

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**

**№ 2 (14), 2022**

Тверь 2022

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2022. № 2 (14). 81 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 специальностям: 2.1.5 Строительные материалы и изделия, 2.4.4 Электротехнология и электрофизика, 2.6.10 Технология органических веществ.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ЭЛ № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

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

ISSN 2686-794X (онлайн)

**СОДЕРЖАНИЕ****СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

<i>Белов В.В., Али Р.А.</i> Неавтоклавный газобетон с наполненной цементной матрицей.....	4
<i>Маклакова С.Н., Галкина М.А., Бровкин В.Н.</i> Анализ методов испытаний образцов строительных материалов из бетона.....	13
<i>Трофимов В.И., Гулятьев В.И.</i> Повышение эффективности строительства аэродромных комплексов в условиях Крайнего Севера....	17
<i>Черемных С.В.</i> Методика расчета теплотехнических характеристик многослойной ограждающей конструкции.....	26

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

<i>Алисова Е.П., Лебедев В.В., Крупнов А.В.</i> Этапы построения системы молниезащиты и моделирование системы защиты от прямых ударов молнии.....	34
<i>Колесова М.А., Крупнов А.В.</i> Краткий обзор характеристик и сравнение параметров накопителей электрической энергии.....	39
<i>Степанов А.А., Осеи-Овусу Р.</i> Перспективное планирование развития электроэнергетического сектора.....	48

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ**

<i>Орлов В.В., Ожимкова Е.В.</i> Биологическая азотфиксация и ее значение для ранних этапов развития льна культурного.....	57
<i>Столяренко В.И., Ольшанский В.И.</i> Физические методы модификации структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе стеклоткани.....	63
<i>Шкерина К.Н., Сидоров А.И., Никошвили Л.Ж.</i> Полианилин как основа создания магнитноразделяемых сорбентов и катализаторов.....	74

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК: 691.517

### НЕАВТОКЛАВНЫЙ ГАЗОБЕТОН С НАПОЛНЕННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЕЙ

*В.В. Белов, Р.А. Али*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., Али Р.А., 2022

**Аннотация.** Статья освещает роль наполненной с помощью различных микронаполнителей цементной матрицы неавтоклавнога газобетона в различных аспектах его применения. Установлены оптимальные (по максимальному пределу прочности на сжатие и минимальному расходу цемента) соотношения компонентов, минеральных и химических добавок в составе неавтоклавнога газобетона: соотношение минерального порошка и цемента, содержание микрокремнезема и хлористого натрия. Разработаны принципы определения оптимальных лабораторных составов неавтоклавнога газобетона со сниженным расходом цемента марок по плотности D500, D600 и D800.

**Ключевые слова:** микронаполнитель, суперпластификатор С-3, минеральный порошок, микрокремнезем, неавтоклавный газобетон.

### ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития строительства ячеистые бетоны являются наиболее эффективным теплоизоляционным и одновременно конструкционным материалом. Они обладают низким коэффициентом теплопроводности, достаточной механической прочностью и изготавливаются из дешевого исходного сырья [1]. Производство и применение ячеистого бетона говорит о том, что спрос на газобетон пониженной плотности будет неуклонно расти.

В России уже сегодня выпуск газобетона плотностью D350–D400 составляет не менее 30 % от общего объема производства [2]. Ячеисто-бетонные стены имеют наименьший период окупаемости, а нормируемые приведенные сопротивления теплопередаче для них могут быть установлены на 22–30 % меньше регламентированных СНиП 11-3-79 для соответствующих регионов. Панели из ячеистого бетона характеризуются долговечностью, пожаробезопасностью, огнестойкостью и могут применяться в зданиях различного назначения [3]. Полученный материал отличается пониженной плотностью и низким коэффициентом теплопроводности, что является одним из наиболее важных показателей теплозащитных свойств материалов и конструкций [4].

Развитие и внедрение энергосберегающих и конкурентоспособных строительных материалов – важный вопрос строительной отрасли. В общем объеме производства стеновых материалов значительный объем принадлежит силикатным изделиям. Сокращение расхода энергии на стадиях производства и эксплуатации продукции, а также рост объемов выпуска и повышение ее качества могут быть достигнуты путем разработки и внедрения современных ресурсосберегающих технологий [5]. Для решения данной проблемы наиболее актуальны разработки новых технологических приемов использования в производстве неавтоклавных ячеистых бетонов местной сырьевой базы и минеральных промышленных отходов. Это позволит обеспечить производство источником дешевого и частично уже подготовленного минерального сырья и создаст реальные возможности для экономии энергетических ресурсов и капитальных вложений [6]. Одним из способов улучшения свойств композиционных материалов, в том числе газобетонов неавтоклавного твердения, является подбор оптимального гранулометрического состава минеральной части.

В статье [7] рассматривается и совершенствуется метод оптимизации гранулометрического состава заполнителя приближением его к эталонной кривой просеивания минеральной части тяжелого бетона, в результате чего достигается улучшение его физико-механических свойств. В статье [1] отмечено, что для получения высокой прочности газобетона необходимо создавать наиболее плотную компактную упаковку межпоровой перегородки, которая достигается при использовании полидисперсного наполнителя.

Дисперсную часть любого бетона представляют различные минеральные полидисперсные добавки-наполнители и основное вяжущее. В настоящее время использование микро- и наноразмерных наполнителей практически необходимо для повышения эксплуатационно-технологических свойств бетона. Данное требование обусловлено способностью тонкодисперсного компонента уплотнять структуру цементного камня, а нередко и химически связываться с продуктами гидратации цемента, создавая синтерные микрзоны (зоны спекания) на физическом уровне. Эти зоны и сложные соли из гидратных микрокристаллов клинкера составляют внутреннюю «сотовую» структуру композита, заполненную вяжущим компонентом и добавками [8].

Наполнители представляют собой 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 [9, 10], где, в частности, было показано, что применение в качестве наполнителя цементных систем молотого известняка и суперпластификатора позволяет целенаправленно регулировать свойства мелкозернистых карбонатных бетонов. Очевидно, что подобные принципы совершенствования составов и технологии применимы и к газобетонам неавтоклавного твердения.

В этой связи представляется актуальным проведение исследований, направленных на снижение расхода цемента для приготовления эффективных видов ячеистого бетона с помощью различных микронаполнителей в составе цементной матрицы для межпоровых перегородок газобетона. В настоящей работе рассмотрены оптимальные составы неавтоклавного газобетона марок по средней плотности D500, D600 и D800 со сниженным

расходом цемента на основе наполненного связующего вещества. В качестве исходных материалов использовали бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5, неактивированный порошок минеральный ГОСТ Р 52129-2003 (доломитовая мука), микрокремнезем, алюминиевую пудру марки ПАП-2, суперпластификатор С-3, ускорители твердения NaCl и NaOH. Для определения ориентировочного В/Т-отношения и содержания алюминиевой пудры для газобетона марки по средней плотности D500 и проверки оптимальных дозировок микрокремнезема, суперпластификатора С-3 и ускорителя твердения NaCl выполняли эксперимент с варьированием В/Т-отношения (0,35–0,50), содержания алюминиевой пудры (550–650 г на 1 м<sup>3</sup> газобетона), содержания NaOH (0–1,5 % от массы цемента).

Для определения оптимального соотношения минерального порошка и портландцемента с добавкой микрокремнезема без газообразователя (невспученной матрицы газобетона) выполнялся планированный двухфакторный эксперимент с варьированием отношения минерального порошка к цементу  $X_1 = \text{МП/Ц} = 1-1,5$ ; отношения микрокремнезема к цементу  $X_2 = \text{МК/Ц} = 0-0,15$ , – на образцах 70 x 70 x 70 мм при одинаковой подвижности смеси (распływ смеси по Суттарду 15–16 см). Твердение образцов осуществлялось в течение 7 сут в нормальных условиях. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты планированного двухфакторного эксперимента по оптимизации состава неvspученной матрицы газобетона с варьированием отношения минерального порошка к цементу  $X_1 = \text{МП/Ц} = 1-1,5$ ; отношения микрокремнезема к цементу  $X_2 = \text{МК/Ц} = 0-0,15$

№ серии	Уровни факторов		Значения факторов		Распływ по Суттарду, см	В/Т	Предел прочности на сжатие в возрасте 7 сут, МПа	Влажность образцов, %	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>
	X1	X2	МП/Ц	МК/Ц					
1	-1	-1	1	0	16	0,40	10,9	15,3	1 630
2	+1	-1	1,5	0	15	0,38	7,6	18,3	1 565
3	-1	+1	1	0,15	16	0,42	11,4	10,8	1 640
4	+1	+1	1,5	0,15	16	0,41	8,4	15,1	1 605
5	-1	0	1	0,075	16	0,40	12,1	12,5	1 700
6	+1	0	1,5	0,075	15	0,39	8,8	17,6	1 610

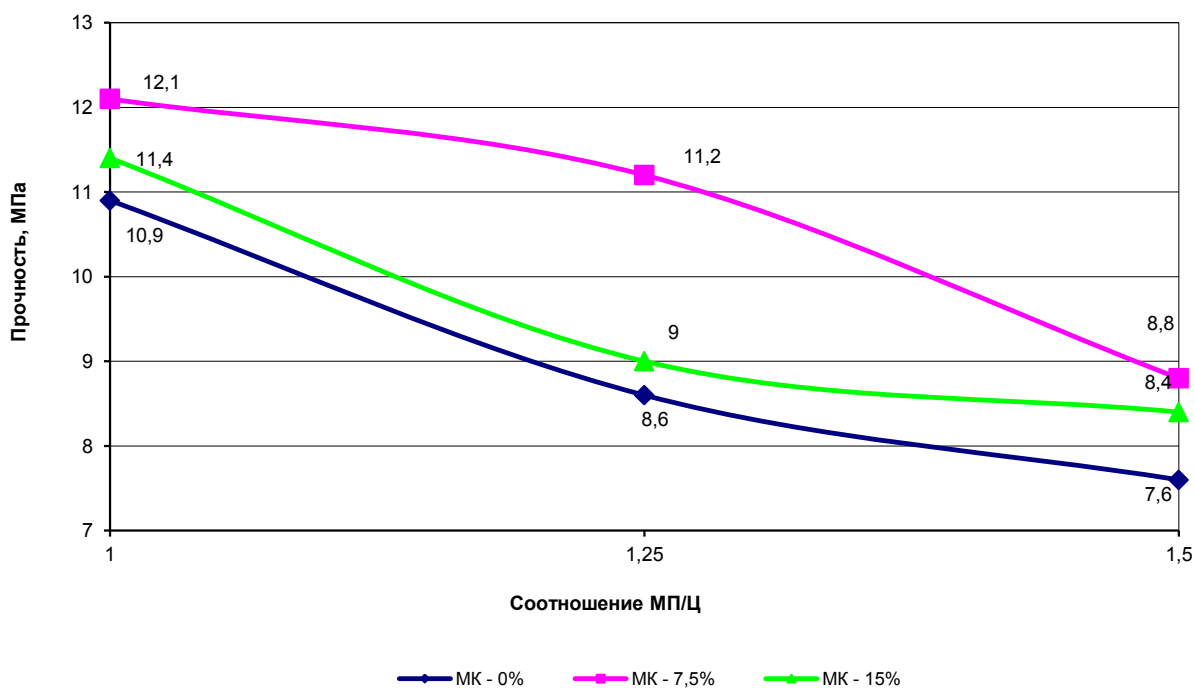


Рис. 1. Зависимости предела прочности неспученной матрицы газобетона на сжатие от соотношения минерального порошка и цемента при различном процентном содержании микрокремнезема от массы цемента

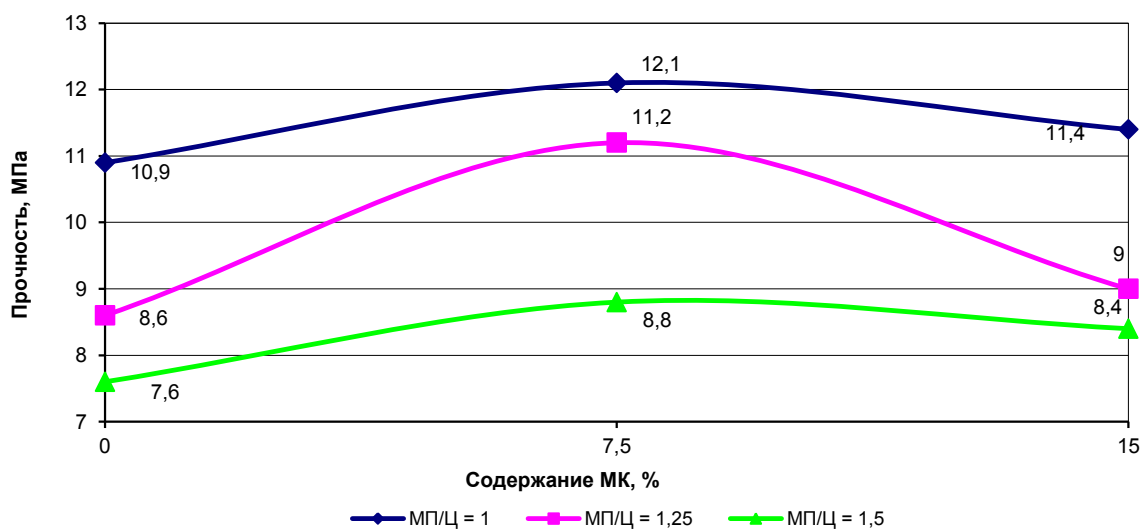


Рис. 2. Зависимости предела прочности неспученной матрицы газобетона на сжатие от содержания микрокремнезема при различном соотношении минерального порошка и цемента

Полученные результаты позволяют определить оптимальные составы неавтоклавного газобетона или связующего вещества его межпоровых перегородок на основе портландцемента, минерального порошка из карбонатных горных пород, микрокремнезема, суперпластификатора С-3 и NaCl. Установлены оптимальные (по максимальному пределу прочности на сжатие и минимальному расходу цемента) соотношения компонентов: соотношение минерального порошка и цемента МП/Ц = 1,3, содержание микрокремнезема 9 %, С-3 – 0,6 %, NaCl – 0,5 %.

Состав газобетона неавтоклавного твердения подбирали на образцах размером 100x100x100 мм, прочность которых проверяли после твердения в течение 7 и 28 сут в нормальных условиях (температура  $(20 \pm 2)$  °С, влажность воздуха 95–100 %). Рабочую консистенцию (густоту) растворной смеси определяли с помощью прибора Суттарда в соответствии с требованиями ГОСТ 23789. Установлено, что расплыв по Суттарду 26–28 см, необходимый для получения газобетона марки по средней плотности D500 из смеси с оптимальной добавкой микрокремнезема 9 %, достигается при высоких значениях В/Т, что объясняется высокой дисперсностью микрокремнезема. Получен первоначальный состав матрицы газобетона (В/Т = 0,5, Al = 650 г на 1 м<sup>3</sup>, NaOH = 0,5 % от массы цемента), который соответствует требованиям по средней плотности (марка D500). Далее состав оптимизировали для достижения наибольшей прочности газобетона при заданной плотности путем проведения эксперимента при варьировании В/Т-отношения и содержания алюминиевой пудры.

При уменьшении В/Т-отношения от 0,50 до 0,44 и уменьшении содержания алюминиевой пудры от 650 до 600 г на 1 м<sup>3</sup> средняя плотность и предел прочности на сжатие увеличиваются. Для получения газобетона марки по средней плотности D500 оптимальное В/Т составляет 0,48, а содержание алюминиевой пудры – 650 г на 1 м<sup>3</sup>. При этом температура смеси в момент выгрузки в форму была около 40 °С, время вспучивания составляло 10 мин. Соответствующие зависимости приведены на рис. 3.

В табл. 2 приведен оптимальный состав № 2 газобетона марки D500 со средней плотностью 500 кг/м<sup>3</sup>, пределом прочности на сжатие в возрасте 28 сут 1,10 МПа (предполагаемый класс по прочности В1). Снижение расхода цемента составляет 37,3 кг на 1 м<sup>3</sup> неавтоклавного газобетона (16,4 %).

Таблица 2

Составы и физико-механические характеристики по данным оптимизации газобетона марки D500

№	Значения факторов		Температура смеси в момент выгрузки в форму, °С	Время вспучивания, мин	Предел прочности на сжатие в возрасте 7 сут, МПа	Предел прочности на сжатие в возрасте 28 сут, МПа	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>
	В/Т	Al, г на 1 м <sup>3</sup>					
1	0,50	650	40	8	0,62	0,95	495
2	0,48	650	41	10	0,65	1,10	500
3	0,46	650	40	11	0,67	1,12	513
4	0,44	650	39	12	0,70	1,20	549
5	0,48	600	41	11	0,78	1,27	557
6	0,44	600	41	11	0,80	1,35	567
7	0,50	600	42	11	0,74	1,15	544



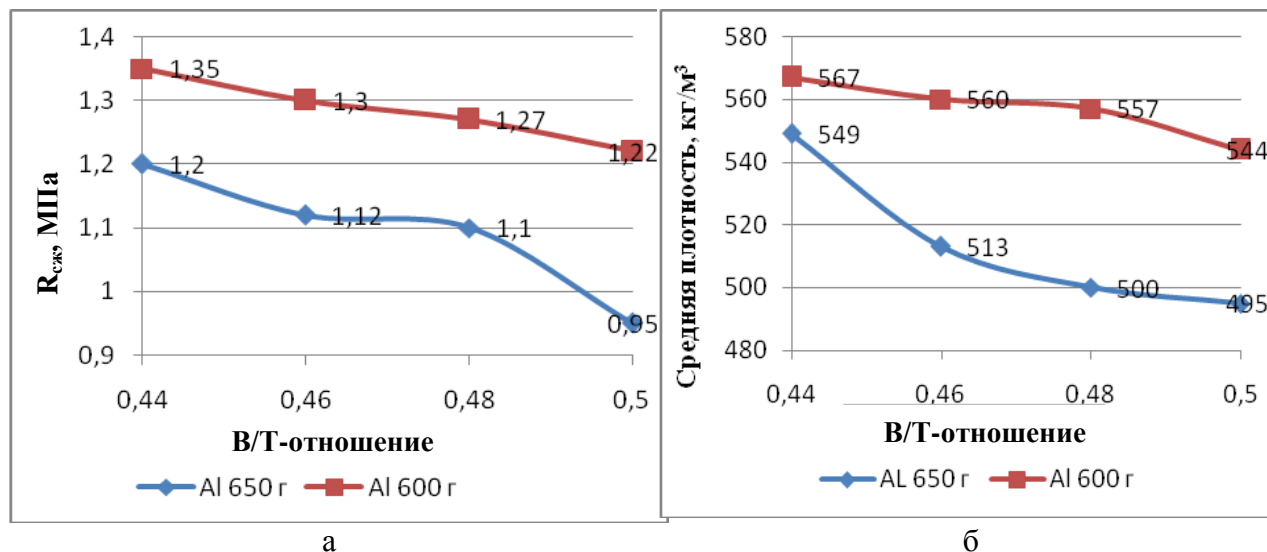


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие (а) и средней плотности (б) в возрасте 28 сут от В/Т-отношения и содержания алюминиевой пудры для газобетона марки D500

Для определения оптимального состава неавтоклавного газобетона марки по средней плотности D600 выполнялся двухфакторный планированный эксперимент с варьированием В/Т-отношения (0,46–0,48) и содержания алюминиевой пудры (500–550 г на 1 м<sup>3</sup> газобетона); МП/Ц = 1,3; МК/Ц = 0,09; С-3 – 0,6 %; NaCl – 0,5 %; NaOH = 0,5 %. Образцы размером 100x100x100 мм твердели в течение 7 сут в нормальных условиях (температура (20 ± 2) °С, влажность воздуха 95–100 %). Соответствующие зависимости приведены на рис. 4, составы газобетона D600 – в табл. 3.

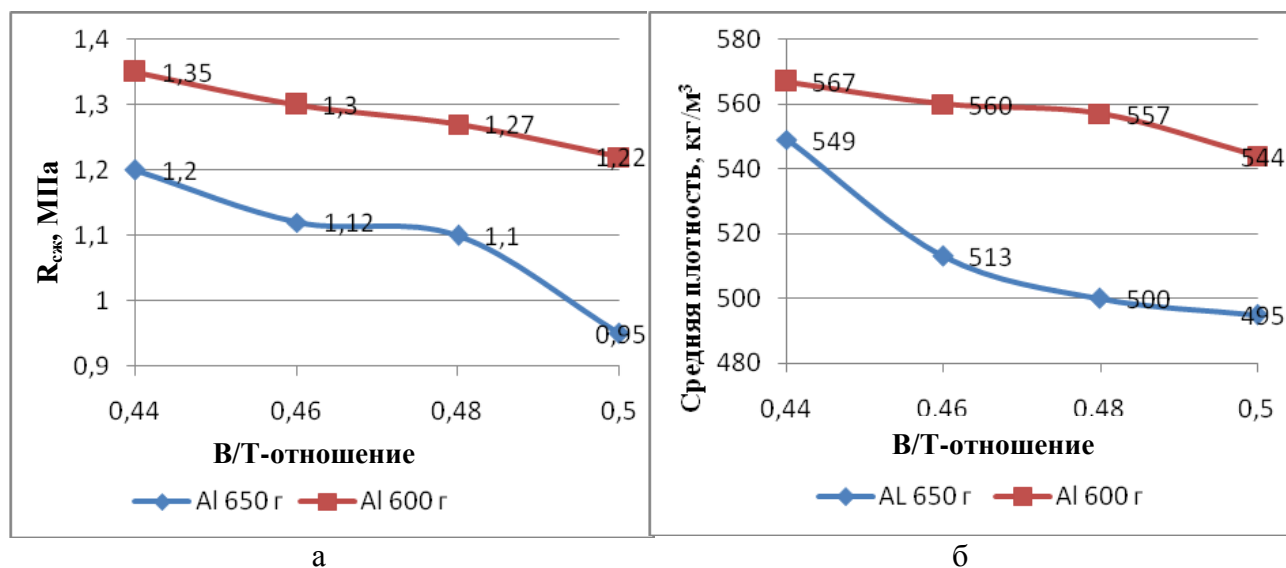


Рис. 4. Зависимость прочности на сжатие (а) и средней плотности (б) в возрасте 28 сут от В/Т-отношения и содержания алюминиевой пудры для газобетона марки D600

Таблица 3

Составы и физико-механические характеристики  
по данным оптимизации газобетона марки D600

Значения факторов в кодированном виде		Значения факторов в натуральном виде		Время вспучивания, мин	Предел прочности на сжатие в возрасте 7 сут, МПа	Предел прочности на сжатие в возрасте 28 сут, МПа	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>
В/Т	Al, г, на 1 м <sup>3</sup>	В/Т	Al, г, на 1 м <sup>3</sup>				
-1	-1	0,46	500	11	1,62	2,45	592
+1	-1	0,48	500	9	1,24	2,00	596
-1	+1	0,46	550	11	1,18	1,90	613
+1	+1	0,48	550	10	1,05	1,45	575

Во всех составах с увеличением В/Т-отношения предел прочности на сжатие уменьшается. У составов наблюдается отслоение и разрыхление верхней части образца вследствие перерасхода газообразователя. Для получения газобетона марки по средней плотности D600 оптимальное В/Т составляет 0,46, а содержание алюминиевой пудры – 500 г на 1 м<sup>3</sup> (состав № 1). При этом температура смеси в момент выгрузки в форму была 40 °С, время вспучивания 11 мин, средняя плотность 592 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности на сжатие в возрасте 28 сут 2,45 МПа (предполагаемый класс по прочности В1,5–В2). Снижение расхода цемента составляет 44,8 кг на 1 м<sup>3</sup> неавтоклавного газобетона (16,4 %).

Для определения оптимального состава неавтоклавного газобетона марки по средней плотности D800 выполнялся двухфакторный планированный эксперимент с варьированием В/Т-отношения (0,42–0,44) и содержания алюминиевой пудры (350–400 г на 1 м<sup>3</sup> газобетона); МП/Ц = 1,3; МК/Ц = 0,09; С-3 – 0,6 %; NaCl – 0,5 %; NaOH = 0,5 %. Образцы 100x100x100 мм твердели в течение 7 сут в нормальных условиях (температура (20 ± 2) °С, влажность воздуха 95–100 %). Полученные зависимости приведены на рис. 5.

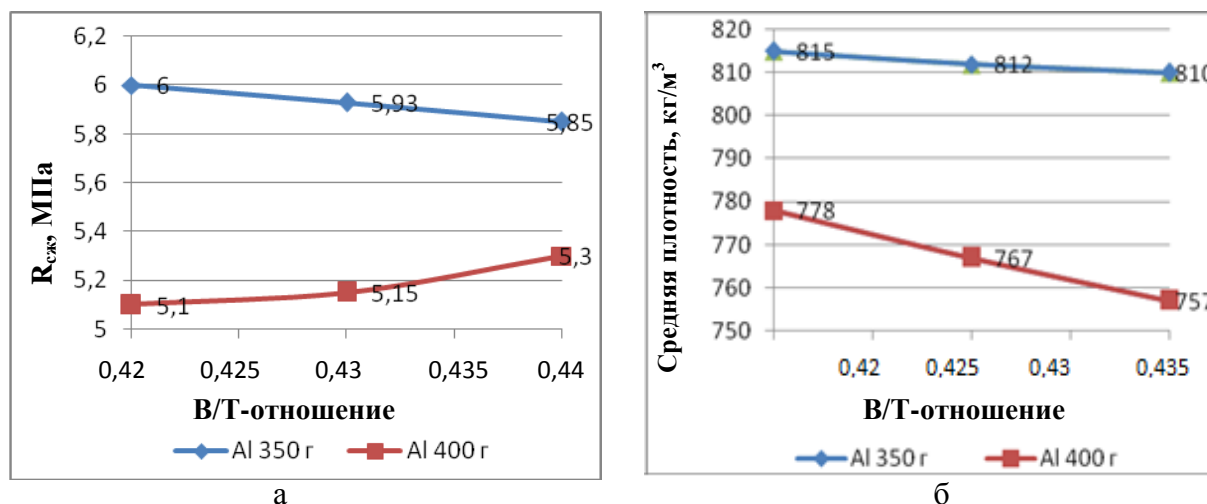


Рис. 5. Зависимость прочности на сжатие (а) и средней плотности (б) в возрасте 28 сут от В/Т-отношения и содержания алюминиевой пудры для газобетона марки D800

Результаты испытаний образцов соответствуют заданной марке газобетона по средней плотности D800 (табл. 4). Для получения газобетона марки по средней плотности D800 оптимальное В/Т составляет 0,44, а содержание алюминиевой пудры – 400 г на 1 м<sup>3</sup> (состав № 3). При этом температура смеси в момент выгрузки в форму была около 40 °С, время вспучивания 11 мин, средняя плотность 757 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности на сжатие в возрасте 28 сут 5,30 МПа (предполагаемый класс по прочности В3,5). Снижение расхода цемента составляет 60,6 кг на 1 м<sup>3</sup> неавтоклавного газобетона (16,4 %).

