сооружения

Серьезной проблемой профессиональной деятельности в рассматриваемой сфере является то обстоятельство, что на многих эксплуатируемых объектах отсутствует регламентация работы службы эксплуатации, которая однозначно устанавливает численность работников (эксплуатационников), их функции и полномочия; методику, периодичность и плановость выполнения мероприятий по обслуживанию зданий и сооружений; средства и приемы фиксации выполненных мероприятий в зависимости от совокупных показателей объекта недвижимости (сложности инженерных коммуникаций, этажности, общей площади здания и пр.).

В идеале на федеральном уровне должен существовать нормативный правовой акт, регламентирующий порядок организации и проведения контроля эксплуатации зданий и сооружений, к которым предъявляются повышенные требования эксплуатационной надежности и безопасности (см. второй этап жизненного цикла на рисунке).

Отсутствие такого рода норм, установившаяся на сегодняшний день практика эксплуатации зданий и сооружений не позволяют своевременно выявить и предотвратить появление критических дефектов, способных привести к разрушению конструкций (или даже объекта в целом) со всеми вытекающими из этого опасными последствиями. Пока же в отрасли, где постоянно возрастают темпы возведения и количество уникальных и технически очень сложных объектов недвижимости, де-факто доминируют погоня за прибылью и безнаказанность.

Заключительный этап жизненного цикла здания или сооружения

В современной России совокупность проблем и вопросов, связанных с заключительным этапом жизни строительного объекта представляется наиболее сложной и неопределенной. В частности, по прошествии многих лет эксплуатации происходят неизбежные изменения, оказывающие решающее влияние на выбор методов решения возникающих проблем. Эти изменения можно разбить на ряд факторов: **1) социальные** (уровень экономического благосостояния населения, демография, востребованные показатели площади и количества комнат в квартирах и пр.); **2) градостроительные** (инсоляция, шумовой режим, экология территории, транспортная доступность, уровень благоустройства, удаленность от центра города и т. д.); **3) конструктивные** (техническое состояние, надежность объекта, требуемый масштаб реконструктивного вмешательства и пр.); **4) кадастровые и экономические** (остаточная стоимость объекта и инфраструктуры, оценка возможной прибыли, доходность проекта с определением объема необходимых капитальных вложений и др.).

Как правило, разрабатываемые стратегии развития поселений на территории Российской Федерации включают мероприятия по масштабному обновлению и реконструкции застройки. При этом рассматриваются приемлемые варианты решения транспортных, социально-бытовых проблем, а также благоустройства городской среды. Города и регионы страны отличаются друг от друга, но имеют и общие структурные черты, в частности **наличие исторического центра** (требующего сохранения); **большой селитебной зоны** (перманентно локально обновляемой); **периферии** – зоны, которая наиболее удалена от исторического центра и в которой требуются снос ветхих строений, переоборудование и новая застройка. Отсюда вытекает необходимость всестороннего изучения существующего

жилищного фонда; систематизации его архитектурных, конструктивных и градостроительных особенностей; разработки рациональных решений по реконструкции; накопления аналогов, разработки методических материалов, пособий типовых решений и проектов.

Важными проблемами являются: а) оценка изменений среды по узловым направлениям; б) выявление динамики развития изменений. Набор факторов «за» (возможности) и «против» (препятствия) может рассматриваться как характерный для некоторой модельной ситуации. Обычно оценка их значимости (вероятности наступления) выполняется путем экспертного определения удельного веса детерминирующих факторов, значимости показателей. В результате факторы, определяющие целесообразность одного из двух базовых вариантов (например, реконструкции или реновации фрагмента городской застройки) получают вполне конкретную оценку целесообразности проведения.

В крупных российских городах более $\frac{3}{4}$ жилфонда составляет массовая типовая застройка, возведенная во второй половине XX века. На практике очень трудно установить экономическую эффективность программ масштабной реконструкции таких территорий. Скорее можно говорить об их результативности и социальном эффекте (снижении затрат времени на достижение мест приложения труда и отдыха, улучшении санитарно-гигиенических условий проживания и повышении комфортности среды). Итогом решения актуальных проблем переустройства застройки должны стать **эффективное использование городских территорий** (уплотнения или разуплотнения застройки, совершенствования планировочной структуры, переустройства инженерной, транспортной и социальной инфраструктуры и т. д.); **снос или сохранение/реконструкция зданий и сооружений; определение масштаба реконструктивного вмешательства** – выполнения мероприятий тотального плана или касающихся только изношенной застройки; **безусловное сохранение охранных зон, памятников архитектуры и культуры**.

Эффективность и результативность мероприятий по переустройству зданий различного назначения во многом определяются характером окружения: наличием/отсутствием противопожарных проездов, близостью источников санитарной вредности, недостаточной величиной санитарно-бытовых разрывов до ближайших зданий, невозможностью обеспечить выполнение требований инсоляции, аэрации, естественной освещенности и пр. Подобный анализ влияния факторов внешней среды в наибольшей степени применим к задачам переустройства больших фрагментов городской застройки. Что касается реконструкции, ремонта или реновации отдельного здания или сооружения, то на первый план выходят факторы, обуславливающие внутреннюю среду подрядной организации и собственника объекта. Однако и в этом случае целесообразен системный анализ по рассмотренному алгоритму. Возможны и паллиативные варианты масштабной реконструкции, когда ее результаты по масштабу «вторжения» сопоставимы с результатами реновации. Поэтому необходим тщательный отбор каждого объекта для масштабной реконструкции (например, крупногабаритной пристройки или многоуровневой мансардной надстройки).

В 2017 году был принят Федеральный закон № 141-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О статусе столицы Российской Федерации» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части установления особенностей регулирования отдельных правоотношений в целях реновации жилищного фонда в субъекте Российской Федерации – городе федерального значения Москве» [4]. По сути было утверждено решение о реновации – сносе большого количества зданий и возведении на их месте новых кварталов, разработанных на конкурсной основе. В других городах

страны столь масштабный проект попросту невозможен в силу отсутствия средств, строительной базы и пр.

Важнейший критерий трансформации застройки – устойчивость, т. е. развитие в интересах настоящего и будущего поколений, что предполагает минимизацию затрат природных ресурсов. Принцип устойчивого развития территории является основополагающим для Градостроительного кодекса РФ. Способ реновации застройки весьма ресурсозатратен, способен негативно повлиять на экологическую обстановку. Для оценки эффективности различных подходов часто используется метод «экологического следа». Речь идет о количественной оценке воздействия на среду обитания (размеров прилегающей территории, необходимой для производства ресурсов и хранения отходов, появляющихся при сносе здания).

Размер экологического следа – интегральная оценка затрат требующихся для производства, строительства, реконструкции и утилизации жилого фонда природных ресурсов, выраженная в площади территории, необходимой для природного воспроизводства затраченных ресурсов. В последние годы были предприняты попытки подсчета экологического следа различных этапов жизненного цикла зданий, а также энергоэффективных мероприятий, связанных с реконструкцией и модернизацией зданий различного типа [5, с. 121–130]. Компаративный анализ различных приемов трансформации городской застройки выявил отсутствие однозначных решений. В итоге выбор варианта часто обусловлен не экономическими или экологическими, а исключительно политическими соображениями. В любом случае решение такой проблемы имеет стратегический характер и представляет собой очень сложную задачу социально-технического управления.

ВЫВОДЫ

1. В структурно-содержательном отношении проблемные поля региональных (проектно-строительных и жилищно-эксплуатационных) комплексов в большинстве случаев полностью совпадают. Специфика характерна только для северных регионов (из-за сокращения зоны вечной мерзлоты) и города Москвы, где в силу особых условий формирования регионального бюджета появилась возможность осуществления массовой реновации застройки.

2. Приемы решения проблем региональных проектно-строительных и жилищно-эксплуатационных комплексов (при внешнем постоянстве системы текущих и капитальных ремонтов, модернизаций, аварийно-восстановительных работ, реконструкций и пр.) претерпевают постоянные трансформации, связанные прежде всего с применением новых технологий, высокопроизводительной техники и пр.

3. Рандомизация актуальных проблем отрасли имеет сложный характер их привязки к стадиям жизненного цикла строительных объектов (периодические «ремиссии и обострения»). Профессионалы все чаще сталкиваются с проблемами организационно-правового и финансового, а не проектного или технологического плана.

4. Практика показывает, что успешное решение проектных и организационно-технологических задач еще не является залогом успешной реализации проектов разной степени сложности. На первый план все чаще выходят проблемы юридического и политического порядка, возникает феномен «нереализуемости» технически, организационно, технологически и финансово безупречных проектов. В современных рыночных условиях изменившиеся регламенты (техничко-правовые нормы), смена руководства региона, характер отношений с федеральным центром, компенсационно-

штрафные санкции и прочее часто создают барьеры на пути строительства новых зданий и сооружений (а особенно реконструкции). Несовершенство юридических формулировок, их разночтение, различное толкование, сложность, высокая стоимость и временная протяженность судебных процедур увеличивают стоимость и время реализации проектов.

5. Выпускники российских вузов не вполне готовы к профессиональной деятельности в новых условиях. Действующие учебные планы должны быть пополнены новыми дисциплинами не проектно-технического (здесь нет особых проблем (особенно в условиях доминирования компьютерных технологий проектирования)), а правового и социального плана (ориентированными исключительно на актуальные проблемы регионального проектно-строительного комплекса).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров В.В., Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Скудалов П.О. Актуальные проблемы и методология строительной науки. М.: ИНФРА-М, 2020. 262 с.
2. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федер. закон от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант». Источник: <https://base.garant.ru/12172032/> (дата обращения: 07.04.2020).
3. О техническом регулировании: федер. закон от 27 декабря 2002 года № 184-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант». Источник: <https://base.garant.ru/12129354/> (дата обращения: 07.04.2020).
4. О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О статусе столицы Российской Федерации» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части установления особенностей регулирования отдельных правоотношений в целях реновации жилищного фонда в субъекте Российской Федерации – городе федерального значения Москве: федер. закон от 1 июля 2017 года № 141-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант». Источник: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71608998/> (дата обращения: 07.04.2020).
5. William E. Rees. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out // *Environment and Urbanization*. 1992. Vol. 4. Iss. 2, pp. 121–130.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДОРОВ Виктор Владимирович – доктор 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

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических 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

Федоров В.В., Баркая Т.Р. Рандомизация актуальных проблем регионального проектно-строительного комплекса // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 3 (7). С. 32–40.

RANDOMIZING TOPICAL ISSUES REGIONAL DESIGN AND CONSTRUCTION COMPLEX

V.V. Fedorov, T.R. Barkaya
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The level of innovation of design, construction and technical and operational activities in modern cities is estimated. There was a need for a systematic approach to identify and address key industry problems. The possible methodology includes the selection and justification of technologies, space planning and architectural and structural solutions; analysis of interaction of architectural and landscape environment with artificially introduced abstractions, myths, symbols, ideal models and sign objects; combining the results of empirical data with the conclusions and consequences of «thought experiments» based on the use of modern IT-technologies. It is shown that a characteristic feature of the sphere of professional activity is the comparable scale of current problems solved at the regional and national level. We are considering the randomization of problems, the next relevant plan for linking to stages of the life cycle of a building/structure. The results of comparative analysis of industry complexes of different constituent entities of the Russian Federation are presented. The phenomenon of «unrealizability» of completed and funded projects is described.

Keywords: design and construction complex, construction object, life cycle of building/structure, randomization of current problems of industry.

REFERENCES

1. Fedorov V.V., Subbotin S.L., Barkaya T.R., Skudalov P.O. Aktual'nye problemy i metodologiya stroitel'noj nauki [Current problems and methodology of construction science]. M.: INFRA-M, 2020. 262 p.
2. Technical regulations on the safety of buildings and structures: Feder. law No. 384-FL of 30 December 2009. Access from the Internet – the Garant legal system. Source: <https://base.garant.ru/12172032/> (date of accessed: 07.04.2020).
3. On technical regulation: Feder. law No. 184-FL of 27 December 2002. Access from the Internet – the Garant legal system. Source: <https://base.garant.ru/12129354/> (date of accessed: 07.04.2020).
4. On amendments to the Law of the Russian Federation «On the status of the capital of the Russian Federation» and certain legislative acts of the Russian Federation in terms of establishing the specifics of regulating certain legal relations for the purpose of housing renovation in the subject of the Russian Federation – the Federal city of Moscow: Feder. law No. 141-FL of 1 July 2017. Access from the Internet – the Garant legal system. Source: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71608998/> (date of accessed: 07.04.2020).
5. William E. Rees. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*. 1992. Vol. 4. Iss. 2. pp. 121–130. (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

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., Barkaya T.R. Randomizing topical issues regional design and construction complex // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 3 (7), pp. 32–40.

УДК 69.003.13

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

С.В. Черемных

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Черемных С.В., 2020

Аннотация. Целью исследования является обеспечение энергетической и, как следствие, экологической безопасности регионов с нетрадиционным энергоснабжением путем развития надежных и устойчивых конструкций с использованием возобновляемых источников энергии. Основными задачами исследования являются изучение опыта в области получения и использования ветровой и солнечной энергии, а также ее комбинирования; обоснование необходимости применения экологически безопасных способов получения электроэнергии; разработка типовой конструкции и системы управления на базе возобновляемых источников энергии; расчет электрических схем получения, хранения и транспортировки энергии от природных источников. Методы решения задач исследования – теоретический анализ, систематизация, сравнение и корректировка новых и полученных ранее данных о возможности применения существующей продукции; разработка модульной конструкции, учитывающей возможности реконфигурации компонентной базы; моделирование объекта посредством упрощенных моделей. Стоит отметить, что в условиях стремительного роста мирового потребления энергии прочная и надежная конструкция, состоящая из типовых элементов, позволяет компенсировать энергозатраты в различных отраслях производства малой мощности, а также генерировать и накапливать энергию в районах, где есть необходимость в ее получении.

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

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-40-50

ВВЕДЕНИЕ

Возможность использования возобновляемых источников для выработки необходимой энергии стоит на первом месте в повестке дня во всем мире [1–3]. В последние десятилетия во многих странах действовали специальные государственные

программы поддержки развития технологий создания и использования возобновляемых источников электроэнергии [4].

Применение альтернативных источников, несмотря на существенное преимущество традиционных источников питания по сравнению с возобновляемыми для энергообеспечения крупных потребителей, является наиболее рациональным и экономичным решением для объектов небольшой мощности (от 1 до 10 кВт), удаленных от основного источника питания на десятки и сотни километров. Один из таких вариантов автономного электроснабжения – установка солнечных модулей [5–12] и ветро-энергетических установок, которые не требуют возведения протяженных высоковольтных электрических сетей, так как конструкции с возобновляемыми источниками питания малой мощности размещаются в непосредственной близости от электроприемников на единой либо смежной площадке. Вырабатываемая таким способом электрическая энергия может использоваться напрямую различными нагрузками постоянного тока или накапливаться в аккумуляторных батареях для последующего применения. Солнечные модули способны генерировать электричество в течение 20 и более лет, а эффективность работы солнечной батареи обуславливается потоком солнечного излучения.

