

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 (26), 2025

Тверь 2025

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2025. № 2 (26). 114 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: ПИ № ФС77-74328 (печатн.) от 19 ноября 2018 г., Эл № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

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

ISSN 2658-7459 (печатн.)

ISSN 2686-794X (онлайн)

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Мельников А.А., Баркая Т.Р., Каляскин А.В.</i> Определение предела огнестойкости стержневого железобетонного элемента с учетом нелинейных свойств материала.....	5
<i>Петропавловский К.С., Петропавловская В.Б., Каляскин П.А., Зимина С.А., Михайлова В.А., Розметова Р.Р., Шабалина П.И.</i> Армирование на микроуровне: современные тенденции.....	13
<i>Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Корда Р.Р.</i> Расчет узла соединения раскосов металлической фермы из гнуто-сварных профилей в ПВК IDEA StatiCa.....	21
<i>Трофимов В.И., Смирнов М.А.</i> К вопросу применения вторичного минерального сырья в качестве эффективного заполнителя тяжелого бетона.....	28

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Безденежных В.И.</i> Мгновенное значение момента, развиваемого синхронным генератором при индуктивной и емкостной нагрузке.....	36
<i>Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В.</i> Выбор магнитомягких материалов для оптимальных магнитопассивных подшипников.....	40
<i>Макаров А.Н.</i> Взаимосвязь устойчивого развития энергомашиностроительной промышленности и других отраслей промышленности, прикладной науки и высшего образования.....	49
<i>Макаров А.Н., Крупнов А.В., Окунева В.В.</i> Способ повышения энергоэффективности выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока фасонно-литейного производства.....	58
<i>Окунева В.В., Зубков С.Н.</i> Инновационные методы обучения по технике безопасности и охране труда при проведении работ на электроустановках потребителей 0,4 кВ.....	67
<i>Шубин М.Д., Русин А.Ю.</i> Киберустойчивость электроэнергетических систем.....	74

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Ерохина Я.А., Дужий П.А., Пилипенко А.С., Беляков А.Ю., Пащенко К.П., Котежов К.С., Небратенко Д.Ю.</i> Реологическое поведение СБС-полимеров в базовых пластификаторах и индустриальных маслах.....	81
<i>Панскова Л.Д., Гаврилова Е.П., Манаенков О.В., Кислица О.В., Сульман М.Г.</i> Гидролиз растительных полисахаридов с использованием полимерного твердого кислотного катализатора.....	93
<i>Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И.</i> Изучение методов выделения антоцианов из плодов черники, жимолости и аронии.....	104

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Melnikov A.A., Barkaya T.R., Kalyaskin A.V.</i> Determination of the fire resistance limit of a reinforced concrete bar element taking into account material nonlinear properties.....	5
<i>Petropavlovskii K.S., Petropavlovskaya V.B., Kalyaskin P.A., Zimina S.A., Mikhailova V.A., Rozmetova R.R., Shabalina P.I.</i> Reinforcement at the micro level: modern trends.....	13
<i>Subbotin S.L., Barkaya T.R., Korda R.R.</i> Calculation of the junction point of the braces of a metal truss made of bent-welded profiles in IDEA StatiCa PVC.....	21
<i>Trofimov V.I., Smirnov M.A.</i> On the use of secondary mineral raw materials as an effective filler for heavy concrete.....	28

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Bezdeneshnykh V.I.</i> Instantaneous value of torque developed by a synchronous generator with inductive and capacitive load.....	36
<i>Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V.</i> Selection of magnetic-hard materials for optimal magnetopassive bearings.....	40
<i>Makarov A.N.</i> Interrelationship between sustainable development of power engineering industry and other industries, applied science and higher education.....	49
<i>Makarov A.N., Krupnov A.V., Okuneva V.V.</i> A method for increasing the energy efficiency of steel smelting in arc steelmaking furnaces of three-phase current of shaped casting production.....	58
<i>Okuneva V.V., Zubkov S.N.</i> Innovative method of safety and labor protection training in carrying out work on electrical installations of consumers of 0,4 kV	67
<i>Shubin M.D., Rusin A.Yu.</i> Cyber-resilience of electric power systems.....	74

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Erokhina Ya.A., Duzhy P.A., Pilipenko A.S., Belyakov A.Yu., Paschenko K.P., Kotov K.S., Nebratenko D.Yu.</i> Rheological behavior of SBS polymers in base plasticizers and industrial oils.....	81
<i>Panskova L.D., Gavrilova E.P., Manaenkov O.V., Kislitsa O.V., Sulman M.G.</i> Hydrolysis of plant polysaccharides using a polymeric solid acid catalyst	93
<i>Tsvetkov D.Yu., Petrova A.I., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sidorov A.I.</i> Studying methods of anthocyanin extraction from blueberry, honeysuckle and aronia fruits	104

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 69.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ
СТЕРЖНЕВОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛАА.А. Мельников¹, Т.Р. Баркая¹, А.В. Каляскин²¹Тверской государственный технический университет (г. Тверь)²ООО «ПКБ ОСТОВ» (г. Тверь)

© Мельников А.А., Баркая Т.Р., Каляскин А.В., 2025

Аннотация. В статье рассмотрена методика расчета железобетонного стержневого элемента с учетом физической нелинейности материала в условиях огневого воздействия, а также приведено сравнение пределов огнестойкости при вычислении с учетом нелинейной работы материалов и без нее.

Ключевые слова: огнестойкость, нелинейность, предел огнестойкости, бетон, арматура, железобетон.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-5-12

В существующей методике расчета предела огнестойкости стержневого элемента, рассмотренной в источнике [1], не принимаются во внимание изменения физических свойств материала, но предлагается определять редуцированное сечение и оценивать предел несущей способности по формуле

$$N = \varphi(R_{bn} \cdot A_{red} + R_{sct} \cdot A_{s,tot}), \quad (1)$$

где A_{red} – приведенная площадь сечения; $A_{s,tot}$ – площадь всей продольной арматуры в сечении.

A_{red} находят по формуле

$$A_{red} = 0.9 \cdot (b - 2a_t) \cdot (h - 2a_t), \quad (2)$$

где a_t – уровень критической температуры по высоте сечения.

Возьмем за основу железобетонный пилон размерами 1000 × 200 мм с армированием 10 стержнями 18-го диаметра арматуры класса А500С. Считаем пилон отдельно стоящим, поэтому огневое воздействие будем рассматривать с четырех сторон. Поперечное сечение пилонa показано на рис. 1.

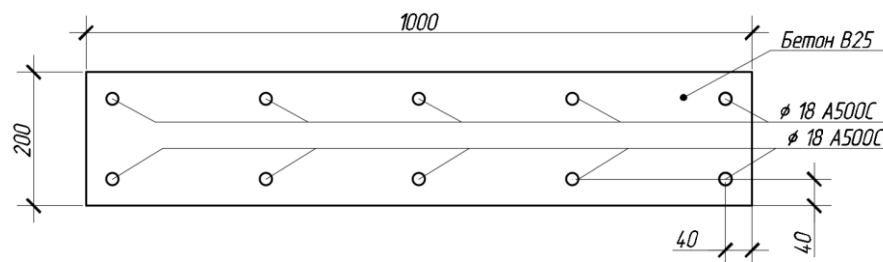


Рис. 1. Поперечное сечение элемента

По результатам статического расчета приняты усилия в пилоне (табл. 1).

Таблица 1

Усилия в пилоне

Усилие	N , т	M_k , т·м	M_y , т·м	Q_z , т	M_z , т·м	Q_y , т
Значение	-206,605	0,05	-1,759	0,87	0,517	0,548

Требуемый предел огнестойкости для несущих конструкций назначим R90. Определим несущую способность пилона по методике, описанной в источнике [1].

Коэффициент φ для дальнейших расчетов принимаем 0,85. При 90-минутном огневом воздействии назначаем:

$$\begin{aligned} a_t &= 37 \text{ мм}; \\ A_{s,tot} &= 25,45 \text{ см}^2; \\ A_{red} &= 0,9 \cdot (100 - 3,7 \cdot 2) \cdot (20 - 3,7 \cdot 2) = 1\,050 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

В результате расчета получаем

$$N = \frac{0,85}{1\,000} \cdot (188 \cdot 1\,050 + 4\,350 \cdot 0,85 \cdot 25,45) = 247,77 \text{ т} > 206,605 \text{ т}.$$

Следовательно, несущая способность сечения обеспечена.

Далее для корректного расчета необходимо назначить характеристики материалов, которые изменяются в зависимости от распределения температуры внутри сечения, поэтому сначала требуется определить значение температуры бетона и арматуры в характерных точках сечения. При этом температура меняется в зависимости от длительности действия стандартного пожара.

Выбираем шаг, с которым будем определять значение температуры внутри сечения. Он составит 20 мм, так как существующие графики распределения тепловых полей имеют аналогичный шаг.

По приложению А из источника [1] устанавливаем температуру в бетонном сечении в соответствии с рис. 2.