Таблица 4

Составы и физико-механические характеристики по данным оптимизации газобетона марки D800

Значения факторов в кодированном виде		Значения факторов в натуральном виде		Время вспучивания, мин	Предел прочности на сжатие в возрасте 7 сут, МПа	Предел прочности на сжатие в возрасте 28 сут, МПа	Средняя плотность кг/м <sup>3</sup>
В/Т	Al, г, на 1 м <sup>3</sup>	В/Т	Al, г, на 1 м <sup>3</sup>				
-1	-1	0,42	350	11	4,14	6,00	815
+1	+1	0,44	350	9	4,11	5,85	810
-1	-1	0,42	400	11	3,31	5,10	778
+1	+1	0,44	400	10	3,77	5,30	757

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан состав связующего вещества межпоровых перегородок неавтоклавного газобетона на основе портландцемента, минерального порошка из карбонатных горных пород, микрокремнезема, суперпластификатора С-3 и NaCl. Установлены оптимальные (по максимальному пределу прочности на сжатие и минимальному расходу цемента) соотношения компонентов:

соотношение минерального порошка и цемента МП/Ц = 1,3;

содержание микрокремнезема 9 %, суперпластификатора С-3 – 0,6 %, NaCl – 0,5 %.

На этой основе разработаны оптимальные лабораторные составы неавтоклавного газобетона со сниженным расходом цемента марок по средней плотности D500, D600 и D800 с использованием портландцемента, минерального порошка из карбонатных горных пород, микрокремнезема и химических добавок.

**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 ТвГТУ*. Тверь. 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: СамГАСУ. 2004. С. 63–65.
4. Якимечко Я.Б. Неавтоклавные газобетоны с полидисперсными наполнителями на основе отходов промышленности // *Строительные материалы*. 2009. № 1. С. 24–26.
5. Прохоров С.Б. Перспективы развития и особенности использования российских специализированных алюминиевых газобразователей // *Строительные материалы*. 2013. № 4. С. 94–95.
6. Сажнев Н.П., Беланович С.Б., Бухта Д.П., Федосов Н.Н., Овчаренко В.А., Кацынель Р.Б., Кузымичев Р.В. Наружные ограждающие конструкции зданий из крупноразмерных ячеисто-бетонных изделий // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 12–18.
7. Мизюряев С.А., Мамонов А.Н., Горин В.М., Токарева С.А. Структурированный высокопористый силикатнатриевый материал повышенной тепло- и термостойкости // *Строительные материалы*. 2011. № 7. С. 8–9.
8. Шинкевич Е.С., Луцкин Е.С. Технологические особенности производства силикатных изделий неавтоклавного твердения // *Строительные материалы*. 2008. № 11. С. 54–56.
9. Белов В.В., Курятников Ю.Ю. Использование золы гидроудаления при изготовлении сухой готовой смеси для неавтоклавного газобетона // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2011. № 1. С. 34–38.
10. Белов В.В., Смирнов М.А. Формирование оптимальной структуры композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов // *Вестник Центрального регионального отделения РААСН*. Воронеж: ВГАСУ. 2010. С. 65–72.

**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. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

*АЛИ Рушди Ахмед Али* – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: rushdiahmad@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Белов В.В., Али Р.А. Неавтоклавный газобетон с наполненной цементной матрицей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 4–12.

УДК 691.327

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ БЕТОНА***С.Н. Маклакова, М.А. Галкина, В.Н. Бровкин**ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия»  
(п. Каравеево, Костромская область)*© Маклакова С.Н., Галкина М.А.,  
Бровкин В.Н., 2022

**Аннотация.** В настоящее время бетон является одним из основных материалов для производства конструкций при строительстве зданий и сооружений. Однако прочность конструкций напрямую зависит от прочностных и деформативных характеристик этого материала. В статье даны рекомендации по отбору образцов, крупности заполнителя и проведению испытаний бетонных образцов на сжатие.

**Ключевые слова:** бетонные и железобетонные конструкции, исследования, деформативность.

Согласно данным различных экспертов, наибольшее значение имеют бетонные и железобетонные конструкции, так как многие строительные элементы (балки, фермы, плиты, панели) изготовлены из бетона и железобетона, являющихся наиболее универсальными и экономически выгодными материалами. Поэтому проектированию, изготовлению и эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций посвящено наибольшее число исследований. В железобетонных (как и, естественно, в бетонных) конструкциях наименее прочным материалом является бетон. Так как бетон плохо сопротивляется растягивающим напряжениям и положительным линейным деформациям, т.е. по определению является хрупким материалом, то его прочностные и деформативные характеристики чаще всего определяются при помощи метода испытаний на сжатие. Однако этому методу присущ ряд недостатков, основным из которых можно считать наличие сил трения на контактных поверхностях «образец – плита испытательной машины». Этот недостаток, как было установлено различными исследователями, оказывает существенное влияние на количественные значения характеристик прочности, так как ставит под вопрос соответствие условий испытания условиям работы бетона в конструкции. В настоящее время этой проблеме, на наш взгляд, не уделяется достаточного внимания, хотя указанный фактор, безусловно, играет значимую роль. Рассмотрению данного вопроса и посвящена статья.

Для подробного изучения проблемы нужно в первую очередь рассмотреть руководящие и нормативные документы, поскольку в практике проектирования и эксплуатации следует опираться в основном на них. Стандартом [1] предусмотрены контрольные проверки для трех видов нормируемой прочности:

- прочность в проектном возрасте;
- отпускная и передаточная прочность (для ненапрягаемых и напрягаемых железобетонных элементов и конструкций);

прочность в так называемом промежуточном возрасте (при снятии несущей опалубки, предварительном нагружении конструкций).

По каждому из обусловленных видов нормируемой прочности выполняют контрольные испытания по следующим вариантам:

1) расчет характеристик однородности бетона по 30 результатам испытаний на прочность с использованием экспериментальных данных по предыдущим партиям образцов;

2) расчет характеристик прочности бетона по 15 результатам испытаний на прочность с использованием экспериментальных данных по предыдущим партиям образцов;

3) расчет характеристик однородности бетона по прочности с использованием результатов неразрушающего контроля прочности в одной партии продукции;

4) без определения характеристик прочности бетона, когда не имеется возможности использовать первый или второй вариант испытаний.

Конкретные типоразмеры конструкций и элементов для выбора вариантов испытаний приведены в соответствующих нормативных документах.

В качестве критериев оценки однородности бетона по прочности рекомендовано вычислять коэффициенты вариации следующих видов:

средний коэффициент вариации ( $V_m$ ) при контроле по первому варианту;

скользящий коэффициент вариации ( $V_c$ ) при контроле по второму варианту;

текущий коэффициент вариации ( $V_T$ ) при контроле по третьему варианту.

В любом случае коэффициент вариации определяют по формуле

$$\bar{V}_m = (S_m / R_m) * 100,$$

где  $R_m$  – фактическая прочность бетона в партии, МПа, рассчитываемая по уравнению

$$R_m = \sum R_i / n,$$

где  $R_i$  – единичные значения прочности бетона, определяемые согласно [2];

$n$  – общее число единичных значений прочности бетона;

Величину  $S_m$  (среднеквадратическое отклонение прочности бетона в партии, МПа) находят из выражения

$$S_m = \sqrt{\sum (R_i - R_m)^2 / n - 1}.$$

По значению коэффициента вариации рекомендовано рассчитывать число образцов, которое используют при определении проектных значений классов бетона по прочности на сжатие [2] (табл. 1).

Таблица 1

Число образцов в серии

Внутрисерийный коэффициент вариации $V_m$ , %	5 и менее	Более 5 и до 8 включительно	Более 8
Требуемое число образцов в серии, шт., не менее	2	3–4	6

Если внутрисерийный коэффициент вариации по прочности на сжатие бетона достигает 8 %, необходимо провести внеочередную аттестацию испытательной лаборатории. Так как однородность состава бетонной смеси существенно влияет на прочностные характеристики получаемого материала, то, во-первых, нормативные

требования устанавливаются для смеси одного номинального состава, а во-вторых, формование образцов следует производить за один производственный цикл, продолжительность которого составляет не менее одной смены для сборных и не менее суток для монолитных конструкций.

Объединение образцов бетона одного и того же класса по прочности на сжатие в одну испытательную партию допускается в следующих случаях:

1) наибольший коэффициент вариации по прочности бетона объединительной партии не превышает 13 %;

2) отклонение между максимальным и минимальным значениями вариации объединительной партии не превышает 2 %;

3) крупность заполнителя в объединительной партии отличается не более чем в два раза;

4) расход цемента в различных партиях варьируется не более чем на 10 % от среднего арифметического значения.

Серию контрольных образцов при определении прочности бетона в сборных конструкциях рекомендуется изготавливать не менее чем из двух проб, отбираемых от одной партии в неделю, при классах бетонов не выше В30 или четырех проб, отбираемых от двух партий в неделю, при классах прочности бетонов на сжатие В35 и выше.

Следует отметить также требования к условиям твердения бетонных образцов для испытаний на сжатие. Образцы должны твердеть в одинаковых с конструкциями условиях до момента определения отпускной или передаточной прочности. Для определения прочности образцов в проектном состоянии их твердение должно происходить в нормальных условиях (при температуре  $20 \pm 5$  °С и относительной влажности  $95 \pm 5$  %). При производстве монолитных бетонных конструкций контрольные образцы следует изготавливать на строительной площадке в условиях, установленных проектом производства работ или технологическим регламентом на производство.

Особо следует отметить испытания по определению прочности бетонных образцов неразрушающими методами. Согласно стандарту [3], установлены методы определения механической прочности на сжатие для бетонов с использованием эффекта упругого отскока, ударного импульса, пластической остаточной деформации и других способов неразрушающего контроля. Эти методы применяют для определения механических характеристик прочности в проектном возрасте бетона, а также при обследовании конструкций.

Вышеперечисленные методы основаны на некоторых косвенных характеристиках прочности бетона. Метод упругого отскока основан на эффекте зависимости прочности бетона от величины упругого отскока удаляемого бойка от поверхности испытываемой конструкции. В методе ударного импульса используется связь прочности бетона с величиной энергии удара. В методе классической деформации используется зависимость величины пластического отпечатка на поверхности бетонной конструкции от геометрических параметров отпечатка.

Существуют и другие методы неразрушающего контроля, основанные на более сложных физических эффектах (например, метод ультразвукового контроля). При применении всех перечисленных косвенных методов необходимо предварительно получить так называемые градуировочные зависимости. Следует учитывать, что их получают экспериментальным путем с использованием результатов по прочности на сжатие бетонов различных классов, что отражено в руководящих и нормативных

материалах. В частности, в ГОСТ 22690-2015 рекомендуется выбирать метод испытания с использованием данных, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

## Характеристики прочности бетона

Метод испытания	Предельное значение, МПа
Упругий отскок	5–50
Ударный импульс	5–150
Пластическая деформация	5–50

При определении прочности тяжелых бетонов (класса В60 и выше) следует учитывать особые условия, установленные стандартом [4]. Существуют и особые правила для построения и применения градуировочных зависимостей. Термодинамические условия (температура, давление) также должны быть соответствующими как при построении градуировочных зависимостей, так и непосредственно при испытании на прочность бетона в конструкции.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. М.: Стандартинформ. 2013. 24 с.
2. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ. 2013. 30 с.
3. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. М.: Стандартинформ. 2010. 38 с.
4. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. М.: Стандартинформ. 2014. 22 с.
5. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. М.: Стандартинформ. 2014. 42 с.
6. Александров В.М., Чеванов М.Н. Введение в механику контактных взаимодействий. М.: Наука. 2007. 114 с.
7. Айзикович С.М. Контактные задачи теории упругости для неоднородных сред. М.: Физматгиз. 2006. 240 с.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*МАКЛАКОВА Светлана Николаевна* – старший преподаватель кафедры строительных конструкций, ФГБОУ ВО «Костромская ГСХА», 156530, Костромская область, Костромской район, пос. Караваево, Караваевская с/а, Учебный городок, д. 34. E-mail: aviapetra@mail.ru

*ГАЛКИНА Марина Александровна* – старший преподаватель кафедры строительных конструкций, ФГБОУ ВО «Костромская ГСХА», 156530, Костромская область, Костромской район, пос. Караваево, Караваевская с/а, Учебный городок, д. 34. E-mail: aviapetra@mail.ru

*БРОВКИН Виктор Николаевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Костромская ГСХА», 156530, Костромская область, Костромской район, пос. Караваево, Караваевская с/а, Учебный городок, д. 34.



**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Маклакова С.Н., Галкина М.А., Бровкин В.Н. Анализ методов испытаний образцов строительных материалов из бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 2 (14). С. 13–17.

УДК 624.21.033.6:624.131.2

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА  
АЭРОДРОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

*В.И. Трофимов, В.И. Гультяев*

*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Трофимов В.И., Гультяев В.И., 2022

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности возведения аэродромного комплекса в районах Крайнего Севера, когда необходимо учитывать суровые природно-климатические условия строительства, вечномерзлое состояние грунтов и высокую себестоимость работ. Показано, что кроме учета особенностей грунтовых условий, влияющих на устойчивость дорожного и аэродромного полотна, необходимо совершенствовать конструкцию последнего, особенно при использовании высокольдистых грунтов, повсеместно распространенных в этих районах. Затрагиваются вопросы совершенствования технологии строительства аэродромного комплекса в сложных инженерно-геологических условиях Арктической зоны. Предложена новая оригинальная конструкция надземного аэродромного комплекса повышенной устойчивости, позволяющая исключить сложную технологическую операцию по отсыпке насыпи. Оригинальный проект быстровозводимого аэродромного комплекса для Арктической зоны, разработанный в ТвГТУ, оценивался на XXIII Московском международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед 2020», где получил серебряную медаль.

**Ключевые слова:** аэродромный комплекс, высокольдистый грунт, строительство, винтовые микростаи.

В настоящее время, когда мировые запасы добываемого энергетического сырья сокращаются, крупные корпорации многих стран, таких как США, Канада, Великобритания, Китай, Япония, все чаще обращают внимание на Арктику, где обнаружены крупнейшие месторождения нефти, газа и другого стратегического сырья.

Учитывая стратегическую важность для нашей страны решения вопроса скорейшего вовлечения арктических месторождений в народно-хозяйственную деятельность и обеспечения их надежной защиты, Правительство РФ приняло специальную государственную программу «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации».

Эффективное обустройство северных территорий напрямую связано с решением вопроса ускоренного строительства широкой сети дорог и аэродромов. При этом

ускоренное освоение уникальных и стратегически важных для нашей страны месторождений, расположенных в удаленных районах Арктики, а также надежная их защита невозможны без применения новых технологических и конструктивных решений при строительстве транспортных сооружений.

Можно выделить три основные составляющие, негативно влияющие на эффективность дорожного и аэродромного строительства в арктических зонах:

широкое распространение структурно-неустойчивых при оттаивании высокольдистых тонкодисперсных грунтов в условиях отсутствия в достаточном количестве кондиционных грунтовых материалов;

использование технологий и технических решений, не отвечающих в полной мере условиям и современным требованиям строительства на таких сложных грунтах;

сезонность выполнения строительных работ и высокую их стоимость [1].

Решение проблемы повышения эффективности строительства аэродромов на высокольдистых тонкодисперсных грунтах в Арктической зоне было предложено осуществлять путем создания высокотехнологичного аэродромного комплекса, что обеспечивается применением новых эффективных технических решений при выполнении работ на этапах его строительства и функционирования.

Одним из важнейших элементов аэродромного комплекса является взлетно-посадочная полоса (ВПП).

Известна ВПП аэродрома, содержащая естественное грунтовое основание, основание из цементобетона и полосу расширения на железобетонных сваях (патент RU № 2477767). Основным недостатком такой ВПП является сложная конструкция ее искусственного основания с использованием железобетонных свай, что приводит к повышению трудоемкости работ и удорожанию строительства, а также к снижению надежности работы ВПП при воздействии сил морозного пучения. Тем самым снижается эффективность работы ВПП аэродрома в целом.

Существующие на сегодня технические решения по планировке аэропорта включают комплекс зданий и сооружений:

аэродром с ВПП, предназначенный для обеспечения взлетов, посадки, руления, стоянки и обслуживания воздушных судов;

служебно-техническую территорию, предназначенную для расположения зданий и сооружений обслуживания пассажирских, грузовых и почтовых перевозок, технического обслуживания воздушных судов, объектов заправки;

здания управления полетами с антенным полем;

производственные здания и сооружения вспомогательного назначения, устраиваемые на грунтовом основании [2].

Недостатком рассмотренной конструктивно-планировочной схемы аэропорта как комплекса зданий и сооружений является плохая транспортная связь между основными объектами: ВПП, ангарами, основными и вспомогательными зданиями, что особенно важно в случае подготовки самолетов при неблагоприятных погодных условиях.

При обосновании нового технического решения аэродромного комплекса нами была поставлена задача по разработке более эффективного его конструктивно-планировочного решения, устраиваемого на мерзлых грунтах в Арктической зоне. Целью предлагаемого технического решения являлись разработка и создание наземного быстровозводимого аэродромного комплекса, обладающего повышенной надежностью при работе в суровых природно-климатических условиях, позволяющего исключить

создание искусственного грунтового основания, а также отличающегося пониженной трудоемкостью при выполнении ремонтных работ и ликвидации, например, снежных заносов и меньшими эксплуатационными расходами за счет увеличения срока работы между капитальными ремонтами ВПП и других сооружений аэродромного комплекса.

Для этого за основу была принята технология свайно-эстакадного дорожного строительства на слабых грунтах, опробованная в Томской области [3].

Разработанный нами высокотехнологичный аэродромный комплекс снабжен единой надземной транспортной системой, которая связывает воедино все сооружения, включая новую конструкцию ВПП. При этом предлагаются к использованию новые технические решения по ускоренному возведению ВПП, ангарного комплекса, вспомогательных сооружений и обеспечению их устойчивой работы.

Это комплексное техническое предложение эффективно в случае отсутствия в достаточном количестве кондиционных грунтовых материалов, используемых для отсыпки дорожных, аэродромных насыпей и других площадок при широком распространении некондиционных тонкодисперсных высокольдистых грунтов, с учетом возможного залегания в основании насыпей пластично-мерзлых грунтов и многожильных льдов (т.е. при невозможности обеспечения надежного функционирования аэродромного комплекса в сложных грунтовых условиях).

Решение проблемы базируется на четырех новых концепциях, позволяющих предусмотреть возможность:

- исключения или полного отказа от затратных технологических операций по устройству искусственного грунтового основания под различные аэродромные сооружения – ВПП, ангары, радары, склады и др.;

- использования эффективной механизированной и автоматизированной системы доставки (самолетов, боеприпасов, запасных частей и др.) в соответствующие зоны аэродромного комплекса;

- применения сборочной технологии возведения аэродромного комплекса из отдельных готовых конструкций и узлов;

- постоянного поддержания ВПП и остальных сооружений в устойчивом состоянии в автоматическом режиме.

При этом высокая технологичность строительства аэродромного комплекса обеспечивается применением новой технологии ускоренного его возведения за счет исключения сложной и дорогой технологической операции – создания искусственного грунтового основания, а также использования готовых модульных конструкций, что, соответственно, снижает стоимость строительства. Данная технология реализуется путем использования специальных винтовых микросвай (а.с. 777573) под все сооружения аэродромного комплекса, включая ВПП, и применения сборочной технологии при надземном возведении всех сооружений из отдельных конструкций (патенты 2675133, 2669250).

В ТвГТУ были выполнены многочисленные испытания на мерзлых органо-минеральных грунтах по оценке несущей способности винто-лопастных зондов, выступающих в качестве моделей винтовых микросвай (рис. 1) [4].

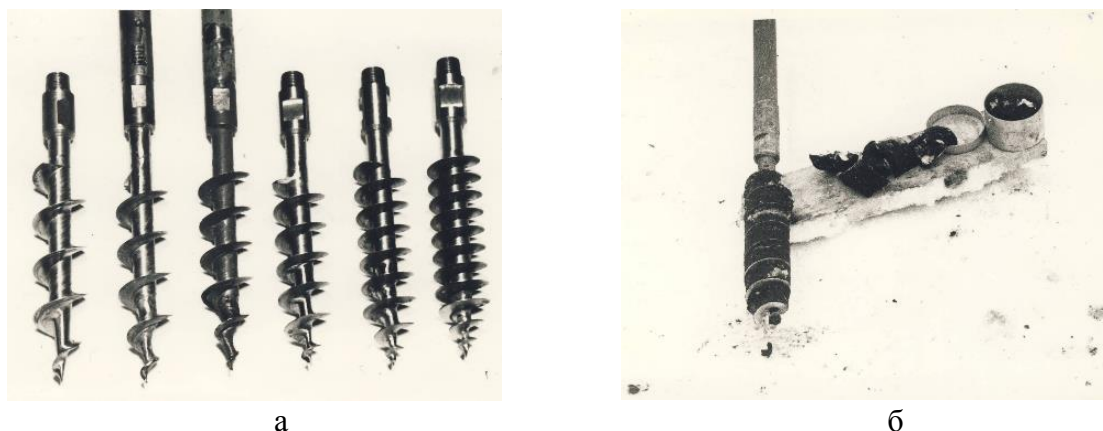


Рис. 1. Цилиндрические винтовые микросваи: различного типоразмера (а); после испытания на несущую способность (б)

По результатам испытаний винто-лопастных зондов различной формы и геометрии были выбраны оптимальные размеры винтовых микросвай: длина 100–120 мм (без учета заходной части), шаг 20–24 мм, диаметр 36 мм. Одна такая винтовая микросвая, завинченная, например, в мерзлый торфяной грунт с температурой от  $-0,5$  до  $-1,5$  °С, обладает высокой – порядка 14 000 Н – несущей способностью на выдергивающую нагрузку. При этом погружение винтовых микросвай в мерзлые грунты на глубину до 2 м возможно без проходки лидирующей скважины.

Было также выявлено дополнительное повышение эффективности использования винтовых микросвай за счет снижения энергоемкости погружения в случае их применения на мерзлых грунтах с повышенной льдистостью, чем и характеризуется Арктическая зона РФ – широким распространением высокольдистых грунтов.

Как следует из таблицы, составленной по результатам выполненных нами сравнительных испытаний по оценке усилий погружения зондовых наконечников в замороженный торфяной покров (п. Новая Орша, Тверская обл.) различными способами, наименее трудоемким процессом погружения зондовых наконечников в мерзлый торфяной грунт оказывается завинчивание [4]. Усилие, которое затрачивается при погружении зонда путем его завинчивания, на один-два порядка меньше, чем при задавливании, т.е. операция завинчивания, как менее энергоемкая, значительно эффективнее, чем операция задавливания. Кроме того, в случае использования операции завинчивания отпадает необходимость в анкеровке задавливающих установок, что повышает эффективность применения винтовых зондов (анкеров).

Затрачиваемые усилия для различных способов погружения зондов в мерзлый торфяной грунт ( $T = -0,5$  °С)

Усилие на рукоятке при завинчивании цилиндрического винта ( $t = 24$ мм, $h = 100$ мм)	Усилие при задавливании крыльчатки ( $\Phi = 36$ мм, $h = 50$ мм) $P, N$	Усилие на рукоятке при завинчивании конуса ( $S = 2$ см <sup>2</sup> , $\alpha = 30^\circ$ )	Усилие при задавливании конуса ( $S = 2$ см <sup>2</sup> , $\alpha = 30^\circ$ ) $P, N$

$P, N$		$P, N$	
70–100	8 000–9 000	40–50	5 000–6 000

Учитывая такую высокую несущую способность винтовых микросвай при их небольших размерах, а также их высокую технологичность, а именно возможность вручную производить погружение – завинчивание в мерзлый грунт, было предложено использовать их в качестве кустовых опор нефтяных резервуаров и сооружений аэродромного комплекса [5].

Можно приближенно оценить несущую способность кустовой опоры на винтовых микросваях. В качестве наглядного примера рассмотрим создание посадочной площадки для тяжелого вертолета МИ-6 с максимальной взлетной массой до 45 т. Кустовая опора, например, из пяти винтовых микросвай с учетом выполненных ранее испытаний будет иметь несущую способность 7 тн. Для безопасной посадки такого вертолета будет достаточно семи кустовых опор из винтовых микросвай.

Использование винтовых микросвай на мерзлых грунтах в кустовом исполнении позволит производить более быстрый монтаж вертолетных площадок, ВПП, площадок под радарные станции и других сооружений.

Технология строительства и функционирования высокотехнологичного аэродромного комплекса на основе предложенных технических решений может быть реализована следующим образом.

Если работы выполняются зимой, то сначала площадка 21 (рис. 2б) расчищается от снега, после чего под все сооружения аэродромного комплекса завинчиваются микросваи 9 в мерзлое основание с формированием из них кустов. После этого на оголовках микросвай 9 на заданной высоте устраивают ростверки с образованием вентилируемого зазора.

Затем устанавливают и закрепляют на оголовках свай рельсовые пути 10–12 с транспортными тележками 13 и поворотными мостами 14, 15, монтируют на сваях ангарные боксы 2, жилой комплекс 7, перегрузочную площадку 8, радар 3, дизель-генератор 5, модуль очистки бытовых отходов 6 и другие вспомогательные сооружения (рис. 2а).

Функционирование аэродромного комплекса начинается с доставки пилотов по рельсовому пути 11 на транспортной тележке из жилого комплекса к ангарным боксам, в которых находятся самолеты 19 с самоходными тележками (рис. 2б). Снаряжение для самолетов, а также вновь прибывшие пилоты и обслуживающий персонал перемещаются к ангарным боксам или жилому комплексу с другой стороны рельсового пути 11, соединенного с площадкой для дирижабля и вертолета 4 через перегрузочную площадку. Для дублирования основной транспортной системы проложена грунтовая дорога 26 (рис. 2а).