Однако среди специалистов постоянно возникают споры об эффективности и целесообразности развития возобновляемых источников энергии. Причинами разногласий являются относительно невысокий уровень энерговыделения основных фондов (в среднем по году составляет около 15 % от суммарной производительности установленного оборудования) и высокая стоимость оборудования электростанций на базе возобновляемых источников [1, 2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Существующие конструкции на объектах ПАО «Газпром» на базе солнечных модулей

Один из основных объектов инфраструктуры газодобывающих и газоснабжающих организаций – магистральные трубопроводы, в состав которых входят системы линейной телемеханики, требующие для своей работы электропитание. Традиционно электроснабжение линейных потребителей трубопроводов выполняется от вдольтрассовой высоковольтной линии 6 (10) кВ с установкой в районе расположения потребителей электроэнергии комплектных трансформаторных подстанций. Подключение объектов контрольных пунктов телемеханики (КП ТМ) к сетям центрального электроснабжения во многих случаях может оказаться невозможным из-за удаленности магистральных трубопроводов от сетей электроснабжения. Нередко для подключения объекта требуются установка дорогостоящих электрических подстанций и прокладка протяженных линий электропередач (ЛЭП). Протяженность высоковольтной линии в большинстве случаев равна протяженности трубопроводов и может составлять как десятки, так и сотни километров. Получение разрешения на подключение, удовлетворение технических условий и создание проекта электроснабжения требуют существенных временных и финансовых затрат.

Ощутимый потенциал экономии совокупных затрат на строительство системы электроснабжения линейных объектов при применении автономных источников питания на базе солнечных электростанций малой мощности по сравнению с использованием воздушных ЛЭП был выявлен по результатам технико-экономических расчетов в рамках концептуальных проектов обустройства газотранспортной сети.

На рис. 1 представлена конструкция стойки с солнечными модулями, которая выполнена в виде одиноко стоящих, но соединенных между собой стоек из гнутого профиля. Эти стойки опираются на винтовые сваи. К стойкам-опорам крепятся солнечные модули. Через эти опоры осуществляется подвод кабелей от датчиков и исполнительных механизмов [1].

Виды металлических конструкций под солнечные модули довольно разнообразны и их выбор зависит от необходимого объема вырабатываемой энергии, а также задач, поставленных перед объектами строительства.



Рис. 1. Конструкция для установки КП ТМ с солнечными модулями
(Брянская область)

На рис. 2 представлена конструкция стойки. Она выполнена в виде пыле-влагозащищенного шкафа, установленного на опорах. Через эти опоры осуществляется подвод кабелей от датчиков и исполнительных механизмов. Для обеспечения электропитания в условиях Северного Урала была применена система солнечных модулей общей мощностью 1 кВт. Чтобы понять, в чем преимущество применения описанного нетрадиционного источника энергии, представьте, что вместо этой конструкции для обеспечения электропитания КП ТМ для кранового узла потребовалось бы построить линию электропередач, пересекающую одну реку и две железные дороги.



Рис. 2. Конструкция для установки КП ТМ с солнечными модулями
(Пермский край)

Если используется солнечная панель, то следует учитывать один очень важный фактор – непостоянство солнечного света. Поэтому размещать солнечные модули необходимо строго в определенном направлении (на юг). Нужно также обращать внимание на высоту их расположения и угол наклона к горизонту.

Сама система должна отвечать ряду требований (в случае их несоблюдения строиться она не будет): она должна иметь минимальное собственное энергопотребление и функционировать без внешнего обогрева или охлаждения; обладать широкими опциями и возможностями по комплектации для снижения собственного энергопотребления; программное обеспечение должно быть способным управлять источниками и потребителями энергии и обеспечивать этим их оптимальную работу; конструкции под солнечные модули должны характеризоваться минимализмом и простотой возведения.

Изменяя количество солнечных модулей в зависимости от географического расположения объекта, можно контролировать выработку электрической энергии и достичь максимального коэффициента полезного действия для достижения поставленных задач.

Однако применение альтернативной энергии и конструкций, вырабатывающих ее, несмотря на экономическую привлекательность, ограничено. В качестве серьезного фактора, препятствующего распространению и развитию альтернативной энергетики, выступают природно-климатические условия района строительства объектов. Например, в регионах, в которых распространены многолетнемерзлые грунты, прокладка трубопроводов предусматривается, как правило, в надземном исполнении с системой электрообогрева, мощность которой может достигать нескольких мегаватт. Для подключения системы электрообогрева в данном случае наиболее целесообразно использование централизованного электроснабжения с передачей электроэнергии по вдольтрассовой высоковольтной линии, к которой также могут быть подключены и линейные потребители. Стоимость строительства возобновляемых источников энергии на базе солнечных электростанций генерируемой мощностью не менее 1 МВт в настоящее время существенно выше, чем стоимость строительства традиционной системы электроснабжения.

Таким образом, одним из наиболее вероятных направлений применения конструкций солнечных электростанций малой мощности является вспомогательная инфраструктура трубопроводов внешнего транспорта.

Оптимальным вариантом использования солнечных конструкций на объектах магистрального газового транспорта является их монтаж на удаленных линейных объектах небольшой мощности (электрифицированных узлов запорной арматуры подземных трубопроводов внешнего транспорта, станции электрохимической защиты, станции линейной телемеханики и связи и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная энергосберегающая конструкция на базе солнечных модулей и ветроэнергетических установок

Если солнечной энергии недостаточно, то для обеспечения требуемого уровня надежности электроснабжения должны применяться взаимозаменяемые источники питания, обеспечивающие круглосуточное покрытие нагрузки в любое время года, а также стабильную подачу электроэнергии при кратковременных увеличениях нагрузки в связи с пуском дополнительных электродвигателей. Таким образом, для увеличения объемов получения экологически чистой электроэнергии можно использовать комбинированный способ выработки электроэнергии, например солнечные модули в сочетании с

ветроэлектрическими установками [13–15]. Пример одной из таких установок представлен на рис. 3 [3].

Сооружение представляет собой комплекс, который состоит из башенной конструкции для крепления энергоуловителей и крановой установки, используемой для обслуживания аккумуляторов.

Металлическая четырехгранная конструкция (башня) высотой 24 м спроектирована в виде стержневой системы из полых прокатных труб прямоугольного сечения.



Рис. 3. Конструкция на базе возобновляемых источников энергии

Комбинировать автономные источники альтернативной энергии выгодно, так как совмещается, например, мощность, получаемая от ветра, и мощность, даваемая солнцем.

Энергия ветра. С целью наилучшего взаимодействия с воздушными массами на вершине конструкции устанавливается вертикально-осевой ветрогенератор 5 кВт SokolAirVertical. Он монтируется на опорной трубе в центре сечения металлической башни. Винтовая лестница из просечно-вытяжных листов крепится внутри конструкции к каждой грани башни с внутренней стороны и имеет три площадки отдыха. Верхняя площадка устроена на уровне конструкции ветрогенератора для обеспечения доступа к данному агрегату.

Энергия солнца. В проекте в качестве второго «энергоуловителя» используются солнечные панели ФСМ-200М, закрепленные на южной грани башни. Их количество может варьироваться в зависимости от нужд потребителей и в общем случае составляет 54 шт. Они устанавливаются под углом 90° к горизонту по всей высоте конструкции.

Башню устанавливают таким образом, чтобы солнечные модули смотрели строго на юг. Это обуславливается максимальным потоком солнечной энергии, проходящей через панели. Обслуживание панелей обеспечивается устройством винтовой лестницы, которая одновременно служит для вертикального перемещения рабочего персонала по башне.

Транспортировка получаемой энергии от солнечных панелей осуществляется электропроводным видом транспорта к телу ветряного генератора, в который встроены контроллер заряда, позволяющий комбинировать энергию от ветра и солнца и получать выходное напряжение 220 В. Аккумулятор обеспечивает хранение электроэнергии. Для питания разнообразных источников промышленного и бытового назначения предусмотрен инвертор (от него электроэнергия поступает к потребителю).

Как показано на рис. 4, в комплекс сооружения входит, кроме башни, крановая установка, управляемая оператором посредством ручного привода.

Она состоит из восьми колонн с лежащими на них подкрановыми балками, по которым перемещается небольшой мостовой кран. Эта установка предназначена для беспрепятственного обслуживания аккумуляторов, находящихся ниже нулевой отметки в пределах доступности кранового механизма. Проектом также предусмотрен подогрев механизма греющим кабелем, который дает возможность в любой момент времени переместить кран и исключить обледенение рабочих поверхностей.

Подземная часть комплекса представляет собой совокупность утепленных ячеек, выполненных в виде упорядоченных углублений, в которых расположены модули аккумуляторов для накопления и хранения на них электрической энергии. В целях предотвращения воздействия факторов окружающей среды верхняя часть ячейки загерметизирована.



Рис. 4. Крановая установка, используемая для обслуживания емкостей энергонакопителей

Объект строительства можно использовать не только для нужд нефтегазовой отрасли, но и в регионах с недостаточным энергоснабжением для обеспечения электроэнергией вахтовых поселков, поселений коренных малочисленных народов и вдоль крупных транспортных магистралей для дозаправки электромобилей.

На рис. 5 показан график суммарной среднедневной вырабатываемой электроэнергии на примере территорий Западно-Сибирской равнины.

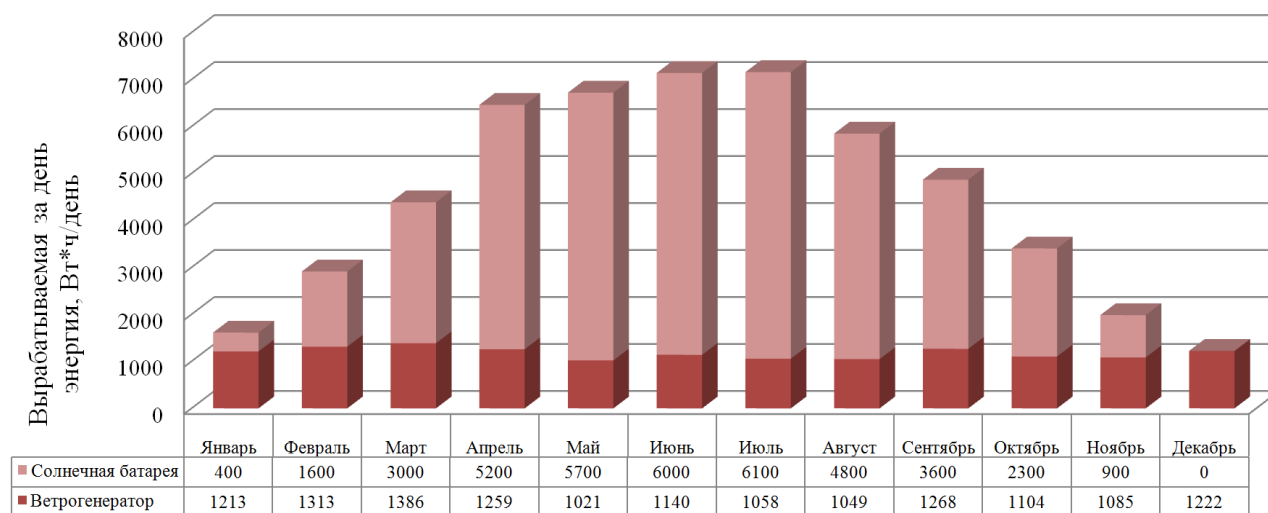


Рис. 5. График суммарной среднедневной вырабатываемой электроэнергии территорий Западно-Сибирской равнины

Комбинированный способ получения электроэнергии позволяет использовать установку в различных местностях. В зимний период преобладающим энергонакопителем можно считать ветроэнергетическую установку, поскольку один из альтернативных источников энергии (солнце) практически не участвует из-за климатических особенностей региона. В летний период, наоборот, основное количество энергии солнечными модулями. При принятии решения об установке исследуемой конструкции учитывается зависимость между приоритетными нагрузками для возобновляемых источников энергии в зависимости от мест исследования (прибрежная полоса – преимущественное использование ветрогенератора, места с солнечной активностью – преимущественное использование солнечных модулей) [16, 17].

Выработанную энергию можно как накапливать, так и использовать в процессе накопления, что обеспечит значительную экономию средств на затраты энергообеспечения проживания людей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительство крупных сооружений, таких как атомные и гидравлические электростанции (ГЭС), для традиционного энергоснабжения потребителей нерентабельно в районах с низкой плотностью населения. Кроме того, ГЭС на равнинных реках – крайне нецелесообразное решение из-за недостаточного напора воды, а при затоплении прибрежных территорий в процессе строительства и эксплуатации плотин неизбежно страдает окружающая природа. Огромный вред также наносится лесному фонду при устройстве

воздушных ЛЭП. С целью предотвращения аварийной и пожарной ситуации вдоль трасс делают вырубки в виде просек. Ширина просеки обычно равна средней высоте существующих насаждений основного лесного массива. Прокладывается просека с каждой стороны от крайнего провода воздушной ЛЭП, а это в среднем порядка 10 м в обе стороны.

В условиях стремительного роста мирового потребления энергии прочная и надежная энергосберегающая конструкция на базе солнечных модулей и ветроэнергетических установок, состоящая из типовых элементов, позволяет компенсировать энергозатраты в различных отраслях производства малой мощности, без постройки дорогостоящих энергетических сооружений традиционного типа (ГЭС, ЛЭП и т. д.)

При подсчете окупаемости было выявлено, что сметная стоимость строительства экспериментальной конструкции составляет 13 млн руб., а срок возможной окупаемости при использовании в различных отраслях – от 5 до 10 лет. Это делает ее экономически эффективной и целесообразной (по сравнению с устройством и проектированием других сооружений по добыче электрической энергии на основе традиционных источников) и дает возможность рекомендовать данный проект в качестве типового проектного решения в различных природно-климатических условиях [1, 3, 18].