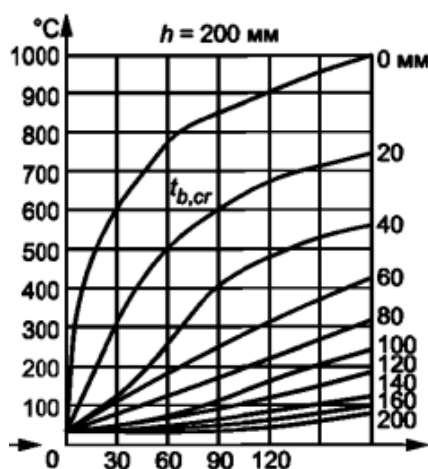


Рис. 2. Температуры прогрева тяжелого бетона в плитах и стенах высотой сечения 200 мм при одностороннем воздействии пожара [1]

Таким образом, используя рис. 1, определяем температуру внутри бетонного сечения размерами $1\,000 \times 200$ мм с шагом 20 мм при продолжительности стандартного огневого воздействия 90 мин.

По полученным значениям температуры внутри сечения можно установить, какая температура действует на высоте рабочей продольной арматуры, и назначить понижающие коэффициенты условий работы, а для бетонного сечения следует назначить ряд коэффициентов, которые бы показывали с шагом 20 мм, какое значение расчетного сопротивления бетона сжатию необходимо задавать участку бетонного сечения, чтобы смоделировать изменение физических свойств материала при огневом воздействии.

Для определения коэффициентов условий работы используем данные источника [1]. Интерполяцией устанавливаем указанные коэффициенты и сводим их в табл. 2.

Таблица 2

Определение температуры внутри бетонного сечения

Глубина прогрева	Температура на глубине сечения при толщине 200 мм	Коэффициенты условий работы y_{bt}
0	850	0,1
20	600	0,1
40	400	0,65
60	250	0,9
80	180	0,975
100	–	1
Время воздействия стандартного пожара	90 мин	90 мин

В соответствии с полученными коэффициентами можно найти значения сопротивления бетона сжатию при огневом воздействии. Результаты сводим в табл. 3.

Таблица 3

Назначенные классы бетона по толщине сечения
(исходный бетон В25, $R_{bn} = 18,5$ МПа)

Глубина прогрева	R_{bnt}	В
0	1,85	–
20	12,025	15
40	16,65	20
60	18,037 5	20
80	18,5	25
100	18,5	25

Для полученных классов бетона строим трехлинейные диаграммы напряженного состояния бетона при продолжительном действии нагрузки. На рис. 3 показаны диаграммы деформирования для бетонов разных классов.

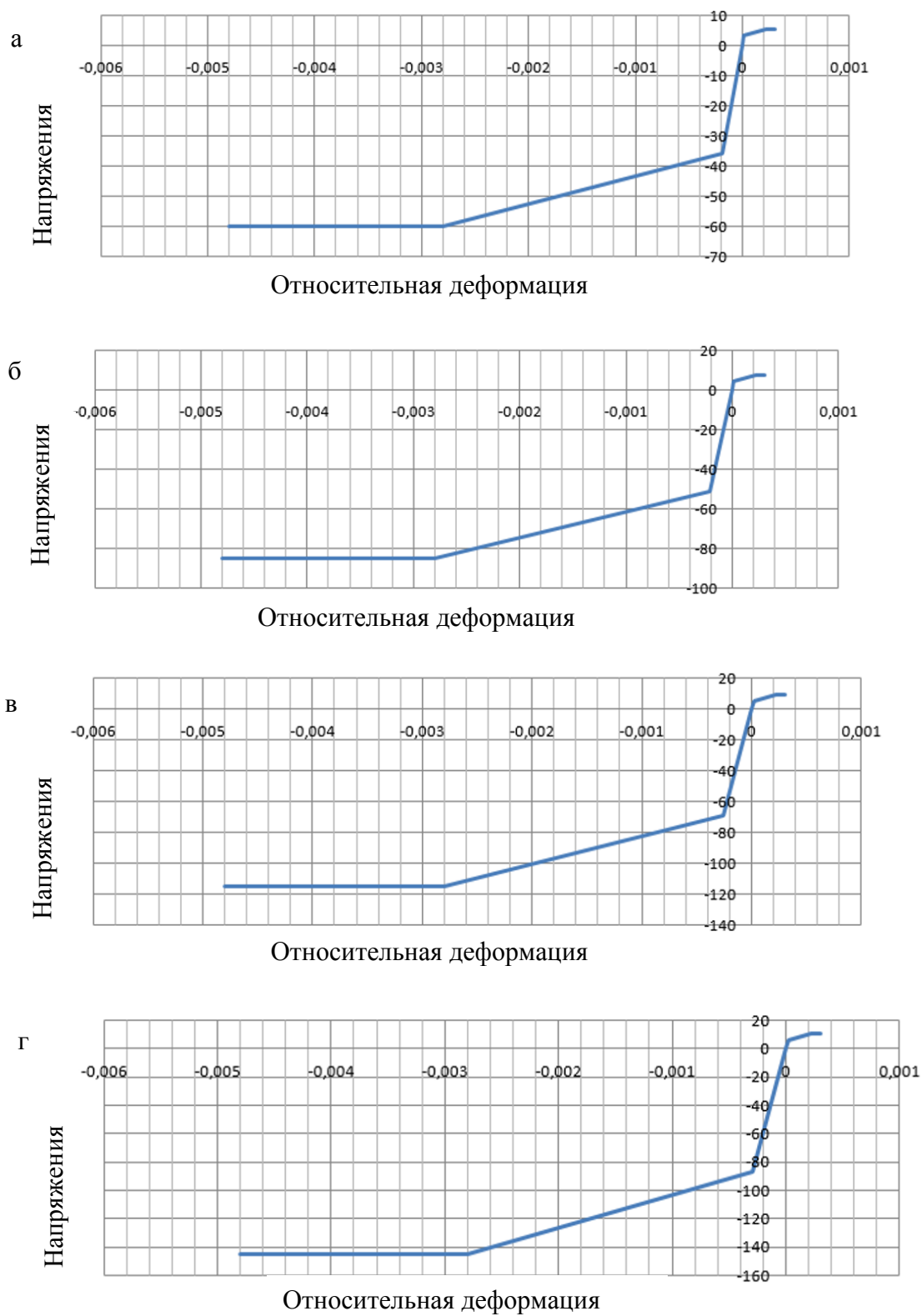


Рис. 3. Диаграммы деформирования для бетонов:
а – В10; б – В15; в – В20; г – В25

Выполняем аналогичные действия для арматуры, вычисляем температуры, действующие на глубине расположения арматуры, и получаем коэффициенты условий работы арматуры (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты γ_{st} и β_s при защитном слое 40 мм

t, мин	γ_{st}	E_{s2} , МПа	β_s	E_{st2} , МПа
90 мин	0,85	200 000	0,85	170 000

После применения коэффициентов строим диаграмму напряженного состояния арматуры А500 (рис. 4).



Рис. 4. Диаграмма напряженного состояния арматуры при 90-минутном действии стандартного пожара

Для наглядности нанесем слои, соответствующие прочности полученных классов бетона, на поперечное сечение (рис. 5).

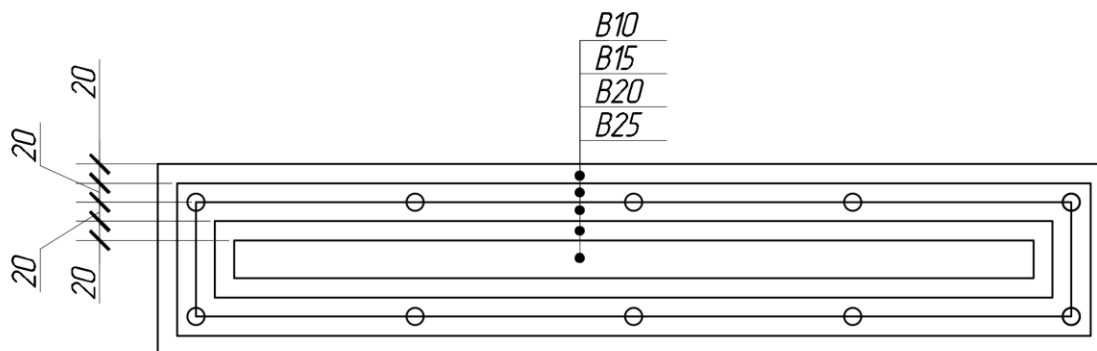


Рис. 5. Назначенные классы бетона по толщине сечения

Таким образом, получаем поперечное сечение пилон с разными классами бетона (расчетными сопротивлениями бетона осевому сжатию) по мере их нагрева.

При выполнении расчета считаем, что плоское поперечное сечение при получении деформаций остается плоским в соответствии с гипотезой Бернулли. Соответственно, распределение относительных деформаций по высоте сечения элемента принимаем по линейному закону. Существующие программные комплексы не позволяют создать такое сечение, поэтому была написана программа на базе Visual Basic 6.0. В данной программе необходимо выстраивать поперечное сечение с триангуляционной сеткой 20×20 мм, задавая послойно соответствующие классы бетона по рис. 3. Программа позволяет для каждого назначенного класса бетона подгрузить собственную диаграмму деформирования. Далее, задавая перемещения и углы поворотов плоского сечения, мы получаем относительные деформации каждой точки триангуляционной плоскости. Данные относительные деформации накладываются на ранее загруженные диаграммы напряженно-деформированного состояния бетона и арматуры, показывая возникающие напряжения в каждой ячейке размером 20×20 мм до наступления предельных напряжений в сжатом бетоне или сжатой арматуре.