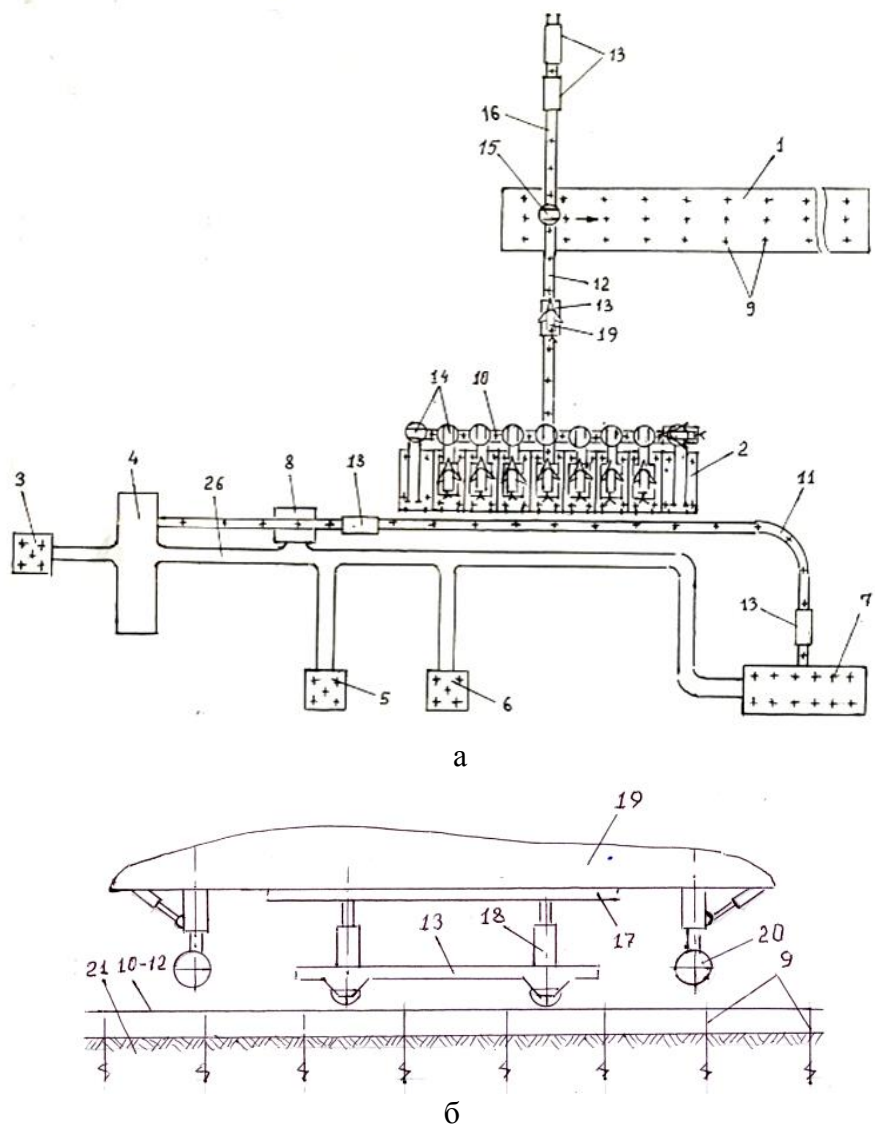


Рис. 2. Схемы быстровозводимого аэродромного комплекса:  
 конструктивно-планировочная (а); транспортировки самолета (б);  
 конструктивно-планировочная с двухсторонним расположением ангарных боксов (в);  
 конструктивно-планировочная с совмещением ВПП и ангарных боксов (г)

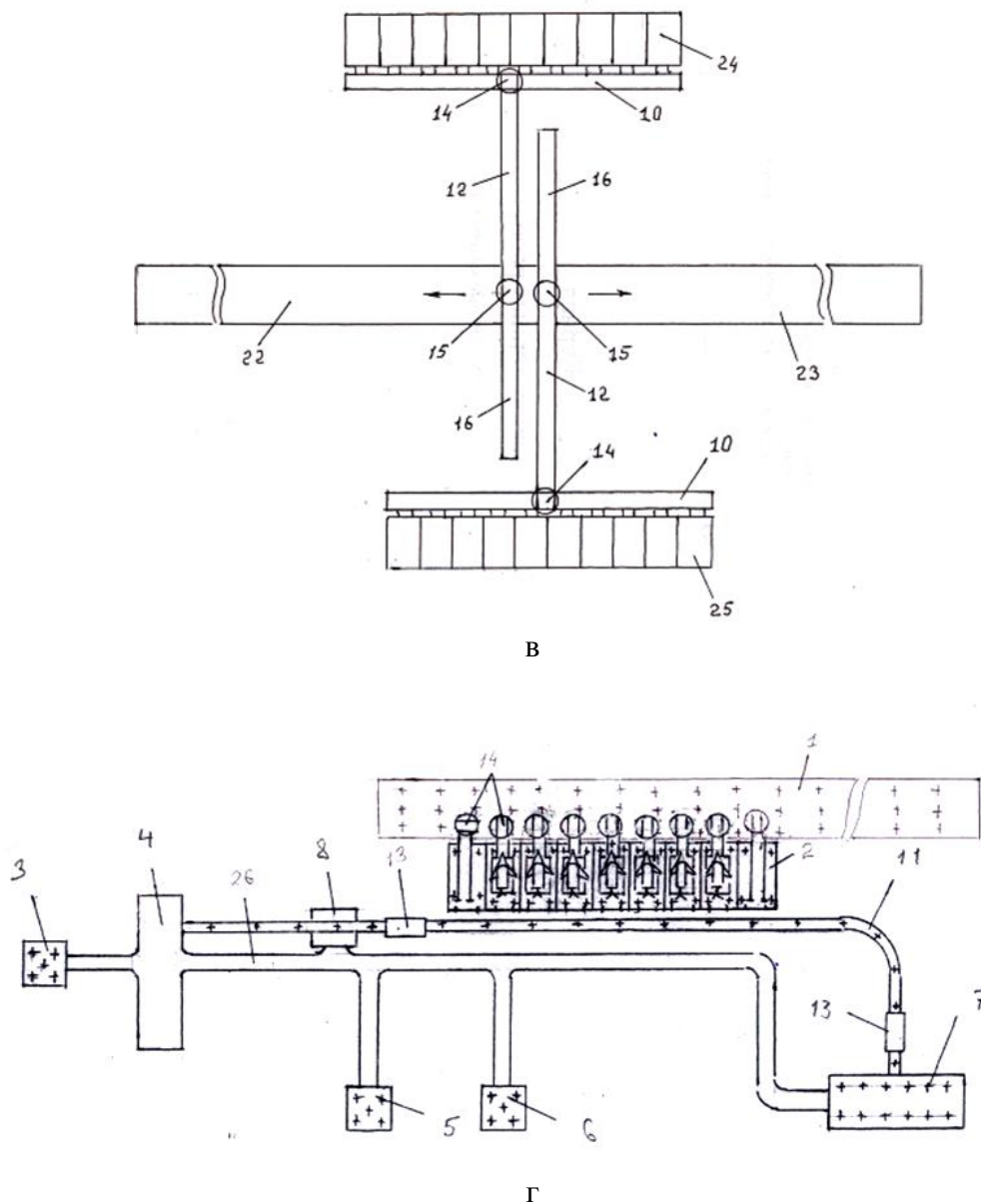


Рис. 2. Продолжение

Снаряженные и заправленные самолеты с пилотами, находящиеся в боксах, закрепляются в поднятом состоянии на самоходных тележках, для чего приводится в движение подъемник 17 гидроцилиндрами 18, тем самым приподнимая самолет с образованием зазора между шасси 20 и рельсовым путем (см. рис. 2б).

После этого самоходная тележка с самолетом выезжает из бокса 2 и, попадая на поворотный мост 14, перемещается по рельсовому пути 10 до поворотного моста, расположенного на рельсовом пути 12. Затем самоходная тележка с самолетом движется по рельсовому пути 12 до центрального поворотного моста 15, установленного на ВПП 1. Поворотный мост 15 с самолетом поворачивается на  $90^\circ$  в сторону старта, после чего

самолет опускается с касанием шасси ВПП и выруливает на стартовую позицию, а пустая самоходная тележка перемещается по рельсовому пути 16 в зону накопления (ожидания) пустых тележек (см. рис. 2а).

После возвращения самолета с задания последний наезжает на самоходную тележку, которая подается из зоны накопления (ожидания) на центральный поворотный мост 15, и все операции выполняются в обратном порядке.

В этом случае самолеты могут стартовать непосредственно друг за другом. В случае же соединения ангаров с ВПП в ее середине появляется возможность дополнительно ускорить процесс отправки самолетов. При этом ВПП возводится из двух частей – 22 и 23 (рис. 2в). В этом случае стартовать одновременно могут сразу два самолета в разные стороны ВПП.

В случае необходимости для ускорения процесса старта и возврата группы самолетов, а также с точки зрения снижения стоимости строительства целесообразно использовать схему аэродромного комплекса с совмещенными ВПП 1 и ангарными боксами 2 (рис. 2г). Так как каждый ангарный бокс 2 соединен своим рельсовым путем с ВПП 1 и заканчивается поворотным мостом 14, установленным на ВПП 1, то появляется возможность отправки и приема одновременно нескольких самолетов потоком. В этом случае стартовать одновременно могут сразу несколько самолетов.

Эффективность работы аэродромного комплекса может быть существенно повышена, для чего комплекс выполняется из двух линеек ангарных боксов – 24 и 25, расположенных напротив друг друга с разных сторон ВПП и соединенных с ней в ее начале отдельным надземным рельсовым транспортом (рис. 2в).

Высокая технологичность функционирования аэродромного комплекса обеспечивается использованием механизированной и автоматизированной систем доставки (самолетов, боеприпасов, запасных частей и др.) в соответствующие зоны аэродромного комплекса надземным рельсовым транспортом, а также возможностью в автоматическом режиме постоянно поддерживать ВПП и сооружения в устойчивом состоянии за счет оригинальной управляемой системы термостабилизации грунта на основе электрических микрохолодильников Пельтье и датчиков температуры, установленных на винтовых микросваях, с возможностью автоматического поддержания температурно-реологического состояния природного основания по заданной программе под всеми сооружениями, включая и ВПП.

Данный оригинальный комплекс технических решений обеспечивает:

**1. На этапе строительства:**

- 1) значительное сокращение сроков и стоимости строительства аэродромного комплекса;
- 2) повышение устойчивости, т.е. надежности работы сооружений, включая и ВПП;
- 3) возможность использования технологии быстровозводимых конструкций ВПП в суровых природно-климатических условиях на основе отказа от чисто строительной технологии и перехода к использованию более эффективной технологии надземной сборки готовых сопрягаемых конструкций;
- 4) повышение технологичности и экологичности строительства аэродромного комплекса.



**2. На этапе функционирования:**

1) постоянную возможность доставки самолетов (боеприпасов, запасных частей и др.) в соответствующие зоны аэродромного комплекса на основе использования оригинальной механизированной и автоматизированной систем;

2) возможность более быстрого и качественного выполнения работ по обслуживанию ВПП;

3) возможность постоянного поддержания в автоматическом режиме безопасного температурно-реологического состояния грунта вокруг винтовых микросвай и работы конструкций сооружений в устойчивом состоянии.

Предложенный комплекс технических решений по повышению эффективности аэродромного строительства на мерзлых грунтах позволяет значительно расширить область их применения при строительстве не только высокотехнологичных аэродромов, но и других важных сооружений в арктических зонах.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Смирнов А.В., Жигadlo А.П., Иванов Г.В., Робустов В.В. Строительство и расширение сетей дорог с твердым покрытием – важное направление успешного освоения Арктики // *Нефть и Газ Сибири*. 2017. № 1 (26). URL: <http://sib-ngs.ru/journals/article/554> (дата обращения: 15.01.2022).
2. Ромашков В.М. Исследование технологических процессов и планировочных решений аэродромов сельскохозяйственной авиации // *Труды НИИ «Аэропроект»: Технология и планировка аэропортов*. Вып. 10. М.: Аэропроект, 1972.
3. Картофелев Е.О., Акимов Б.Г., Кухаренко С.А. Применение свайно-эстакадных дорожных конструкций на слабых основаниях в условиях Томской области // *Вестник ТГАСУ*. 2010. № 4. С. 172–180.
4. Трофимов В.И., Кондратьев В.Г. Геотехнология и строительство на мерзлых органоминеральных грунтах. Тверь: ТвГТУ. 2014. 268 с.
5. Трофимов В.И. Высокоустойчивая конструкция быстровозводимого фундамента нефтяного резервуара для арктических зон // *Научный Вестник Арктики*. № 9. 2020. С. 28–31.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*ТРОФИМОВ Валерий Иванович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vitrofa@mail.ru

*ГУЛЬТЯЕВ Вадим Иванович* – доктор технических наук, заведующий кафедрой автомобильных дорог, оснований и фундаментов, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vig0@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Трофимов В.И., Гультаев В.И. Повышение эффективности строительства аэродромных комплексов в условиях Крайнего Севера // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 17–25.

УДК 692.23

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МНОГОСЛОЙНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ****С.В. Черемных***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Черемных С.В., 2022

**Аннотация.** Рассматривается влияние теплотехнических характеристик ограждающей конструкции на санитарно-гигиенические условия и условия энергоэффективности зданий и сооружений. В качестве ограждающей конструкции принимается наружная стена производственного здания, расположенного в г. Братске. Определение расчетных параметров наружной среды для района строительства выполняется согласно нормативной документации с учетом нормативных санитарно-гигиенических показателей микроклимата региона, внутренней среды объекта и режима эксплуатации здания и его помещений. Особое внимание уделяется определению требуемого термического сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, при вычислении которого рассчитывается толщина слоя многослойной неоднородной конструкции (утеплителя). Расчет выполняется с целью проверки соответствия нормируемых условий по превышению расчетного сопротивления теплопередачи над требуемым сопротивлением.

**Ключевые слова:** ограждающая конструкция, утеплитель, теплопроводность, энергоэффективность, теплоотдача, климатология.

**ВВЕДЕНИЕ**

От теплотехнических качеств наружных ограждений зданий зависит ряд важных факторов, таких как благоприятный микроклимат внутренней среды зданий, обеспечение температуры и влажности воздуха в помещении не ниже нормативных санитарно-гигиенических и строительно-технических требований, а также расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий за отопительный период [1–4].

В свою очередь, температура внутренней поверхности ограждения, обеспечивающая отсутствие конденсата, а также сверхнормативной асимметрии температуры, воздействующей на человека внутри помещения и влажностный режим конструктивного решения ограждения, влияющий на его теплозащитные качества, также влияет на продолжительность срока эксплуатации ограждающих конструкций и здания в целом [5].

Обеспечение нормативных параметров микроклимата внутренней среды зданий обеспечивается за счет соответствующей толщины и эффективности ограждающей конструкции, мощности систем отопления, вентиляции или кондиционирования [6].

Для расчета ограждающих конструкций разработаны методики теплотехнического расчета, основанные на том, что оптимальная толщина и эффективность конструкции определяются исходя из климатических показателей района строительства, нормативных санитарно-гигиенических условий эксплуатации зданий и помещений, условий

энергосбережения и энергоэффективности зданий и экономической целесообразности и сроков окупаемости затрат на строительство зданий [6].

Физический смысл методики теплотехнического расчета заключается в определении минимального достаточного значения сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции. При этом расчетное значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции должно быть не меньше величины, требуемой по санитарно-гигиеническим и строительно-техническим показателям [7].

В представленной статье в качестве примера рассматривается расчет многослойной ограждающей конструкции согласно СП 50.13330.2012 [8].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В простейшем виде ограждающая конструкция здания по своей расчетной схеме представляет собой плоскую конструкцию (стенку), ограниченную параллельными поверхностями. Она разделяет воздушные среды с разными температурами [9].

Для определения требуемой толщины утеплителя и вычисления приведенного сопротивления теплопередаче многослойной ограждающей конструкции производственного здания в качестве исходных данных предположим, что конструкция выполнена согласно рисунку. Цифрами обозначены слои:

- 1 – кладка из керамического кирпича толщиной  $\delta = 120$  мм;
- 2 – пенополиуретан, толщину которого примем за неизвестную;
- 3 – кладка из сплошного глиняного кирпича толщиной  $\delta = 380$  мм;
- 4 – штукатурка (цементно-песчаный раствор) толщиной  $\delta = 20$  мм.

Расчетные параметры наружной среды, необходимые для расчета сопротивления теплопередаче, приведены в СП 50.13330.2012 и определяются по СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» [8]. К ним относятся:

средняя температура воздуха периода со среднесуточной температурой воздуха меньше  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , определяется по табл. 1 СП 131.13330.2012:  $t_{\text{ht}} = -8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

продолжительность периода со среднесуточной температурой воздуха меньше  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , определяется по табл. 1 СП 131.13330.2012:  $z_{\text{ht}} = 249$  сут;

средняя температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92, определяется по табл. 1 СП 131.13330.2012:  $t_{\text{ext}} = -39\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для определения режима эксплуатации помещения с учетом нормативных санитарно-гигиенических показателей микроклимата его внутренней среды определим параметры воздушной среды для обеспечения минимально допустимых условий комфортности внутри жилого помещения в холодный период года (согласно СП 23-101-2004):

температура воздуха  $t_{\text{int}} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

относительная влажность воздуха  $j_{\text{int}} = 40\text{ }%$ .

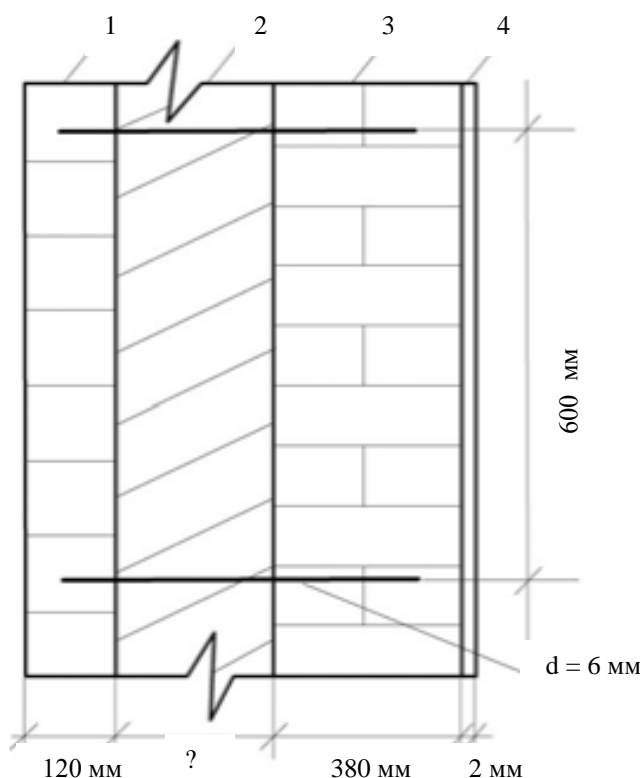


Схема ограждающей конструкции

В зависимости от относительной влажности и температуры внутреннего воздуха режим эксплуатации помещения в холодный период года определяется по табл. 1 СП 50.13330.2012 как сухой.

Условия эксплуатации ограждающей конструкции определяются с учетом климатических показателей района строительства и режима эксплуатации зданий и помещений.

Зона влажности района строительства по климатическим показателям наружной среды согласно прил. «В» к СП 50.13330.2012 определяется как сухая.

Условия эксплуатации ограждающей конструкции определяются по табл. 2 СП 50.13330.2012. Для сухого режима эксплуатации помещения и сухой зоны влажности условия эксплуатации ограждающей конструкции соответствуют параметру «А».

Определяем градусы-сутки отопительного периода, °С·сут [8]:

$$D_d = (t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}};$$

$$D_d = (18 + 8,6) \cdot 249 = 66\,23,4.$$

Находим нормированное сопротивление теплопередаче [8]

$$R_{\text{req}} = a \cdot D_d + b,$$

где  $a = 0,000\,35$ ;

$b = 1,4$  согласно примечанию к табл. 4 СП 50.13330.2012, т.е.

$$R_{\text{req}} = 0,0002 \cdot 623,4 + 1 = 2,32 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Находим требуемое условное сопротивление теплопередаче [8]

$$R_0^{\text{усл. тр}} = \frac{R_{\text{req}}}{r},$$

где  $R_0^{\text{усл. тр}}$  – требуемое сопротивление теплопередаче конструкции без учета теплотехнической неоднородности ограждающей конструкции;

$r$  – коэффициент теплотехнической неоднородности, «глади», глухой части стены. В рассматриваемом варианте принимаем  $r = 0,87$ . Получим

$$R_0^{\text{усл. тр}} = \frac{2,32}{0,87} = 2,67 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

В общем случае утеплители выбирают по критериям теплопроводности и пожарной безопасности, но этого недостаточно. Нужно обязательно обращать внимание на такие показатели, как плотность, гибкость и упругость плит. Дело в том, что наибольший эффект от применения утеплителей достигается только в том случае, когда они плотно прилегают к утепляемой поверхности и друг к другу [10–18]. Между плитами утеплителя и стеной не должно оставаться пустот и зазоров. В данном случае был использован пенополиуретан на синтетическом связующем, требуемое значение сопротивления теплопередаче которого находим согласно п. 8 СП 50.13330.2012 [8]:

$$R_{\text{ут}}^{\text{тр}} = R_0^{\text{усл. тр}} - (R_{\text{в}} + \sum R_{\text{м, изв}} + R_{\text{н}}),$$

где  $R_{\text{в}} = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}}$  – коэффициент сопротивления теплоотдаче внутренней поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по табл. 7 СП 50.13330.2012 ( $\alpha_{\text{int}} = 0,87 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ );

$R_{\text{н}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ext}}}$  – коэффициент сопротивления теплоотдаче наружной поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по табл. 8 СП 23-101-2004 для наружных стен, покрытий, перекрытий над проездами  $\alpha_{\text{ext}} = 23 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ ;

$\sum R_{\text{м, изв}}$  – сумма сопротивления теплопередаче известных слоев ограждающей конструкции [8]:

$$\sum R_{\text{м, изв}} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n},$$

где  $\delta_1$  – толщина 1-го известного слоя ограждающей конструкции;

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности 1-го известного слоя ограждающей конструкции;

$n$  – количество слоев многослойной ограждающей конструкции.

Получим:

$$\sum R_{\text{м, изв}} = \frac{0,12}{0,58} + \frac{0,38}{0,70} + \frac{0,02}{0,76} = 0,78 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

$$R_{\text{yt}}^{\text{тп}} = 2,67 - \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,12}{0,58} + \frac{0,38}{0,70} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{1}{23} \right) = 1,74 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

При выполнении расчетов толщины утеплителя необходимо контролировать значения показателей приведенного сопротивления теплопередаче, которое не должно быть ниже нормируемого значения. Расчетную толщину утеплителя находим по формуле [8]

$$\delta_{\text{yt}} = R_{\text{yt}}^{\text{тп}} \cdot \lambda_{\text{yt}}, \text{ т.е. } \delta_{\text{yt}} = 1,99 \cdot 0,05 = 0,087 \text{ м}.$$

Округлив полученный результат в большую сторону, фактическую толщину утеплителя из конструктивных соображений принимаем  $\delta_{\text{ym}}^{\phi} = 0,09 \text{ м}$ .

Для проверки полученного результата определим приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены по формулам [8]:

$$R_0^{\text{усл}} = R_{\text{в}} + \sum R_{\text{м, изв}} + R_{\text{н}};$$

$$R_0 = R_0^{\text{усл}} \cdot \tau;$$

$$R_0^{\text{усл}} = \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,12}{0,58} + \frac{0,09}{0,05} + \frac{0,38}{0,70} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{1}{23} \right) = 2,73 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

$$R_0 = 2,73 \cdot 0,87 = 2,37 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика теплотехнического расчета заключается в определении экономически целесообразного сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции. При этом сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции должно быть не меньше требуемого сопротивления теплопередаче.

Проверяем выполнение неравенства (достаточность сопротивления теплопередаче):

$$R_0 = 2,73 \geq R_{\text{req}} = 2,32 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

т.е. фактическое приведенное сопротивление теплопередаче не меньше требуемого.

Для установления расчетно-температурного перепада  $\Delta t_0$  (разница между температурами внутреннего воздуха и внутренней поверхности стены) определим расчетный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции в соответствии с п. 5.8 СП 50.13330.2012 по формуле [8]

$$\Delta t_0 = \frac{n \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}})}{R_0 \cdot \alpha_{\text{int}}},$$

где  $\Delta t_0$  – расчетная разница между температурами внутреннего воздуха и внутренней поверхности стены;

$n$  – коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждения по отношению к наружному воздуху, принимаемый по табл. 6 СП 50.13330.2012:  $n = 1$ ;

$t_{\text{int}}$  – температура внутреннего воздуха здания, принимаемая по минимальным значениям оптимальной температуры для жилого помещения по табл. 1 СП 23-101-2004:  $t_{\text{int}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$t_{\text{ext}}$  – температура наружного воздуха в холодный период года,  $^\circ\text{C}$ , принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92.

Согласно табл. 1 СП 131.13330.2012,  $t_{\text{ext}} = -39 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Получим

$$\Delta t_0 = \frac{1 \cdot (18 + 39)}{2,37 \cdot 8,7} = 2,81 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Проверяем выполнение условия  $\Delta t_0 \leq \Delta t_n$ , где  $\Delta t_n$  – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, принимаемый по табл. 5 СП 50.13330.2012:  $\Delta t_n = 3,20 \text{ }^\circ\text{C}$ .  $2,81 \text{ }^\circ\text{C} < 3,20 \text{ }^\circ\text{C}$  – условие выполняется.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные расчетные характеристики и основные значения применяемых материалов приведены ниже:

№ слоя	Материал	Плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Толщина $\delta$ , м	Коэффициент теплопроводности
1	Кладка из керамического кирпича	1 600	0,12	0,58
2	Пенополиуретан	80	0,09	0,05
3	Кладка из сплошного глиняного кирпича	1 800	0,38	0,70
4	Штукатурка (цементно-песчаный раствор)	1 800	0,02	0,76

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод о том, что принятая конструкция стены отвечает санитарно-гигиеническим и строительным требованиям к теплопередаче ограждающих конструкций по температурному перепаду.