В рамках экологического мониторинга можно сделать вывод, что для поддержания стабильной экологической ситуации в мире человечеству необходимо использовать возобновляемые потоки и источники энергии (особенно поступающие на поверхность Земли потоки энергии, приносимые солнечным излучением и создаваемые ветровым давлением). Требуется постоянный контроль за развитием и совершенствованием альтернативных систем получения энергии и ежегодная актуализация оценки применимости описанных и подобных им установок, так как технические характеристики генерирующих установок, возводимых на базе возобновляемых источников энергии, непрерывно улучшаются [19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Голубев С.В. Возобновляемые источники энергии в энергетике газовой отрасли. Перспективы и аспекты применения ВИЭ на объектах ПАО «Газпром» // *Газовая промышленность*. 2016. № 12/746. С. 72–76.
3. Лебедев Д.С., Панов В.К., Венчакова В.В., Матвейчук В.В., Черемных С.В. Возобновляемые источники энергии на базе солнце- и ветроэнергетических систем типа «Лидия» // *Возобновляемые источники энергии: материалы всероссийской научной конференции с международным участием и XI Научной молодежной школы, 3–6 декабря 2018 года, Москва*. М.: МАКС Пресс, 2018.
4. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон [принят Гос. Думой 11.11.2009] // *Собрание законодательства РФ*. 2009. № 3. Ст. 14.
5. Акимова В.В., Тихоцкая И.С. Новое японское «чудо»... Солнечное! // *Азия и Африка сегодня*. 2014. № 9. С. 18–25.

6. Акимова В.В. Институциональный фактор развития возобновляемой энергетики: опыт Белгородской области // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2017. № 6. С. 18–24.
7. Акимова В.В. Типология стран по уровню развития солнечной энергетики // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2015. № 4. С. 89–95.
8. Jäger-Waldau A. PV status report 2016: Research, Solar Cell Production and Market Implementations of Photovoltaics // *European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport*. Italy. 2016. 90 p. DOI: 10.2790/682995
9. Renewables 2016 Global status report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf (дата обращения: 05.03.2020).
10. Snapshot of global PV markets, 1996–2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2014.pdf (дата обращения: 05.04.2020).
11. Елистратов Е.Е., Аронова Е.С. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. 2012. 164 с.
12. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика / под ред. В.И. Виссарионова. М.: МЭИ. 2008. 276 с.
13. Bussar C., Moos M., Alvarez R., Wolf P. [et al.]. Optimal allocation and capacity of energy storage systems in a future European power system with 100 % renewable energy generation // *Energy Procedia*. 2014. No 46, pp. 40–47.
14. Bryce S. Richards, Gavin L. Park, Thomas Pietzsch, Andrea I. Schafer. Renewable energy powered membrane technology: Brackish water desalination system operated using real wind fluctuations and energy buffering // *Journal of Membrane Science*. 2014. No 468, pp. 224–232.
15. Бурмистров А.А., Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. [и др.]. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии / под ред. В.И. Виссарионова. М.: МЭИ, 2009. 144 с.
16. Cedrick B.Z.E., Long P.W. Investment Motivation in Renewable Energy: a PPP Approach. *Energy Procedia*. 2017. No 155, pp. 229–238.
17. Renewables 2018 Global Status Report // *REN21 Secretariat*. 2018, pp. 252.
18. Седаш Т.Н. Возобновляемые источники энергии: стимулирование инвестиций в России и за рубежом // *Российский внешнеэкономический вестник*. 2016. Т. 4. С. 94–97.
19. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf> (дата обращения: 12.03.2020).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧЕРЕМНЫХ Степан Валерьевич – старший 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. Универсальная энергосберегающая конструкция на базе возобновляемых источников энергии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 40–50.

UNIVERSAL ENERGY-SAVING DESIGN BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

S.V. Cheremnykh

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The aim of the research is to ensure energy and, as a result, environmental safety of regions with non-traditional energy supply by developing reliable and sustainable structures using renewable energy sources. The main objectives of the research are: to study the experience in the field of obtaining and using wind and solar energy, as well as its combination; to justify the need to use environmentally friendly methods of generating electricity; to develop a standard design and management system based on renewable energy sources; calculation of electrical circuits for obtaining, storing and transporting energy from natural sources. The method of solving the research tasks is: theoretical analysis, systematization, comparison and correction of new and previously obtained data on the possibility of using existing products; development of a modular design that takes into account the possibility of reconfiguration of the component base; object modeling using simplified models. It is worth noting that in the conditions of rapid growth in global energy consumption, a strong and reliable design consisting of standard elements allows you to compensate for energy consumption in various industries of low power production, as well as generate and store energy in areas where there is a need for it.

Keywords: rod system, metal structures, wind power plants, solar modules, batteries, power engineering, modular construction.

REFERENCES

1. 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).
2. Golubev S.V. Renewable energy sources in energetics of gas industry. Prospects and aspects of the use of RES at Gazprom PJSC facilities. *Gazovaya promyshlennost'*. 2016. No. 12/746, pp. 72–76. (In Russian).
3. 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*. M.: Lomonosov MSU. December 3–6, 2018. (In Russian).
4. On Energy Saving and on Improving Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation: feder. law of 23.11.2009 No. 261-FL: Adopted by the State Duma on 11 November 2009: approved by the Federation Council on 18 November 2009. *Assembly of Legislation of the Russian Federation*. 2009. No. 3. Article. 14. (In Russian).
5. Akimova V.V., Tikhotskaya I.S. New Japanese «miracle»... Solar! *Aziya i Afrika segodnya*. 2014. No. 9, pp. 18–25. (In Russian).
6. Akimova V.V. Institutional factor of renewable energy development: experience of the Belgorod region. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2017. No. 6, pp. 18–24. (In Russian).
7. Akimova V.V. Typology of countries by level of solar energy development. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2015. No. 4, pp. 89–95. (In Russian).

8. Jäger-Waldau A. PV status report 2016: Research, Solar Cell Production and Market Implementations of Photovoltaics. *European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport*. Italy. 2016. 90 p. DOI: 10.2790/682995.
9. Renewables 2016 Global status report [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf (date of access: 05.03.2020).
10. Snapshot of global PV markets, 1996–2015 [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2014.pdf (date of access: 05.04.2020).
11. Elistratov E.E., Aronova E.S. Solnechnye ehnergoustanovki. Otsenka postupleniya solnechnogo izlucheniya. [Photovoltaics. Assessment of solar radiation]. St. Petersburg: Publishing House of Polytechnical University. 2012. 164 p.
12. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsov V.A., Malinin N.K. Solnechnaya ehnergetika [Solar Energy] / ed. V.I. Vissarionov. Moscow: MEI, 2008. 276 p.
13. Bussar C., Moos M., Alvarez R., Wolf P. et al. Optimal allocation and capacity of energy storage systems in a future European power system with 100 % renewable energy generation. *Energy Procedia*. 2014. No. 46, pp. 40–47.
14. Bryce S. Richards, Gavin L. Park, Thomas Pietzsch, Andrea I. Schafer. Renewable energy powered membrane technology: Brackish water desalination system operated using real wind fluctuations and energy buffering. *Journal of Membrane Science*. 2014. No. 468, pp. 224–232.
15. Burmistrov A.A., Vissarionov V.I., Deryugina G.V. [et al.]. Metody rascheta resursov vozobnovlyaemykh istochnikov ehnergii [Methods for calculating renewable energy resources]. ed. V.I. Vissarionov. Moscow: MEI. 2009. 144 p.
16. Cedrick B.Z.E., Long P.W. Investment Motivation in Renewable Energy: a PPP Approach. *Energy Procedia*. 2017. No. 155, pp. 229–238.
17. Renewables 2018 Global Status Report. *REN21 Secretariat*, Paris, France. 2018, pp. 252.
18. Sedash T.N. Renewable energy: stimulating investment in Russia and abroad. *Rossiiskii vneshneehkonomicheskii vestnik*. 2016. Vol. 4, pp. 94–97. (In Russian).
19. Forecast of development of energy of the world and Russia until 2040 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf> (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Cheremnykh S.V. Universal energy-saving design based on renewable energy sources // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No 3 (7), pp. 40–50.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.311.16

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПОСРЕДСТВОМ СОЗДАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*В.В. Окунева, А.А. Агамирзоев, К.Б. Корнеев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Окунева В.В., Агамирзоев А.А., Корнеев К.Б., 2020

Аннотация. Рассмотрена одна из самых перспективных технологий для решения задачи балансировки системы с распределенной генерацией – виртуальная подстанция. Отмечено, что, используя технологии распределенных вычислений и «Интернета вещей», можно реализовать эффективный механизм децентрализованного управления элементами энергосистемы.

Ключевые слова: электроэнергетика, подстанция, виртуализация, автоматизация, распределенная генерация, «умный» учет.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-51-59

ВВЕДЕНИЕ

Человечество с каждым годом все больше и больше наращивает производство и потребление электроэнергии. В настоящее время особое внимание уделяется возобновляемым источникам энергии.

Многие ресурсы нашей планеты ограничены. Поэтому большинство стран стремится наращивать долю возобновляемых источников энергии. Будущее человечества зависит от альтернативной энергетики. Однако альтернативная энергетика, несмотря на все свои достоинства, не может обеспечить постоянный уровень производства электроэнергии (иногда ее больше, иногда меньше). Солнечные батареи работают только днем, их эффективность зависит от погодных условий и времени года. Ветряные фермы простаивают во время сезона перелета птиц. Эти и другие факторы являются проблемами, обусловленность которыми отличает рассматриваемую энергетику от традиционной. По мере возрастания доли альтернативной электроэнергии эти проблемы обостряются. На данном этапе исторического развития придумали конкретное их решение – виртуальные электростанции (ВЭС).

КОНСТРУКЦИЯ И ФУНКЦИИ ВЭС

Виртуальная электростанция – это высокотехнологичная система, которая объединяет электроэнергию сразу от нескольких производителей и потребителей [1]. Можно сказать, что ВЭС фактически управляет поведением как производителей, так и потребителей. Производителями в данном случае могут выступать объекты распределенной генерации, солнечные панели, биогазовые, ветровые станции, когенерация, небольшие

гидроустановки и т. п.; потребителями – потребители электроэнергии, владеющие холодильными установками, кондиционерами, дренажными насосами, дробильными установками и т.д. Необходимо заметить, что такие объекты потребителей и производителей должны обладать гибкостью в производстве или потреблении электроэнергии. Виртуальная электростанция не вмешивается непосредственно в производственный процесс [2]: она регулирует объекты, обеспечивая поддержку энергосистеме, когда производство и потребление теряют баланс (возникают пиковые нагрузки и т. п.). Для работы ВЭС необходима «умная» инфраструктура: «умные» системы учета электроэнергии; коммуникация, например связь через Интернет; специальное программное обеспечение, которое будет обеспечивать баланс между доступными источниками электроэнергии за счет «сглаживания» пиковых нагрузок в системе.

Виртуальная электростанция может играть роль стабилизатора энергосистемы. При постоянном поступлении информации в реальном времени о возможностях разгрузки мощностей каждого из подключенных к системе потребителя она получает сигнал от регулятора и системного оператора [3]. По предварительной и общей договоренности контролирует потребление каждого потребителя, тем самым сглаживает общий график пиковой нагрузки и стабилизирует сеть [4].

Проект ВЭС не может быть типовым, так как структура возобновляемых источников энергии и их потребителей всегда индивидуальна и уникальна и зависит от различных факторов, таких как географическое положение и демографические особенности региона. Но стоит отметить, что в любой ВЭС есть обязательные элементы:

- 1) источник энергии;
- 2) потребитель электричества;
- 3) система накопления мощности;
- 4) датчики для сбора информации и управления работой;
- 5) программно-аппаратный комплекс, управляющий работой энергосети [5].

Энергосистемам, в которых распределение энергии производится без ВЭС, приходится резервировать энергию (не менее 15 % этой энергии в норме не используется). Поэтому снижается выгода выработки электроэнергии. В системах с ВЭС количество ненужных резервов намного меньше. Различные программные алгоритмы и связь с различными локальными устройствами сбора и обработки информации (так называемого «Интернета вещей» – Internet of Things, IoT) позволяет более гибко применять энергию [6].

КОМПОНЕНТЫ ИДЕАЛЬНОЙ ВЭС

Идеальная ВЭС состоит из нескольких технологических стадий [7, 8]:

1. Технология генерации. В настоящее время доступен широкий диапазон технологий, требующих, однако, жесткой спецификации.

2. Технологии накопления энергии. Системы накопления энергии могут рассматриваться сегодня как новое средство для адаптации изменений спроса на электроэнергию до заданного уровня выработки электроэнергии. В контексте использования возобновляемых источников энергии или других распределенных источников энергии, они могут быть использованы также в качестве дополнительных источников или в качестве энергетических буферов в случае неконтролируемой (стохастической) генерации, например топливные элементы и фотоэлектрические

технологии (особенно в слабых сетях в связи с распределенными объектами генерации и возобновляемыми источниками энергии).

3. Информационно-коммуникационные технологии. Крайне важны для ВЭС, наличие коммуникационных технологий и инфраструктура – обязательное требование для рассматриваемой электростанции.

В зависимости от целей управления можно выделить три категории электростанций с разными уровнями использования коммуникационных технологий в них [9, 10].

На данный момент существует несколько определений ВЭС (различаются в зависимости от того, как описана распределенная генерация). Мы будем считать в рамках этой статьи, что ВЭС подразумевает контроль агрегации нескольких распределенных генерирующих блоков, объединенных сетью передачи электрической энергии и располагающихся вблизи нагрузок. Контроль такой агрегации может выполняться централизованной или децентрализованной системой, поддерживаемой алгоритмом логического управления и связи инфраструктуры, поэтому рассматривается как одна большая электростанция.

Типы ВЭС в зависимости от топологии управления и применения коммуникационных технологий:

1. Централизованная ВЭС (рис. 1а). В этом режиме работы распределенных источников генерирования электрической энергии задаются контрольным координационным центром. Сигналы нагрузок поступают в компьютер и обрабатываются с помощью логического алгоритма. После этого сигналы направляются в каждый блок контроллера распределенной генерации и в соответствии с ними осуществляется генерация электроэнергии. При наличии координационного центра ВЭС способна выполнять как технические, так и экономические функции, что позволяет получить преимущества от агрегирования распределенной генерации.

2. Децентрализованная ВЭС (рис. 1б). В топологии децентрализованной системы каждое подразделение распределенной генерации локально контролируется местными контроллерами. В основном активная выходная мощность распределенной генерации контролируется контроллером распределенной генерации, а сам этот контроллер – местным контроллером, который имеет свои логические алгоритмы.