Установив напряжения в каждой точке заданной сетки и составив уравнения равновесия, мы можем получить усилия в рассматриваемом элементе:

$$N = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj}; \quad (3)$$

$$M_x = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{bxi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj}; \quad (4)$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{byi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{syj}. \quad (5)$$

Усилия, получившиеся в результате расчета поперечного сечения, перед сравнением с действующими усилиями снижаем на коэффициент продольного изгиба, учитывающий снижение несущей способности.

Результаты расчета приводим в виде изополей напряжений в поперечном сечении (рис. 6–8).

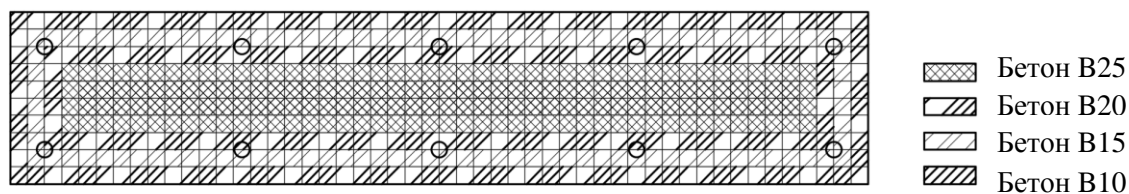


Рис. 6. Расчетная схема сечения

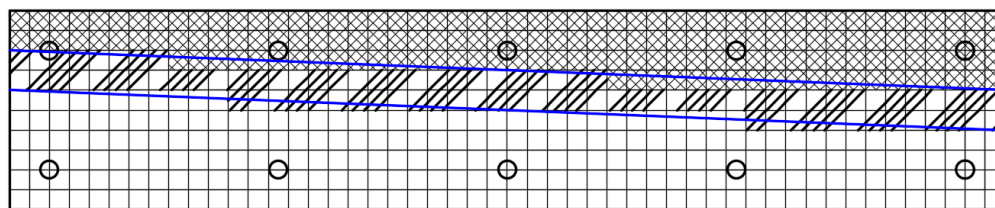


Рис. 7. Поля напряжений при предельных действующих усилиях:

$$M_x = 2,01 / M_y = 0,82$$

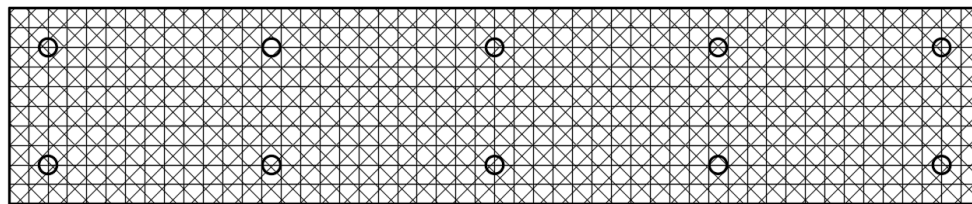


Рис. 8. Поля напряжений при предельных действующих усилиях:

$$M_x = 2,01 / M_y = 0,82 / N = 305,41$$

Итак, при времени воздействия 90 мин несущая способность сечения составит 305 т.

В рассматриваемом случае при 90-минутном воздействии пожара несущая способность сечения с учетом физической нелинейности составила 259,25 т, а без нее – 247,77 т. Эти значения достаточно схожи, но данное исследование необходимо проводить в динамике, чтобы понять, как будет изменяться несущая способность с увеличением времени действия пожара. Полученные по приведенной методике результаты показывают резерв по несущей способности около 25 %. При расчете по методике [1] увеличение времени действия пожара приводит к росту α_t , что предполагает исключение из работы всей арматуры, в то время как при применении нелинейного расчета появляется возможность расчета с послойным снижением прочности (класса) бетона поперечного сечения. Однако для подтверждения достоверности полученных результатов необходимо проведение натурных испытаний контрольных образцов [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564542941> (дата обращения: 23.02.2025).
2. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 23.02.2025).
3. Полевода И.И., Жамойдик С.М., Нехань Д.С. Модельные огневые испытания железобетонных центрифугированных колонн с конструктивной огнезащитой // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2021. Т. 5. № 3. С. 289–299.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МЕЛЬНИКОВ Артем Александрович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Neryose@yandex.ru

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

КАЛЯСКИН Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор ООО «ПКБ ОСТОВ», 170043, Россия, г. Тверь, ул. Псковская, д. 12, корп. 3. E-mail: ostov_tver@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Мельников А.А., Баркая Т.Р., Каляскин А.В. Определение предела огнестойкости стержневого железобетонного элемента с учетом нелинейных свойств материала // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 5–12.

**DETERMINATION OF THE FIRE RESISTANCE LIMIT
OF A REINFORCED CONCTETE BAR ELEMENT
TAKING INTO ACCOUNT MATERIAL NONLINEAR PROPERTIES**

A.A. Melnikov¹, T.R. Barkaya¹, A.V. Kalyaskin²

¹*Tver State Technical University (Tver)*

²*LLC «PKB OSTOV» (Tver)*

Abstract. This article develops a method for calculating a reinforced concrete core element taking into account the physical nonlinearity of the material, and also compares the fire resistance limit when calculating taking into account the nonlinear operation of materials and without it.

Keywords: fire resistance, nonlinearity, fire resistance rating, concrete, reinforced, reinforced concrete.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MELNIKOV Artem Alexandrovich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. Tver. E-mail: Neryose@yandex.ru

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

KALYASKIN Alexander Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of LLC «PKB OSTOV», 12, Pskovskaya street, Tver, 170043, Russia. E-mail: ostov_tver@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Melnikov A.A., Barkaya T.R., Kalyaskin A.V. Determination of the fire resistance limit of a reinforced conctete bar element taking into account material nonlinear properties // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 5–12.

УДК 691.54

**АРМИРОВАНИЕ НА МИКРОУРОВНЕ:
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ**

*К.С. Петропавловский, В.Б. Петропавловская, П.А. Каляскин,
С.А. Зимина, В.А. Михайлова, Р.Р. Розметова, П.И. Шабалина
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Петропавловский К.С., Петропавловская В.Б.,
Каляскин П.А., Зимина С.А., Михайлова В.А.,
Розметова Р.Р., Шабалина П.И., 2025

Аннотация. В настоящее время в строительном материаловедении динамично развивается такой инновационный подход, как самоармирование вяжущих и бетонов. Рассмотрены результаты проведенного сравнительного анализа видов микрокристаллического армирования и обоснована эффективность применения самоармированных композитов. Особое внимание уделено технологии самоармирования как методу формирования иерархической структуры материала на микроуровне.

Ключевые слова: многоуровневое армирование, самоармирование, вискеры, нитевидные кристаллы, микрокристаллическое армирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-13-21

В последние годы строительная отрасль России демонстрировала устойчивый рост, сопровождающийся активным внедрением инновационных технологий [1]. Однако темпы его замедлились, что обусловлено завершением ряда национальных проектов и ограничениями в финансировании [2]. Важными направлениями являются анализ и оптимизация работы материалов, повышение прочностных и иных характеристик за счет управления их внутренней структурой на нано- и микроскопическом уровнях при тех же технологических затратах. Это позволяет создавать более прочные и устойчивые конструкции, снижая затраты на материалы и ускоряя процесс строительства [3].

Перспективные свойства и широкая область применения самоармирующихся композитов согласуются с теорией многоуровневого армирования, разработанной Е.М. Чернышовым, которая подчеркивает важность иерархической структуры для обеспечения прочности и устойчивости материала. Согласно данной теории, прочность и устойчивость материала обеспечиваются благодаря иерархической структуре, где армирование происходит на нескольких масштабных уровнях – от атомарного до макроскопического [4]. В контексте самоармирования это означает, что внутренние механизмы могут формировать армирующие структуры на каждом уровне: например, упорядочивать атомы на микроскопическом уровне, создавать волокна или сети на мезоуровне и, наконец, образовывать пространственную структуру на макроуровне [5].

В исследовании будет рассматриваться только армирование на микроуровне, так как этот уровень позволяет воздействовать на структуру материала, контролируя его свойства на самых ранних этапах формирования и создавая композиты с заданными характеристиками и высокой степенью однородности.

Армирование кристаллами – это процесс улучшения механических и физических свойств материала за счет включения в него или формирования в нем кристаллических структур, которые служат армирующими элементами [6]. В материалах, особенно полимерах и композитах, кристаллы могут выступать как жесткие, упорядоченные домены, которые повышают прочность, жесткость и устойчивость к деформациям [7]. Кристаллические включения или кристаллические области внутри аморфной матрицы действуют как армирующие фазы, препятствуя скольжению цепей и улучшая механические характеристики. Такой подход часто используется для создания материалов с улучшенными износостойкостью, термостойкостью и структурной стабильностью [7].

Одним из распространенных методов является армирование микрочастицами (рис. 1), при котором используются мелкодисперсные, керамические или полимерные частицы в целях увеличения твердости и износостойкости [8]. Метод используется в производстве керамики, полимерных материалов и композитов для улучшения механических и термических свойств, а также в металлообработке для повышения износостойкости и устойчивости к химическим воздействиям [8].

Другой способ – армирование микрокристаллами, который предполагает формирование кристаллических доменов или их добавление в аморфную матрицу, что способствует росту жесткости и термостойкости материала [9]. Кристаллы, применяемые для армирования, могут иметь различную морфологию – от сферических до пластинчатых структур.