Решенная задача имеет существенное значение для специалистов, занимающихся вопросами строительной теплотехники и строительной механики, а представленная методика по определению теплотехнических характеристик ограждающих конструкций может быть применена в современных программных комплексах.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сташевская Н.А., Минина А.П. Особенности теплотехнического расчета в современном домостроении // *Системные технологии*. 2017. № 2 (23). С. 47–50.
2. Высоцкий Д.В., Татьянников Д.А. Обзор изменений требований строительных норм тепловой защиты зданий // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2020. Т. 2. С. 76–83.
3. Матозимов Б.С., Кутуев М.Д., Супибекова А.К., Юсупов А.Н., Джунушев А.Д. Компьютерный анализ основных задач строительной теплотехники // *Наука и инновационные технологии*. 2016. № 1 (1). С. 261–264.
4. Короткова Л.И., Семиколенова Е.В. Теплопередача наружных ограждающих конструкций зданий с длительным сроком эксплуатации // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2020. Т. 11. № 2. С. 7–10.
5. Burova Z.A. Methods and devices for insulation materials heat-conducting determination // *SWorldJournal*. 2016. Т. j1104. № 11. С. 26–29.
6. Иванова Л.В. Развитие нормативных требований к тепловой защите зданий // *Архитектура и дизайн*. 2020. № 1. С. 33–44. DOI: 10.7256/2585-7789.2020.1.35796
7. Высоцкий Д.В., Татьянников Д.А. Сравнение вариантов утепления производственного здания при реконструкции // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2020. № 2 (38). С. 57–67. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.02.04
8. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М.: ОАО «НИЦ «Строительство». 2012. 96 с.
9. Заборова Д.Д., Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Теплотехническая работоспособность многослойной стеновой конструкции // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2017. Т. 23. № 1. С. 18–26.
10. Huang W., Chen T., Jiang Q., Song X., Zhu J., Yu W. Multi-mass synergetic coupling perforated bi-layer plate-type acoustic metamaterials for sound insulation // *International Journal of Modern Physics B*. 2020. Vol. 34. № 13. С. 2050136. DOI: 10.1142/S0217979220501362
11. Pasztory Z., Borcsok Z., Bazhelka I.K., Kanavalava A.A., Meleshko O.V. Thermal insulation panels from tree bark // *Proceedings of BSTU. Issue 1, Forestry, Nature Management, Processing of Renewable Resources*. 2021. № 1 (240), pp. 141–149.
12. Burova Z.A., Grischenko T.G. Modern standardization methods of insulation materials thermophysical properties measuring in Ukraine // *SWorldJournal*. 2016. Vol. j1110. № 11, pp. 14–17.
13. Kirpluks M., Ivdre A., Fridrihsone A., Cabulis U. Tall oil based rigid polyurethane foams thermal insulation filled with nanofibrillated cellulose // *Polimery/Polymers*. 2020. Vol. 65. № 10, pp. 719–727.
14. Koshlak H., Kaczan A. The investigation of thermophysical characteristics of porous insulation materials based on burshtyn tpp ash // *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2020. Т. 22. № 1, pp. 537–548.
15. Wang H., Cai Y., Wang X., Chiang P.C., Chen T.L., Li C., Wei S., Huang Q. Application of wall and insulation materials on green building: a review // *Sustainability*. 2018. Vol. 10. № 9, pp. 3331.



16. Gnanauthayan G., Rengasamy R.S., Kothari V. Heat insulation characteristics of multi-layer nonwovens // *Research Journal of Textile and Apparel*. 2018. Vol. 22. № 2, pp. 94–108.
17. Siqueira F.F.D.S., Nunes L.C.C., Cosse R.L., de Noronha Castro Pinto F.A., Mareze P.H., Silva C.F.E. Characterization of buriti (*mauritia flexuosa*) foam for thermal insulation and sound absorption applications in buildings // *Buildings*. 2021. Vol. 11. № 7. DOI: 10.3390/buildings11070292
18. Li C., Dong W., Lin L., Zhu X., Liu Q., Zhang Y., Zhai N., Zhou Z., Wang Y., Chen B., Ji Y., Chen X., Xu X., Yang Y., Zhang H., Chen Z. A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: performance optimization through composition and microstructure // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 553, pp. 120517. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120517

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*ЧЕРЕМНЫХ Степан Валерьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», депутат Тверской городской Думы, 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [cheremnykh\\_s.v@mail.ru](mailto:cheremnykh_s.v@mail.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Черемных С.В. Методика расчета теплотехнических характеристик многослойной ограждающей конструкции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 2 (14). С. 26–33.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

УДК 621.316.98

**ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ***Е.П. Алисова, В.В. Лебедев, А.В. Крупнов**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*© Алисова Е.П., Лебедев В.В.,  
Крупнов А.В., 2022

**Аннотация.** В статье подробно описаны этапы внедрения молниезащиты. Рассмотрены применяемые материалы и средства защиты от перенапряжений конструкций зданий. Дана оценка значению внедрения новых планов и различных способов внутренних соединений металлических конструкций для защиты людей.

**Ключевые слова:** молниезащита, ограничитель перенапряжения, устройство защиты от импульсных перенапряжений, заземление, выравнивание потенциалов.

**ВВЕДЕНИЕ**

Стандарты для комплексных систем молниезащиты основаны на фундаментальном принципе обеспечения прямого низкоомного пути для тока молнии. Следует соблюдать меры предосторожности, чтобы предотвратить пожар, разрушение зданий, повреждение оборудования, смерть или травмирование работников при прохождении тока от уровня крыши до уровня земли. Стандарты включают в себя основные требования к конструкциям и продуктам. Ожидается, что система, основанная на исследованиях, протоколах испытаний и полевом опыте, обеспечит личную и структурную безопасность – защиту от молнии и ее вторичных воздействий. Стандарты постоянно пересматриваются для новых продуктов, методов строительства и проверенных научных разработок с целью устранения опасности молнии. Несмотря на то, что материальные компоненты системы остались прежними, вид всей конструкции за последние 25 лет сильно изменился.

**ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ****Первый этап (оценка риска удара молнии)**

Оценка риска удара молнии учитывает множество факторов, связанных со зданием, в том числе стоимость имущества внутри сооружения, количество людей, находящихся в нем, и частоту их присутствия (24/7 против 40 часов в неделю), электрические системы, чувствительность оборудования, близость к легковоспламеняющимся предметам и многое другое. Склад, где хранятся металлические трубы, не нуждается в таком же уровне защиты, что и объект, заполненный оборудованием для технических испытаний.

Оценка риска удара молнии в систему освещения обеспечит рекомендуемый уровень защиты от I до IV специально для здания, причем уровень I является самым высоким и его обеспечение наиболее затратно. В результате оценки возможна установка устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП), которые необходимы для данной конструкции. Оценка риска также определит, требуются ли более продвинутое исследование удара молнии, например изучение частотного спектра и временной области.

### **Второй этап (проектирование системы молниезащиты)**

Как только оценка риска покажет, какой уровень защиты необходим, можно начинать физическое проектирование. После этого определяется количество молниеприемников и проводников и оформляются строительные чертежи.

### **Третий этап (конструирование системы)**

После завершения этапа проектирования системы молниезащиты можно приступить к ее монтажу.

Ниже перечислены элементы, которые должны быть в наличии для обеспечения эффективной системы молниезащиты.

1. Устройства защиты от прямых ударов молнии должны иметь структуру, позволяющую принимать удары до того, как они достигнут сооружений.

2. Кабель, соединяющий верхнюю часть здания с системой заземляющих электродов, проводит ток молнии через всю конструкцию без ее повреждения.

3. Система заземляющих электродов нижнего уровня должна эффективно отводить молнию от конструкции до конечного пункта назначения.

4. Соединение системы молниезащиты с другими внутренними заземленными металлическими системами должно быть приспособлено к исключению удара молнии изнутри.

5. Наконец, УЗИП должны быть установлены на каждом вводе, чтобы остановить проникновение молнии из линий электропередачи и уравнивать потенциал между системами заземления во время грозных разрядов [4].

Если все эти элементы правильно установлены на этапе проектирования и не произошло никаких изменений в здании, то система обеспечит защиту от удара молнии.

Элементы молниезащиты изготавливаются из материалов, которые защищены от ускоренного износа и воздействия атмосферы и климата. Не должны использоваться комбинации материалов, которые образуют электролитические пары в присутствии влаги. Условия почвы на площадке будут влиять на компоненты системы заземления. Срок службы системы и цикл технического обслуживания зависят от выбранных материалов и местных условий. Материалы должны быть согласованы с используемыми конструкционными материалами (осветительными приборами, кожухами, кожухами вентиляторов, различными кровельными системами) для поддержания уровня влаги в течение всего предполагаемого срока службы здания.

### **МОЛНИЕПРИЕМНИК**

Молниеприемник – это устройство защиты от прямого удара молнии, представляющее собой устройство, защищающее от проникновения молнии в строительные сооружения, от пожара, взрыва и т.д. Может иметь стержневую, тросовую или сетчатую конструкцию. Строительные элементы, выступающие над конструкцией, могут быть включены в систему молниезащиты [5].

Защита самых высоких и выступающих элементов здания с помощью устройств защиты от прямого удара молнии также обеспечивает соответствующий уровень защиты для нижних частей конструкции или предметов, расположенных в «тени» более защищенных областей. В качестве молниеприемника используют модель с зоной защиты радиусом 46 м. На более опасных объектах, содержащих взрывчатые вещества или легковоспламеняющиеся жидкости и пары, зона защиты уменьшается до сферы радиусом 30 м, которая покрывает свыше 98 % зарегистрированных ударов молнии.

Система защиты от прямого удара молнии защищает конструкцию от воздействия удара молнии в определенные точки здания. В большинстве случаев применяются медные или алюминиевые воздушные молниеприемники стержневой конструкции из-за их высокой проводимости и стойкости к различным погодным условиям.

### **МОЛНИЕОТВОДЫ**

Система молниеотводов включает в себя кабели основного размера, конструкционную сталь здания, а также соединительные провода к внутренним системам заземления здания. Главные проводники выполняют функцию переноса тока от молниеприемников к системе заземления. Основные кабели изготовлены из высокопроводящей меди или алюминия, которые подходят для работы во внешней среде.

Медные и алюминиевые кабели для молниезащиты спроектированы по международным стандартам плетения и укладки кабелей с использованием отдельных проводов меньшего сечения. Такая конструкция обеспечивает максимальную площадь на единицу веса проводника для отвода молнии, которая быстро распространяется по поверхности. Все устройства защиты от прямого удара молнии должны быть подключены к системе заземления. Устройства защиты от прямого удара молнии, охватывающие различные области конструкции зданий и сооружений, должны быть связаны между собой в единую систему либо с помощью проводников, проложенных на крыше, либо с помощью проводников контура заземления [1].

### **ЗАЗЕМЛЕНИЕ**

Для того чтобы направлять молнию от конструкции и переносить ее в любые слои почвы, используют систему заземляющих электродов молниезащиты.

Схема заземления зависит от характера почвы: одиночные заземляющие стержни применяют там, где грунт глубокий; несколько электродов, пластин заземления, радиальных или скрытых проводных сетей используют, если почва мелкая, сухая или с низкой проводимостью. Каждый подводящий кабель должен заканчиваться соединением с электродом заземления, предназначенным для молниезащиты. Электроды

контура заземления молниезащиты не должны применяться в качестве одиночных заземляющих элементов. В итоге контур заземления должен включать в себя соединение отдельных заземляющих электродов различных систем.

Везде, где это целесообразно, соединения с заземляющими электродами должны быть выполнены снаружи фундаментной стены, причем достаточно далеко от нее, чтобы избежать заглубления фундаментов, колпачков труб и т.д. Где это возможно, заземляющие электроды следует устанавливать ниже линии замерзания. Материалы, используемые для заземления электродов, должны быть пригодны для любого щелочного или кислотного состава почв и длительного срока службы.

С целью наибольшей эффективности отведения тока от конструкции заземляющие устройства размещают на внешних краях, таких как углы и наружные стены конструкции, избегая, по возможности, протекания тока под зданием.

Контур заземления, охватывающий конструкцию, соединяющую все кабели заземления на их основании и/или заземляющие электродные устройства, наилучшим способом выравнивает потенциал для всей системы молниезащиты, обеспечивая связь с другими системами заземления здания.

Все составляющие заземления на сооружении или внутри него должны быть связаны между собой для того, чтобы обеспечить общий потенциал заземления с использованием основного молниеотвода. Это система заземляющих электродов молниезащиты, заземление электрических, коммуникационных и антенных систем, а также системы металлических трубопроводов, используемых в конструкции (трубопроводы для воды, газа, сжиженного нефтяного газа и др.) во избежание поражения любой катодной защиты.

### **ВЫРАВНИВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ**

Современное здание включает в себя металлические трубопроводы, такие как водопровод, канализация и газовые системы, а также цепи электрических и коммуникационных систем.

Молния распространяется от заземляющих электродов системы вблизи поверхности земли и может вернуться в здание по металлическим трубам или другим основаниям. Оборудование внутри сооружений, от раковины, подключенной к водопроводной и канализационной сетям, до персонального компьютера, подключенного как к электрической сети, так и к сети Интернет, становится дополнительной точкой для разряда тока молнии между независимо заземленными системами, что может вызвать значительные повреждения.

Система молниезащиты решает эту проблему путем соединения металлических строительных систем с системой молниезащиты с целью создания общего потенциала земли. Необходимо соединить каждую заземленную систему здания и систему непрерывных металлических трубопроводов с системой заземляющих электродов молниезащиты вблизи уровня уклона [2, 3].

### **ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ**

Системы молниезащиты спроектированы в первую очередь как системы противопожарной защиты людей и оборудования внутри зданий. Внедрение металлических конструкций в эту структуру обеспечивает путь протекания молнии из

внешней среды и создает опасность внутри здания. Заземление и трубы с системой молниезащиты связываются или соединяются, чтобы избежать этой проблемы. Следующим шагом является обеспечение защиты в цепях, связанных с электрическими линиями, линиями связи и линиями передачи данных, которые могут передавать молнии в структуру здания. Полная система молниезащиты в соответствии со стандартами включает в себя УЗИП на каждом входе в служебные провода здания, независимо от того, являются ли они служебными или, возможно, смонтированными на конструкции, как антенная система.

Устройства защиты от импульсных перенапряжений, предназначенные для грозовых перенапряжений, быстро реагируют на возникновение резко возрастающей формы волны и поддерживают соединение с землей во время сильного перенапряжения, а затем возвращаются к своей функции контроля.

Правильно подобранные и установленные УЗИП на всех фидерах цепи защищают от входа молнии в электрооборудование сооружения, предохраняют провода и электрооборудование от пробоя изоляции с возможным последующим возгоранием.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система молниезащиты должна включать в себя пять компонентов – устройства защиты от прямых ударов молнии, токоотвод, систему заземляющих электродов, уравнивание потенциалов, УЗИП, что обеспечивает безопасность и надежность данной системы в целом.

Для защиты от поражения электрическим током, сохранения электрооборудования и создания безопасных условий работы применяется комплексный подход с принятием всех необходимых мер.

Система молниезащиты в комплексе с системой уравнивания потенциалов обеспечивает защиту людей от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции.

Система молниезащиты, помимо защиты от первичных воздействий молнии (прямых ударов), включает в себя устройства защиты от вторичных воздействий молнии [6].

Применение и правильная эксплуатация молниезащиты гарантируют надежное функционирование электроприборов и электроустановок, исключая опасность повреждения электрическим током работников предприятия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bud VanSickle. Lightning Protection Overview // *Lightning Protection Institute*. 2009, pp. 1–15.
2. Борисов Р.К., Жарков Ю.В., Коломиец Е.В. Молниезащита подстанций распределительных электрических сетей // *Вестник МЭИ*. 2014. № 4. С. 1–5.
3. Курдюмов В.И., Зотов Б.И. Безопасность жизнедеятельности на производстве. М.: Колос. 2003. 432 с.
4. Веревкин В.Н., Смелков Г.И., Черкасов В.Н. Электростатическая искробезопасность и молниезащита. М.: МИЭЭ. 2006. 170 с.
5. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М.: Группа ИДТ. 2008. 352 с.

6. Титова А.С. Устройство молниезащиты // *Современные научные исследования и инновации*. 2018. № 11. С. 5.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*АЛИСОВА Екатерина Петровна* – студентка 1-го курса магистратуры кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: katerina\_petrovna2014@mail.ru

*ЛЕБЕДЕВ Виктор Витальевич* – студент 1-го курса магистратуры кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: shnuagele@mail.ru

*КРУПНОВ Андрей Владимирович* – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Алисова Е.П., Лебедев В.В., Крупнов А.В. Этапы построения системы молниезащиты и моделирование системы защиты от прямых ударов молнии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 34–39.

УДК 621.3:681.11.031.1

#### КРАТКИЙ ОБЗОР ХАРАКТЕРИСТИК И СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*М.А. Колесова, А.В. Крупнов*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Колесова М.А., Крупнов А.В., 2022

**Аннотация.** В статье представлен краткий обзор основных накопителей электрической энергии, а также дана сравнительная характеристика известных на сегодняшний день накопителей электроэнергии с точки зрения их перспективного использования в системах электроснабжения.

**Ключевые слова:** накопители электрической энергии, электроэнергетика, энерго-система, гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС), супермаховик, суперконденсатор, сверхпроводниковый накопитель электрической энергии, батарея.

#### ВВЕДЕНИЕ

Нестабильность работы энергосистемы России является актуальной проблемой электроэнергетики, преодоление которой требует своевременных решений. Применение систем накопления электрической энергии (СНЭ) поможет решить ряд задач, таких как

выравнивание графиков электрических нагрузок, отклонение частоты, провал напряжения, потери в электрических сетях, которые остро влияют на работу энергосистемы в целом.

В зависимости от формы хранения электрической энергии системы накопления подразделяются на химические, электрические, магнитные и механические (рис. 1). Аккумуляторы и топливные элементы (FC) попадают в химические системы, в то время как электромагнитные системы включают в себя суперконденсаторы и сверхпроводники. Механические системы можно разделить на накопители кинетической энергии, к которым относятся супермаховики, и накопители потенциальной энергии, включающие в себя системы гидронасоса и сжатого воздуха. Рассмотрим некоторые из них (рис. 1).

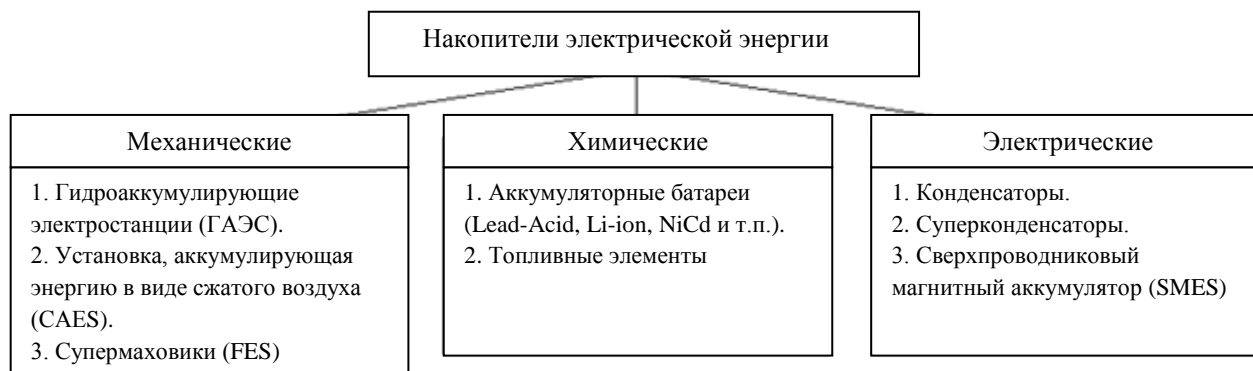


Рис. 1. Классификация накопителей электрической энергии

### МЕХАНИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС) в настоящее время является единственной проверенной и наиболее широко применяемой технологией для крупномасштабного (>100 МВт) хранения энергии. Она предполагает длительный срок службы в диапазоне 30–50 лет, низкие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание. КПД ГАЭС составляет в среднем 80 % из-за изменения высоты и потерь на конверсию [1]. Данная технология обеспечивает наибольшую пропускную способность из всех современных технологий накопления, поскольку единственным ограничителем здесь является размер верхнего резервуара. Однако при этом требуются особые условия при строительстве, наиболее важными из которых являются наличие перепада высот и наличие обширного места для водохранилищ. Главная особенность ГАЭС состоит в том, что она работает на возобновляемом энергоресурсе, использование которого не истощает топливных запасов Земли. Существенно и то обстоятельство, что на ГАЭС отсутствуют вредные выбросы в атмосферу, воду, почву [2].

К механическим СНЭ относится также воздушно-аккумулирующая электростанция (CAES). Преимущества данной системы заключаются практически в неограниченном количестве хранимой энергии и в относительно низкой стоимости сооружения такой установки. В настоящее время существуют только две действующие системы первого поколения – в Германии (построена в 1978 году) и Алабаме (построена в 1991 году). Система CAES наиболее эффективна в странах с низкой температурой в зимнее время, т.е. в период максимального расходования электроэнергии.

Однако традиционные системы CAES первого поколения демонстрируют низкую эффективность в диапазоне 42–54 % из-за больших потерь тепла в атмосферу при сжатии и повышенных требований к тепловой энергии, предъявляемых при охлаждении турбины



декомпрессированным воздухом [3]. Для решения этих проблем, снижающих общую эффективность традиционных систем, были разработаны усовершенствованные адиабатические и изотермические системы CAES. Системы CAES второго поколения используют тепло, выделяемое в процессе сжатия, которое передается и хранится в тепловых хранилищах.

Усовершенствованные адиабатические CAES (AA-CAES), как правило, потребляют мало либо вообще не потребляют топливо или внешнюю энергию для нагрева воздуха во время расширения, тем самым повышая общую эффективность до 70 % и исключая сопутствующие выбросы. Изотермический CAES включает в себя отвод тепла, получаемого при сжатии, для поддержания постоянной температуры и, таким образом, позволяет избежать затрат на создание теплового хранилища. Соответственно, варианты CAES без необходимости в термальных подземных хранилищах могут быть построены в меньшем масштабе. Маломасштабные CAES (SS-CAES) вызывают особый интерес в промышленной области для обеспечения бесперебойного и резервного питания.

Другой механической СНЭ является супермаховик. Супермаховик (FES) – это маховик высокой удельной энергоемкости. Маховики обладают способностью обеспечивать как высокую энергию, так и высокую плотность мощности при кратковременных разрядах. Высокая эффективность в диапазоне 90–95 % также может быть достигнута за счет использования вакуумного насоса, постоянных и магнитных подшипников, которые необходимы для преодоления сил трения во время работы. Дополнительные преимущества (по сравнению с другими системами FES) включают в себя нечувствительность к условиям окружающей среды и отсутствие производства опасных химических веществ. Однако технология является очень дорогостоящей, так как для хранения энергии в электроэнергетической системе необходимы маховики большой мощности, что приводит к увеличению потерь на трение и снижению эффективности. По мнению некоторых исследователей, очевидно, что длительное хранение устройств этого типа невозможно, поэтому маховики используются в качестве дополнения к батареям в системах бесперебойного питания.

### **ХИМИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Аккумуляторная батарея – это устройство, которое накапливает энергию в химической форме при подключении к источнику постоянного тока. Самый старый тип аккумуляторных батарей, свинцово-кислотный, широко используется в транспортных средствах для запуска двигателей и множества других объектов. Он считается одним из наиболее подходящих для стационарного применения, так как может обеспечивать отличную импульсную мощность. В заряженном состоянии батарея состоит из свинца (Pb) и оксида свинца (PbO<sub>2</sub>), находящихся в 37%-й серной кислоте (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), тогда как в разряженном состоянии сульфат свинца (PbSO<sub>4</sub>) образуется как на аноде, так и на катоде, в то время как электролит превращается в воду. Номинальное напряжение свинцово-кислотного элемента составляет 2 В, диапазон рабочих температур от –5 до 40 °С. Хотя свинцово-кислотная технология является достаточно старой, она имеет низкую стоимость. Свинец и серная кислота токсичны, а срок службы последней относительно ограничен. Кроме того, аккумуляторы затопленного типа требуют периодического обслуживания водой и занимают большую площадь из-за их низкой удельной энергии (25 Вт·ч/кг) и глубины разряда (70 %), поэтому они считаются неблагоприятными для крупномасштабного применения.

Благодаря изобретению свинцово-кислотных батарей с регулируемым клапаном (VRLA), батареи мощностью до 36 МВт уже используются для производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии, поскольку они достигают более высокой удельной энергии (30–50 Вт·ч/кг) и глубины разряда (80 %) при незначительных требованиях к техническому обслуживанию. Как в портативных, так и в стационарных устройствах используются также никель-кадмиевые батареи, имеющие значительные преимущества по сравнению со свинцово-кислотными – более высокую удельную энергию (60 Вт·ч/кг), более длительный срок службы (1 500–3 000 циклов «заряд – разряд») и более низкие требования к обслуживанию, но при более высоких производственных затратах.

Другой химической СНЭ являются FC. Топливный элемент – это электрохимическое устройство, преобразующее химическую энергию топлива в электрическую энергию прямым методом. В качестве основного топлива используется водород. Основным преимуществом FC является их способность преобразовывать химическую энергию непосредственно в электричество, т.е. без использования каких-либо промежуточных энергоемких этапов и шумных движущихся частей.

Регенеративные FC – это устройства, которые объединяют функции FC и электролизера в одном устройстве. Хотя все FC могут работать как регенеративные, они обычно оптимизированы для выполнения только одной функции.

Регенеративные FC можно охарактеризовать как долговременные устройства накопления электрической энергии. Они обеспечивают самую высокую удельную энергию, приходящуюся максимум на 1 200 Вт/кг, и превосходную циклическую производительность в 20 000 циклов. Их ежедневный саморазряд оценивается в 3 %, глубина разряда составляет 90 %, а общая эффективность находится в диапазоне значений 20–50 % (так как электролиз является самым слабым звеном в цепи). Помимо их применения в транспортном секторе, где они являются потенциальной заменой ископаемого топлива для транспортных средств, такие устройства накопления электрической энергии перспективны с точки зрения обеспечения как стационарной, так и распределенной мощности.