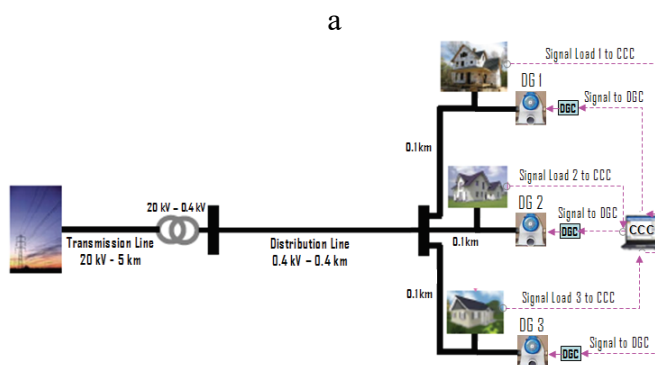


Рис. 1. Виртуальная электростанция: а – централизованная; б – децентрализованная;
Transmission Line – линия электропередачи напряжением 20 кВ длиной 5 км;
Distribution Line – линия распределения на напряжении 0,4 кВ длиной 0,4 км;
Signal load 1, 2, 3 to CCC – передача сигнала на компьютер

6

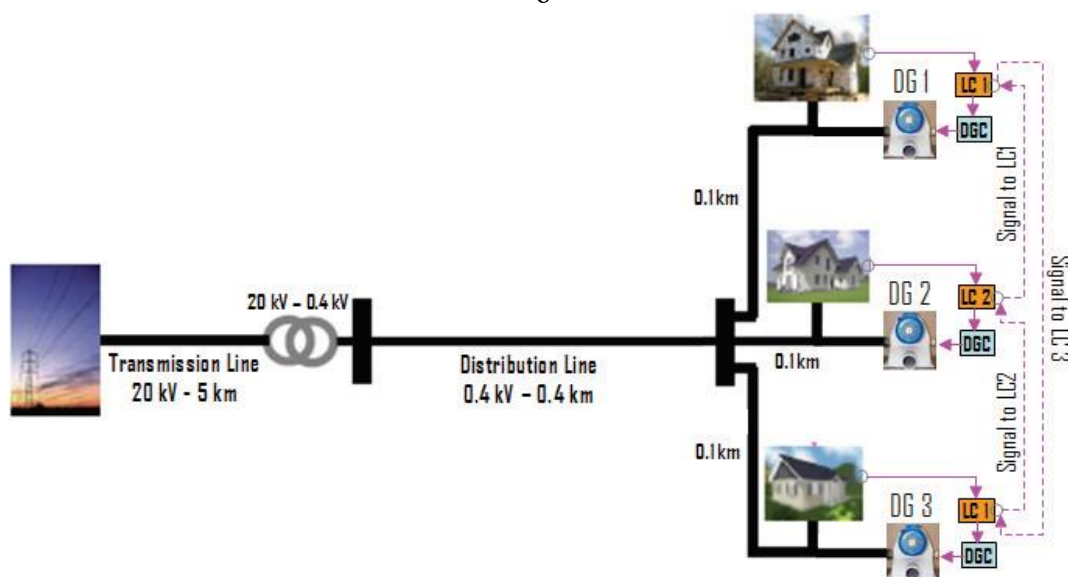


Рис. 1. Продолжение

Для выполнения комплексной системы локальные контроллеры связаны друг с другом (образуют кольцо [11]). Таким образом, сетевая архитектура рассматривается как единый центр управления.

Различные типы подключения блока DG к энергосистеме делятся на следующие конфигурации:

конфигурация 1 (рис. 2а): сеть направлена на минимизацию экспорта и импорта электроэнергии, т. е. блок DG работает параллельно с сетью; обеспечивает пиковую или базовую нагрузку для всех или некоторых нагрузок;

конфигурация 2 (рис. 2б): сеть предназначена для обеспечения экспорта электроэнергии из энергосистемы в сторону клиента, т. е. блок DG работает параллельно с сетью, обеспечивает пиковую или базовую нагрузку для нагрузки и экспортирует энергию в сеть, устройство может обеспечивать дополнительное или резервное питание;

конфигурация 3 (рис. 2в): сеть предназначена для построения энергосистемы с передачей электроэнергии в систему энергоснабжения, т. е. блок DG обеспечивает пиковую, базовую нагрузку или резервное питание для коммунального предприятия, работает параллельно с сетью;

конфигурация 4 (рис. 2г): сеть предназначена для организации реверса или изолирования участка системы с помощью автоматической системы передачи.

В конфигурации 4 два источника питания никогда не соединяются вместе и только один из двух поставщиков всегда подключен к нагрузке в любой момент времени [12]. В этом случае краткий перерыв в электроснабжении происходит во время переключения, а также всякий раз, когда происходит сбой в основной сети и переключение питания на альтернативный генератор обеспечивает питание изолированной пользовательской нагрузки (нагрузка 2); снабжающая компания подает питание потребителю на нагрузку 1 (Load 1) и иногда на нагрузку 2 (Load 2); генератор не работает параллельно.

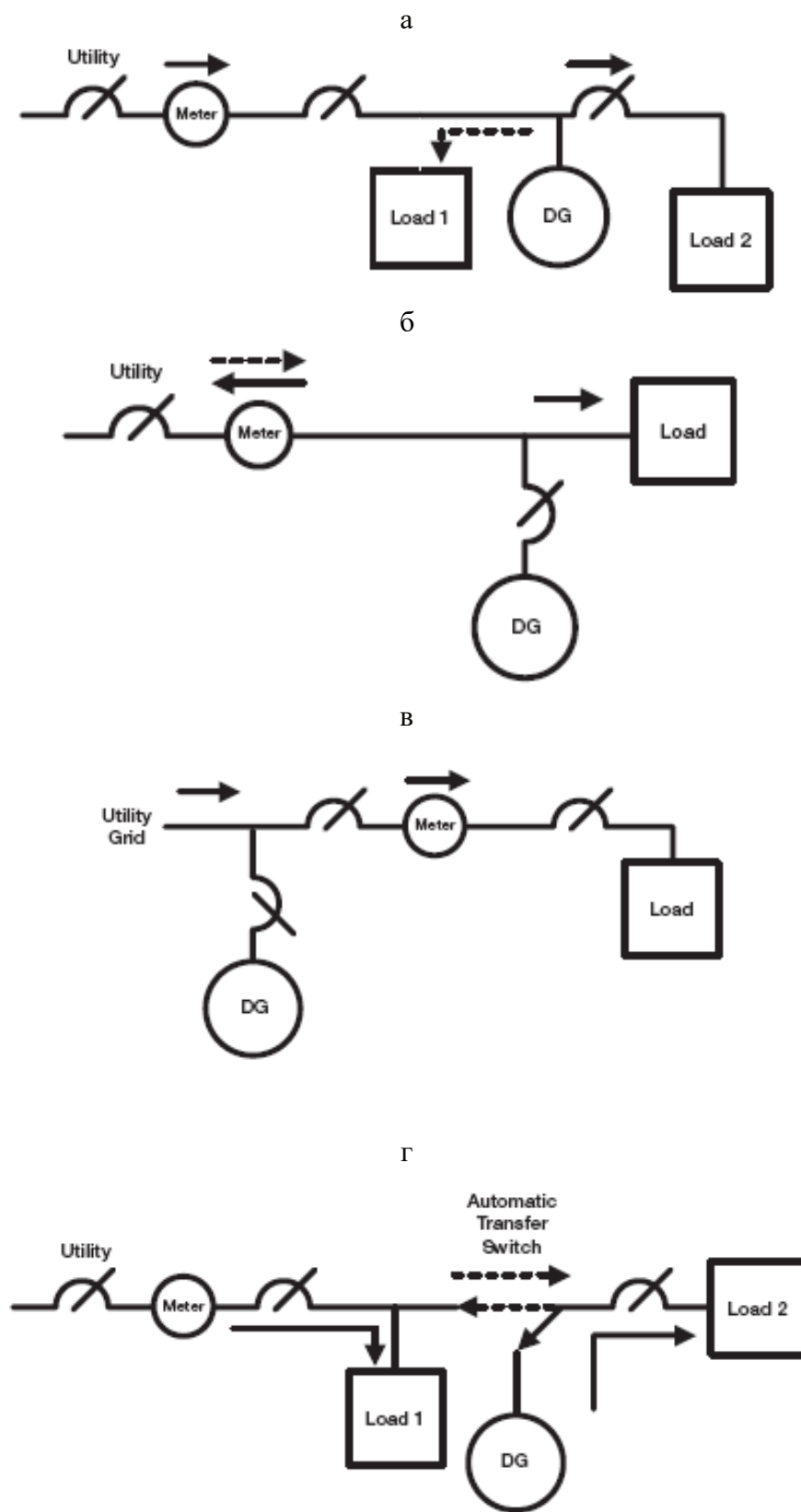


Рис. 2. Конфигурации: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4

ФИНАНСОВЫЙ АСПЕКТ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ВЭС

Рынок ВЭС является достаточно перспективным. Об этом свидетельствует количество вложенных в него финансов. В 2016 году мировой рынок ВЭС составлял около 200 млн долл. США. По прогнозам на 2021 год, доля вырастет до 711 млн долл. США. С совершенствованием технологий произойдет рывок в развитии данной отрасли. В настоящее время все основные проекты ВЭС либо реализуются, либо уже работают, но пока в тестовом режиме [13, 14].

Развитие ВЭС замедляет существующее законодательство. Правом на реализацию электроэнергии потребителям в большинстве стран обладает только государство, которое, в свою очередь, закупает ее у частных производителей. Из-за этого организовать частную распределительную сеть без вмешательства государства не представляется возможным.

В нашей стране наблюдается медленный прогресс в рассматриваемой области. В 2017 году Правительство РФ утвердило документ под названием «План мероприятий по стимулированию развития генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии с установленной мощностью до 15 кВт». Он подразумевает полноценную работу малых возобновляемых источников энергии, таких как частные ветродвигатели и солнечные панели [15].

Главный недостаток ВЭС – относительная дороговизна внедрения; затраты на возведение ВЭС достаточно тяжело спрогнозировать. Иными словами, часто необходимо субсидирование альтернативных электростанций, требуются установка и синхронизация различных датчиков, которые, в свою очередь, не будут нормально функционировать при низком качестве интернет-соединения. Отметим, что с распространением и совершенствованием сетей 5G, которые уже начинают завоевывать рынки развитых стран, данная проблема исчезнет.

Необходимы также программно-аппаратный комплекс и его постоянное обслуживание. Обзор всех перечисленных проблем позволяет сделать вывод, что реализации проекта ВЭС часто немыслима без поддержки государства или иного крупного инвестора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Виртуальные электростанции с каждым годом развиваются, что заставляет правительство во многих государствах пересматривать имеющееся законодательство. Постепенно возникает новый рынок электроэнергии (его формирование, как прогнозируется, завершится к 2024 году). В нем будут тесно переплетены ВЭС, «умное» распределение энергетических резервов, оптимизация всех участков рынка. По имеющейся информации, к 2024 году в некоторых странах (США, Японии и др.) завершатся проекты по строительству передовых ВЭС. Эффективные системы «умного» перераспределения электроэнергии будут стимулировать весь мир увеличивать долю альтернативной энергетики, что, в свою очередь, повлечет за собой сокращение потребления невозобновляемых природных ресурсов и улучшение экологии. Изменится энергетическая инфраструктура, что приведет к децентрализации сети, т. е. будущие энергосистемы будут гораздо меньше страдать от природных катаклизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Altaher A. Implementation of a dependability framework for smart substation automation systems: application to electric energy distribution // *Electric power. Université Grenoble Alpes*. 2018.
2. Bakken D., Bose A., Hauser C., Whitehead D., Zweigle G. Smart generation and transmission with coherent, real-time data // *Proc. IEEE (Special Issue on Smart Grids)*. 2011. Vol. 99. No. 6, pp. 928–951.
3. Кечкин А.Ю., Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Вопросы создания виртуальных электростанций в масштабе Micro-Grid // *Вестник НГИЭИ*. 2015. № 4 (47). С. 50–55.
4. Новых А.В., Свириденко И.И., Гоголев Г.В. Повышение эффективности гибридной электростанции с помощью виртуальной электростанции // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2019. Т. 19. № 2. С. 87–96.
5. Корнеев К.Б., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Открытость и защищенность протоколов передачи критической информации на объектах энергетики // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 2 (2). С. 50–57.
6. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Y. Optimization of virtual power plant electrical network // *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. ISGT*. 2019. P. 8791638.
7. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Kechkin A.Y. Optimization of virtual power plant with a distributed generation // *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 01057.
8. Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Кечкин А.Ю. Вопросы создания виртуальных электростанций на основе объектов распределенной генерации // *Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI Международной научно-технической конференции* / отв. ред. В.В. Тютиков. Иваново: ИГЭУ, 2015. С. 360–365.
9. Уколова Е.В. Виртуальные электростанции – контроль распределенной генерации // *Молодежный вестник ИРГТУ*. 2016. № 1. С. 25.
10. Аристова Н.И., Чадаев В.М. Виртуальные электростанции – идеи и решения // *Автоматизация в промышленности*. 2019. № 11. С. 9–13. DOI: 10.25728/avtprom.2019.11.03
11. Денисюк С. П., Базюк Т. Н. Анализ влияния источников распределенной генерации на электросети и особенности построения виртуальных электростанций // *Электрификация транспорта*. 2012. № 4. С. 23–28.
12. Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 5 (124). С. 131–142.
13. Андрианова Л.П. Тенденции развития электроэнергетики на базе распределенной генерации электроэнергии // *Достижения науки и инновации – аграрному производству: материалы национальной научной конференции*. Уфа: БашГАУ, 2017. С. 68–74.
14. Hrochová M. Virtual power plant concept – idea vs. reality // *Экономика и предпринимательство*. 2016. № 1-1 (66). С. 57–61.
15. Сенчук Д.А., Цырук С.А., Орлова К.В. Перспективы внедрения в России программ по управлению спросом на электроэнергию // *Промышленная энергетика*. 2016. № 10. С. 30–36.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ease@mail.ru

АГАМИРЗОЕВ Артур Айндинович – магистрант кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ease@mail.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических 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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Окунева В.В., Агамирзоев А.А., Корнеев К.Б. Реализация распределенной генерации посредством создания виртуальных электростанций // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 3 (7). С. 51–59.

**IMPLEMENTING DISTRIBUTED GENERATION
BY CREATING VIRTUAL POWER PLANTS**

V.V. Okuneva, A.A. Agamirzoev, K.B. Korneev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. We consider one of the most promising technologies for solving the problem of balancing a system with distributed generation is a virtual substation. It is noted that using the technologies of distributed computing and the «Internet of things», it is possible to implement an effective mechanism for decentralized control of power system elements.

Keywords: electric power, substation, virtualization, automation, distributed generation, «smart» accounting.