Особый интерес представляют вискеры – нитевидные кристаллы (рис. 2). Благодаря своей одномерной кристаллической структуре они имеют огромный потенциал применения, охватывающий как упрочнение материалов, так и наноэлектронику. Несмотря на то, что нитевидные кристаллы известны уже довольно давно, их практическое применение пока ограничено в основном ролью армирующих волокон. Однако концепция фибры гораздо шире и распространяется на разнообразные волокнистые материалы, каждый из которых обладает уникальными характеристиками [10].

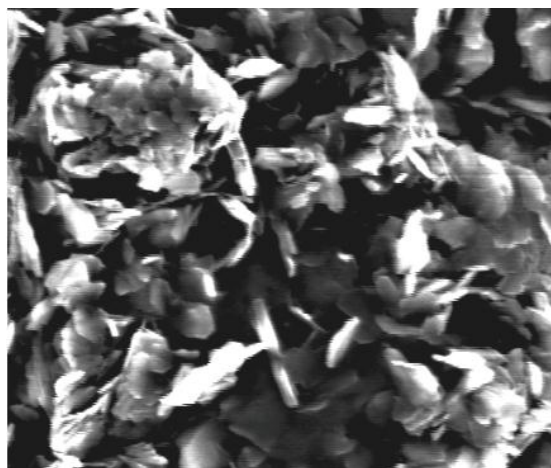


Рис. 1. Микрочастицы [8]

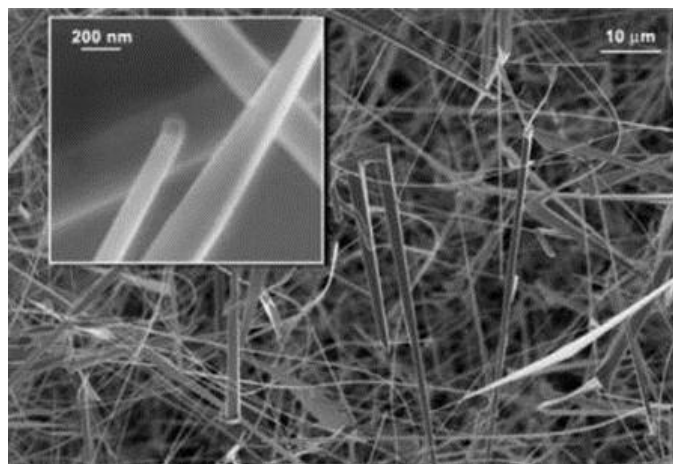


Рис. 2. Вискеры SnO_2 ,
растущие по механизму
«пар – жидкость – кристалл» [10]

Армирование микроволокнами – это добавление в материалы мелких синтетических волокон (рис. 3), которые равномерно распределяются в матрице и препятствуют образованию микротрещин [11].



Рис. 3. Пучки фибриллированных волокон

Указанный метод применяется не только в бетоне, но и в других композитах для улучшения их механических свойств и повышения долговечности [12]. Он используется в строительстве (в отношении бетонных конструкций, дорожных покрытий), производстве композитных материалов (например, пластиков и смол), авиа- и автомобилестроении для увеличения прочности и устойчивости изделий, а также в 3D-печати для улучшения качества и повышения долговечности напечатанных объектов.

Отдельно выделяется самоармирование, которое имеет ряд существенных преимуществ перед традиционным микрокристаллическим армированием [12, 16]. Равномерное распределение армирующего материала по всему объему бетона значительно снижает вероятность образования трещин и повышает прочность при растяжении и изгибе. Это не только упрощает технологический процесс, исключая трудоемкую укладку и связывание арматурных стержней, но и ускоряет темпы строительства, снижая трудозатраты. Благодаря своей природе самоармированный бетон идеально подходит для создания конструкций сложной формы и не ограничивается требованиями к установке традиционной арматуры. Самоармирование способствует снижению веса конструкции и уменьшению объема используемого металла, что сокращает общую стоимость строительства и повышает его экологичность. Самоармирование находит применение в различных отраслях. В медицине его используют для эндопротезов и имплантатов, обеспечивая их долговечность и биосовместимость [13]; в судостроении самоармированные полимеры позволяют создавать легкие и прочные корпуса судов, снижают расход топлива [14]; в авиации самоармирование способствует уменьшению массы и стоимости самолетов, а также экономии топлива [15].

Методы получения самоармированных материалов отличаются от природы вяжущего и армирующей добавки. Так, в полимерных материалах известен метод горячего компактирования (рис. 4), который играет важную роль в производстве самоармированных полимерных композитов [14]. При использовании этого метода за счет воздействия температуры и давления формируются плотные структуры, в которых армирующие элементы (например, волокна, кристаллы или ориентированные цепи) самопроизвольно выстраиваются внутри матрицы. Это способствует формированию внутренней

армирующей системы без необходимости внешнего добавления армирующих компонентов, т.е. реализуется принцип самоармирования [14]. В результате материал приобретает высокую прочность, однородность и устойчивость к механическим нагрузкам.

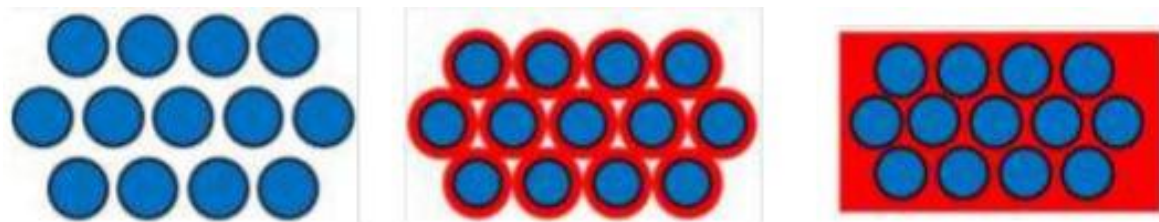


Рис. 4. Механизм горячего компактирования [14]

Аналогичные процессы самоармирования наблюдаются и в неорганических вяжущих, таких как гипс, где армирующая структура формируется за счет химических реакций внутри материала. Самоармирование гипсового камня представляет собой процесс внутреннего упрочнения материала путем образования кристаллических структур этtringита без введения внешних армирующих компонентов [16]. С химической точки зрения это достигается благодаря взаимодействию сернокислого алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) и гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (рис. 5) при определенных условиях: водородном показателе pH 10–10,5 и температуре 20–40 °C. Так формируются игольчатые и нитевидные кристаллы этtringита, которые равномерно распределяются в гипсовой матрице и создают внутренний армирующий каркас [16]. Эти кристаллы сшивают структуру материала, препятствуя распространению микротрещин и повышая его механические характеристики. При оптимальном содержании реагентов предел прочности при сжатии увеличивается до 87 %, прочность при изгибе – до 100 %, а водостойкость достигает значения 0,6. Таким образом, процесс самоармирования за счет направленного химического формирования кристаллической фазы позволяет существенно улучшить прочностные и эксплуатационные свойства гипсовых материалов [16].

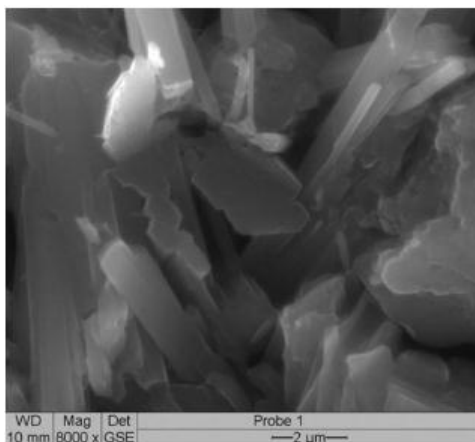


Рис. 5. Микроструктура гипсового модифицированного камня с добавкой гидроксида кальция [16]

Сравнительные характеристики преимуществ и недостатков видов микроармирования приведены в таблице.

Преимущества и недостатки видов микроармирования

Метод микроармирования	Преимущества	Недостатки
Микрочастицы	Улучшение плотности и однородности материала [17]. Увеличение устойчивости к химическим и физическим воздействиям [18]. Улучшение удобоукладываемости [19]	Сложность равномерного распределения [20]. Риск агрегации микрочастиц [20]
Микрокристаллы	Повышение прочности за счет кристаллической структуры [17]. Повышение химической стойкости и долговечности [17].	Сложность равномерного распределения [20]. Возможная несовместимость с матрицей [21]
Микроволокна	Улучшение ударной и динамической прочности [22]. Повышение морозостойкости и износостойкости [23]. Простота внедрения в смесь [23]. Применение в 3D-печати [24]	Ограниченное повышение прочности на растяжение и сжатие [22]. Необходимость точного дозирования [22]
Самоармирование	Формирование армирующей структуры на микроскопическом, мезо- и макроуровнях [24]. Улучшение прочности и устойчивости за счет внутренних процессов [22]	Сложность управления внутренними процессами [20]. Ограниченность в применении и необходимость стандартизации [22]

Исходя из природы самоармированных композитов, можно выделить следующие их преимущества перед микрокристаллическим армированием [14]:

- адгезия на поверхности раздела «матрица – армирующий наполнитель»;
- высокое размерное соотношение (армирование во всех случаях осуществляется с участием волокнистых структур);
- низкая плотность;
- высокая степень переработки за счет переплавки.