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Суперконденсаторы (также называемые ультраконденсаторами, электрохимическими конденсаторами, ионисторами или электрическими двухслойными конденсаторами) – это устройства для хранения энергии со специальными функциями, переходные между обычными конденсаторами и батареями. Суперконденсаторы идеально накапливают электрическую энергию в электростатическом поле электрохимического двойного слоя, поэтому могут циклически работать миллионы раз и имеют гораздо больший срок службы по сравнению с батареями [4]. Они достигают более высокой плотности мощности, чем батареи, из-за короткого времени заряда, но обеспечивают более низкую плотность энергии из-за ограниченной площади поверхности электрода. Кроме того, суперконденсаторы демонстрируют очень высокую эффективность (до 95 %) благодаря низкому сопротивлению, что приводит к снижению потери энергии. Они могут заряжаться и разряжаться быстрее, чем аккумуляторные батареи, из-за ускоренного переноса ионов в растворе к поверхности электрода. Несмотря на то что суперконденсаторы подвержены саморазряду и в настоящее время применяются в портативной электронике и автомобильной промышленности, они могут также использоваться в электрических или гибридных

транспортных средствах для обеспечения пиковой (импульсной) мощности, необходимой во время пуска и ускорения. В последние годы батареи суперконденсаторов используются в энергетических установках для компенсации провала напряжения и хранения энергии.

Существует еще одна электрическая СНЭ – сверхпроводниковый индукционный накопитель (SMES). Это крупномасштабный энергонакопитель, который может хранить энергию в диапазоне от 10 до 100 МВт. Он накапливает энергию в виде постоянного электрического тока, проходящего через индуктор (катушку). Как правило, электрическая энергия накапливается в магнитном поле, создаваемом потоком выпрямленного тока в катушке, изготовленной из ниобий-титановых (NbTi) кабелей со сверхнизким сопротивлением. Для поддержания сверхпроводящего состояния устройство должно быть охлаждено до  $-264^{\circ}\text{C}$  (9,2 К), что позволяет постоянному току протекать через индуктор с наименьшим сопротивлением. Благодаря почти нулевому сопротивлению сверхпроводники обеспечивают высокую эффективность хранения (до 98 %), что обеспечивает совсем незначительные потери энергии и более быструю реакцию по сравнению с другими системами хранения энергии. Более того, эти устройства могут работать практически бесконечно и способны разряжать почти всю накопленную энергию за 1,2 с. Основными недостатками низкотемпературных сверхпроводящих катушек являются высокая стоимость сверхпроводящего провода и повышенные энергозатраты на охлаждение. В связи с этим они используются для кратковременного хранения энергии с целью повышения качества работы энергосистемы.

### СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В таблице представлены основные технические характеристики и капитальные затраты на СНЭ.

Технические характеристики и капитальные затраты на СНЭ

Система	Мощность	КПД, %	Время разряда	Саморазряд в день	Плотность энергии, Вт/кг	Срок службы, лет	Жизненный цикл	Капитальные затраты, \$ / кВт·ч
Механические СНЭ								
ГАЭС	100–5 000 МВт	70–85	От 1 до 24 ч	Очень низкий	0,5–1,5	40–60	–	5–100
САЭС	5–300 МВт	68–80	и более	Низкий	30–60	20–40	–	2–50
FES	0–250 кВт	90–95	От миллисекунд до 15 мин	100 %	10–30	До 15	20 000+	1 000–5 000
Система	Мощность	КПД, %	Время разряда	Саморазряд в день	Плотность энергии, Вт/кг	Срок службы, лет	Жизненный цикл	Капитальные затраты, \$ / кВт·ч
Химические СНЭ								
VRLA	0–20 МВт	68–80	От 1 с до не-	0,1–0,3 %	30–50	5–15	200–1 000	200–400

NiCd	0–40 МВт	60–70	скольких часов	0,1–0,6 %	50–75	10–20	2 000–2 500	800–1 500
NaS	50 кВт–8 МВт	72–90		До 20 %	150–240	10–15	2 500	300–500
ZEBRA (хлорид никеля, хлорид натрия)	0–300 кВт	85–90		До 15 %	100–120	10–14	2 500+	100–200
FC	0–50 МВт	20–50	От 1 с до 24 ч и более	Почти нет	800–10 000	5–15	1 000+	600–2 500
Металло-воздушные батареи	0–10 кВт	30–50		Очень низкий	150–3 000	–	100–300	10–60
Li-ion	0–100 кВт	90–97	От 1 мин до нескольких часов	0,1–0,3 %	75–200	5–15	1 000–10 000+	600–2 500
VRB	30 кВт–3 МВт	73–83	От 1 с до 10 ч	Низкий	10–30	5–10	12 000+	150–1 000
ZnBr	50 кВт–2 МВт	68–75			30–50	5–10	2 000+	150–1 000
PSB	1–15 МВт	60–75			–	10–15	–	150–1 000
Солнечное топливо	0–10 МВт	20–30	От 1 до 24 ч	Почти нет	800–100 000	–	–	–
Электрические СНЭ								
SMES	100 кВт–10 МВт	95–98	От миллисекунд до 8 с	10–15 %	0,5–5	20+	100 000+	1 000–10 000
Конденсатор	0–50 кВт	60–70	От миллисекунд до 1 ч	40 %	0,05–5	До 5	50 000+	500–1 000
Суперконденсатор	0–300 кВт	90–97		20–40 %	2,5–15	20+	10 000+	300–2 000

Система	Мощность	КПД, %	Время разряда	Саморазряд в день	Плотность энергии, Вт/кг	Срок службы, лет	Жизненный цикл	Капитальные затраты, \$ / кВт·ч
Тепловые СНЭ								
Низкотемпературные	0–5 МВт	40–60	От 1 до 8 ч	0,5 %	80–120	10–20	–	20–50
Криогенные (CES)	100 кВт–300 МВт	40–50		0,5–1,0 %	150–250	20–40	–	3–30

Высоко-температурные	0–60 МВт	30–60	От 1 до 24 ч и более	0,05–1,0 %	80–200	5–15	–	30–60
----------------------	----------	-------	----------------------	------------	--------	------	---	-------

Сравнивая вышеприведенные данные по номинальной мощности различных СНЭ, можно сгруппировать системы накопления для различных областей применения. Гидроаккумулирующие электростанции, пневматические системы (CAES) и криогенные накопители подходят для применения в масштабах свыше 100 МВт с длительностью от 1 до 24 ч. Их можно использовать для крупномасштабного управления энергопотреблением – выравнивания графика нагрузки, увеличения/уменьшения нагрузки и резерва мощности. Крупномасштабные батареи, проточные батареи, FC, солнечное топливо, CES- и тепловые накопители энергии подходят для управления энергией среднего масштаба мощностью 10–100 МВт. Батареи, SMES, конденсаторы и суперконденсаторы имеют высокий показатель реакции (миллисекунды), следовательно, могут быть использованы для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии, таких как провал напряжения, уменьшение колебания напряжения и мерцания, а также могут выступать кратковременными источниками бесперебойного питания. Типичная номинальная мощность для такого рода систем составляет менее 1 МВт [5].

Из приведенных выше табличных данных видно, что ГАЭС, CAES, FC, металловоздушные элементы, солнечное топливо и проточные батареи имеют очень малую степень саморазряда, поэтому подходят для длительного хранения. Срок свинцово-кислотного, NiCd, литий-ионного, теплового накопителей и CES, имеющих средний коэффициент саморазряда, ограничен десятками дней. Маховики, ZEBRA, SMES, конденсатор и суперконденсатор характеризуются очень высоким коэффициентом самозаряда – 10–40 % в день. Они могут быть реализованы только в течение коротких циклических периодов, максимум на несколько часов. Маховики будут разряжать 100 % накопленной энергии в течение дня.

Капитальные затраты при этом указаны с точки зрения затрат на выработку полезной мощности, поэтому их можно разделить по эффективности хранения. Самые низкие капитальные затраты идут на свинцово-кислотные батареи, но данная система по-прежнему остается дорогостоящей для управления энергопотреблением из-за ее относительно короткого срока службы и требует обслуживания. CAES, металлическая воздушная батарея, ГАЭС, тепловые СНЭ и CES находятся в низком диапазоне с точки зрения капитальных затрат на киловатт в час. Металлические воздушные батареи могут показаться лучшим выбором из-за их высокой плотности энергии и низкой стоимости, но они имеют весьма ограниченный жизненный цикл и все еще находятся на стадии разработки.

В сравнении с другими разработанными системами CAES имеют относительно низкие капитальные затраты. Капитальные затраты на батареи немного выше, чем затраты на безубыточные ГАЭС, хотя разрыв постепенно сокращается. SMES, маховики, конденсаторы и суперконденсаторы подходят для применения в системах с высокой мощностью и малой продолжительностью хранения, так как они относительно дешевые по выходной мощности, но дорогие с точки зрения емкости накопителя энергии. Топливные элементы имеют самую высокую стоимость за цикл, и им потребуется большой период

окупаемости, чтобы стать экономически конкурентоспособными. Батареи на солнечном топливе находятся на ранней стадии разработки, поэтому данные о жизненном цикле, сроке службы и стоимости не указаны.

Следует также отметить, что капитальные затраты на системы хранения энергии могут существенно отличаться от приведенных выше оценок (например, из-за прорывов в технологиях, времени строительства, расположения установок и размера системы). Обобщенные данные следует рассматривать только как предварительные.

Наиболее технологически зрелыми системами накопления на сегодняшний день по-прежнему остаются ГАЭС и свинцово-кислотные батареи, используемые уже более ста лет (рис. 2). Системы CAES, различные батареи, SMES, маховики, конденсаторы, суперконденсаторы, низко- и высокотемпературные накопители электрической энергии – это технически разработанные и коммерчески доступные технологии. Их конкурентоспособность и надежность все еще нуждаются в дополнительных испытаниях в электроэнергетической отрасли и на рынке. Развивающимися технологиями являются FC, металловоздушная батарея и солнечное топливо, которые находятся на стадии разработки [6].

Из представленной на рис. 2 [6] траектории развития технологий следует, что очередной технологией, которая в ближайшее время будет готова к широкому применению, станут проточные накопители, высокоскоростные маховики и суперконденсаторы.

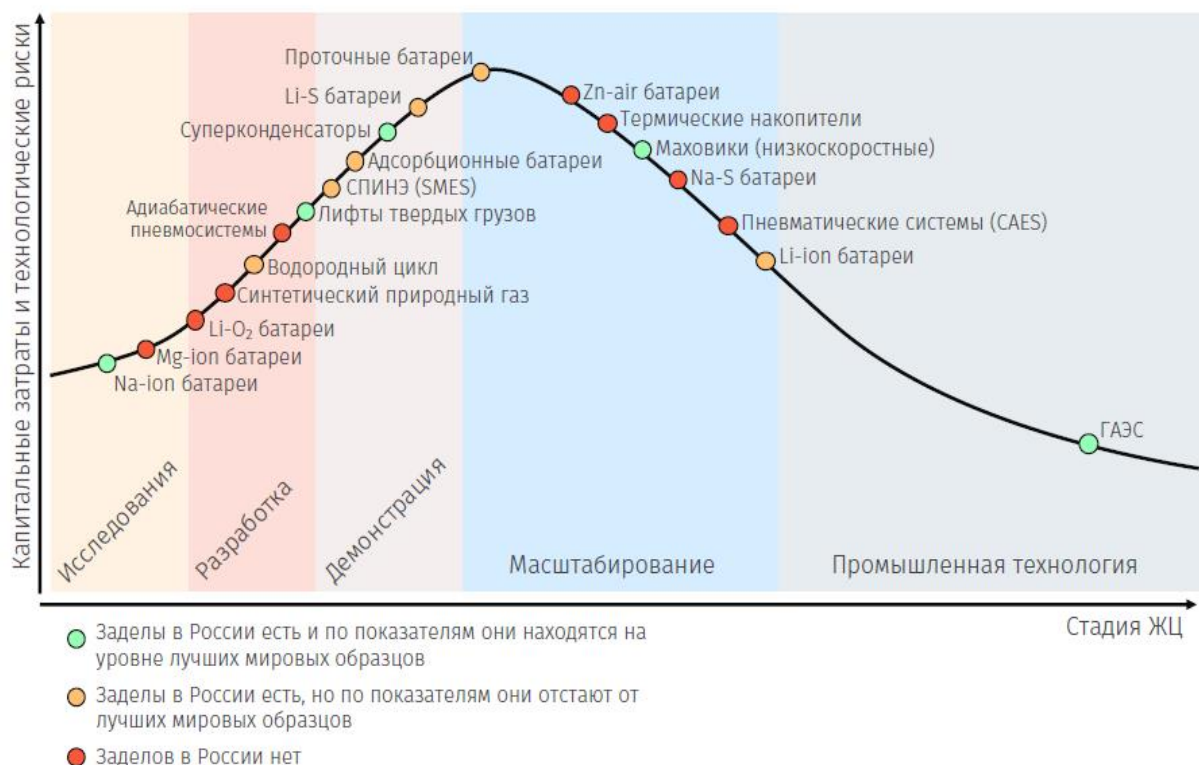


Рис. 2. Кривая зрелости отраслевых технологий

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного сравнения можно сделать вывод о том, что СНЭ необходимы для современной отрасли производства и распределения электроэнергии. Технологии СНЭ обеспечивают функции управления энергопотреблением – выравнивание нагрузки, управление качеством электроэнергии, а также повышают надежность энергоснабжения. Основываясь на текущем уровне развития СНЭ, можно предположить, что показатель хранения энергии увеличится на 10–15 % (в настоящее время он составляет 3 %). На сегодняшний день доминирующей СНЭ остается ГАЭС. Ожидается, что CAES получит быстрое коммерческое развитие, особенно в странах с благоприятной геологией. Крупномасштабные батареи, такие как свинцово-кислотные, NiCd и Li-ion, будут постепенно внедряться для управления энергопотреблением с уменьшением затрат и увеличением срока службы. Батареи среднего масштаба (NaS и хлоридно-натриевые, никель-хлоридные), а также низкотемпературные накопители тепловой энергии могут найти применение в системах электроснабжения городов и промышленных предприятий. Ожидается дальнейшее развитие коммерчески доступных систем – SMES, супермаховиков и суперконденсаторов с высокой производительностью. Новые технологии, такие, например, как солнечное топливо, CES и металловоздушные батареи, привлекают все больше внимания исследователей благодаря низкому воздействию на окружающую среду и очень высокой плотности запасаемой энергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikolaidis P., Poullikkas A. Сравнительный обзор систем хранения электрической энергии для повышения устойчивости // Журнал энергетических технологий. 2017. URL: [https://www.academia.edu/35017143/Journal\\_of\\_Power\\_Technologies\\_97\\_3\\_2017\\_220\\_245\\_A\\_comparative\\_review\\_of\\_electrical\\_energy\\_storage\\_systems\\_for\\_better\\_sustainability](https://www.academia.edu/35017143/Journal_of_Power_Technologies_97_3_2017_220_245_A_comparative_review_of_electrical_energy_storage_systems_for_better_sustainability) (дата обращения: 15.09.2021).
2. Производство электроэнергии на электрических станциях ГАЭС. URL: <https://studfile.net/preview/6847543/> (дата обращения: 15.09.2021).
3. Poullikkas A. Сравнительный обзор крупномасштабных аккумуляторных систем для хранения электроэнергии. 2013. URL: [https://www.researchgate.net/publication/258022527\\_A\\_comparative\\_overview\\_of\\_large-scale\\_battery\\_systems\\_for\\_electricity\\_storage](https://www.researchgate.net/publication/258022527_A_comparative_overview_of_large-scale_battery_systems_for_electricity_storage) (дата обращения: 20.09.2021).
4. Ud din Mufti M., Lone S.A., Iqbal S.J., Ahmad M., Ismail M. Система накопления энергии на основе суперконденсатора для улучшенной регулировки частоты нагрузки. 2009. URL: [https://www.researchgate.net/publication/223540019\\_Super-capacitor\\_based\\_energy\\_storage\\_system\\_for\\_improved\\_load\\_frequency\\_control](https://www.researchgate.net/publication/223540019_Super-capacitor_based_energy_storage_system_for_improved_load_frequency_control) (дата обращения: 18.09.2021).
5. Chen H., Yang W. Прогресс в системах хранения электрической энергии: краткий обзор. 2009. URL: [https://www.researchgate.net/publication/220037284\\_Progress\\_in\\_electrical\\_energy\\_storage\\_systems\\_a\\_critical\\_review\\_Prog\\_Nat\\_Sci](https://www.researchgate.net/publication/220037284_Progress_in_electrical_energy_storage_systems_a_critical_review_Prog_Nat_Sci) (дата обращения: 20.09.2021).
6. Абрамов А.Ю. Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры. 2019. URL: <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/1b8/1b83729ddd27beaeb629e380293a4585.pdf> (дата обращения: 20.09.2021).

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*КОЛЕСОВА Марина Андреевна* – студентка 2-го курса магистратуры кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: marina.kolesova69@yandex.ru

*КРУПНОВ Андрей Владимирович* – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Колесова М.А., Крупнов А.В. Краткий обзор характеристик и сравнение параметров накопителей электрической энергии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 2 (14). С. 39–48.

**УДК 621.311****ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА**

*А.А. Степанов<sup>1</sup>, Р. Осей-Овусу<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «Тверьгорэлектро», (г. Тверь)

<sup>2</sup>ООО «Электрическая компания Ганы» (г. Аккра, Гана)

© Степанов А.А., Осей-Овусу Р., 2022

**Аннотация.** В статье описаны общемировые тенденции перехода к распределенной генерации, которые ставят перед энергетическими рынками всех стран задачу формирования централизованного органа управления. Перечислены актуальные задачи, решаемые таким органом. Дана оценка сложившейся ситуации, не позволяющей предоставить потребителям минимальные цены на электроэнергию.

**Ключевые слова:** рынки электроэнергии, прогнозирование, управление, распределенная генерация, трансформация.

Организованные оптовые рынки электрической энергии – это относительно недавнее новшество (в РФ – с ноября 2003 года) за более чем вековую историю электроэнергетического сектора. Они были разработаны и внедрены в мире в начале 1990-х годов. Организованные рынки, которыми управляет специализированный оператор, включают в себя рынки с определенными временными рамками (например, на сутки вперед, на час вперед и в режиме реального времени), а также услуги поддержки системы, такие как «горячий» и «холодный» резервы мощности, часто называемые вспомогательными.

Для большинства стран Евросоюза (ЕС) характерен полный переход на конкурентный механизм построения рынка электроэнергии. Тем не менее, несмотря на



схожесть энергосистем и даже значительные перетоки мощности между странами, оптовые энергорынки в ЕС ограничены территориями единичных стран, что создает значительный дисбаланс цен на электроэнергию. Как отмечается в отчете по мониторингу рынка [1], это привело в 2019 году к росту цен на электроэнергию на 8–15 %, в то же время в результате пандемии коронавируса последовало значительное снижение спроса.

В третьем квартале 2021 года потребление электроэнергии в Европе вышло на допандемийный уровень (третий квартал 2019 года) благодаря восстановлению экономики и смягчению ограничений. Оптовые цены на электроэнергию достигли рекордно высокого уровня на европейских рынках, и ожидаемое дальнейшее повышение в следующем квартале подтвердилось [2]. Наибольший годовой рост цен вследствие повышения цен на газ на спотовом рынке был зарегистрирован в Ирландии (+323 %), Португалии (+215 %) и Испании (+214 %).

Воздействие роста цен на потребителей значительно варьировалось в пределах ЕС, так как в некоторых странах изменения оптовых цен почти сразу же отражаются в розничных ценах, тогда как в других на это уходит до двух лет. Наибольший годовой прирост цен для конечных бытовых потребителей в сентябре наблюдался в Эстонии (+53 %), на Кипре (+48 %) и в Испании (+30 %).

При этом наличие малорегулируемых мощностей распределенной генерации вызывало кратковременное явление «отрицательных» тарифов, когда спрос значительно уступал предложению, что привело к почти бесплатному отпуску электроэнергии в сети распределяющих компаний. При этом стоимость электроэнергии для потребителей оставалась, конечно, высокой.

Рынок электроэнергии в ЕС чрезвычайно волатилен. В качестве примера можно указать, что в Европе резко упала выработка электроэнергии за счет ветряных электростанций. Так, по состоянию на 4 марта 2022 года ветрогенераторы обеспечивали лишь 9 % баланса энергосистемы ЕС – это минимум с января. В период с 21 по 27 февраля 2022 года средний уровень был 22 % с максимумом до 29 % (об этом свидетельствуют данные ассоциации WindEurope) [3].

Стоит отметить, что реализация стратегии по переходу к «зеленой» энергетике в ЕС начала «пробуксовывать», так как многие страны постепенно отказываются субсидировать строительство электрических станций альтернативной энергетики. Основными причинами этого являются следующие:

невысокий КПД альтернативных источников энергии, особенно ветровых электрических станций;

нерегулируемый отпуск электроэнергии, вызванный малопрогнозируемой выработкой электроэнергии на ветровых и солнечных электростанциях [3];

высокие затраты на сопутствующую инфраструктуру (землеотведение и необходимость наличия промышленных накопителей электроэнергии большой мощности);

малоэффективные системы управления потоками электроэнергии в системах распределенной генерации.

Высокая зависимость цен потребителей от оптовых цен на рынке характерна для стран с изолированными энергосистемами (или участками энергосистем). Показателен пример США, где оптовая цена на электроэнергию в штате Техас во время торгов увеличилась более чем в 100 раз относительно средневзвешенной цены [4, 5]. Причиной этого стало кратковременное, но значительное похолодание в феврале 2021 года, которое

привело к отказу части электростанций и лавинообразному возрастанию спроса со стороны потребителей. На рис. 1 представлена карта США с нанесенными на ней областями действия оптовых рынков [5]. Видно, что Техас (синий цвет) обладает своим собственным (изолированным) рынком электроэнергии, а также и почти изолированной энергосистемой, но это не ограничивает для энергокомпаний возможность устанавливать цены.

Для РФ ситуация с наличием и функционированием оптовых рынков на отдельных территориях во многом определяется наличием линий электропередач между этими территориями и соседними регионами, а также присутствием в регионе конкурирующих производителей электроэнергии (рис. 2) [6]. В связи с высокой изолированностью некоторых регионов или отсутствием альтернативных поставщиков цены формируются не на базе торгов, а местным регулирующим органом.

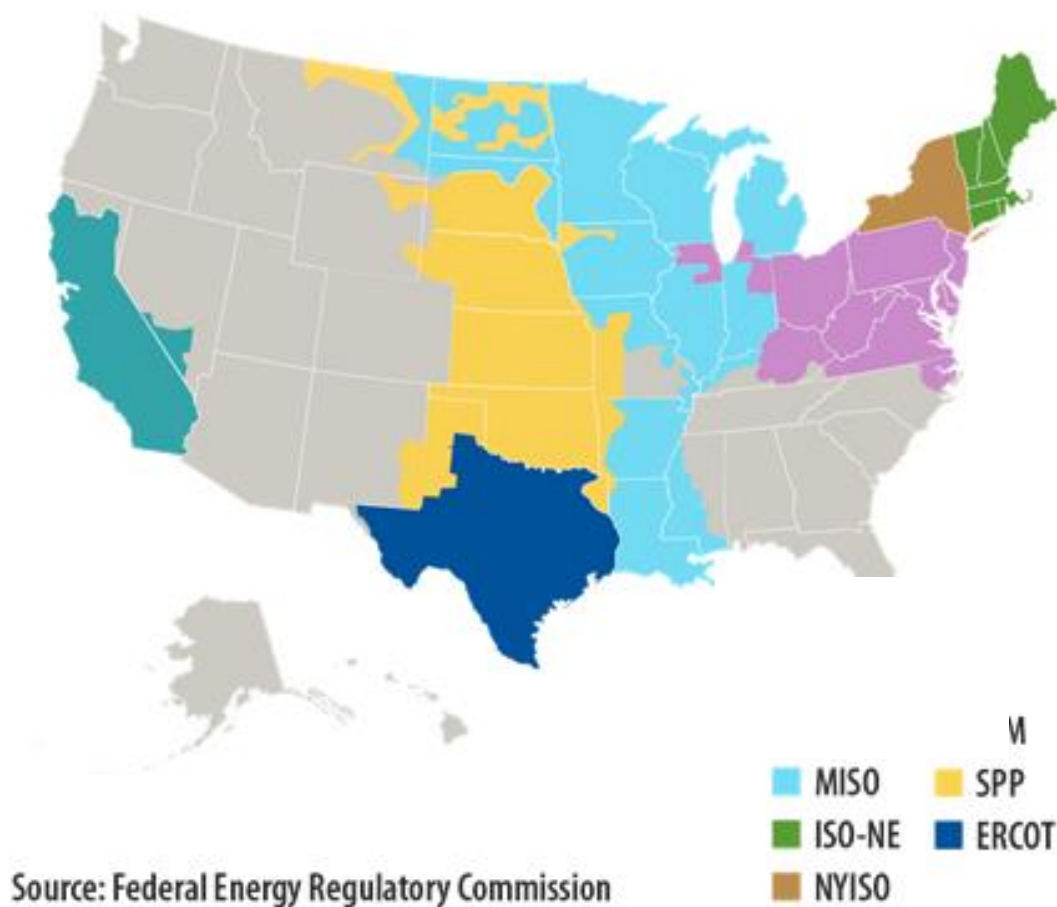


Рис. 1. Зоны функционирования независимых оптовых рынков электроэнергии на территории США (серый цвет – зоны без оптовых рынков)

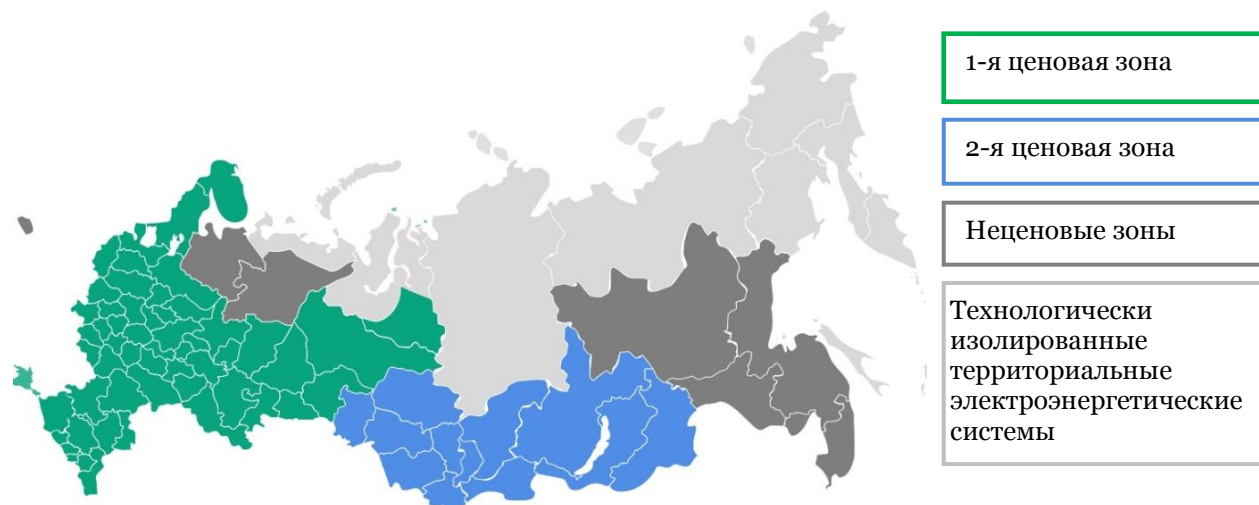


Рис. 2. Оптовый рынок электроэнергии РФ

Как правило, в РФ отсутствует конкурентный рынок мощностей, если речь идет о величинах, превышающих мегаватты. Это связано со сложившейся еще во времена СССР концепцией единой энергосистемы (в рамках плана ГОЭЛРО). В связи с этим фактически существуют только компании, которые управляют централизованно созданными оптовыми рынками для торговли энергией (т.е. только МВт·ч в противовес сделкам по мощности, которые предназначены для транзакций только МВт). В совокупности эти сделки играют важную роль в эксплуатации и экономической оптимизации региональных сетей, а в конечном счете – в поставке электроэнергии потребителям по справедливой цене. Доля компаний, которые управляют рынками вспомогательных услуг, а также рынками мощности, предназначенными для обеспечения достаточности общих ресурсов электроэнергии для удовлетворения немедленного спроса на электроэнергию, невелика. Оптовая торговля электроэнергией осуществляется путем двусторонних сделок. Эти транзакции различаются по продолжительности контракта, а также по объему, ежедневным срокам и продолжительности доставки.