REFERENCES

1. Altaher A. Implementation of a dependability framework for smart substation automation systems: application to electric energy distribution. *Electric power. Université Grenoble Alpes*. 2018.
2. Bakken D., Bose A., Hauser C., Whitehead D., Zweigle G. Smart generation and transmission with coherent, real-time data. *Proc. IEEE (Special Issue on Smart Grids)*. 2011. Vol. 99. No. 6, pp. 928–951.
3. Kechkin A.Y., Sosnina E.N., Shaloho A.V. Issues of creation of virtual power plants on the scale of Micro-Grid. *Vestnik NGIEI*. 2015. No. 4 (47), pp. 50–55. (In Russian).
4. New A.V., Sviridenko I.I., Gogolev G.V. Improving hybrid power plant efficiency with a virtual power plant. *Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2019. Vol. 19. No. 2, pp. 87–96.
5. Korneev K.B., Okuneva V.V., Pavlova Yu. Openness and security of protocols of transmission of critical information at energy facilities. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo*

tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii». 2019. No 2 (2), pp. 50–57. (In Russian).

6. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Y. Optimization of virtual power plant electrical network. *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference*. ISGT. 2019. P. 8791638.

7. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Kechkin A.Y. Optimization of virtual power plant with a distributed generation. *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 01057.

8. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Kechkin A.Y. Issues of creation of virtual power plants on the basis of distributed generation objects. *Electric power industry through the eyes of youth works of the VI International Scientific and Technical Conference*. Ivanovo: IGEU, 2015, pp. 360–365. (In Russian).

9. Ukolova E.V. Virtual power plants – control of distributed generation. *Molodezhnyj vestnik IRGTU*. 2016. No. 1, pp. 25. (In Russian).

10. Aristova N.I., Chadeev V.M. Virtual power plants – ideas and solutions. *Automation in industry*. 2019. No. 11, pp. 9–13. DOI: 10.25728/avtprom.2019.11.03.

11. Denisyuk S.P., Bazyuk T.N. Analysis of the influence of distributed generation sources on power grids and peculiarities of virtual power plants construction. *Electrification of transport*. No. 4. pp. 23–28. 2012 (In Russian).

12. Suslov K.V. Development of power supply systems of isolated territories of Russia using renewable energy sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 21. No. 5 (124), pp. 131–142. (In Russian).

13. Andrianova L.P. Trends of development of electric power industry on the basis of distributed power generation. *Achievements of science and innovation – agricultural production: materials of the national scientific conference*. Ufa: BashGAU, 2017. pp. 68–74. (In Russian).

14. Hrochová M. Virtual power plant concept – idea vs. reality. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2016. No. 1-1 (66), pp. 57–61.

15. Senchuk D.A., Tsyruk S.A., Orlova K.V. Prospects for implementation of electricity demand management programs in Russia. *Industrial energy*. 2016. No. 10, pp. 30–36. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

OKUNEVA Viktoria Velerjevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

AGAMIRZOEV Arthur Aindinovich – graduate student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Okuneva V.V., Agamirzoev A.A., Korneev K.B. Implementing distributed generation by creating virtual power plants // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 3 (7), pp. 51–59.

УДК 004.94, 519.2

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

А.Ю. Русин*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Русин А.Ю., 2020

Аннотация. Отмечено, что совершенствование материалов и технологий приводит к повышению надежности электрооборудования. Показано, что при этом возрастает время испытаний новых образцов оборудования на надежность и увеличиваются затраты на их проведение. Даны результаты исследований, позволивших сократить время проведения испытаний оборудования на надежность.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, испытания на надежность, электрооборудование, цензурированные выборки, метод максимального правдоподобия, план испытаний.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-60-68

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения испытаний оборудования на надежность разработан целый ряд планов испытаний. Они приведены в стандарте [1].

В статье рассматривается повышение эффективности результатов испытаний по плану $[N, U, \{r, T\}]$, когда отказы электрооборудования имеют распределение Вейбулла; предложена методика повышения точности оценок максимального правдоподобия (МП) по малым, однократно цензурированным выборкам при проведении испытаний по указанному плану.

При использовании плана $[N, U, \{r, T\}]$ одновременно испытывают N объектов. Объекты, которые отказали во время испытаний, не восстанавливаются и не заменяются. Испытания прекращают в случаях:

1. Когда число отказавших объектов достигло r .
2. При истечении времени испытаний.
3. При достижении наработки T каждого неотказавшего объекта [1].

При проведении испытаний по этому плану формируются однократно цензурированные справа выборки. Для снижения стоимости испытаний оборудования на надежность нужно уменьшать количество испытываемых образцов и время проведения испытаний. Но это приводит к формированию малых выборок наработок на отказ.

Для расчета показателей надежности по малым, однократно цензурированным справа выборкам применяется метод максимального правдоподобия [2, 3].

Уменьшение времени испытания оборудования на надежность приводит к снижению достоверности рассчитанных показателей надежности испытываемого электрооборудования. Поэтому оно возможно только при одновременном повышении точности метода максимального правдоподобия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись с помощью моделирования на ЭВМ цензурированных выборок, подобных выборкам, формирующимся при испытаниях оборудования по плану $[N, U, \{r, T\}]$.

Использован следующий алгоритм формирования однократно цензурированной справа выборки:

1. Генерируется случайная величина t , распределенная по исследуемому закону распределения Вейбулла, и рассчитываемая по формуле [4]

$$t = m(-\ln R)^{1/f},$$

где m, f – параметры формы и масштаба закона распределения Вейбулла; R – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $(0,1)$.

2. Полученная случайная величины сравнивается с заданным временем T . Если $t < T$, то к моделируемой выборке добавляется случайная величина t , соответствующая наработке до отказа. Если $t > T$, то к моделируемой выборке добавляется случайная величина T , соответствующая наработке до цензурирования.

3. Процесс моделирования продолжается до тех пор, пока число полученных случайных величин не станет равным заданному числу членов выборки N (объему выборки) или число наработок на отказ не станет равным r .

4. По достижению числа наработок на отказ заданного значения r всем цензурированным наработкам присваивается значение максимальной наработки на отказ.

На ЭВМ моделировались однократно цензурированные справа выборки случайных величин объемом $N = 5, 10, 15, 20, 25$. Генерирование выборок выполнялось при следующих ограничениях:

$$5 \leq N < 10, q \geq 0,5;$$

$$10 \leq N < 20, q \geq 0,3;$$

$$20 \leq N \leq 25, q \geq 0,2,$$

где q – степень цензурирования выборки.

Количество сформированных выборок для каждого значения N равно 3000. По каждой выборке методом максимального правдоподобия рассчитывались оценки параметров формы и масштаба закона распределения Вейбулла и их относительные отклонения δ от истинных значений, которые использовались при генерации выборки:

$$\delta = \frac{p - p_{ОМП}}{p},$$

где p – истинное значение параметра распределения Вейбулла, которое применялось при моделировании выборки; $p_{ОМП}$ – оценка максимального правдоподобия параметра распределения Вейбулла.

В исследованиях ставилась задача получения универсальных уравнений, которые можно применять для оборудования с разными значениями средних наработок до отказа. Поэтому параметры m и f исследуемого закона распределения устанавливались для каждой генерируемой выборки с использованием случайного числа, равномерно распределенного на интервале $[0,1]$ по формулам:

$$f = 1,5 + 0,2 \cdot \text{RAND}(), m = 5 + 2 \cdot \text{RAND}(),$$

где $\text{RAND}()$ – функция генерации случайного числа, равномерно распределенного на интервале $[0, 1]$, языка программирования Fox Pro.

Продолжительность испытаний также определялась с помощью генератора случайных чисел по выражению

$$T = 0,5 \cdot \text{RAND}() + 1.$$

Число отказов r при моделировании принималось равным 4 при $N = 5$; 7 при $N = 10$; 11 при $N = 15$; 14 при $N = 20$; 18 при $N = 25$.

По результатам моделирования построены гистограммы относительных отклонений оценок МП параметров масштаба и формы закона распределения Вейбулла (рис. 1). По оси ординат отложены процент оценок от общего количества, попавших в данный интервал.

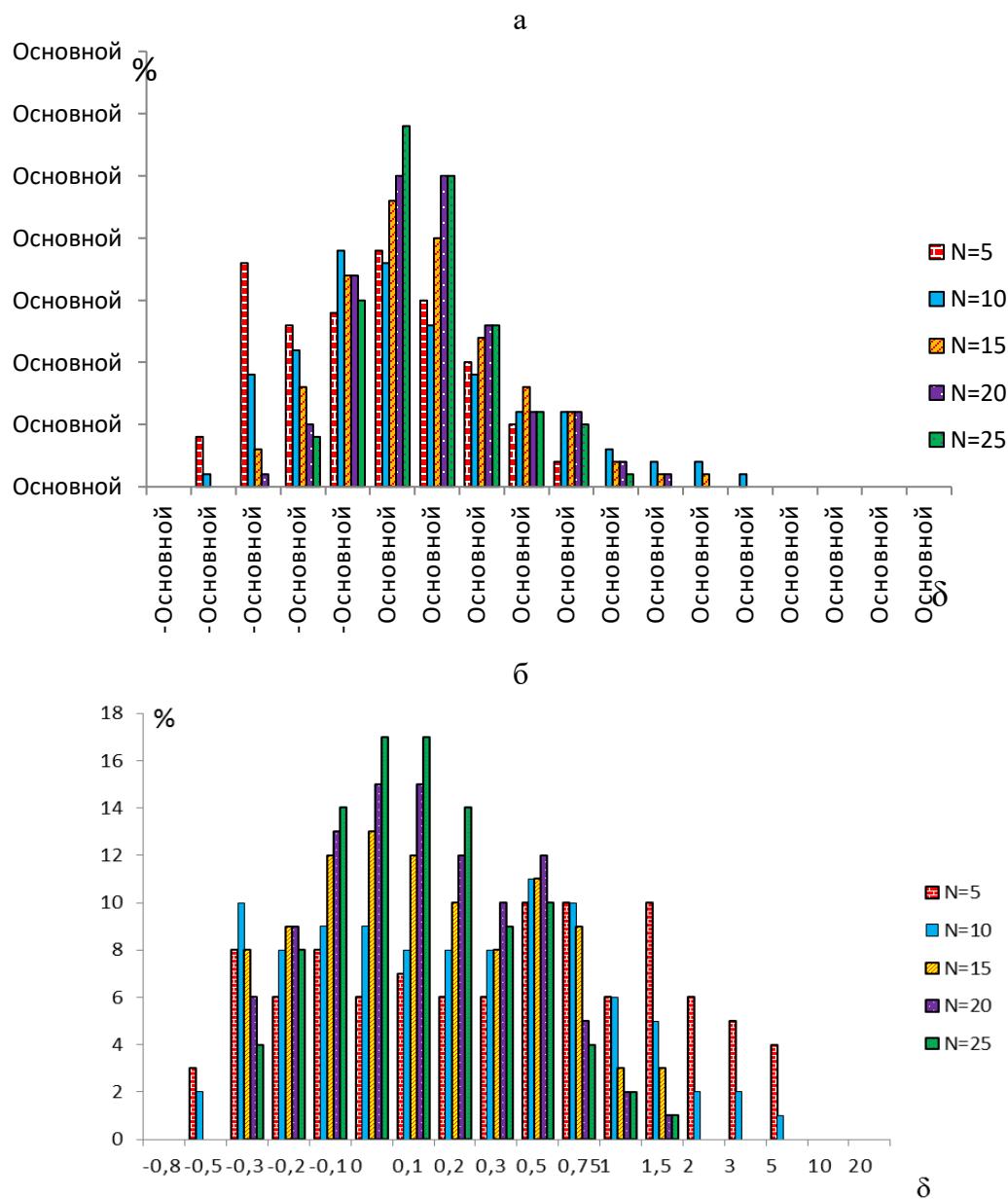


Рис. 1. Относительные отклонения оценки МП параметра:
а – масштаба; б – формы

Можно сделать вывод, что точность метода МП при значениях $N < 25$ низка. Относительное отклонение оценок от истинных значений может достигать 70–100 % и более.

В [5, 6] разработаны математические модели повышения точности оценок МП при проведении испытаний по плану $[N, U, \{r, T\}]$.

Цель проведенных исследований в общем виде можно сформулировать следующим образом: получение математических моделей, устанавливающих связь между относительным отклонением оценок МП параметров распределения Вейбулла от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки.

Этапы решения поставленной задачи:

1. Моделирование на ЭВМ однократно цензурированных справа выборок случайных величин, распределенных по закону распределения Вейбулла, по описанному выше алгоритму.

Чтобы избежать повторения последовательностей псевдослучайных чисел, перед формированием каждой выборки генерировалось случайное число на основе системного времени. Для этого использовалась функция $RAND()$ с отрицательным аргументом – $RAND(-1)$. Получение достаточной разницы в системном времени при генерации выборок осуществлялось с помощью задержки времени до 30 мс перед каждым циклом формирования однократно цензурированной выборки.

2. Расчет параметров выборки, характеризующих ее структуру. Для описания структуры сформированной выборки случайных величин в работе использовались пять стандартных параметров выборки: $X1$ – степень цензурирования; $X2$ – коэффициент вариации; $X3$ – коэффициент вариации полных случайных величин; $X4$ – эмпирический коэффициент асимметрии; $X5$ – коэффициент эксцесса.

Еще пять параметров представляют собой математические выражения, составленные из стандартных характеристик выборки: $X6$ – отношение математического ожидания полных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки; $X7$ – отношение математического ожидания цензурированных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки; $X8$ – относительное отклонение математического ожидания от середины вариационного размаха; $X9$ – отношение медианы к математическому ожиданию; $X10$ – отношение моды к математическому ожиданию.

Все параметры измеряются в относительных единицах и не зависят от абсолютных значений случайных величин. Подробно формулы расчета этих параметров рассмотрены в [5].

3. Расчет оценок МП параметров закона распределения Вейбулла.