Самоармирование представляет собой перспективное и практически значимое направление в современном строительном материаловедении. Применение методов моделирования в сочетании с контролем условий кристаллизации обеспечивает возможность управляемого формирования внутренней структуры материала [25], что открывает путь к созданию новых поколений эффективных, экологически безопасных и технологичных строительных материалов.

Таким образом, современная наука не стоит на месте, и в стремлении к созданию более прочных, долговечных и функциональных материалов ученые активно развивают различные подходы к микроармированию. Методы армирования являются эффективными средствами повышения прочностных и эксплуатационных характеристик материалов. Наиболее высокие результаты, как правило, демонстрирует самоармирование, однако данный метод отличается большей технологической сложностью и требует более сложного управления структурой материала. Тем не менее как традиционные методы армирования, так и самоармирование представляют собой перспективные направления для дальнейших научных исследований и разработки высокоэффективных композитов нового поколения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-49-03004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительство в Российских регионах: итоги 2024 года. URL: https://sherpagroup.ru/analytics/gv6bq48?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 24.05.2025).
2. Киселица Е.П., Шилова Н.Н., Шеломенцев А.Г. Повышение производительности труда строительных организаций в условиях инновационной экономики // *Вопросы инновационной экономики*. 2021. № 11 (1). С. 225–238.
3. De Schepper M., Van den Heede P., Van Driesse I., De Bely N. Life Cycle Assessment of Fully Recyclable Concrete // *Materials*. 2014 Vol. 7. No. 8. P. 6010–6027.
4. Коротких Д.Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого бетона и повышение его трещиностойкости: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2001. 188 с.
5. Коротких Д.Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 96–100.
6. Печников А.А., Толешулы А., Мещеряков Е.Г. Влияние армирования на структуру, механические и технологические свойства КМ // *Известия МГТУ МАМИ*. 2014. № 1 (19). С. 44–46.
7. Берлин Ал.Ал., Пахомова Л.К. Полимерные матрицы для высокопрочных армированных композитов (обзор) // *Высокомолекулярные соединения*. 1990. Т. 32. № 7. С. 1347–1381.
8. Тараканов О.В., Тараканова Е.О. Формирование микроструктуры наполненных цементных материалов // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 8. С. 13–16.
9. Армирование кристаллами в полимерных композиционных материалах. URL: https://newchemistry.ru/letter.php?n_id=2928&cat_id=5&page_id=2 (дата обращения: 25.05.2025).
10. Goodilin E.A., Pomerantseva E.A., Krivetsky V.V., Itkis D.M., Hester J., Tretyakov Yu.D. A Simple Method of Growth and Lithiation of Ba₆Mn₂₄O₄₈ Whiskers // *J. Mater. Chem*. 2005. No. 15. P. 1614–1620.
11. Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б. Облегченные самоармированные гипсовые композиты // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 40–45.
12. Domanskaya I., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Fediuk R. Potential of Gypsum-based Matrices for Sustainable Composite Materials: a Comprehensive

Review // *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 2025. Vol. 77. No. 4. P. 2367–2382.

13. Demina V.A., Demin A.M., Kuznetsova D.S. Biodegradable Nanostructured Composites for Surgery and Regenerative Medicine // *Russian Nanotechnologies*. 2021. Vol. 16. No. 1. P. 4–22.

14. Севастьянов Д.М., Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю. Самоармированные полимерные композиты – классификация, получение, механические свойства и применение (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 4 (52). С. 104–118.

15. Production of Wide-body Aircraft: Promising Processes and Technologies // *Engineering Systems*. URL: <http://engineeringystems.ru/proizvodstvo-shirokofyuzelyazhnih-samoletov/perspektivniye-processi.php> (дата обращения: 25.05.2025).

16. Петропавловский К.С. Самоармированные гипсовые материалы с комплексным модификатором: дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 208 с.

17. Kolosov A.V., Yemelyanova A.E. Modification of Building Materials by Microparticles // *Izvestiya vuzov. Construction*. 2019. No. 12. P. 65–70.

18. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Сухаренко В.А. Влияние минеральных микронаполнителей на свойства строительных материалов // *Строительные материалы*. 2012. № 9. С. 79–83.

19. Zeitlin B.M. Additives for Concrete. М.: Stroyizdat, 2016. 327 p.

20. Smirnov D.D., Krylov A.A. Problems of Uniform Distribution of Microparticles in Composites // *Composite materials*. 2022. Vol. 8. No. 1. P. 2–29.

21. Novikov S.S. Compatibility of Microcrystals and Matrices in Composite Materials // *Scientific Research*. 2020. Vol. 10. No. 4. P. 40–47.

22. Kutsenko A.V. Properties of Concrete Reinforced with Microfibers // *Bulletin of Construction Science*. 2021. No. 2. P. 33–38.

23. Karasev A.I. The Use of Synthetic Microfibers in Concrete Mixtures // *Concrete and Reinforced Concrete*. 2018. No. 4. P. 27–30.

24. Selivanov E.V., Zakharova I.V. The Use of Reinforced Composites in 3D Printing of Building Structures // *Architecture and Construction of Russia*. 2021. No. 11. P. 55–59.

25. Каляскин П.А., Петропавловская В.Б., Баркая Т.Р., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Влияние типа армирования гипсобетона на его свойства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 27–41.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Института нано- и биотехнологий, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrov@gmail.com

КАЛЯСКИН Петр Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

ЗИМИНА Софья Андреевна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

МИХАЙЛОВА Вероника Андреевна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

РОЗМЕТОВА Русалина Руслановна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

ШАБАЛИНА Полина Игоревна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петропавловский К.С., Петропавловская В.Б., Каляскин П.А., Зимина С.А., Михайлова В.А., Розметова Р.Р., Шабалина П.И. Армирование на микроуровне: современные тенденции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 13–21.

REINFORCEMENT AT THE MICRO LEVEL: MODERN TRENDS

*K.S. Petropavlovskii, V.B. Petropavlovskaya, P.A. Kalyaskin,
S.A. Zimina, V.A. Mikhailova, R.R. Rozmetova, P.I. Shabalina*
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. At present, such an innovative approach as self-reinforcement of binders and concrete is dynamically developing in construction materials science. The paper presents the results of a comparative analysis of types of microcrystalline reinforcement and substantiates the effectiveness of using self-reinforced composites. Particular attention is paid to the technology of self-reinforcement as a method for forming a hierarchical structure of a material at the micro level.

Keywords: multi-level reinforcement, self-reinforcement, whiskers, filamentary crystals, microcrystalline reinforcement.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Institute of Nano- and Biotechnologies, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

KALYASKIN Peter Alexandrovich – Graduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

ZIMINA Sofya Andreevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

MIKHAILOVA Veronika Andreevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

ROZMETOVA Rusalina Ruslanovna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

SHABALINA Polina Igorevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Petropavlovskii K.S., Petropavlovskaya V.B., Kalyaskin P.A., Zimina S.A., Mikhailova V.A., Rozmetova R.R., Shabalina P.I. Reinforcement at the micro level: modern trends // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 13–21.

УДК 624.078.4

РАСЧЕТ УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ РАСКОСОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФЕРМЫ ИЗ ГНУТО-СВАРНЫХ ПРОФИЛЕЙ В ПВК IDEA STATICA

С.Л. Субботин, Т.Р. Баркая, Р.Р. Корда

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Корда Р.Р., 2025

Аннотация. В статье рассмотрен процесс расчета узла фермы из гнуто-сварных профилей с использованием программного комплекса IDEA StatiCa. Подчеркнута важность точного моделирования и анализа сварных соединений и геометрических особенностей профилей для обеспечения прочности и надежности металлических конструкций. Описан пошаговый порядок работы: от создания 3D-модели узла до анализа результатов и оптимизации конструкции. Представлены практические рекомендации и преимущества применения IDEA StatiCa в условиях современных требований к строительным конструкциям. Результаты исследования подтверждают эффективность данного программного инструмента при проектировании сложных узлов фермы.

Ключевые слова: IDEA StatiCa, расчет узла, ферма, гнуто-сварные профили, сварные соединения, металлические конструкции, моделирование, прочность, строительное проектирование, оптимизация конструкции.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-21-27

Фермы являются важным элементом пространственных каркасов, широко применяемым в строительстве мостов, покрытий и других сооружений. Узлы фермы – ключевые зоны, где происходит передача нагрузок между элементами конструкции, и правильный расчет их несущей способности и жесткости критичен для безопасности всей конструкции. В последние годы гнуто-сварные профили активно используются (благодаря их высокой прочности и оптимальной геометрии) для изготовления элементов ферм. Программный комплекс IDEA StatiCa позволяет детально анализировать и рассчитывать такие узлы с учетом всех особенностей профилей и сварных соединений.

Основные особенности гнуто-сварных профилей в фермах

Гнуто-сварные профили изготавливаются путем гнутья листовой стали и последующей сварки формы сечения. Они обладают рядом преимуществ:

высокой прочностью при малом весе,
возможностью создавать оптимальные сечения под конкретные нагрузки,
повышенной устойчивостью к локальным деформациям.

Тем не менее эта конструкция предъявляет повышенные требования к точности расчета узлов, так как сварные швы и сложная геометрия существенно влияют на распределение напряжений при работе конструкции под нагрузкой, что должно быть учтено при моделировании в расчетной схеме [1].