Оптовые рынки развивались по многим причинам – от требований к системам передачи энергии с открытым доступом, которые позволяют развивать конкурентоспособную генерацию электроэнергии, до необходимости более совершенной оценки ресурсов для обеспечения надежности системы при большом разнообразии сторонних действующих факторов. При этом многие технические проблемы надежности сети продолжают решаться на уровне местных энергокомпаний без учета возможностей и потребностей смежных сетей. Примером является авария на подстанции «Чагино» в Москве, произошедшая 25 мая 2005 года и повлекшая за собой отключение электроэнергии не только в Московской области, но и в ряде смежных областей.

Оптовая торговля электроэнергией осуществляется путем двусторонних сделок. Эти транзакции дифференцируются по продолжительности контракта, а также по объему и продолжительности доставки. Торговля различается по регионам в зависимости от отличительных характеристик региональных сетей. Объемы прямых договоров в рамках двусторонней торговли, как правило, намного больше, чем ежедневная торговля на краткосрочных рынках.

Последнее время на рынках появляются новые бизнес-модели – агрегаторы мощностей, выделенные генераторы у потребителей. Однако при этом не всегда проработаны юридические вопросы, а также плохо отрегулирована их роль на рынке продажи электроэнергии и мощности. Например, на уровне оптовой торговли электроэнергией регулирующие органы считают краткосрочные рынки практически конкурентоспособными, но в то же время высказываются опасения по поводу способности таких рынков решать долгосрочные проблемы, такие как обеспечение необходимой мощности по запросу. Попытки интеграции распределенной генерации и систем управления спросом в существующие управляемые оптовые рынки предпринимаются регулярно, но здесь часто возникают сложности, вызванные опасениями в невозможности предоставить стабильный уровень мощности в течение продолжительных периодов времени.

На региональном уровне и уровне распределительных энергокомпаний оптовые рынки электроэнергии, которые предназначены для предоставления новых услуг и снижения цен для потребителей, добились пока незначительных успехов, и уровень потребительского спроса на эти услуги может стать значительным фактором изменений. Однако на уровне области многим существующим энергокомпаниям невыгодно создание конкурентного рынка электроэнергии, так как это может привести к снижению цен со стороны новых участников рынка, что повлечет отток потребителей и снижение прибыли.

Производство и доставка электроэнергии традиционно организовывались вокруг крупных централизованных электростанций и высоковольтных линий электропередачи. Электроэнергия доставляется на большие расстояния до того, как напряжение снижается, и проходит через распределительные системы для доставки потребителям. Эту систему называют магистральной. Организованные оптовые рынки структурированы таким образом, чтобы обеспечивать формирование средней оптовой цены на электроэнергию в энергосистеме. В тарифе поставки электроэнергии конечному потребителю эта средняя оптовая цена составляет от 50 до 70 %. Остальное – компенсация потерь при передаче потребителю и сбытовая надбавка. Тем не менее сбытовая надбавка в некоторых регионах демонстрирует признаки нерыночного регулирования, т.е. устанавливается местным регулирующим органом (например, региональной энергетической комиссией) исходя из сложившейся практики или по иным нерыночным соглашениям.

Инфраструктура передачи мощности на высоком напряжении имеет больше признаков сетевого регулирования, чем системы распределения. Сетевая инфраструктура повышает отказоустойчивость системы, позволяя операторам сети перенаправлять потоки электроэнергии, когда одна или несколько линий отключены по тем или иным причинам. Инфраструктура передачи уже в значительной степени автоматизирована (с помощью таких инструментов, как автоматизированное управление подстанциями и система SCADA) и требует все больших объемов информации. Новые инструменты, такие как высокодетализированные решения для визуализации систем, интеллектуальные реле и интеллектуальные инверторы, повышают отказоустойчивость сети. Хотя изменение погодных условий и интенсивность аномальных явлений имеют большое значение, структура большинства сетей электропередачи уже защищена от таких разрушительных факторов. Тем не менее даже для таких высокоавтоматизированных рынков с избыточным резервированием проблема надежности остается чрезвычайно актуальной.

Стоимость выработки альтернативной электроэнергии, несмотря на ее значительное снижение в последние годы, остается выше стоимости генерации на традиционных источниках. В то же время по причине своей мобильности в сочетании с непредсказуемостью по величине электроэнергия от альтернативных источников может временно становиться условно бесплатной на оптовом рынке. Это приводит к появлению выпадающих доходов у объектов классической энергетики, так как краткосрочные спотовые контракты заключаются именно с альтернативными источниками. Поэтому вопрос о возможности интегрировать увеличивающуюся ветровую и солнечную генерацию в энергорынок, позволяя при этом традиционным источникам генерации получать достаточный доход для продолжения предоставления необходимых услуг, требует детального изучения и регулирования посредством не только рыночных механизмов, но и нормативных документов [7].

Тем не менее одной из неустраняемых проблем управления оптовых рынков остается избыточная генерация, которая возникает, когда генерация «обязательна» и вызвана неуправляемыми источниками возобновляемой энергии, комбинированным производством тепла и электроэнергии, атомной генерацией, русловой гидроэнергетикой, и которая необходима для стабильности сети. При этом величина такой генерации оказывается больше, чем существующая подключенная нагрузка плюс экспорт в смежные сети. Основным средством смягчения последствий избыточной генерации во многих существующих системах является сокращение доли возобновляемых ресурсов в общей структуре ресурсов. В будущих системах может повыситься роль систем хранения электроэнергии, систем аварийного восстановления и повышения гибкости для управления избыточной генерацией. Кроме того, возобновляемым ресурсам характерны внезапные изменения структуры предложения (например, с заходом солнца или ухудшением погодных условий производство солнечной энергии прекращается, что требует быстрого наращивания компенсационного производства электроэнергии).

Изменяющаяся роль потребителя, которая стимулирует трансформацию распределения, также вызывает потребность в новых подходах и инструментах планирования распределения для эффективной интеграции распределенной генерации и управления спросом в электрических сетях, а также понимания выгод и затрат на разработку перспективных инвестиционных планов. Новые решения, такие как применение интеллектуальных инверторов для осуществления преобразования от накопителей энергии, ставят перед участниками рынка вопросы оценки экономичности таких решений перед развертыванием. Поскольку предпочтения и потребности потребителей меняются быстрее, чем темпы планирования энергосистемы, может иметь место несоответствие условий эксплуатации. Какие бы инвестиции ни планировались, вероятно, в течение срока реализации проекта может потребоваться пересмотр.

В ряде стран мира, а также в отдельных регионах РФ разрабатываются методы для интеграции распределенной генерации в энергосистему, и их роль возрастает. При этом в различных регионах распределенная генерация играет разную роль: в одних она используется для балансировки нагрузки, в других – для устранения дефицита мощности, в третьих – для замещения «классической» энергетики исходя из экологических, экономических или других факторов. Процессы планирования потребуют достаточной прозрачности, чтобы позволить всем заинтересованным сторонам, включая

поставщиков услуг распределенной генерации, на равных участвовать в принятии долгосрочных решений по функционированию рынка. Необходимо будет разрабатывать договорные положения между электроснабжающими компаниями и поставщиками услуг распределенной генерации для обеспечения надежности и безопасности всего рынка электроэнергии региона, что предпочтительнее заключения кратковременных договоров.

Как правило, решения о надежности основываются на детерминированном двоичном решении: новое предприятие утверждается, если оно устраняет нарушение стандарта надежности. Напротив, экономические решения основаны на том, что ожидаемая стоимость объекта оценивается по ряду вероятных сценариев. Изменяющаяся топология системы электроснабжения, неопределенная нормативно-правовая база, децентрализованные рыночные решения и развивающиеся уязвимости вносят экономические неопределенности и риски, связанные с надежностью, которые не могут быть адекватно оценены с помощью детерминированной бинарной структуры [8].

Методологии вероятностной оценки рисков предлагают основу для рассмотрения основных неопределенностей и рисков. Методы такой оценки при планировании передачи все еще находятся на стадии исследования и не получили широкого распространения. В настоящее время некоторые элементы этой методологии используются для моделирования топологических изменений, таких как вариации уровней возобновляемой генерации, изменение уровня нагрузки из-за погодных условий и выходной мощности распределенной генерации. Однако при этом существенными препятствиями на пути реализации подходов вероятностной оценки рисков при планировании передачи являются:

- традиция планирования по наихудшим сценариям с использованием детерминированного подхода (произойдет событие или не произойдет);

- отсутствие общепринятого в энергетической отрасли подхода к показателям надежности в рамках вероятностной оценки рисков;

- отсутствие стандартизации в сборе данных, а также доступности исторических данных о надежности элементов электросетей (есть общие сводные региональные данные, по которым невозможно оценить надежность отдельных элементов);

- отсутствие квалифицированных специалистов по оценке рисков применительно к энергетике;

- отсутствие эффективных и понятных инструментов моделирования электросетей с элементами разной степени надежности;

- отсутствие общедоступных коммерческих инструментов для оценки безопасности системы в рамках вероятностной оценки рисков.

Долгая история электроэнергетического сектора – это история управления непрерывными (хотя и медленными) изменениями при обеспечении высокого уровня надежности. Технологические возможности электроэнергетики постепенно обновляются по мере необходимости, но изменения, отмечаемые в отчетах исследователей [9, 10], привлекают внимание к усилиям по поддержанию высокой надежности, безопасности и устойчивости электроэнергетического сектора.

Преобразованная сеть 21-го века, вероятно, будет больше инвестировать в гибкость и отказоустойчивость для достижения того же желаемого результата, который является главной директивой сетевых операторов, а именно устойчивой надежности с высоким уровнем обслуживания. Способ управления сетью зависит от возможностей, заложенных в

запас активов, которые составляют сквозную цепочку поставок, но для управления операционными потоками в реальном времени также требуются определенные системы и процессы для постоянного успеха. Сложность сетевых операций требует инструментов управления сетью, которые обеспечивают детальную видимость, и разработки определенных операционных алгоритмов, которые помогают операторам сетки оставаться в курсе изменений от секунды до секунды и от миллисекунды к миллисекунде. Наступила эра расширенных сетевых операций, выполняемых с помощью искусственного интеллекта. Однако это должно происходить в контексте, гарантирующем отражение кибератак, которые могут вывести сети из строя, и осуществляться через рыночные механизмы, чтобы помочь в оценке и обеспечении рентабельных результатов.

Государственные и федеральные регулирующие органы и лица, определяющие политику, играют ключевую роль в обеспечении целостности системы, безопасности и постоянного финансирования электроэнергетического сектора. Планирование, играющее главную роль в обеспечении долгосрочных запасов и целостности потоков, должно развиваться по мере развития самого сектора. Более надежное моделирование, улучшенный анализ рисков и лучшая реализация оптимизации на двустороннем интерфейсе потоков информации и энергии между потребителями и операторами сетей – важные улучшения, которые, вероятно, внесут значительный вклад в преобразование, обеспечат надежность и качество сегодняшних услуг.

Таково состояние управления электроэнергетической сетью в настоящее время. Происходят масштабные трансформации, необходимые для адаптации к новым проблемам безопасности, в сочетании с эволюционным процессом, вызванным инициативами перехода к «зеленой» энергетике и распределенной генерации, которая качественно меняет рынки предложения и спроса. Есть много способов облегчить трансформацию и помочь операторам сетей и другим заинтересованным сторонам адаптироваться к меняющейся физической и кибернетической «топографии» энергетического сектора. Энергетики только начинают отвечать на вопрос, как обеспечить поддержание высокой надежности электроэнергетического сектора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ACER Market Monitoring Report 2019 – Electricity Wholesale Markets Volume (рус. Отчет ACER о мониторинге рынка за 2019 г. – Объем оптовых рынков электроэнергии). URL: [https://documents.acer.europa.eu/Official\\_documents/Acts\\_of\\_the\\_Agency/Publication/ACER%20Market%20Monitoring%20Report%202019%20-%20Electricity%20Wholesale%20Markets%20Volume.pdf](https://documents.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/ACER%20Market%20Monitoring%20Report%202019%20-%20Electricity%20Wholesale%20Markets%20Volume.pdf) (дата обращения: 04.03.2022).
2. Quarterly report on European electricity markets. Volume 14 (issue 3, covering third quarter of 2021). European Commission, 2022. URL: [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-01/Quarterly%20Report%20on%20European%20Electricity%20markets%20Q3%202021\\_v1.2\\_1.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-01/Quarterly%20Report%20on%20European%20Electricity%20markets%20Q3%202021_v1.2_1.pdf). (дата обращения: 04.03.2022).
3. Wind energy in Europe 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026 (рус. Ветроэнергетика в Европе 2021. Статистика и перспективы на 2022-2026 годы). Published in February 2022 WindEurope Business Intelligence. URL: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/> (дата обращения: 04.03.2022).

4. Дегтярев А. Замерзающие жители Техаса начали получать счета за свет на тысячи долларов // *ВЗГЛЯД. Деловая газета*. URL: <https://vz.ru/news/2021/2/19/1085983.html> (дата обращения: 04.03.2022).
5. Бездействие властей спровоцировало гуманитарную катастрофу в замороженном Техасе // *РИА ФАН*. URL: <https://riafan.ru/1393247-bezdeistvie-vlastei-sprovocirovalo-gumanitarnuyu-katastrofu-v-zamorozhennom-tekhase> (дата обращения: 22.02.2022).
6. U.S. Electricity Grid & Markets (рус. Электрическая сеть и рынки США). URL: <https://www.epa.gov/green-power-markets/us-electricity-grid-markets> (дата обращения: 04.03.2022).
7. Оптовый рынок электрической энергии и мощности // *Ассоциация «Некоммерческое партнерство Совет рынка по организации эффективной системы оптовой и розничной торговли электрической энергией и мощностью»*. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm> (дата обращения: 04.03.2022).
8. Смил В. Энергетика: мифы и реальность. Научный подход к анализу мировой энергетической политики. М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА. 2012. 272 с.
9. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Управление рисками и надежностью в системах электроснабжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. № 2 (10). 2021. С. 56–67.
10. Quadrennial energy review. Transforming the nation's electricity system: the second installment of the QER. (рус. Четырехлетний энергетический обзор. Преобразование системы электроснабжения страны: вторая часть QER). January 2017. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/02/f34/Quadrennial%20Energy%20Review-Second%20Installment%20%28Full%20Report%29.pdf> (дата обращения: 04.03.2022).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*СТЕПАНОВ Александр Александрович* – главный инженер АО «Тверьгорэлектро», 170008, Россия, г. Тверь, ул. Ротмистрова, 27. E-mail: [gitge@mail.ru](mailto:gitge@mail.ru)  
*ОСЕИ-ОВУСУ Раймонд* – инженер, ООО «Электрическая компания Ганы», г. Аккра, Гана. E-mail: [orajmond2008@mail.ru](mailto:orajmond2008@mail.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Степанов А.А., Осеи-Овусу Р. Перспективное планирование развития электро-энергетического сектора // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 48–56.



## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК: 631.81

### БИОЛОГИЧЕСКАЯ АЗОТФИКСАЦИЯ И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ РАННИХ ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ ЛЬНА КУЛЬТУРНОГО

*В.В. Орлов, Е.В. Ожимкова*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Орлов В.В., Ожимкова Е.В., 2022

**Аннотация.** В условиях современного земледелия обеспечение растений различными видами питания продолжает оставаться одним из важнейших факторов регулирования продуктивности сельскохозяйственных культур. Представленная работа посвящена исследованию влияния различных источников азотного питания на ранние этапы развития льна культурного. Проведено также исследование влияния азотфиксации на накопление белка в надземной и корневой частях растения.

**Ключевые слова:** биологическая азотфиксация, азотфиксаторы, механизм фиксации азота, бактериальные удобрения, лен.

#### ВВЕДЕНИЕ

Использование биологических удобрений, которые характеризуются высоким антагонистическим эффектом по отношению к широкому спектру фитопатогенов и высокой азотфиксирующей активностью, позволяет значительно повысить урожайность культур на фоне снижения норм вносимых минеральных удобрений [1].

Разнообразные биохимические процессы, протекающие в почве, обусловлены прежде всего жизнедеятельностью многочисленных почвенных микроорганизмов. Между почвенной микрофлорой и растениями в процессе длительной эволюции сформировались особые сложные взаимоотношения как симбиотического, так и антагонистического характера. Симбиоз между растениями и почвенными бактериями имеет в основном трофическую природу. Растения, выделяя большой набор специфических органических соединений, способствуют формированию определенного типа микробиоценоза в зоне своей ризосферы. Жизнедеятельность микроорганизмов, в свою очередь, в значительной степени определяет режим корневого питания растений, их устойчивость к заболеваниям и неблагоприятным условиям внешней среды, а в конечном счете – урожайность [2].

Биологическая азотфиксация – усвоение молекулярного азота воздуха азотфиксирующими бактериями (азотфиксаторами) с образованием соединений азота, доступных для использования другими организмами, в частности растениями [3, 4].

Все известные азотфиксаторы могут быть классифицированы следующим образом:

симбиотические азотфиксаторы – микроорганизмы, которые усваивают азот атмосферы, только находясь в симбиозе с высшими растениями (бактерии родов *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mezorhizobium*, *Sinorhizobium*, *Azorhizobium*);

свободноживущие азотфиксирующие бактерии (бактерии родов *Clostridium*, *Azotobacter*, *Beijerinckia* и др.; азотфиксирующие фототрофные бактерии, цианобактерии);

ассоциативные азотфиксаторы – микроорганизмы, обитающие на поверхности корневой системы злаков, т.е. живущие в ассоциации с высшими растениями (бактерии родов *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Klebsiella*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter* и др.).

Потребность в дальнейшем изучении и углублении знаний о фиксации азота вызвана назревшей необходимостью более глубокого понимания природы, взаимосвязей между отдельными ее компонентами, а также необходимостью в увеличении урожайности сельскохозяйственных культур в связи с ростом населения Земли и повышением спроса на пищевую продукцию [5–7].

Основными преимуществами бактериальных удобрений перед химическими средствами являются:

поддержание и сохранение окружающей среды;

получение экологически чистой продукции;

сохранение всех взаимосвязей и цепей биосферы, созданных природой;

биологизация земледелия;

восстановление плодородия почвы и т.д. [8].

В современных биоудобрениях довольно часто используют симбиотические азотфиксаторы – клубеньковые бактерии (*Rhizobium sp.*, *Bradyrhizobium sp.*), а также ассоциативные азотфиксаторы (*Azospirillum*, *Azotobacter*, *Agrobacterium*, *Azomonas*). Однако при внедрении в сельское хозяйство удобрений на основе азотфиксирующих бактерий необходимо учитывать их возможное (хоть и незначительное) влияние на экосистемы [5, 9].

Целью представленной работы являлось изучение накопления белка в надземной и корневой частях льна культурного на ранних этапах развития при различных условиях азотного питания.

В соответствии с целью работы были определены задачи исследования:

экспериментальное определение содержания белковых компонентов в надземной части и корнях у различных сортов льна при варьировании условий азотного питания;

обоснование вариантов оптимального азотного питания льна культурного на ранних этапах онтогенеза.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Семена льна предоставлены ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур».

Вегетационные опыты, в которых растения выращивают в сосудах с чистым кварцевым песком, обогащенным определенными питательными солями (смесями),

называют песчаными культурами. В песчаных культурах изучают роль отдельных элементов, их концентраций и соотношений в питании растений, явления антагонизма и синергизма между различными элементами и другими факторами роста и развития растений. В представленной работе вегетационные опыты проводились на песчаных культурах при постоянном контроле условий освещенности и влажности. Семена в песчаной культуре проращивали при температуре  $22 \pm 0,5$  °С. На протяжении всего эксперимента (10 сут) ежедневно увлажняли верхний слой песка раствором соответствующего удобрения (или водой в случае контрольного опыта) [10].

В данной работе в качестве источников азотного питания использовались такие растворы удобрений, как раствор Кнопа, раствор Кнопа с сульфатом аммония, раствор микробиологического удобрения «Байкал ЭМ-1».

Для приготовления раствора Кнопа использовали 1 л дистиллированной воды, в котором растворяли 0,572 г кальция азотнокислого ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), 0,143 г калия азотнокислого ( $\text{KNO}_3$ ), 0,071 г калия хлористого ( $\text{KCl}$ ), 0,143 г калия фосфорнокислого ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ). Общее соотношение N:P:K равнялось 65:8:27.

Для того чтобы приготовить раствор Кнопа с сульфатом аммония, отмеряли 1 л дистиллированной воды и растворяли в нем 0,572 г кальция азотнокислого ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), 0,143 г калия азотнокислого ( $\text{KNO}_3$ ), 0,071 г калия хлористого ( $\text{KCl}$ ), 0,143 г калия фосфорнокислого ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) и 0,125 г сульфата аммония ( $\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .

Для приготовления раствора микробиологического удобрения «Байкал ЭМ-1» отмеряли 1 л дистиллированной воды и добавляли 1 мл удобрения (согласно инструкции к коммерческому препарату).

Для проведения экспериментов использовали чистый кварцевый песок с диаметром частиц менее 0,5 мм (просеивали его через сита с соответствующим диаметром ячеек). После просеивания песок промывали – сначала водопроводной, а затем дистиллированной водой, просушивали в лабораторном сушильном шкафу и использовали для набивки сосудов. Затем семена льна исследуемых сортов высаживали в подготовленные сосуды с песком.

На протяжении 10 дней верхний слой песка ежедневно увлажняли раствором соответствующего удобрения (водой для контроля).

При подготовке растительного материала для проведения экспериментов по определению содержания белков в наземной и корневой частях с помощью шпателя доставали из сосуда с песком ростки льна культурного. Все ростки тщательно промывали дистиллированной водой с целью очистить растения от крупинки песка, которые могут повлиять на результат анализов, после чего каждый росток разделяли на надземную и корневую части (рис. 1).

На следующем этапе исследований определяли содержание белков в корневой и надземной частях побегов льна биуретовым методом (предварительную экстракцию белков из растительного материала проводили 7%-м раствором хлорида натрия, гидромодуль 1:10) [11–14].



Рис. 1. Корневая и надземная части побегов льна, выращенных в песчаной культуре

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На диаграммах (рис. 2–4) представлено содержание белка в надземной и корневой частях побегов каждого исследуемого сорта льна культурного.