4. Расчет зависимого параметра – отклонения оценки МП от истинного значения – по формуле

$$Y = \frac{P}{P_{ОМП}}.$$

5. Построение регрессионных зависимостей. Были построены регрессионные математические модели, устанавливающие связь между отклонением оценки МП от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки. Для каждого объема выборки N построено свое уравнение регрессии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Математические модели построены в классе линейных уравнений регрессии вида [7]

$$\bar{y}(x) = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_{10} x_{10}. \quad (1)$$

Уравнения являются значимыми. Коэффициенты $b_0, b_1, \dots, b_{10}$ и параметры значимости уравнений регрессии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты и параметры значимости уравнений регрессии

b	N									
	m					f				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
b_0	-3,31	-3,08	-2	-1,51	-1,16	5,47	5,02	3,51	3,21	2,97
b_1	1,43	0,64	0,1	0,25	–	0,39	0,41	0,29	0,8	0,66
b_2	-0,22	-0,27	-0,46	-0,39	-0,61	1,31	1,53	1,52	1,66	1,86
b_3	1,22	1,38	1,56	1,27	1,49	-2,69	-2,78	-2,48	-3,05	-3,02
b_4	1,76	1,87	1,11	1,03	0,66	-2,29	-2,32	-0,81	-1,34	-0,034
b_5	-0,37	-0,61	-0,23	-0,17	-0,09	0,67	0,52	0,63	0,49	0,34
b_6	-0,13	-0,08	-0,03	-0,022	0,027	0,2	0,14	0,07	-	-0,027
b_7	-0,05	0,01	-0,005	-0,008	-	0,04	0,04	0,03	0,003	0,024
b_8	0,03	0,10	0,04	-0,012	0,013	-0,28	-0,37	-0,004	-	-0,019
b_9	-0,3	-0,23	0,38	0,077	0,66	1,72	1,05	0,34	-0,38	-0,55
b_{10}	-0,11	0,03	0,02	-0,028	0,002	0,12	0,64	-0,021	0,92	-0,24
Q	424	254	122	82	65	670	495	278	208	158
$Q_{\text{пр}}$	183	185	80	50	38	630	466	263	199	150
$Q_{\text{ост}}$	242	69	42	32	27	40	29	15	9	9

Примечание. Q – общая сумма квадратов результативного признака; $Q_{\text{пр}}$ – общая сумма квадратов, характеризующая влияние признаков; $Q_{\text{ост}}$ – остаточная сумма квадратов, т. е. влияние неучтенных факторов.

Полученные уравнения регрессии позволяют рассчитать и ввести поправки к оценке МП по формуле

$$p_{\text{кон}} = p_{\text{омп}} \cdot \bar{y}(x), \quad (2)$$

где $p_{\text{кон}}$ – конечная оценка параметра распределения.

Поправки повышают точность оценки МП.

Была выполнена оценка эффективности полученных регрессионных моделей. Для каждой заново смоделированной выборки по уравнению (1) были получены поправки к

оценке МП и рассчитаны конечные оценки параметров масштаба и формы закона распределения Вейбулла по формуле (2).

Результаты применения полученных уравнений регрессии для параметров масштаба и формы закона распределения Вейбулла показаны в табл. 2, 3 и на рис. 2–6 (на рис. 2–6 даны относительные отклонения оценок МП от истинного значения).

Таблица 2

Дисперсия начальных и конечных относительных отклонений оценок параметра масштаба распределения Вейбулла

N	$\delta_{нач}$	$\delta_{кон}$
5	0,047	0,031
10	0,15	0,016
15	0,061	0,011
20	0,047	0,01
25	0,031	0,0089

Таблица 3

Дисперсия начальных и конечных относительных отклонений оценок параметра формы распределения Вейбулла

N	$\delta_{нач}$	$\delta_{кон}$
5	2,11	0,06
10	0,58	0,033
15	0,15	0,006
20	0,094	0,003
25	0,067	0,0027

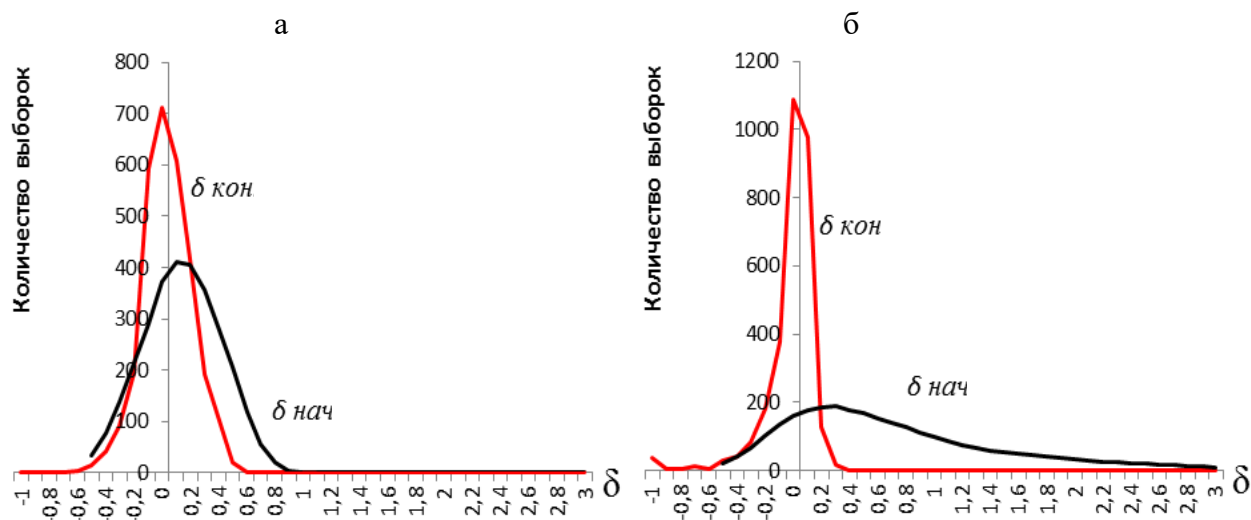


Рис. 2. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра для $N = 5$:
а – масштаба; б – формы

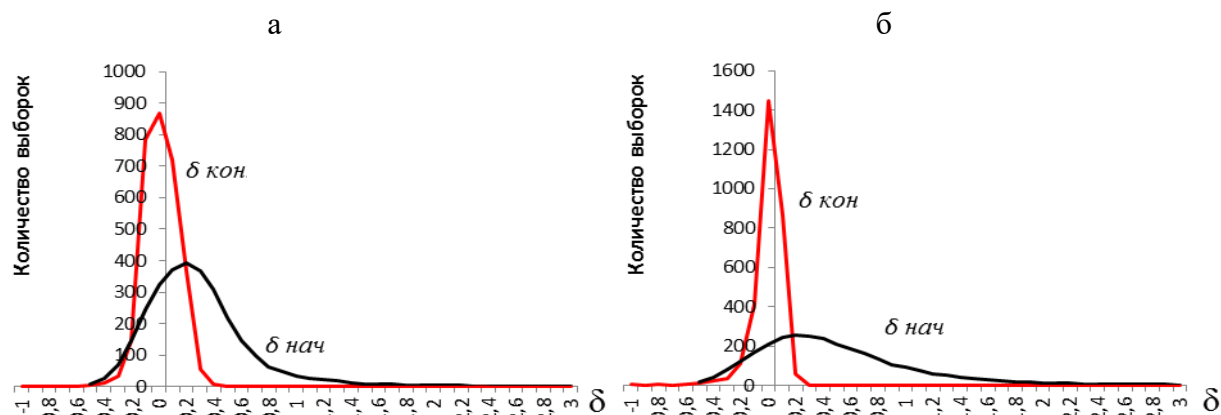


Рис. 3. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра для $N = 10$:
а – масштаба; б – формы

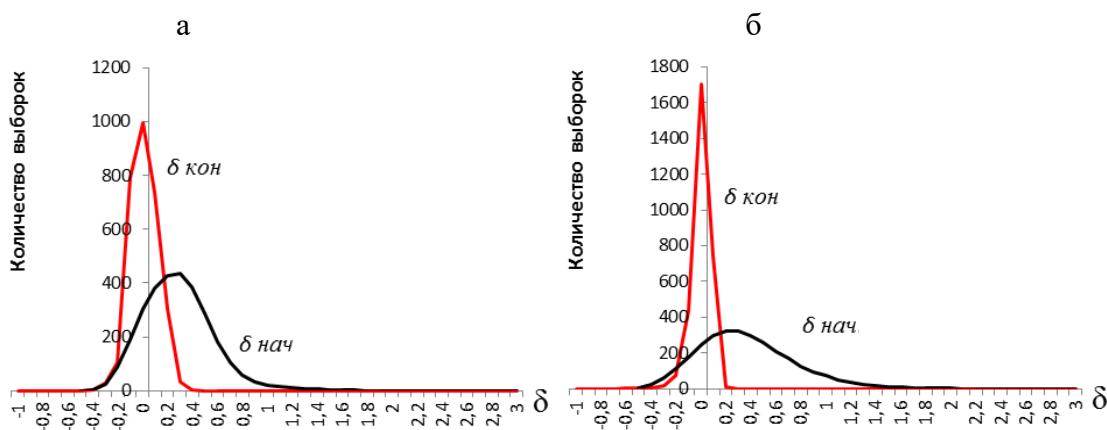


Рис. 4. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N = 15$ параметра:
а – масштаба; б – формы

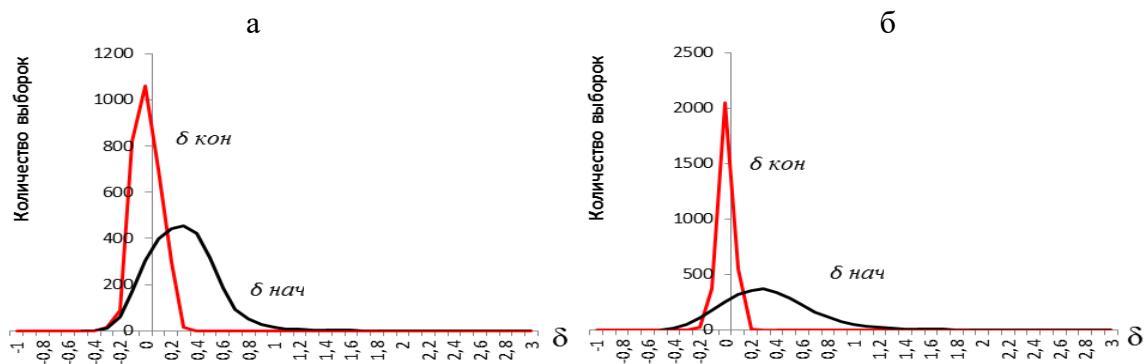


Рис. 5. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N = 20$ параметра:
а – масштаба; б – формы

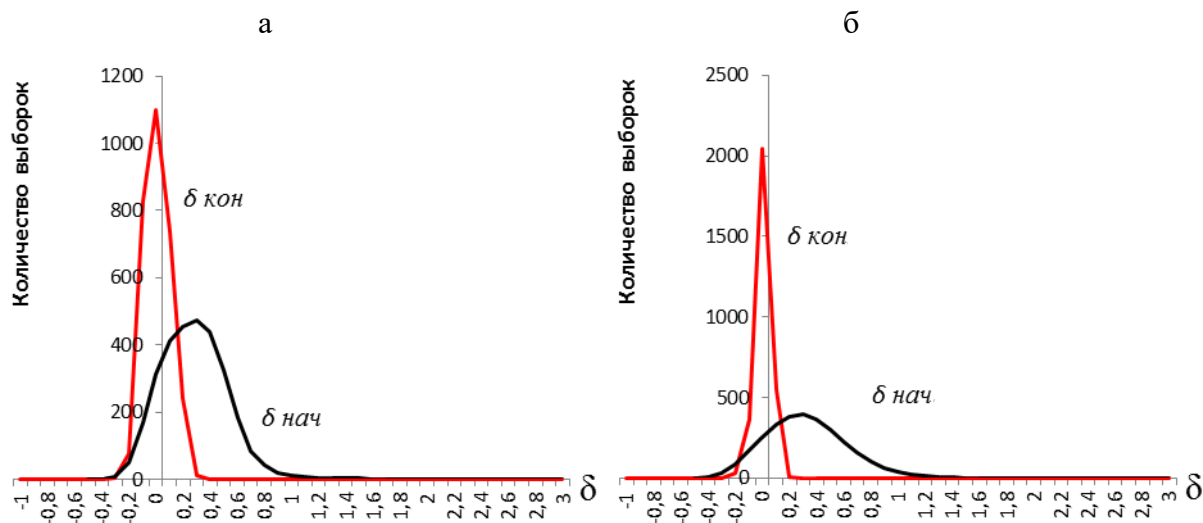


Рис. 6. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N = 25$ параметра:
а – масштаба; б – формы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Графики, приведенные на рис. 2–6, показывают, что точность оценок МП параметров закона распределения Вейбулла после применения разработанных моделей и введения поправки значительно возрастает. После введения поправки, относительные отклонения оценок МП от истинного значения параметров распределения, в зависимости от объема выборки (не превышают 0,4 для параметра масштаба и 0,3 для параметра формы), в то время как начальные отклонения могут быть больше 2. Это позволит сократить затрачиваемое время при испытании оборудования и сохранить достоверность рассчитанных показателей надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. М.: Издательство стандартов, 1987.
2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
3. Rossi R.J. Mathematical Statistics. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2018.
4. Петрович М.Л., Давидович М.И. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ. М.: Финансы и статистика, 1989. 189 с.
5. Русин А.Ю., Абдулхамед М. Управление процессом испытания оборудования на надежность // Надежность. 2014. № 3 (50). С. 27–34.
6. Русин А.Ю., Абдулхамед М. Обработка информации в системе испытаний промышленного оборудования на надежность // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 4 (56). С. 27.
7. Scott D. Young. Handbook of Regression Methods. New York: Chapman and Hall/CRC, 2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

РУСИН Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: alexrusin@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Русин А.Ю. Сокращение времени испытаний электрооборудования на надежность // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 3 (7). С. 60–68.

TIME REDUCTION TESTS OF RELIABILITY ELECTRICAL EQUIPMENT

A.Y. Rusin

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that improving materials and technologies leads to increased reliability of electrical equipment. It is shown that at the same time, the time for testing new equipment samples for reliability increases and the cost of carrying them out increases. Research results are given that can reduce the time of testing equipment for reliability.

Keywords: computer simulation, reliability testing of electrical equipment, censored samples, maximum likelihood method, test plan.

REFERENCES

1. GOST 27.410-87. Nadezhnost' v tekhnike. Metody kontrolya pokazatelej nadezhnosti i plany kontrol'nyh ispytaniy na nadezhnost' [Industrial product dependability. Inspection methods of reliability indices and plans of check tests on reliability]. M.: Izdatel'stvo standartov. 1987.
2. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika [Applied mathematical statistics]. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 p.
3. Richard J. Rossi. Mathematical Statistics. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2018.
4. Petrovich M.L., Davidovich M.I. Statisticheskoe ocenivanie i proverka gipotez na EVM. M.: Finansy i statistika, 1989. 189 p.
5. Rusin A.Y., Abdulhamed M. Equipment reliability test process control. *Nadezhnost'*. 2014. No. 3 (50), pp. 27–34. (In Russian).
6. Rusin A.Y., Abdulhamed M. Information processing in the industrial equipment reliability test system. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*. 2014. No 4 (56), p. 27. (In Russian).
7. Scott D. Young. Handbook of Regression Methods. New York: Chapman and Hall/CRC, 2018.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

RUSIN Aleksandr Yur'evich – 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: alexrusin@inbox.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Rusin A.Y. Time reduction tests of reliability electrical equipment // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 3 (7), pp. 60–68.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 674.093

СВЯЗЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ, С МЕТЕОФАКТОРАМИ

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

© Качановский Ф.В., 2020

Аннотация. Проведен статистический анализ связей удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 1916–2019 годах, с показателем кислотности и количеством осадков, а также с температурой воздуха. Построены одно- и многофакторные регрессионные модели связей.