IDEA StatiCa как инструмент расчета узлов фермы

IDEA StatiCa – это современный программный продукт, предназначенный для структурного анализа узлов металлоконструкций. В частности, с его помощью можно:

импортировать или создавать 3D-модели конкретного узла с заданными профилями и соединениями [2];

анализировать сложное взаимодействие болтовых и сварных соединений [3];

учитывать нелинейности материала и геометрии, что важно при работе с гнуто-сварными профилями [4];

проводить расчет по различным актуальным нормативным документам, включая Еврокод и российские Своды правил [2, 5];

формировать подробные отчеты с визуализацией напряжений и выявлением критических зон узла [6].

Пошаговый процесс расчета узла фермы из гнуто-сварных профилей в IDEA StatiCa

1. Моделирование узла. Непосредственно в программно-вычислительном комплексе (ПВК) IDEA StatiCa создаем трехмерную модель узла. При этом геометрию и сечения гнуто-сварных профилей назначаем с учетом параметров, которые существенно влияют на поведение узла (рис. 1–4) [1].

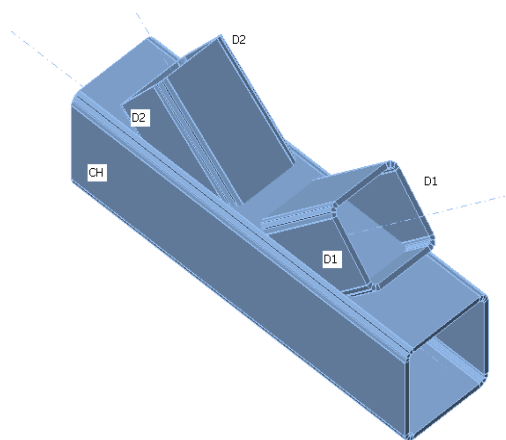


Рис. 1. Маркировка элементов узла нижнего пояса:

CH – нижний пояс;

D1 – раскос № 1; D2 – раскос № 2

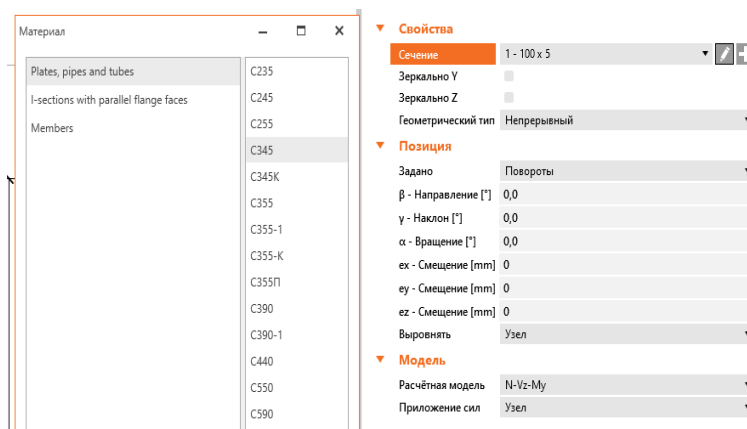


Рис. 2. Геометрия и характеристики сечения элемента расчетной схемы «CH»

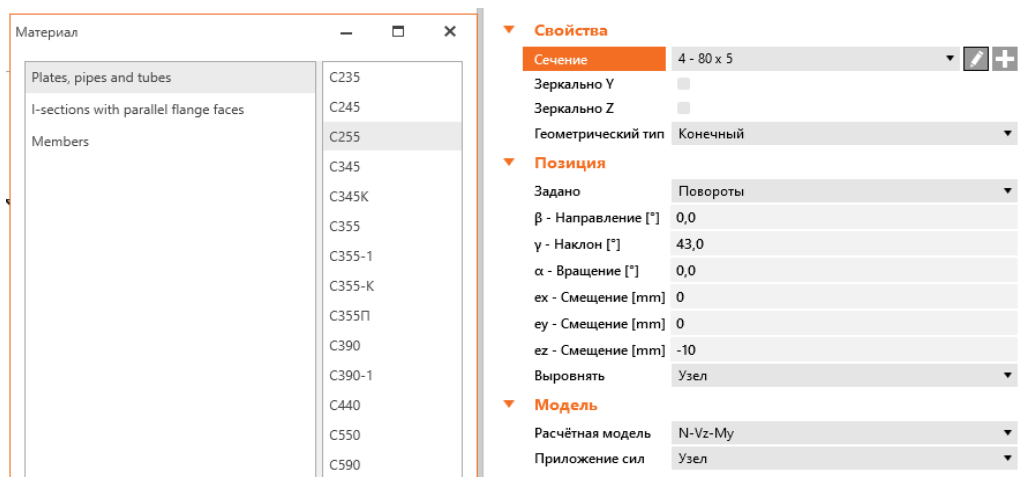


Рис. 3. Геометрия и характеристики сечения элемента расчетной схемы «D1»

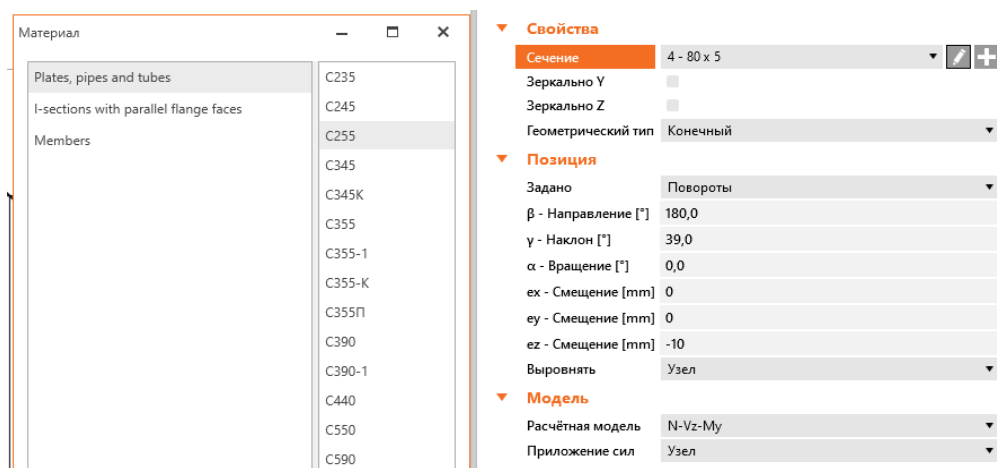


Рис. 4. Геометрия и характеристики сечения элемента расчетной схемы «D2»

2. Назначение условий приложения нагрузки.

Задаем внешние силы и моменты, действующие на узел. Сюда можно включить изгибающие моменты, поперечные и продольные силы. Важно корректно задать направления и величины нагрузок для обеспечения необходимой точности анализа (рис. 5, 6) [4].

	Элемент	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
	CH / Конец	247,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
	D1 / Конец	-163,0	0,0	1,0	0,0	-1,0	0,0
>	D2 / Конец	184,5	0,0	-2,3	0,0	-1,3	0,0

Рис. 5. Таблица загружений

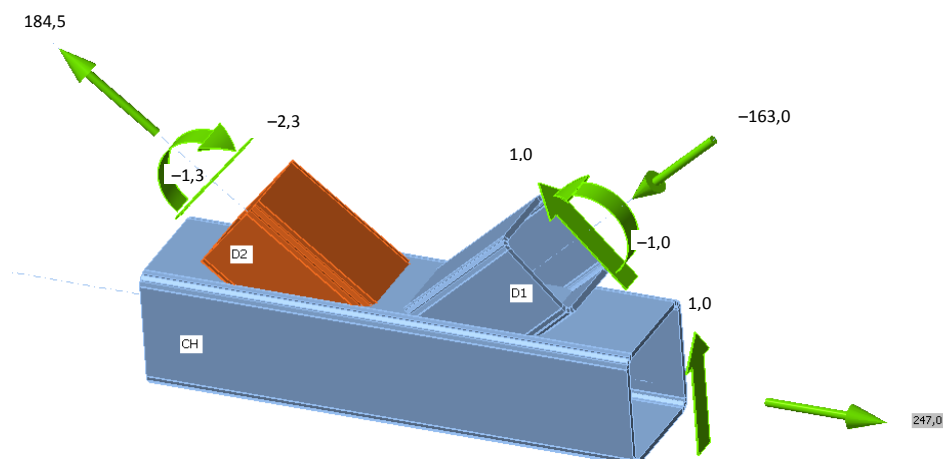


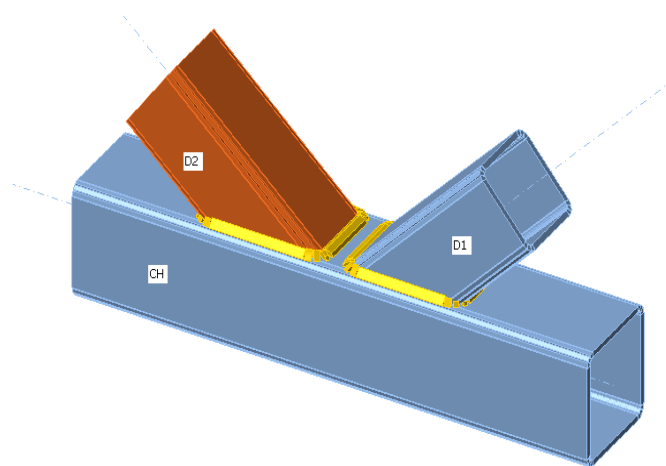
Рис. 6. Схема приложения нагрузок в модели

3. Задание соединений элементов в узле.