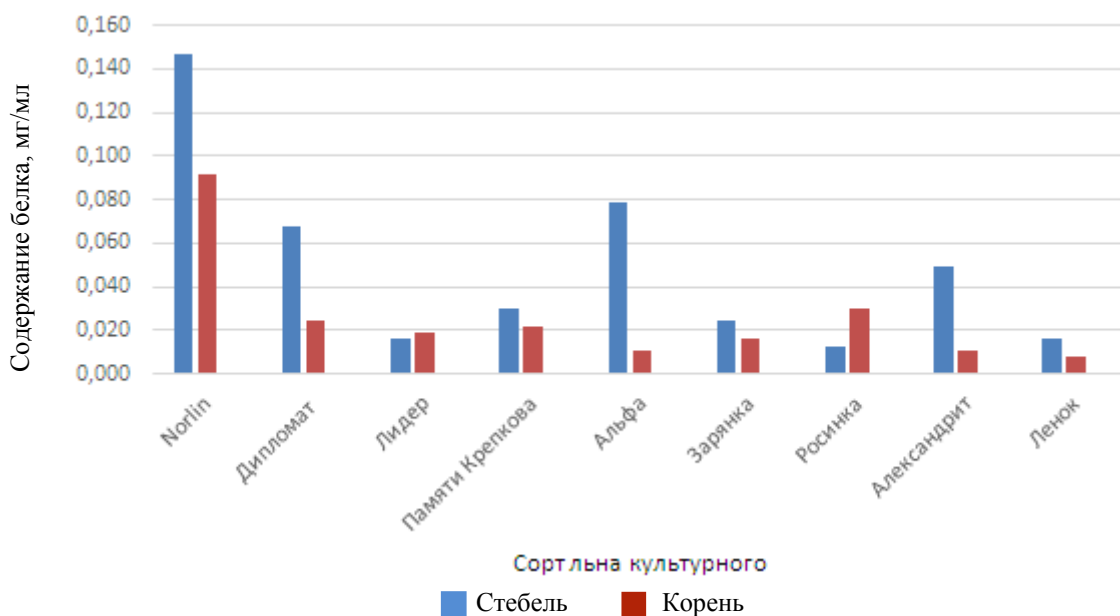


Рис. 2. Диаграмма содержания белка в надземной и корневой частях побегов льна культурного (условия азотного питания – раствор Кнопа)

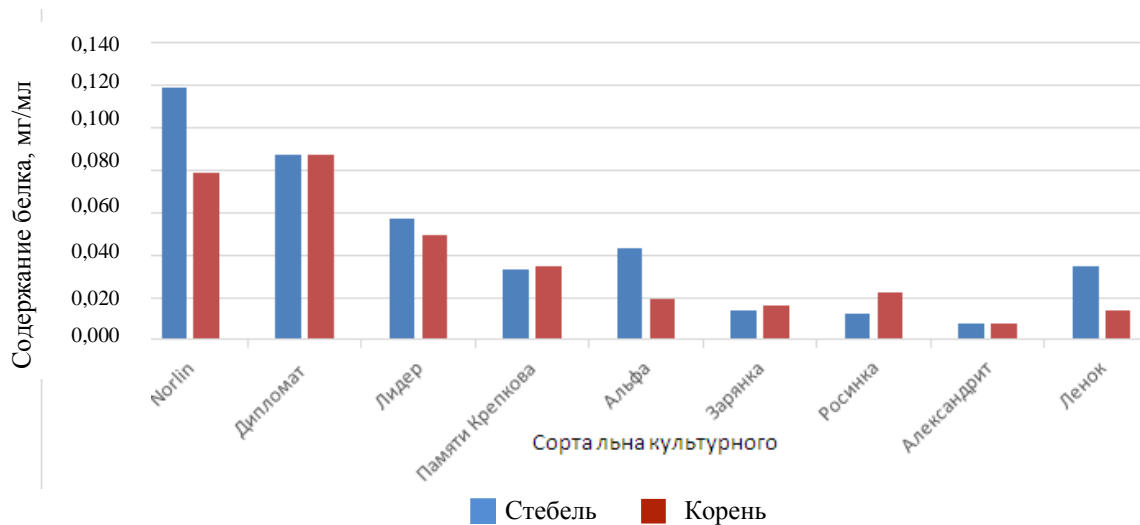


Рис. 3. Диаграмма содержания белка в надземной и корневой частях побегов льна культурного (условия азотного питания – раствор Кнопа с сульфатом аммония)

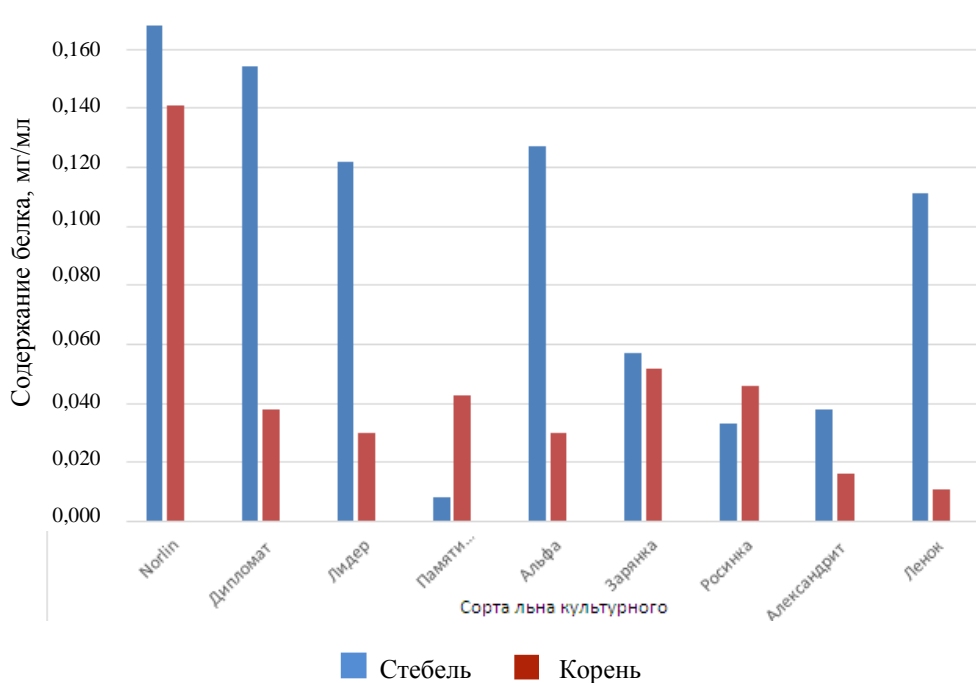


Рис. 4. Диаграмма содержания белка в надземной и корневой частях побегов льна культурного (условия азотного питания – биоудобрение)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе на примере нескольких сортов льна масличного и льна-долгунца исследовано накопление белка в побегах и корнях в контролируемых условиях азотного питания. В качестве материала для исследования были изучены семена девяти сортов льна, различающихся по морфотипу, а также по месту и времени создания сорта.

Количество белка у изученных сортов различно (амплитуда различий превышает двукратное значение) и зависит от используемого источника азотного питания. Однако следует отметить, что использование компонентов, обеспечивающих контролируемые условия азотного питания, во всех сериях экспериментов положительно влияло на рост растений. При различных условиях азотного питания установлено, что значения общей массы навески надземной части растения для каждого сорта отличаются, но при этом относительное содержание белка максимально при использовании биоудобрения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шайхутдинов Ф.Ш. Эффективность применения бактериальных удобрений Азотовит и Бактофосфин на серых лесных почвах Республики Татарстан // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2013. № 3 (23). С. 29–34.
2. Терещенко Н.Н. Биоудобрения на основе микроорганизмов: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет. 2003. 60 с.
3. Шукин В.Б. Физиология и биохимия растений: словарь терминов и понятий. Оренбург: Оренбургский государственный аграрный университет. 2013. 144 с.
4. Сытников Д.М. Биотехнология микроорганизмов-азотфиксаторов и перспективы применения препаратов на их основе // *Biotechnologia Acta*. 2012. Т. 5. № 4. С. 34–45.
5. Клещев Н.Ф. Агробиотехнология: Биологическая фиксация молекулярного азота: учебное пособие. Харьков: НТУ «ХПИ». 2014. 168 с.
6. Hoffman V.M., Lukoyanov D., Yang Z.-Y., Dean D.R., Seefeldt L.C. Mechanism of nitrogen fixation by nitrogenase: The next stage // *Chemical Reviews*. 2014. № 114, pp. 4041–4062.
7. Эмер Н.Р. Структурно-функциональные особенности групп микроорганизмов цикла азота в почвах с длительным применением минеральных удобрений. Дисс... канд. биол. наук. Москва. 2016. 136 с.
8. Фауст Е.А. Сельскохозяйственная биотехнология: краткий курс лекций. Саратов: Саратовский ГАУ. 2016. 76 с.
9. Shridhar V.S. Review: Nitrogen Fixing Microorganisms // *International Journal of Microbiological Research*. 2012. № 3 (1), pp. 46–52.
10. Сова В.В., Кусайкин М.И. Выделение и очистка белков. Владивосток: Дальневосточный ун-т. 2006. 42 с.
11. Пасынский А.М. Химия белка. М.: Изд-во иностранной литературы. 2002. 358 с.
12. Медведева А.Н. Методы биохимических исследований // *Вопросы медицинской химии*. 2001. № 4. С. 426–438.
13. Абрамова З.И. Исследование белков и нуклеиновых кислот. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина. 2006. 162 с.
14. Семак И.В., Зырянова Т.Н., Губич О.И. Биохимия белков. Минск: БГУ. 2007. 67 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ОРЛОВ Владимир Владимирович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: v.v.orlov95@gmail.com

*ОЖИМКОВА Елена Владимировна* – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: eozhimkova@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Орлов В.В., Ожимкова Е.В. Биологическая азотфиксация и ее значение для ранних этапов развития льна культурного // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 2 (14). С. 57–63.

УДК 667.64:678.026

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ  
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ СТЕКЛОТКАНИ**

*В.И. Столяренко, В.И. Ольшанский*

*УО «Витебский государственный технологический университет» (г. Витебск)*

© Столяренко В.И., Ольшанский В.И., 2022

**Аннотация.** В статье рассмотрены элементы технологии и способы физической модификации полимеров. Разработаны рекомендации по подбору компонентов и отдельных элементов технологического процесса производства композиционного материала на основе стеклоткани с улучшенными механическими характеристиками. Представлены процессы и зависимости влияния свойств отдельных компонентов композита на механические свойства материала в целом. Выполнен анализ методов физической модификации полимеров, отобраны наиболее приемлемые варианты. Проведена их сравнительная характеристика, рассмотрена возможность их применения в технологическом процессе. Показаны зависимости механических характеристик полимерной эпоксидной матрицы от длительности облучения ее ультрафиолетовым излучением во время полимеризации, в ходе которого экспериментально подтверждена эффективность данного метода. Получены зависимости, отражающие характер и степень влияния длительности ультрафиолетового облучения эпоксидного полимера на его механические свойства.

**Ключевые слова:** композит, стекловолокно, модификация, эпоксидная смола, полимеризация, свойства, модуль упругости, растяжение, изгиб.

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие производственных технологий ставит вопрос разработки конструкционных материалов, превосходящих по своим параметрам традиционно используемые. Одно из перспективных направлений в этой области – разработка полимерных материалов. Полимерные материалы обладают чрезвычайно широкими возможностями ввиду практически безграничной варибельности состава композиции и методов модификации, а также благодаря широкой номенклатуре самих полимеров и наполнителей. Зачастую только полимеры способны соответствовать возрастающим требованиям современных технических разработок. В области машиностроения и

строительства полимерные материалы все активнее конкурируют с такими материалами, как металл, дерево, железобетон. Достоинством полимерных материалов является сочетание требуемого уровня механических свойств с низкой стоимостью материала и высокой производительностью при формировании изделий.

Композиционные конструкционные материалы на основе термореактивных олигомеров находят широкое применение в строительстве и во многих случаях заменяют металлы, а благодаря низкой плотности, высокой коррозионной стойкости и возможности замены нескольких металлических деталей разного назначения одной, выполненной из полимеркомпозита, они незаменимы в различных областях строительной индустрии. В строительных конструкциях широкое применение находят стеклопластики, производство которых на сегодняшний день превысило 2 млн т. Стеклопластиковые материалы на основе термореактивных олигомеров, в том числе эпоксидных, могут эффективно использоваться для изготовления строительных изделий и конструкций в энергетической отрасли [1].

Благодаря малому удельному весу композиционные материалы на основе стеклоткани превосходят сталь по значению удельной прочности: равнопрочная конструкция из стеклопластика оказывается в два раза легче стальной. Низкий удельный вес, низкая теплопроводность (сравнимая с теплопроводностью древесины), высокая диэлектрическая прочность, отсутствие электрохимической коррозии, а также высокая атмосферостойкость и биологическая стойкость обеспечили широкое применение материала [2].

Актуальность совершенствования физико-механических свойств полимеров путем их модификации обусловлена расширением сферы применения данных материалов в строительстве и различных областях техники.

В статье приведен анализ элементов технологии и способов модификации полимеров с целью разработки рекомендаций по повышению механических характеристик полимерного материала, описано экспериментальное исследование зависимости механических характеристик полимерной матрицы от продолжительности облучения УФ (ультрафиолетовым) излучением в момент полимеризации матрицы.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Для обеспечения высоких механических характеристик рационально применять в качестве матрицы эпоксидный полимер, обладающий приемлемыми характеристиками адгезии к стекловолокну. Оптимальным вариантом может являться смола ЭД-20 ГОСТ 10587-84 – олигомер, состоящий из эпихлоргидрина и дифенилолпропана, в изначальном состоянии представляющий собой вязкую прозрачную массу с янтарным оттенком, которая при воздействии отвердителя переходит в твердое, нерастворимое, неплавкое состояние.

Стандартными отвердителями для этой смолы являются полиэтиленполиаминовый (ПЭПА) отвердитель ТУ 6-02-594-85, триэтилентетрамин (ТЭТА) ТУ 6-02-1099-83. Этал-45 ТУ 2257-045-18826195-01 – это нетоксичный отвердитель аминного типа, который не имеет неприятного запаха и не вызывает аллергических реакций, по свойствам близок к ПЭПА, но смола после отверждения более пластична. Данный отвердитель более технологичен, не образует повышенное число поперечных сшивок полимолекулы, благодаря чему обеспечивается лучшая эластичность матрицы, а процесс отверждения идет несколько быстрее, чем у ТЭТА.



Стекловолокно при изготовлении стеклопластиков применяется в виде ровницы, пряжей, нитей, тканей, матов. При текстильной обработке снижается коэффициент использования прочности единичного стеклянного волокна. Это объясняется разрушением части волокон, возникновением поверхностных трещин, неоднородностью работы волокон при закручивании, усложнением пропитки связующим [3].

По условию работы волокон на растяжение-сжатие наиболее подходящими материалами представляются ровница с диаметром волокна от 5 до 11 мкм, расположенная под углом 45–90°, сатин 8/3 и ровистан 30А.

Специфика использования композитов в строительстве предполагает контакт с влажной средой, и здесь оптимальным вариантом является бесщелочное, алюмоборосиликатное стекло марки «Е» [4].

В целом свойства стеклопластикового композита зависят от прочности и деформационных свойств матрицы, состава и ориентации наполнителя и прочности адгезионного слоя. Адгезионное взаимодействие происходит по границе контакта наполнителя и матрицы, образуя прилегающий к поверхности раздела переходный слой. В переходном слое образуется связь между матрицей и наполнителем, влияющая на условие торможения трещин в материале. Если прочность переходного слоя меньше прочности волокон наполнителя, то трещина будет проходить по поверхности раздела, а на изломе будет заметно вытягивание волокон из матрицы, следовательно, чем больше адгезия, тем выше механические свойства. При превышении верхнего предела прочности адгезионного слоя, определяемого прочностью наполнителя, матрица теряет свои свойства упругого связующего [4].

При разработке композиционного многокомпонентного материала необходимо стремиться максимально использовать свойство каждого элемента, чтобы обеспечить однородность их деформации при приложении нагрузки, и стараться передать максимум нагрузки несущим армирующим волокнам [5].

В работе [6] описан комплекс требований, связывающих свойства матрицы и волокон: при оптимальном содержании армирующих волокон 70 % от объема материала их прочностные свойства реализуются на 90 %.

Требования выражаются системой неравенств:

$$\frac{E_{\text{матрицы}}}{E_{\text{стекловолокна}}} > 0,064,$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;

$$\frac{\sigma_{\text{матрицы}}}{\sigma_{\text{стекловолокна}}} > 0,06,$$

где  $\sigma$  – прочность при растяжении, МПа;

$$\frac{\varepsilon_{\text{матрицы}}}{\varepsilon_{\text{стекловолокна}}} > 1,5,$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация;

$$\frac{E_{\text{матрицы}}}{E_{\text{стекловолокна}}} > 0,06 ;$$

$$\frac{\tau_{адгезии}}{\sigma_{стекловолокна}} > 0,015,$$

где  $\tau$  – прочность при сдвиге, МПа;

$\sigma$  – прочность при растяжении, МПа;

$$\frac{\varepsilon_{матрицы}}{\varepsilon_{стекловолокна}} > 1,7;$$

$$\frac{\tau_{матрицы}}{\tau_{стекловолокна}} \geq 1.$$

Эпоксидная матрица требует доработки, снижающей хрупкость и повышающей упругие свойства материала. При этом необходимо стремиться избежать удорожания материала, возникающего при химических методах модификации полимеров. Частичного улучшения механических свойств можно добиться применением отвердителя «Этал 45», повышающего пластичность матрицы. Дальнейшее повышение пластичности возможно при применении физических методов модификации полимера. В отличие от химических физические методы модификации экологичны, управляемы, легко поддаются автоматизации.

Физическая модификация делится на термическую, облучение, вакуумно-компрессионное воздействие, периодическую деформацию, воздействие магнитным полем [7].

На основании данных работы [7] проведен анализ наиболее приемлемых методов физической модификации полимеров (табл. 1).

В результате анализа методов физической модификации одним из наиболее перспективных видится метод воздействия УФ-излучения на матрицу полимерного композита. Достоинства и особенности воздействия данного метода: метод при минимальных энергетических затратах способен легко встраиваться в техпроцесс производства композита, при этом УФ-излучение способствует образованию новых цепочек на начальном этапе полимеризации, уменьшается количество поперечных сшивок полимолекулы, структура измельчается и уплотняется, и, как следствие, повышаются прочность, жесткость и упругость материала. Кроме того, на начальном этапе к материалу подводится дополнительная энергия, вызывающая ускорение полимеризации матрицы.

Таблица 1

Анализ методов физической модификации полимеров

Способ модификации	Характер воздействия на полимер	Влияние на свойства полимера	Возможность применения в техпроцессе
Давление, холодная прокатка	Влияет на структурную упорядоченность	Повышает температуру кристаллизации, повышает прочностные характеристики на 10 %	Легко вписывается в техпроцесс, положительно влияет на заданные свойства

Ультрафиолетовое излучение. Время воздействия 15–30 мин, длина волны 200–350 нм, мощность излучателя 1,5 Вт./см <sup>2</sup>	Ускоряет отверждение, снижает энергию активации отверждения, повышает вероятность образования линейных цепей на начальной стадии с последующим формированием из них сетчатой структуры	Повышает прочностные характеристики на 30 %, снижает водопоглощение материала, увеличивает адгезию	Простота оборудования, низкие энергозатраты, не усложняет техпроцесс. Требуется защита персонала
Ультразвуковая обработка А. Очистка нити от замасливателя 5 мин, частота 110 Гц. Б. Холодная прокатка + + ультразвук 20 КГц. В. Обработка матрицы 2–7 Вт./см <sup>2</sup> . Г. Обработка композита при застывании	А. Скорость очистки увеличивается в 30 раз. Б. Влияет на глубину воздействия. В. Снижает вязкость смолы. Г. Повышает равномерность распределения компонентов	А. Повреждает волокна. Б. Повышается упругость в 1,4 раза, прочность – на 12 %. В. Время пропитки уменьшается в 1,6 раза. Г. Повышает прочностные свойства	Имеется значительный положительный эффект, требуется защита персонала, дополнительное оборудование
Вибрация + + УФ-излучение	Перемешивание слоев повышает эффективность воздействия	Повышает на 40 % прочность и упругость, снижает водопоглощение материала, увеличивает адгезию	Заметный эффект в сочетании с технологичностью, требуется защита персонала

Способ модификации	Характер воздействия на полимер	Влияние на свойства полимера	Возможность применения в техпроцессе
Воздействие электромагнитного поля, время воздействия 15 мин, напряженность магнитного поля 636 кА/м: А. Постоянного. Б. Переменного	А. Растет упорядоченность надмолекулярной структуры. Б. Понижает температуру отверждения	Повышение прочностных характеристик на 30–90 %; постоянное поле вызывает анизотропию свойств	Экономичность, простота управления, значительный положительный эффект. Требуется защита персонала

<p>Механотермический метод:</p> <p>А. Обкатка стальным роликом при <math>t = 65-90</math> °С, давление ролика 600–750 МПа.</p> <p>Б. Вытяжка при температуре выше точки кристаллизации на 15 °С</p>	<p>А. Формирует изделие с эластичным ядром и жестким внешним слоем.</p> <p>Б. Меняет структуру строения материала</p>	<p>Прочностные свойства поверхностного слоя в 10 раз превосходят исходный образец.</p> <p>Прочность повышается в 4–5 раз по всей толщине образца</p>	<p>Возможно применение метода на стадии протягивания полосы от экструдера до прессы, значительно повышает механические свойства композита</p>
---	---	--	---

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований способом заливки в форму изготовлены образцы из эпоксидного полимера ЭД-20 ГОСТ 10587-84.

Размеры образцов:

для испытания на изгиб по ГОСТ 4648-71: длина 80 мм, ширина  $(25 \pm 0,50)$  мм, толщина  $(2,00 \pm 0,20)$  мм;

для испытания на разрыв по ГОСТ 11262-80: длина 250 мм, расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце, составляет  $(170 \pm 5)$  мм; расчетная длина  $(50 \pm 1)$  мм, ширина  $(25 \pm 0,50)$  мм, толщина  $(2,00 \pm 0,20)$  мм.

Толщина образца измерена в точках, находящихся на расстоянии  $\pm 2$  мм от центра образца, по ГОСТ 6507 с использованием микрометра, обеспечивающего измерение с погрешностью  $\pm 0,01$  мм. Ширина образца измерена в соответствии со стандартом ИСО 16012 «Пластмассы. Определение линейных размеров испытательных образцов» с использованием микрометра, обеспечивающего измерение с погрешностью  $\pm 0,02$  мм. Условия кондиционирования и испытания образцов в стандартной атмосфере 23/50, температура воздуха 23 °С, относительная влажность 50 % в соответствии с ГОСТ 12423-2013.

Продолжительность воздействия излучения изменялась дискретно: 0; 7,5; 15; 30; 45 мин с каждым новым образцом. Измерение выдержки производилось с помощью лабораторного таймера ТЛ-301 с индикацией времени в диапазоне до 99 мин 59 с. В качестве источника излучения применялась лампа T8 UVC G13 15 Вт, установленная на расстоянии 100 мм от поверхности материала, длина волны излучения 254 нм. В каждом опыте применялась пятикратная повторяемость.

Механические свойства образцов изучены при проведении испытания в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 9550-81, система измерения нагрузки – в соответствии с требованиями для группы машин 0-У по ГОСТ 28840 (предел допускаемой погрешности  $\pm 0,5$  % измеряемой нагрузки). Для проведения испытаний была использована разрывная лабораторная машина WDW-20E, соответствующая требованиям ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб». Общие технические характеристики машины приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики испытательной машины WDW-20E

Характеристика	Значение
Максимальная нагрузка	20 кН
Точность измерения приложенной нагрузки	±0,5 %
Точность измерения деформации образца	±0,5 %
Разрешение перемещения	0,001 мм
Точность измерения перемещения	±1 %
Диапазон скоростей нагружения	0,005–500 мм/мин
Максимальное перемещение траверсы при растяжении и сжатии	800 мм
Ширина пространства для испытаний	370 мм

Скорость расхождения захватов при растяжении составляет  $(1,0 \pm 0,5) \%$  /мин, при изгибе 3 мм/мин, расстояние между опорами при изгибе 60 мм.

Модуль упругости при растяжении определялся как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительного удлинения. Модуль упругости при растяжении ( $E_p$ ) в МПа вычислялся по формуле

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_0}{A_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)},$$

где  $F_2$  – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3 %, Н;

$F_1$  – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,1 %, Н;

$l_0$  – расчетная длина образца, мм;

$A_0$  – площадь начального поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>;

$\Delta l_2$  – удлинение, мм, соответствующее нагрузке  $F_2$ ;

$\Delta l_1$  – удлинение, мм, соответствующее нагрузке  $F_1$ .

Модуль упругости при изгибе определялся как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительной деформации (по трехточечной схеме нагружения).

Относительная деформация крайних волокон рассчитывалась по формуле

$$\zeta = \frac{6zh}{L_v^2},$$

где  $z$  – значение прогиба, мм;

$h$  – толщина образца, мм;

$L_v$  – расстояние между опорами, мм.

Скорость деформации при растяжении определялась как отношение скорости перемещения подвижного элемента испытательной машины ( $v$ ) к длине образца между кромками зажимов. При изгибе скорость деформации рассчитывалась по формуле

$$v = \frac{u \cdot L_v^2}{6h},$$

где  $u$  – скорость деформации крайних волокон образца, равная  $0,01 \text{ мин}^{-1}$ .

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости изменения механических свойств матрицы от времени облучения при полимеризации (рис. 1–4).