Ключевые слова: удельная электропроводность, кислотность, атмосферные осадки, температура воздуха, модель, корреляция, регрессия, факторы, тренд, сезонная компонента, показатель кислотности pH .

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-69-76

Показатель кислотности и удельная электропроводность атмосферных осадков – важные характеристики состояния водной среды, служащие индикаторами антропогенного воздействия на нее. Интерес к ним, научный и практический, не нов и разнообразен. Существуют публикации на эту тему, например [1, 2, 3, 4].

Наблюдения за кислотностью осадков, выпадающих в Твери, проводятся лабораторией мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии с 1990 года. Наблюдения за электропроводностью осадков эта лаборатория ведет с 2016 года. Срочные измерения обеих величин производятся одновременно, интервалы между измерениями изменяются от одних суток до двух декад. В течение четырех лет (2016–2019 годы) произведено 494 измерения (в среднем 10 измерений в месяц). Удельная электропроводность осадков измеряется в мкСм/см, показатель кислотности – безразмерная величина.

Временные последовательности срочных значений удельной электропроводности sw и pH , а также последовательности их среднемесячных значений $amsw$ и $ampH$ подвергаются регулярному (ежегодному) статистическому анализу [3]. В статье излагаются результаты установления связей удельной электропроводности осадков с их кислотностью и количеством, а также с температурой воздуха. Исходя из предположения, что sw и pH (и, соответственно, $amsw$ и $ampH$) – коррелированные случайные величины, рассмотрим прежде всего вопрос о выборе регрессионной модели, связывающей эти величины. Из множества регрессионных моделей взяты для сопоставления три традиционные модели простой регрессии: линейная (полиномиальная модель первого порядка), экспоненциальная и логарифмическая. Применительно к среднемесячным величинам $amsw$ и $ampH$ уравнения названных моделей имеют вид (на 90 %-м довери-

тельном уровне и соответствующих коэффициентах корреляции – 0,272486; 0,224415; 0,250820):

линейная:

$$atcsw = -10,0444 + 4,7351 \cdot atpH; \quad (1)$$

экспоненциальная:

$$atcsw = \exp(1,512 + 0,220317 \cdot atpH);$$

логарифмическая:

$$atcsw = -25,1055 + 24,1698 \cdot \ln(atpH).$$

Линии регрессии, соответствующие моделям, показаны на рис. 1. Все модели указывают на существование положительной связи между исследуемыми величинами: чем больше показатель кислотности $atpH$, тем больше электропроводность осадков $atcsw$. Линии регрессии расположены близко друг к другу. При этом экспоненциальная модель имеет выпуклость вверх, а логарифмическая – вниз. Обе линии слабо искривлены, т. е. связь практически линейна.

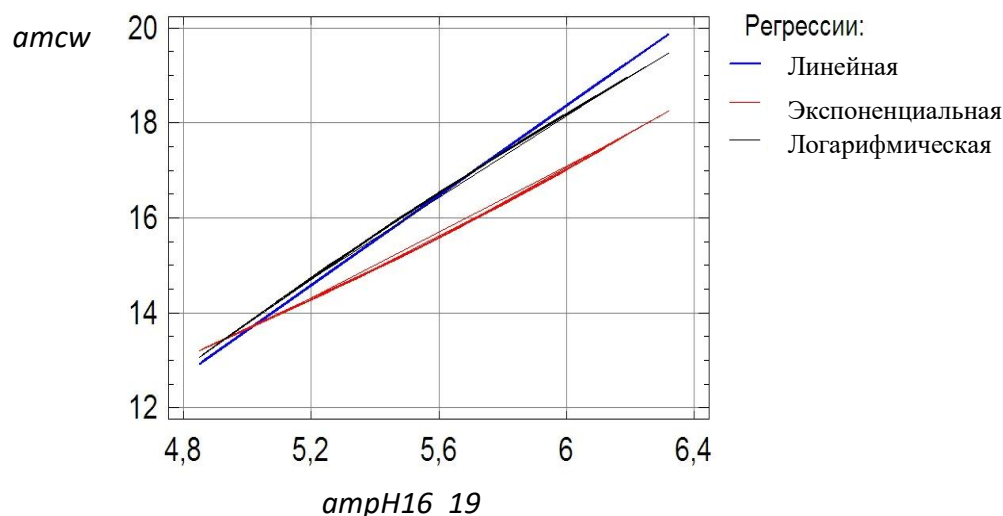


Рис. 1. Линии регрессии $atcsw$ на $atpH$ для линейной, экспоненциальной и логарифмической моделей (2016–2019 годы)

Чтобы построить линии регрессии временной последовательности срочных значений удельной электропроводности sw на показатель кислотности pH , были использованы те же модели, имеющие в этом случае вид (на 99 %-м доверительном уровне и соответствующих коэффициентах корреляции 0,20234; 0,20284; 0,17881):

линейная:

$$sw = -5,39213 + 3,82533 \cdot pH; \quad (2)$$

экспоненциальная:

$$sw = \exp(1,34434 + 0,220847 \cdot pH);$$

логарифмическая:

$$sw = -16,0334 + 18,6746 \cdot \ln(pH).$$

Обращает на себя внимание тот факт, что коэффициенты корреляции всех моделей для срочных значений оказались несколько меньше, чем для среднемесячных. Это объясняется, по-видимому, влиянием случайных компонент последовательностей срочных значений.

Линии регрессии, соответствующие моделям последовательностей срочных значений, показаны на рис. 2. Малая кривизна линий срочных значений и их взаимное расположение сходны с подобными для среднемесячных значений, как это видно из сопоставления рис. 1 и 2, что подтверждает сделанный ранее вывод о существовании положительной связи кислотности осадков с их удельной электропроводностью.

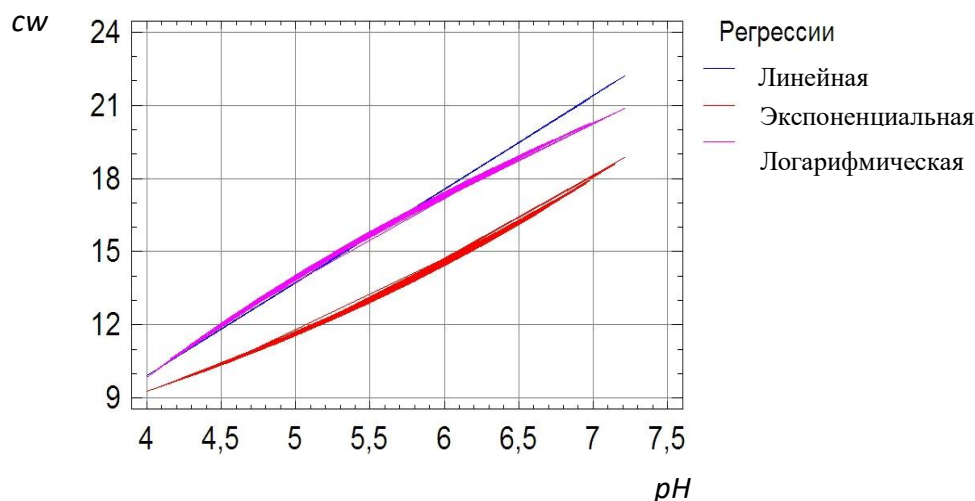


Рис. 2. Линии регрессии срочных значений $сw$ на pH для линейной, экспоненциальной и логарифмической моделей (2016–2019 годы)

Сходство линий регрессии рассмотренных моделей и близость значений коэффициентов корреляции дает основание полагать, что в сравнительно коротком интервале времени наблюдений (2016–2019 годы) все три модели пригодны при оценке характера изучаемой связи как в случае срочных, так и в случае среднемесячных значений. Допущение линейности модели не является, строго говоря, необходимым, но оказывается удобным и привлекательным из-за своей простоты. При удлинении ряда наблюдений ситуация может измениться: могут обнаружиться преимущества какой-либо из моделей, или, наоборот, ее неприемлемость.

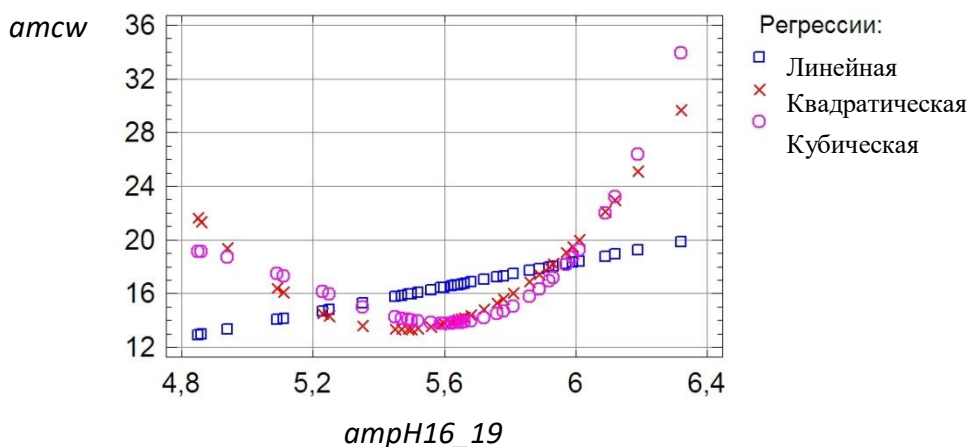


Рис. 3. Линии регрессии $атсw$ на $атрН$ для линейной, квадратической и кубической моделей (2016–2019 годы)

Перспективной для регрессионного анализа представляется полиномиальная модель, как простая и одновременно гибкая. Проверим ее пригодность для рассматриваемого четырехлетнего отрезка времени, сопоставив уже рассмотренную модель первого порядка (линейную), а также квадратическую и кубическую. Для среднемесячных величин $атсв$ и $атрН$ линейной модели соответствует уравнение (1), квадратической модели – уравнение

$$атсв = 673,355 - 241,694 \cdot атрН + 22,127 \cdot атрН^2; \quad (3)$$

а кубической модели – уравнение

$$атсв = -2717,15 + 1599,95 \cdot атрН - 310,159 \cdot атрН^2 + 19,9174 \cdot атрН^3. \quad (4)$$

Линии регрессии, отвечающие уравнениям (1), (3) и (4), изображены на рис. 3. Квадратическая и кубическая модели $атсв$ на $атрН$ имеют выраженный нелинейный характер, контрастирующий с видом ранее рассмотренных моделей, и едва ли эти модели (квадратическую и кубическую) можно считать пригодными для описания регрессии четырехлетних совокупностей $атсв$ и $атрН$.

Рассмотрим совместно три полиномиальные модели регрессии совокупностей срочных значений $св$ и $рН$:

линейную (см. уравнение (2));

квадратическую:

$$св = 219,403 - 77,393 \cdot рН + 7,25602 \cdot рН^2; \quad (5)$$

кубическую:

$$св = 1208,64 - 619,706 \cdot рН + 105,308 \cdot рН^2 - 5,84898 \cdot рН^3. \quad (6)$$

Линии регрессии, соответствующие уравнениям (2), (5) и (6), изображены на рис. 4. Видно, что полиномиальные модели регрессии сохранили свой характер при переходе от среднемесячных значений $атсв$ и $атрН$ к срочным $св$ и $рН$.

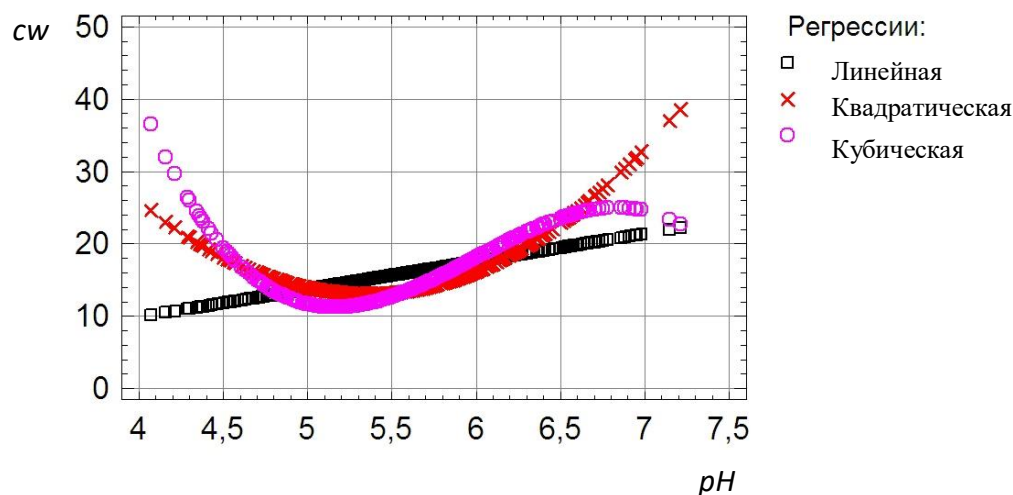


Рис. 4. Линии регрессии $св$ на $рН$ для линейной, квадратической и кубической моделей (2016–2019)

Влияние температуры воздуха на электропроводность осадков оценивалось простой линейной регрессией совокупности срочных значений $св$ на срочные значения темпе-

ратур t , а также регрессией среднемесячных величин $amcw$ на среднемесячные температуры amt . Уравнения регрессии имеют вид:

для срочных значений (коэффициент корреляции – 0,19183):

$$cw(t) = 14,4524 + 0,249723 \cdot t; \quad (7)$$

для среднемесячных значений (коэффициент корреляции – 0,256527):

$$amcw(t) = 15,5888 + 0,176449 \cdot amt. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) свидетельствуют о существовании сравнительно слабой положительной связи электропроводности осадков с температурой воздуха, т. е. чем выше температура, тем больше электропроводность. Линия регрессии, соответствующая уравнению (8), показана на рис. 5.