Указываем типы сварных швов, их размеры и другие характеристики IDEA StatiCa, которые позволяют учитывать фактические параметры сварных соединений и их несущую способность, что особенно важно для гнуто-сварных профилей (рис. 7–9) [3].



Рис. 7. Характеристики сварного соединения «CH» и «D1»

Рис. 8. Характеристики
сварного соединения
«CH» и «D2»Рис. 9. Расположение сварных соединений
(швов) в модели

4. Расчет и анализ результатов.

Производим расчет созданной схемы. Программа автоматически определит напряженно-деформированное состояние узла, выявит зоны максимальных напряжений и проверит соответствие нормативным требованиям. Кроме того, возможен анализ резервов прочности, а также выявление потенциальных мест возникновения повреждений (рис. 10–12) [6].

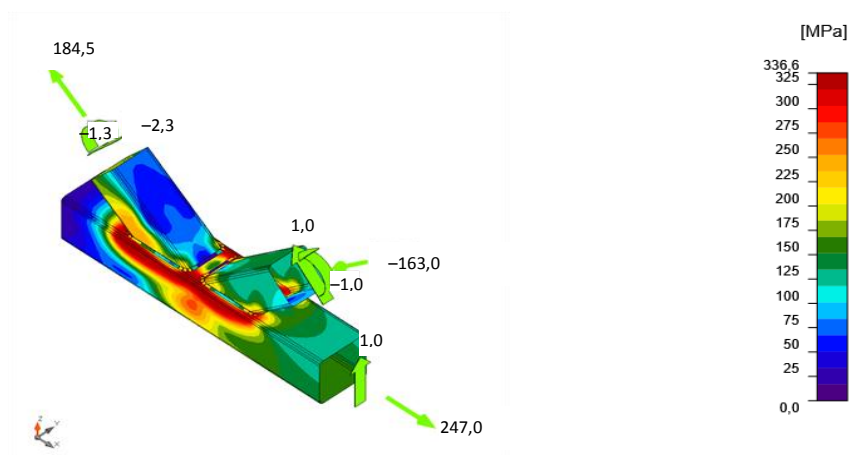


Рис. 10. Изополя эквивалентных напряжений, возникающих в узле

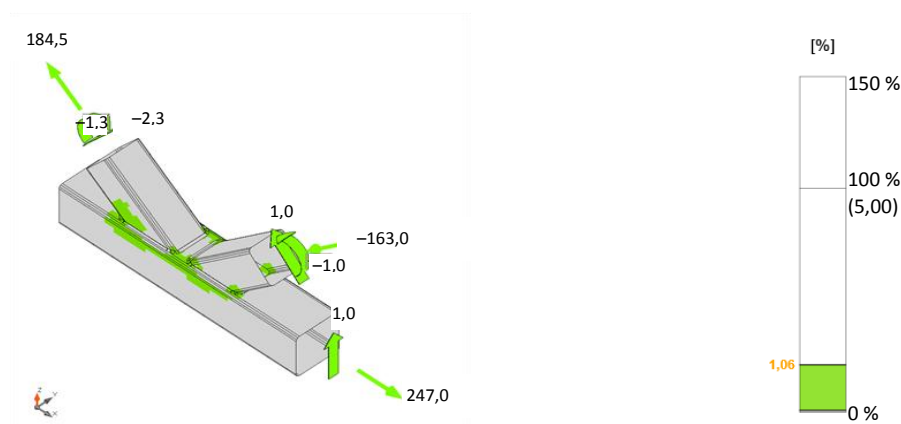


Рис. 11. Распределение пластических деформаций, возникающих в узле

Проверка сварных швов для наихудшего нагружения (Пластическое распределение)

		Статус	Элемент	Край	Электрод	k,f [mm]	l [mm]	l _{we} [mm]	Нагрузки	N [kN]	U _{twm} [%]	U _{tbm} [%]	Констр. треб-ия
>	+	✔	CH-w 3	D1	350	▲6,0	354	4	LE-MC1	4,0	88,0	95,1	✔
	+	✔	CH-w 3	D2	350	▲6,0	372	4	LE-MC1	4,1	89,5	96,8	✔

Рис. 12. Результаты проверки сварных швов

5. Оптимизация конструкции.

При необходимости корректируем параметры профиля, соединений или загрузки элементов и повторяем расчет для поиска оптимального решения с позиций обеспечения прочности узла и экономичности конструктивного исполнения [7].

Обобщая результаты анализа полученных расчетных данных, можно выделить **основные практические рекомендации:**

необходимо тщательно подбирать параметры сварных швов, поскольку от них сильно зависит поведение узла [1];

для повышения надежности конструкции следует проверять результаты расчета с учетом различных комбинаций нагрузок [5];

для упрощения обмена данными и сокращения времени моделирования представляется эффективным использовать возможности интеграции IDEA StatiCa с программными продуктами BIM и CAD [7].

Расчет узлов фермы из гнуто-сварных профилей является сложной и ответственной задачей, требующей учета множества факторов: геометрии, свойств материала, типа соединений и нагрузок. Использование IDEA StatiCa значительно упрощает этот процесс, обеспечивая высокую точность, соответствие нормам и возможности оптимизации конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Ю.А. Особенности расчета гнуто-сварных профилей в металлических конструкциях // *Строительная механика и расчеты*. 2023. № 1. С. 23–30.
2. IDEA StatiCa Official Website. URL: <https://www.ideastatica.com> (дата обращения: 10.03.2025).
3. Смирнова Е.Н. Программные комплексы для расчета соединений металлических конструкций // *Строительство и архитектура*. 2020. № 2. С. 60–67.
4. Иванов С.А. Современные методы расчета и проектирования металлических конструкций. СПб.: Лань, 2021. 288 с.
5. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. URL: <https://www.flamax.ru/upload/iblock/0ca/0ca30e537078b720c0199a7dc2c9383c.pdf> (дата обращения: 10.03. 2025).
6. Герасимов В.В. Металлические конструкции зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 2019. 432 с.
7. Петров К.М., Сидоров А.В. Применение программного обеспечения в строительном проектировании // *Инженерный журнал*. 2022. № 4. С. 45–52.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СУББОТИН Сергей Львович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru

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

КОРДА Роман Русланович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: romankorda@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Корда Р.Р. Расчет узла соединения раскосов металлической фермы из гнуто-сварных профилей в ПК IDEA StatiCa // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 21–27.

**CALCULATION OF THE JUNCTION POINT OF THE BRACES OF A METAL TRUSS
MADE OF BENT-WELDED PROFILES IN IDEA STATICA PVC**

S.L. Subbotin, T.R. Barkaya, R.R. Korda
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article discusses the process of calculating a truss assembly from bent-welded profiles using the IDEA StatiCa software package. The importance of accurate modeling and analysis of welded joints and geometric features of profiles is emphasized to ensure the strength and reliability of metal structures. A step-by-step procedure is described: from creating a 3D model of the node to analyzing the results and optimizing the design. Practical recommendations and advantages of using IDEA StatiCa in the context of modern requirements for building structures are presented. The research results confirm the effectiveness of this software tool in designing complex farm components.

Keywords: IDEA StatiCa, node calculation, truss, bent-welded profiles, welded joints, metal structures, modeling, strength, construction design, design optimization.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

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

KORDA Roman Ruslanovich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: romankorda@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Subbotin S.L., Barkaya T.R., Korda R.R. Calculation of the junction point of the braces of a metal truss made of bent-welded profiles in IDEA StatiCa PVC // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 21–27.

УДК 504.05

**К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
В КАЧЕСТВЕ ЭФФЕКТИВНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА****В.И. Трофимов, М.А. Смирнов***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Трофимов В.И., Смирнов М.А., 2025

Аннотация. Представлен анализ выполненных различными авторами исследований в области применимости минерального вторичного сырья в строительстве. Рассмотрен вопрос повышения эффективности его использования для изготовления эффективных строительных бетонных изделий. Предложена методика улучшения зернового состава заполнителя из дробленого боя силикатного кирпича путем его обогащения качественным щебнем из прочных горных пород.

Ключевые слова: заполнители бетона, кирпичный бой, обогащение, зерновой состав, прочность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-28-35

В настоящее время отходы промышленного производства и вторичное сырье находят все более широкое применение при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций [1–4]. Этому способствуют различные программы по сносу устаревших зданий и сооружений. Например, программа «Реновация» уже несколько лет успешно реализуется в г. Москве (рис. 1). Кроме того, в районах проведения специальной военной операции ощущается острая необходимость в работах по восстановлению тех или иных зданий. При этом известно, что от разрушенных построек образуется большое количество техногенного сырья в виде кирпичного боя и бетонного лома, которое может быть с успехом использовано в производстве эффективных строительных материалов [2]. Данный подход позволит снизить дефицит таких материалов, расширить их сырьевую базу и повысить экологическую безопасность. Следовательно, выпуск бетонных изделий различного назначения на основе переработанного вторичного минерального сырья является актуальной задачей.