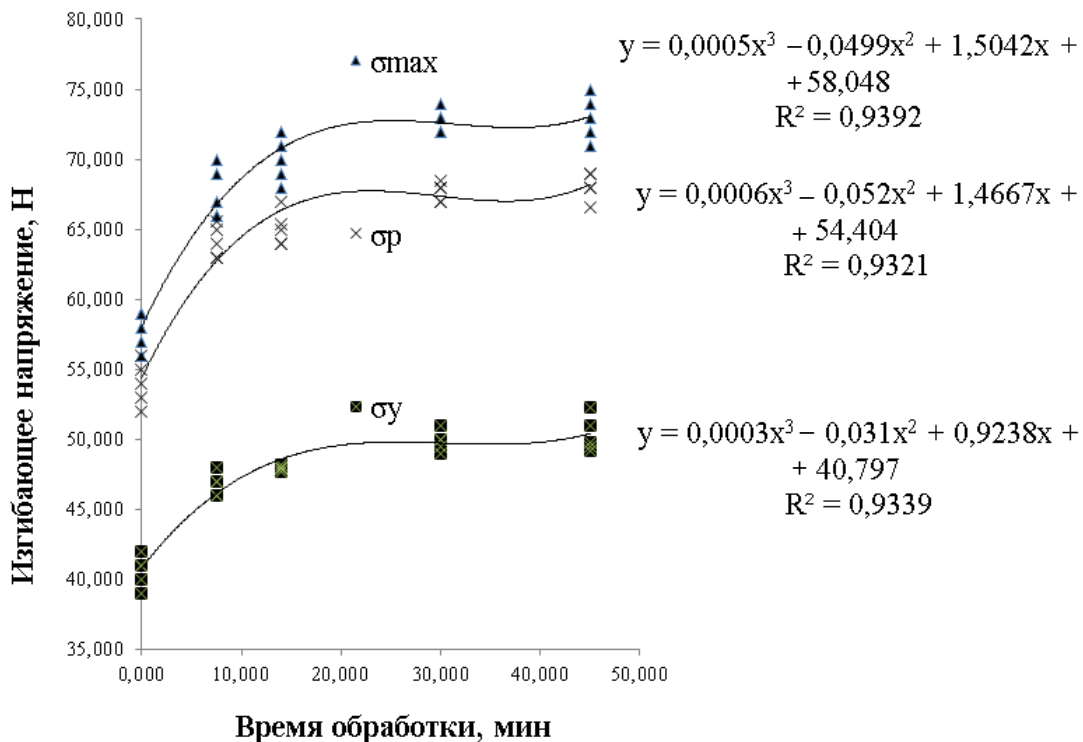


Рис. 1. Изменение механических параметров при испытании эпоксидного полимера на изгиб в зависимости от продолжительности воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации:  $\sigma_{\max}$  – изгибающее напряжение при максимальной нагрузке;  $\sigma_p$  – изгибающее напряжение при разрушении;  $\sigma_y$  – максимальное изгибающее напряжение упругой деформации образца

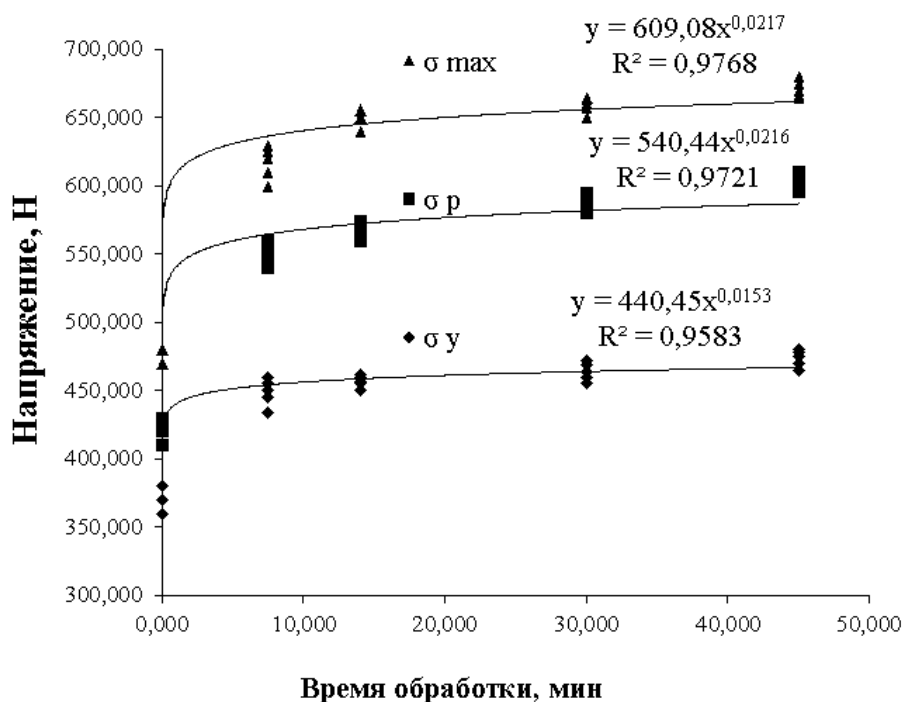


Рис. 2. Изменение механических параметров эпоксидного полимера при испытании на растяжение в зависимости от продолжительности воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации:  $\sigma_{max}$  – напряжение растяжения при максимальной нагрузке;  $\sigma_p$  – напряжение растяжения при разрушении;  $\sigma_y$  – максимальное напряжение растяжения упругой деформации образца

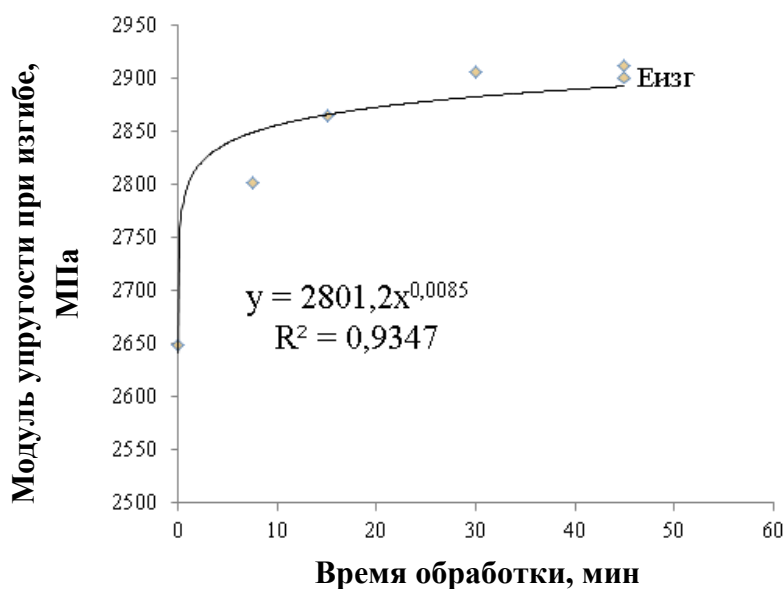


Рис. 3. Зависимость изменения модуля упругости при изгибе от продолжительности воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации

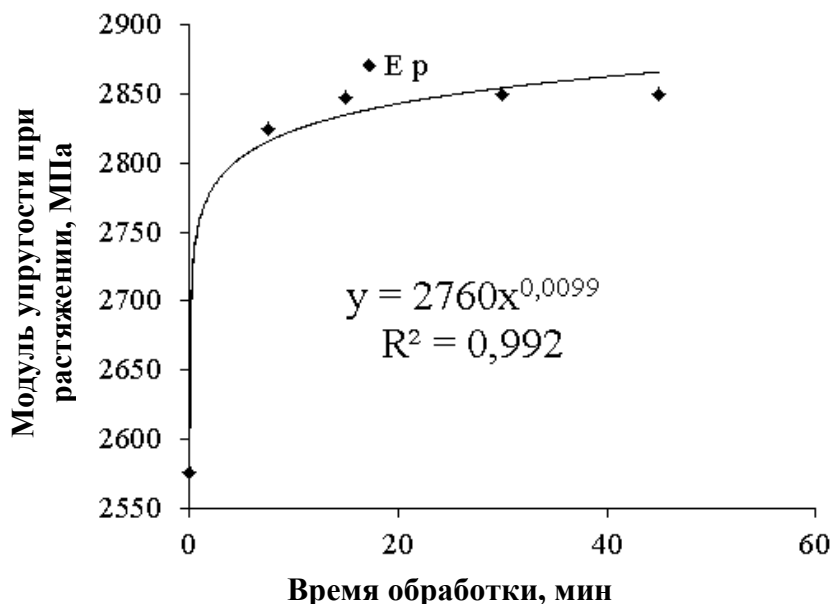


Рис. 4. Зависимость изменения модуля упругости при растяжении от продолжительности воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации

Согласно представленным на рис. 1–4 графикам, механические характеристики облученных образцов (предел напряжения при максимальной нагрузке, предел напряжения при разрушении и предел напряжения при упругой деформации) повысились в среднем на 15–20 %.

Рассчитанный на основании проведенных измерений средний модуль упругости при изгибе и растяжении выявил аналогичные тенденции зависимости показателей упругости от времени облучения образцов. Данные зависимости с достоверностью не ниже 93 % описываются приведенными на графиках математическими моделями.

Анализируя графики, можно прийти к выводу, что облучение наиболее эффективно в течение первых 8–10 мин обработки. Дальнейшее увеличение времени облучения имеет заметно меньшую эффективность воздействия. На графике это выражается снижением скорости изменения параметров упругости образцов (график переходит в пологую траекторию). Это вполне сопоставимо с теоретическими предпосылками, объясняющими воздействие УФ-излучения на процесс полимеризации эпоксидного олигомера.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проанализированы элементы технологии и способы физической модификации полимеров, способные обеспечить повышенные механические характеристики материала; представлено экспериментальное исследование зависимости механических характеристик полимерной матрицы от времени воздействия УФ-излучения в процессе полимеризации материала с целью повышения модуля упругости при изгибе и растяжении. В ходе эксперимента получены зависимости механических характеристик эпоксидной матрицы от времени облучения при полимеризации материала. В результате облучения эпоксидной смолы ЭД-20 при полимеризации механические характеристики повысились на 15–20 %. Наибольший эффект достигается при продолжительности облучения, составляющей 8–10 мин. Результаты эксперимента подтверждают, что данный



метод физической модификации полимерной матрицы обладает достаточно высокой эффективностью и может применяться в технологическом процессе производства многокомпонентных полимерных материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ястребинская А.В. Разработка и применение композиционного материала на основе эпоксидиановой смолы для строительных конструкций и теплоэнергетики // *Современные наукоемкие технологии*. 2004. № 2. С. 173–174.
2. Бондалетова Л.И., Бондалепов В.Г. Полимерные композиционные материалы. Томск: Томский политехнический университет. 2013. 111 с.
3. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: НОТ. 2008. 820 с.
4. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. М.: Научный мир. 2009. 384 с.
5. Каримова Л.К., Ахметшина А.И., Дебердеев Т.Р. Производство изделий из стеклопластиков. Материалы, технологии и методы испытаний. Казань: Школа. 2019. 106 с.
6. Мельников Д.А., Громова А.А., Раскутин А.Е., Курносов А.О. Теоретический расчет и экспериментальное определение модуля упругости и прочности стеклопластика ВПС-53/120 // *Труды ВИАМ*. 2017. № 1 (49). С. 64–75.
7. Кестельман В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. М.: Химия. 1980. 224 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*СТОЛЯРЕНКО Владимир Ильич* – аспирант кафедры «Теплоэнергетика», УО «Витебский государственный технологический университет», 210035, г. Витебск, Московский пр., д. 72. E-mail: stoljarenkov@mail.ru

*ОЛЬШАНСКИЙ Валерий Иосифович* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», УО «Витебский государственный технологический университет», 210035, г. Витебск, Московский пр., д. 72.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Столяренко В.И., Ольшанский В.И. Физические методы модификации структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе стеклоткани // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 63–73.

УДК 66.095.26

## ПОИАНИЛИН КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ МАГНИТНОРАЗДЕЛЯЕМЫХ СОРБЕНТОВ И КАТАЛИЗАТОРОВ

*К.Н. Шкерина, А.И. Сидоров, Л.Ж. Никошвили  
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Шкерина К.Н., Сидоров А.И.,  
Никошвили Л.Ж., 2022

**Аннотация.** В рамках данной статьи исследована возможность синтеза полианилина (ПАНИ) путем анионной полимеризации в присутствии  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ , а также получения магнитного композита ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Сделан вывод о том, что в ходе синтеза ПАНИ оптимальным является предварительное растворение анилина в растворе  $\text{HCl}$  с концентрацией 1 моль/л, тогда как добавление  $\text{HCl}$  к раствору анилина с нейтральной рН, равно как и использование  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , приводит к снижению выхода ПАНИ. Показано, что полимеризация анилина успешно проходит в присутствии  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и что ПАНИ равномерно покрывает магнитные наночастицы, а полученный композит ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  хорошо реагирует на магнитное поле.

**Ключевые слова:** полианилин, магнитные наночастицы, оксид железа, эмеральдин, анионная полимеризация, сорбенты, катализаторы.

### ВВЕДЕНИЕ

Достоинства органических материалов заключаются в дешевизне и простоте производства, а также в их электропроводящих свойствах. За прошедшие 40 лет были созданы полимерные материалы с электропроводностью, ненамного уступающей электропроводности металлов. В 2000 году ученым А. Хигеру, А. Макдиармиду и Х. Ширакава была присуждена Нобелевская премия по химии за открытие и развитие электропроводящих сопряженных полимеров [1]. Это открытие привело к созданию новейших типов электронных и оптоэлектронных устройств, которые в данный момент нашли широкое применение, и положило начало исследованиям в области синтеза и изучения свойств различных полимерных материалов. Одним из наиболее изученных образцов сопряженных полимеров можно считать полианилин (ПАНИ), а также его модифицированные формы.

Полианилин – это органический высокомолекулярный полупроводниковый материал с достаточно высоким уровнем электронной проводимости. В последние десятилетия ПАНИ вызывает значительный научный интерес благодаря своим хорошим электрическим и окислительно-восстановительным свойствам, а также стабильности. Кроме того, он обладает большим потенциалом применения в составе химических сенсоров, электромеханических приборов, электрохромных ячеек, органических батарей и противокоррозионных добавок [2, 3].

Среди проводящих полимеров ПАНИ выделяется наибольшим количеством выявленных и охарактеризованных форм с различными свойствами. Из-за взаимодействия с кислотами каждое из трех протонированных состояний ПАНИ имеет соответствующую

депротонированную форму с низкой проводимостью. Таким образом, полимер может существовать как минимум в шести формах, различающихся как степенью окисления, так и состоянием протонирования (рис. 1). Полианилин – уникальный полимер, так как его проводящие формы (эмеральдин и пернигранилин) могут переходить в непроводящее состояние двумя разными способами. Первый способ заключается во введении электронов в ПАНИ и восстановлении атомов азота; второй – в удалении кислоты, стабилизирующей полярон, что приводит к трансформации структуры полимерной цепи и исчезновению полисопряжения [4, 5].

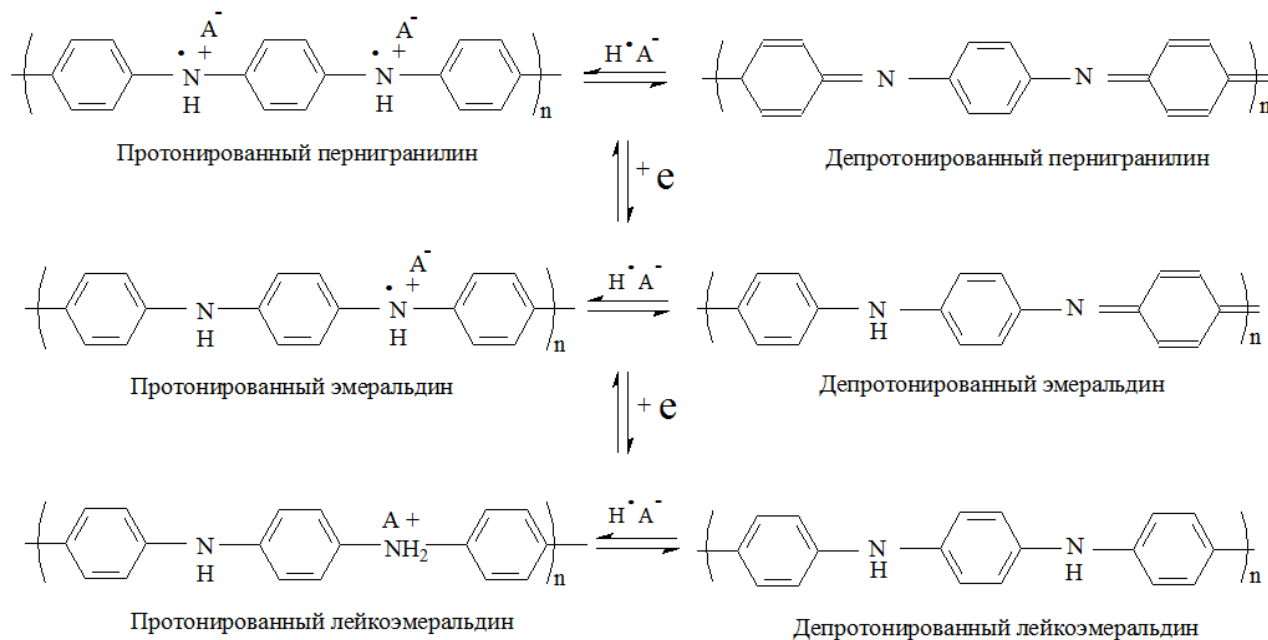


Рис. 1. Различные формы ПАНИ: пернигранилин, эмеральдин и лейкоэмеральдин

Трансформация формы ПАНИ – это изменение не только его электропроводности, но и способности сорбировать различные анионы и катионы. Полианилин обладает совокупностью свойств, необходимых сорбенту, и характеризуется высокой термостойкостью, низкой растворимостью и отсутствием токсичности [6]. Способность связывания катионов металлов может использоваться для очистки сточных вод от металлов, а также находит свое применение в катализе.

Гетерогенный катализ можно отнести к высокоперспективным направлениям использования ПАНИ. В сочетании с каталитически активными металлами полимер используется как сокатализатор и стабилизатор. В некоторых вариантах ПАНИ может полностью заместить катализаторы на основе благородных металлов, что позволяет упростить и удешевить синтез каталитических систем [7].

Важное место в классификации гибридных материалов занимают магнитные нанокomпозиты на основе ПАНИ. Главные свойства таких нанокomпозитов определяются как природой магнитных наночастиц, так и специфической электронной структурой полисопряженной системы полимера, обеспечивая сочетание магнитных, электрических и других полезных свойств. Из-за сильного электронного взаимодействия между ПАНИ и

наночастицами включение полупроводниковых наночастиц в ПАНИ вызывает большой интерес [8, 9].

Целью данной работы являлось получение магнитноразделяемого композита на основе ПАНИ, который в дальнейшем может использоваться как сорбент и основа создания катализаторов для реакций тонкого органического синтеза.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

оптимизация условий синтеза ПАНИ;

синтез магнитноразделяемых частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;

разработка методики получения композита ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полианилин был синтезирован методом анионной полимеризации анилина в водной среде при использовании  $\text{HCl}$  и  $\text{CH}_3\text{COOH}$ . Перед началом синтеза анилин перегоняли под вакуумом. За основу разработки методики синтеза ПАНИ брались данные, полученные S. Tang и др. [10]. Расчетное количество анилина растворяли в воде или водном растворе  $\text{HCl}$  (1 моль/л). К раствору анилина прикапывали раствор  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  в воде или  $\text{HCl}$  или  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , предварительно охлажденный до температуры  $<5^\circ\text{C}$ . Реакция полимеризации проводилась на холоде при температуре  $0\text{--}10^\circ\text{C}$  в течение 24 ч. Молярное соотношение  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ /анилин составляло 0,23.

Для синтеза магнитных наночастиц  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , взятые в соотношении 1 : 2, растворили в 100 мл воды. К полученному раствору прикапывали 100 мл 10%-го раствора  $\text{NH}_3$  при температуре  $80^\circ\text{C}$ . Общее время синтеза составило 60 мин. Синтез проводили в инертной среде (аргон). После завершения синтеза магнитные наночастицы отделяли с использованием редкоземельного магнита, затем тщательно промывали водой и сушили на воздухе при температуре  $65^\circ\text{C}$  в течение 24 ч.

Синтез композита ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  проводился путем анионной полимеризации анилина в присутствии магнитных наночастиц. Перед началом синтеза магнитные наночастицы диспергировались в дистиллированной воде под действием ультразвука. К суспензии частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  добавляли анилин. Синтез ПАНИ проводился в присутствии магнитных наночастиц по приведенной выше методике. Синтез длился 24 ч. По истечении указанного времени композит тщательно промывали  $\text{HCl}$  (1 моль/л), метанолом и сушили под вакуумом при температуре  $40^\circ\text{C}$ . При каждой промывке частицы ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  отделяли редкоземельным магнитом.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе синтеза ПАНИ было выявлено, что оптимальным является растворение анилина в растворе  $\text{HCl}$ , тогда как  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  должен добавляться из нейтрального раствора. Использование  $\text{CH}_3\text{COOH}$  привело к низкому выходу ПАНИ, поэтому для дальнейших синтезов выбрали  $\text{HCl}$  с концентрацией 1 моль/л. На рис. 2 представлена фотография суспензии ПАНИ. Изумрудно-зеленый цвет характерен для соли эмеральдина – электропроводящей формы ПАНИ (см. рис. 1) [11, 12].

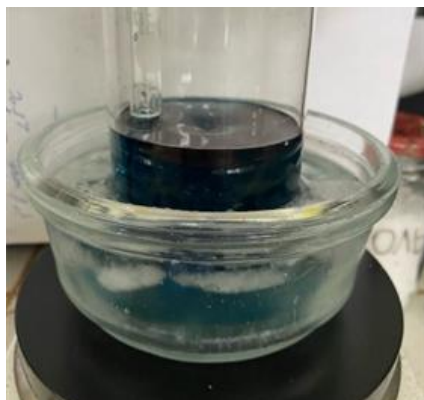


Рис. 2. Фотография суспензии ПАНИ

В случае полимеризации анилина в присутствии магнитных наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  был синтезирован композит ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , который легко отделялся с помощью редкоземельного магнита (рис. 3). Данный композит не терял своих магнитных свойств при обработке раствором  $\text{HCl}$ . Это свидетельствует о том, что поверхность магнитных наночастиц равномерно покрылась слоем полимера. Об успешном формировании ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  свидетельствовала также окраска полученного композита: сами частицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  получались в виде черно-коричневого порошка, тогда как синтезированный композит, покрытый ПАНИ, имел выраженный зеленоватый оттенок.

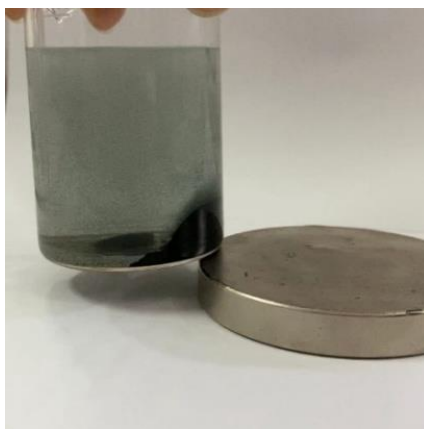


Рис. 3. Магнитные наночастицы, покрытые слоем ПАНИ

Важно отметить, что в процессе нанесения ПАНИ на частицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  способность к разделению под действием внешнего магнитного поля снизилась незначительно по сравнению с исходными (не покрытыми ПАНИ) магнитными частицами. Хорошая реакция ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  на магнитное поле свидетельствует об относительно небольшой толщине пленки ПАНИ на поверхности магнитных частиц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы был синтезирован ПАНИ путем анионной полимеризации анилина в присутствии  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ , а также получен композит ПАНИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Наилучшие результаты были получены при растворении анилина в

растворе HCl (1 моль/л). Выявлено, что полимеризация анилина успешно проходит в присутствии Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, при этом ПАНИ равномерно покрывает магнитные наночастицы. В результате композит ПАНИ-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> хорошо реагирует на магнитное поле. Полученный композит в дальнейшем может быть использован для адсорбции тяжелых металлов из растворов, а также как носитель при создании гетерогенных катализаторов для тонкого органического синтеза.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Оптимизация условий синтеза полианилина и магнитноразделяемого композита проводилась при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00386); синтез магнитных частиц выполнен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00433).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Салихов Т.Р. Электрофизические свойства многослойных пленочных структур на основе полимерных материалов. Дисс... канд. физ.-мат. наук. Уфа. 2016. С. 10–11.
2. Harun M.H., Saion E., Kassim A. Conjugated conducting polymers: A brief overview // *Journal for the Advancement of Science & Arts*. 2007. Vol. 2, pp. 63–68.
3. Xiaoyuan Zh., Jianning W., Guihua M., Xuhong G., Chang L., Zhiyong L. One-step synthesis of novel PANI-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZnO core-shell microspheres: An efficient photocatalyst under visible light irradiation // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 366, pp. 486–493.
4. Sapurina I., Shishov M. Oxidative polymerization of aniline: Molecular synthesis of polyaniline and the formation of supramolecular structures // *New polymers for special applications*. 2012, pp. 251–312.
5. Manohar M., Khairnar S., Shrivastava V. Synthesis, characterisation of polyaniline-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanocomposite and its application for removal of an acid violet 19 dye // *Applied Nanoscience*. 2016. Vol. 6, pp. 495–502.
6. Савин А.В. Орагномодифицированные сорбенты для удаления легких нефтяных углеводородов из водной и воздушной сред. Дисс... канд. тех. наук. Казань. 2014. С. 13–20.
7. Сапурина И.Ю. Наноструктурированный полианилин и композиционные материалы на его основе. Дисс... докт. хим. наук. СПб. 2015. С. 7–10.
8. Qizhao W., Juan H., Jiajia L., Yuxia C. Photodegradation of methyl orange with PANI-modified BiOCl photocatalyst under visible light irradiation // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 283, pp. 577–583.
9. Chen Q., Qinqin H., Mengmeng L., Xueting L., Jin W. The vital role of PANI for the enhanced photocatalytic activity of magnetically recyclable N-K<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>9</sub>/MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/PANI composites // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 311, pp. 230–238.
10. Tang S., Wang A., Lin S., Huang K., Yang C. Polymerization of aniline under various concentrations of APS and HCl // *Polymer Journal*. 2011. Vol. 43, pp. 667–675.
11. Perrin F., Phan T., Nguyen D. Synthesis and characterization of polyaniline nanoparticles in phosphonic acid amphiphile aqueous micellar solutions for waterborne corrosion protection coatings // *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*. 2015. Vol. 53, pp. 1606–1616.

12. Mahnoush B., Suraya A., Suhaidi Sh., Hong N. Preparations, Properties, and Applications of Polyaniline and Polyaniiline Thin Films – A Review // *Journal of Polymers*. 2021. Vol. 13, pp. 2–13.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ШКЕРИНА Кристина Николаевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kshkerina@mail.ru

*СИДОРОВ Александр Иванович* – кандидат химических наук, профессор кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

*НИКОШВИЛИ Линда Жановна* – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шкерина К.Н., Сидоров А.И., Никошвили Л.Ж. Полианилин как основа создания магнитноразделяемых сорбентов и катализаторов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 2 (14). С. 74–79.

**Вестник Тверского  
государственного технического  
университета. Серия  
«Строительство. Электротехника  
и химические технологии»**

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

**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

*Главный редактор*

Гультияев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

*Ответственный секретарь*

Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

*Члены редакционной коллегии:*

Алиферов А.И. – д.т.н., профессор НГТУ

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Березовский Н.И. – д.т.н., профессор Белорусский национальный технический  
университет, г. Минск, Республика Беларусь

Болотов – д.т.н., профессор ТвГТУ

Бронштейн Л.М. – к.х.н., с.н.с., химический факультет Индианского  
университета, Блумингтон, США

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Макаров А.Н. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Матар П.Ю. – к.т.н., HDR, профессор Ливанского университета, Beirut, Ливан

Матвеева В.Г. – д.х.н., профессор ТвГТУ

Назарова М.Ю. – д.т.н., профессор НИУ БелГУ

Петропавловская В.Б. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Самченко С.В. – д.т.н., профессор НИУ МГСУ

Севастьянов А.А. – к.т.н., доцент НГТУ им. Р.Е. Алексева

Сульман М.Г. – д.х.н., профессор ТвГТУ

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

Чернышева Н.В. – д.т.н., профессор БГТУ им. В.Г. Шухова

Шифрина З.Б. – д.х.н., заведующая лабораторией макромолекулярной химии,  
Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

Ясинская Н.Н. – д.т.н., доцент Витебского государственного технологического  
университета, г. Витебск, Республика Беларусь



**ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал  
№ 2 (14), 2022

Редактор М.Б. Юдина  
Корректор С.В. Борисов

---

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22