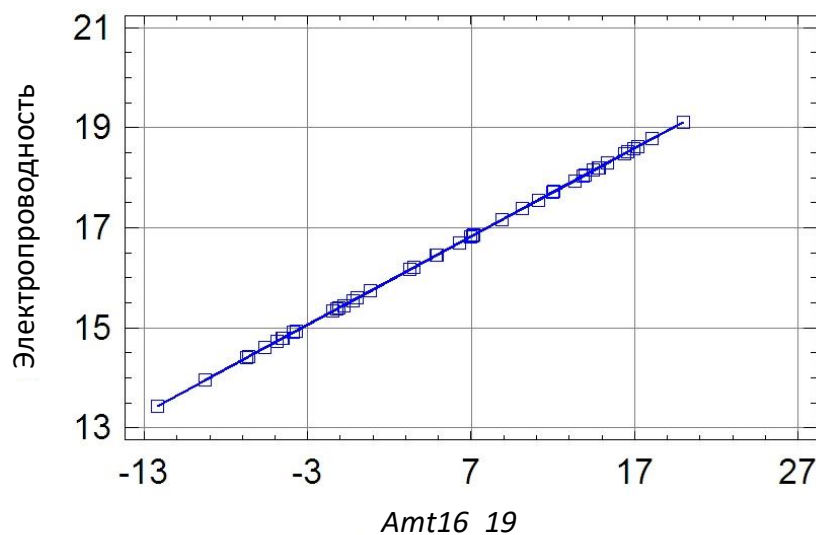


Рис. 5. Связь среднемесячных значений электропроводности $amcw$ и среднемесячных температур воздуха amt (2016–2019)

Установленные однофакторные зависимости электропроводности от кислотности осадков и температуры воздуха позволяют перейти к двухфакторной зависимости [5, 6], в которой отражается совокупное влияние на электропроводность и кислотности осадков и температуры воздуха. Уравнения регрессии в этом случае принимают вид:

для срочных значений:

$$cw(pH, t) = -2,91824 + 3,15328 \cdot pH + 0,199623 \cdot t; \quad (9)$$

для среднемесячных значений:

$$amcw(pH, t) = -3,73742 + 3,48997 \cdot ampH + 0,119535 \cdot amt. \quad (10)$$

Обнаружено, что в формуле (10) фактор $ampH$ статистически незначим на доверительном уровне 90 % и выше и, строго говоря, может быть удален из модели. В формуле (9) оба фактора статистически значимы на 99 %-м уровне доверия.

Продолжая расширять круг факторов влияния на электропроводность осадков, включим в рассмотрение срочное количество осадков pre и их месячную сумму $sumpre$, мм. Тогда получим следующие уравнения регрессии:

для срочных значений:

$$cw(pH, t, pre) = 5,15888 + 2,0501 \cdot pH + 0,288872 \cdot t - 0,492704 \cdot pre; \quad (11)$$

для среднемесячных значений:

$$atcsw(pH, t, pre) = 8,02211 + 2,03118 \cdot ampH + 0,245923 \cdot amt - 0,0782389 \cdot sumpre. \quad (12)$$

Знаки членов уравнений (11) и (12) свидетельствуют о том, что с ростом значений показателя кислотности и температуры воздуха электропроводность осадков увеличивается, а с ростом количества осадков, наоборот, уменьшается (эффект разбавления). Здесь, как и в случае трехфакторного анализа, в формуле для среднемесячных величин (см. уравнение (12)) фактор $ampH$ статистически незначим (на доверительном уровне 90 % и выше) и может быть удален из модели, а в формуле для срочных величин (11) все три фактора статистически значимы на 99 %-м уровне доверия. Этот факт говорит о сравнительно «скромном» влиянии кислотности осадков на их удельную электропроводность.

Сравним внутригодовую динамику удельной электропроводности осадков $atcsw$ и факторов $ampH$, amt , $sumpre$. Используем для этого сезонные компоненты временных рядов этих факторов [5]. Примем период сезонных колебаний всех факторов p равным 12 месяцам. В качестве оценки сезонной компоненты используем среднее $\hat{s}_i$ отклонений значений $atcsw$ от тренда $\hat{tr}_i$ [3], т. е., положим [5], что для среднемесячной электропроводности

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (atcsw_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \text{ для } i = 1, \dots, p;$$

где $m + 1 = 4$ – число (годовых) периодов в ряду наблюдений. Аналогично рассчитаем среднее $\hat{s}_i$ отклонений от тренда значений pH , t и pre от их трендов. Годовой ход сезонных компонент (месячных индексов) показан на рис. 6.

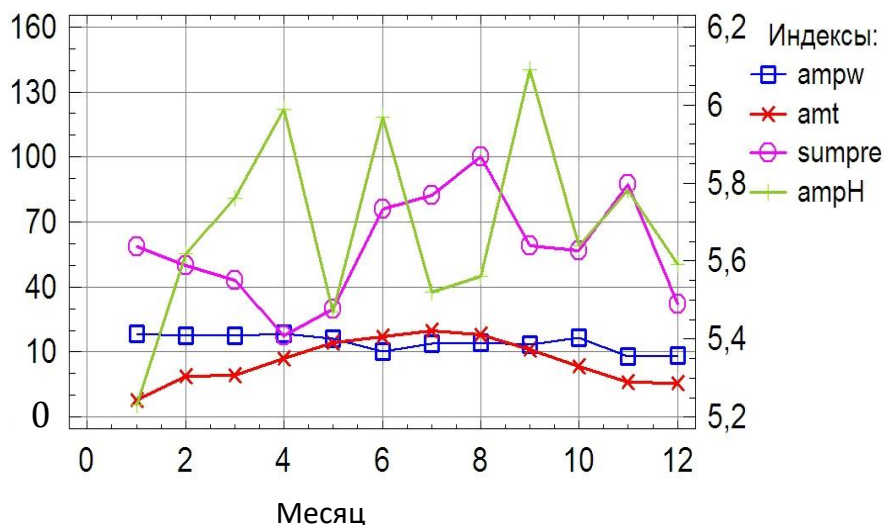


Рис. 6. Годовой ход сезонных компонент (месячных индексов) рядов $atcsw$, $ampH$, amt и $sumpre$ (2016–2019 годы)

Индексы удельной электропроводности $atcsw$, колеблясь с небольшой амплитудой, незначительно убывают от начала к концу года. Очевидная внутригодовая динамика температур воздуха amt не вызывает вопросов. На графике индексов осадков $sumpre$ обращают на себя внимание апрельский минимум и июльский максимум. График показателя кислотности осадков $ampH$ характеризуется чередованием локальных максимумов и минимумов.

ВЫВОДЫ

Установлено существование корреляционных связей удельной электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с показателем кислотности pH , температурой воздуха и количеством выпадающих осадков.

Построены регрессионные одно-, двух- и трехфакторные модели связей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качество воды в Центральной Азии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ca_water_info.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (дата обращения: 14.04.2018).
2. Янченко Н.И. Особенности изменения величины pH и электропроводности снежного покрова в Братске // *Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии*. 2014. Т. 325. № 3. С. 23–24.
3. Качановский, Ф. В. Электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2019. Вып. 3 (3). С. 65–71.
4. Голицын А.Н. Инженерная геоэкология. М.: Оникс, 2007. 202 с.
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1999. 479 с.
6. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере / под ред. В.Э. Фигурнова. 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. Связь электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с метеофакторами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 69–76.

ELECTRICAL SPECIFIC CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION AND METEOROLOGICAL FACTORS IN TVER (CORRELATION ANALYSIS)

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Correlation analysis had made of the precipitation's electrical specific conductivity and meteorological factors (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 1916–2019 years). Regression models of the electrical specific conductivity upon meteorological factors were built.

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

REFERENCES

1. Water quality in Central Asia [Electronic resource]. – Mode of access: [http://www.ca water info.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (date of accessed: 14.04.2018)].
2. Yanchenko N.I. Features of the change in the pH and electrical conductivity of the snow cover in Bratsk. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Himiya i himicheskie tekhnologii*. 2014. vol. 325. No. 3, pp. 23–24. (In Russian).
3. Kachanovskij F.V. Electrical conductivity of precipitation falling in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo, elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2019. No. 3 (3), pp. 65–71. (In Russian).
4. Golicyn A.N. *Inzhenernaya geoekologiya* [Engineering geocology]. M.: Oniks. 2007. 202 p.
5. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. M.: Vysshaya shkola, 1999. 479 p.
6. Tyurin Y.N., Makarov A.A. *Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere* [Statistical analysis of computer data] edited by V.E. Figurnova. 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 Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation and meteorological factors in Tver (correlation analysis) // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 3 (7), pp. 69–76.

УДК 614.8.084

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВУЛКАНИЗАЦИИ ПЛАЩЕВЫХ ТКАНЕЙ НА ВЕЛИЧИНУ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

С.Д. Семеевков, Т.С. Копылова, Д.С. Семеевков

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Семеевков С.Д., Копылова Т.С., Семеевков Д.С., 2020

Аннотация. В статье приводятся материалы по исследованию зависимости адгезионной прочности тканей с полимерными покрытиями от режимов термообработки. Доказана связь монолитной прочности конструкционных материалов с временем термообработки и температурным режимом вулканизации.

Ключевые слова: вулканизация, температурный режим, адгезионная прочность, псевдооживление, конвекция.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-76-79

Был предложен при использовании микроскопического способа исследования пограничной области контакта «ткань – полимерное покрытие» в плащевых тканях способ количественной оценки степени проникновения резиновой смеси в волокна ткани,

который характеризуется тремя параметрами: а) глубиной захвата полимерного покрытия между волокнами ткани; б) углом обхвата полимерным покрытием капронового волокна; в) соотношением фактической и возможной длин линии контакта покрытия с волокном.

Этими тремя параметрами и характеризуется величина адгезионной прочности [1].

Для выявления влияния условий термообработки на величину адгезионной прочности плащевой капроновой ткани микроскопическому анализу подвергались опытные образцы тканей, обработанные при различных режимах.

Зависимость параметров, характеризующих адгезию покрытия к ткани, от температуры вулканизации в режиме псевдооживления и конвекции представлена в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость параметров, характеризующих адгезию покрытия к ткани,
от температуры вулканизации

Температура вулканизации, °С	Соотношение контактных линий, %	Глубина проникновений, мк	Угол контакта, град
Псевдооживление			
160	34,4	7,43	90
170	29,8	9,45	121,2
180	24,4	10,68	133,5
190	21,5	11,24	140,1
200	25,1	11,88	143,4
Конвекция			
160	37,5	4,75	62
170	37,1	5,89	68,5
180	36,5	6,34	73,4
190	35,1	6,82	75,6
200	35	6,21	75,5

При повышении температуры вулканизации вязкоэластические свойства сополимеров изменяются, увеличивается гибкость цепей и повышается их способность к диффузии. Все это приводит к увеличению прочности связи покрытия с тканью [2].

Таким образом, повышение прочности связи каучука с капроновым волокном обусловлено, с одной стороны, увеличением суммарной площади истинного контакта за счет релаксации и пластического течения в граничном слое, а с другой – повышением степени диффузионного переплетения цепей, что облегчает межмолекулярные взаимодействия на границе контакта разноименных макромолекул, активированных за счет повышенной температуры термообработки.

Рост адгезионной прочности у образцов, обработанных в режиме конвекции, происходит значительно слабее, чем при использовании псевдооживленного слоя, отсюда можно сделать вывод, что механический фактор, обусловленный воздействием на размягченную поверхность покрытия частиц теплоносителя, играет довольно значительную роль в обеспечении достаточной адгезионной прочности вулканизуемых материалов [3].

Результаты анализа микросрезов, вулканизированных при разном времени термообработки, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение параметров, характеризующих адгезию,
от продолжительности термообработки

Время термообработки, с	Соотношение контактных линий, %	Глубина проникновений, мк	Угол контакта, град
Псевдооживление			
15	27,4	8,01	100,1
20	22,3	9,21	123,4
25	19,5	9,5	138,5
30	15	9,61	142,1
45	12,4	9,64	142,2
Конвекция			
15	33,4	7,85	33,4
20	30,3	8,19	46,3
25	29,2	8,41	57,4
30	28,4	8,96	69
45	27,9	9,04	76

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что степень контакта и глубина проникновения полимерного покрытия в капроновую ткань растут с изменением времени термообработки до 30 с. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки меняет значение параметров степени монолитности системы «ткань – покрытие» незначительно. При вулканизации плащевой ткани в псевдооживленном слое прогрессивное нарастание адгезионной прочности конструктивного материала происходит с ростом времени термообработки до 30 с. При дальнейшей обработке значение адгезии стабилизируется [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тябин Н.В., Попов А.В. Процессы и аппараты резиновой промышленности. Л.: Химия, 1988. 248 с.
2. Тимонин А.С., Балдин Б.Г., Борщев В.Я. Машины и аппараты химических производств: учебное пособие для вузов. Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочковой, 2008. 871 с.
3. Козлов А.И. Повышение качества ускорителей вулканизации резин // *Химическая промышленность*. 2005. № 5. С. 233–234.
4. Комисаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие. М.: Химия, 2011. 350 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕМЕЕНКОВ Сергей Дмитриевич – кандидат технических наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

КОПЫЛОВА Тамара Семеновна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tamara.kopylova.41@mail.ru

СЕМЕЕНКОВ Дмитрий Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Семеенков С.Д., Копылова Т.С., Семеенков Д.С. Влияние температурного режима вулканизации плащевых тканей на величину адгезионной прочности // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 3 (7). С. 76–79.

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE REGIME OF VULCANIZATION OF RAINCOAT FABRICS ON THE VALUE OF ADHESIVE STRENGTH

S.D. Semeenkov, T.S. Kopylova, D.S. Semeenkov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This paper presents materials on the study of the dependence of the adhesive strength of fabrics with polymer coatings on the heat treatment modes. The connection between the monolithic strength of structural materials and the time of heat treatment and the temperature regime of vulcanization is proved.

Keywords: vulcanization, temperature regime, adhesive strength, fluidization, convection.

REFERENCES

1. Tyabin N.V., Popov A.V. *Processy i apparaty rezinovoj promyshlennosti* [Processes and devices of the rubber industry]. L.: Himiya, 1988. 248 p.
2. Timonin A.S., Baldin B.G., Borshchev V.Y. *Mashiny i apparaty himicheskikh proizvodstv*. [Machines and devices of chemical production]. Kaluga: Izd-vo N.F. Bochkorevoj, 2008. 871 p.
3. Kozlov A.I. Improving the quality of rubber vulcanization accelerators. *Himicheskaya promyshlennost'*. 2005. No. 5, pp. 233–234. (In Russian).
4. Komisarov Y.A., Gordeev L.S., Vent D.P. *Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. M.: Himiya, 2011. 350 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SEMEENKOV Sergey Dmitrievich – Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

KOPYLOVA Tamara Semenovna – Associate Professor of Technological Machines and Equipment Department, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tamara.kopylova.41@mail.ru

SEMEENKOV Dmitry Sergeevich – undergraduate, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Semeenkov S.D., Kopylova T.S., Semeenkov D.S. Influence of the temperature regime of vulcanization of raincoat fabrics on the value of adhesive strength // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 3 (7), pp. 76–79.

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 3 (7), 2020

Редактор Ю.А. Якушева
Корректор А.В. Смирнов

Подписано в печать 21.10.2020

Формат 60x84 1/8

Физ. п. л. 10

Тираж 500 экз.

Усл. п. л. 9,3

Заказ № 336

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 8,7

С – 80

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