Рис. 1. Снос старых зданий: а – из железобетонных панелей; б – кирпича

Ежегодное образование отходов от сноса зданий и сооружений в нашей стране составляет более 17 млн т, 40 % из которых – кирпичный бой [5]. Вопросами эффективного использования продуктов дробления кирпичного боя и бетонного лома занимались Баженов Ю.М., Чумаков Л.Д., Лесовик В.С., Пистилла М.Ф. и другие отечественные и зарубежные ученые. Однако до сих пор не нашли широкого распространения материалы и изделия из бетона на основе вторичного минерального сырья, несмотря на имеющийся положительный опыт применения. При этом остается нерешенным ряд вопросов по повышению прочности и других эксплуатационных свойств изделий на основе таких бетонов.

Из большого перечня вторичного минерального сырья бетонный лом и кирпичный бой являются в настоящее время все более востребованными в производстве эффективных строительных материалов и изделий (рис. 2).



Рис. 2. Вторичное минеральное сырье:

а – бой керамического кирпича;

б – бетонный лом

Известны исследования в области обоснования применимости силикатного и керамического боя в качестве эффективных заполнителей для легкого и тяжелого бетонов [5]. Выполненные на сегодняшний день научно-исследовательские работы показывают, что результаты применения бетонного и кирпичного лома не всегда однозначны [1]. В первую очередь это связано с различными сроками и условиями эксплуатации строительных конструкций до того момента, как они стали отходами. При этом не учитываются марки сырья (например, силикатного кирпича), а также толщина слоев различных растворов: кладочного и штукатурного и др.

В то же время существует проблема, связанная с малой степенью изученности работы заполнителей, полученных из минерального вторичного сырья, в различных условиях эксплуатации, а также с отсутствием достаточного отечественного опыта технологической переработки строительных отходов. Организация производства эффективных бетонных изделий на базе вторичного сырья требует обоснованного выбора технологий и формовочного оборудования необходимой производительности.

На сегодняшний день исследуются технологии разделения бетонного лома на исходный заполнитель и цементный камень, что позволит осуществлять переработку и повторное применение этого материала более эффективно [6].

Результаты испытаний образцов бетона на основе щебня из боя силикатного кирпича, керамического кирпича и бетонного боя показали, что расчетная плотность (а соответственно, прочность) меньше фактической: у бетона на основе щебня из силикатного кирпича – на 2,91 %; керамического кирпича – на 5,17 %; бетонного боя – на 3,82 %. Заданного значения прочности бетона В30 достиг только бетон на основе щебня из силикатного кирпича, что было объяснено влиянием активаторов твердения цемента – гидросиликатов кальция, являющихся компонентами силикатного кирпича [1]. Снижение плотности было объяснено влиянием образующейся поверхностной пористости дробленого материала [7].

Для проведения исследований использовался рециклинговый щебень из боя силикатного кирпича (без раствора) и из боя кладки с силикатным кирпичом (вместе с раствором) [8]. По результатам проведенной работы выявлено, что рециклинговый щебень, полученный дроблением фрагментов кирпичной кладки из силикатного кирпича (с раствором), и рециклинговый щебень, полученный дроблением силикатного кирпича (без раствора), пригодны (наравне со щебнем из осадочных и метаморфических пород) для применения в качестве крупного заполнителя при производстве бетонов общестроительного назначения.

Тем не менее остаются недостаточно изученными вопросы влияния на прочность бетона толщины слоя раствора, остающегося на зернах кирпичного боя; объема содержания пылеватых частиц кирпичного боя; соотношения двух и более видов фракций (основной и вспомогательной) с учетом марок по прочности. При этом важным вопросом, рассматриваемым с позиций эксплуатационных свойств и экономической эффективности полученного бетона на основе кирпичного боя, является обоснование его процентного содержания в общем объеме.

Одним из способов повышения эффективности использования боя из силикатного кирпича в качестве крупного заполнителя бетона является его обогащение. В случае мелкого заполнителя обогащение широко используется при отсутствии значительных запасов кондиционных песков. Так, в Краснодарском крае широко распространены мелкие и пылеватые пески, существенно ухудшающие качество бетона. Одним из путей повышения эффективности их использования является обогащение качественными песками [9].

Метод обогащения крупного заполнителя низкого качества до последнего времени широкого распространения не получил. Однако в последнее время наметилась тенденция использования бетонного лома, кирпичного и стеклянного боя, а также других материалов вторичного минерального сырья для изготовления эффективных строительных бетонных изделий различного назначения.

Известно, что зерна заполнителя различного происхождения и крупности и их соотношения в матрице бетона влияют на его конечную плотность и прочность [9]. На рис. 3 представлены схемы идеализированных структур бетона, формирующихся в зависимости от крупности фракций обогащенного известняковым щебнем заполнителя на основе силикатного кирпичного боя.

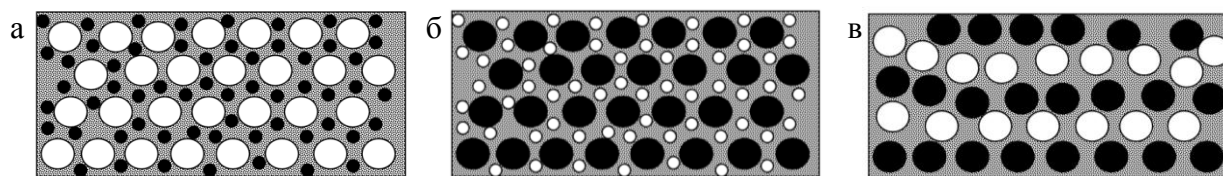


Рис. 3. Идеализированные модели формируемых структур бетона для случаев:
а – крупность зерен известнякового щебня (гравия) меньше крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} < d_{щ_{кшр}}$; б – крупность зерен известнякового щебня (гравия) больше крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} > d_{щ_{кшр}}$; в – крупность зерен известнякового щебня (гравия) равна крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} \approx d_{щ_{кшр}}$;

○ – щебень из боя силикатного кирпича; ● – известняковый щебень (гравий);
⋯ – цементно-песчаная матрица

Схемы развития возможных напряжений (σ) для случаев использования зерен заполнителя различной крупности в матрице бетона с условием, что прочность зерен кирпичного боя меньше прочности зерен известнякового щебня ($R_{щ_{кшр}} < R_{щ_{из}}$), представлены на рис. 4.

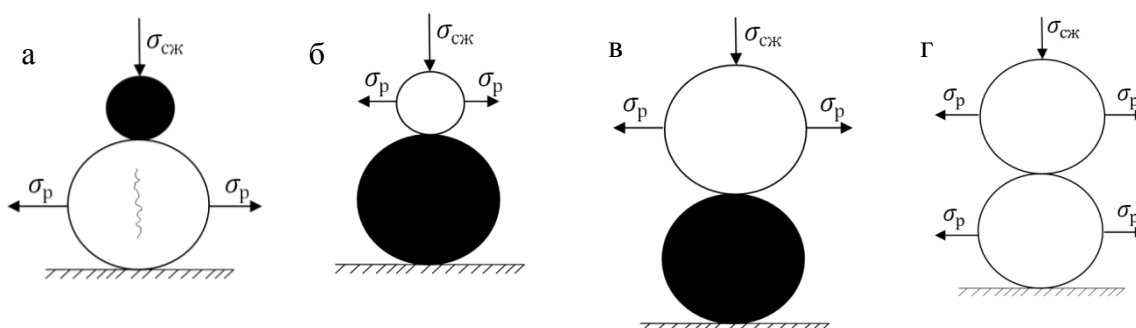


Рис. 4. Схемы возможного силового взаимодействия зерен заполнителя различного происхождения и крупности для случаев: а – крупность зерен известнякового щебня (гравия) меньше крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} < d_{щ_{кшр}}$; б – крупность зерен известнякового щебня (гравия) больше крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} > d_{щ_{кшр}}$; в – крупность зерен известнякового щебня (гравия) равна крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} \approx d_{щ_{кшр}}$;

г – одинаковый диаметр зерен силикатного кирпичного боя;
○ – щебень из боя силикатного кирпича; ● – известняковый щебень (гравий)

Так как дробимость щебня из боя силикатного кирпича меньше дробимости известнякового щебня ($Dp_{щ_{кп}} < Dp_{щ_{из}}$), необходимо установить с точки зрения прочности и эффективности технологии бетона, какой вид щебня задавать более крупным: кирпичный или известняковый. При этом может быть реализовано три варианта.

В первом варианте, когда $d_{щ_{из}} < d_{щ_{кп}}$, прочность бетона базируется в основном на усиленной матрице, упрочненной мелким известняковым щебнем. Благодаря технологии получения щебня из боя силикатного кирпича дроблением до заданной крупности (фракции) будет оставаться меньше отходов в виде пыли и мелкой крошки, что повышает эффективность производства.

Во втором варианте, когда $d_{щ_{из}} > d_{щ_{кп}}$, прочность бетона определяется в основном взаимодействием зерен прочного известнякового щебня с ослабленной матрицей. При подготовке (дроблении боя силикатного кирпича) будет образовываться повышенный объем отходов в виде пыли и мелкой крошки, что снижает эффективность производства бетонных изделий.

В третьем варианте, когда $d_{щ_{из}} \approx d_{щ_{кп}}$, пустотность между зернами двух видов щебня достигает максимального значения, а прочность бетона определяется в основном прочностью цемента-песчаной матрицы, что менее эффективно с точки зрения производства бетонных изделий.

Известно, что на прочность сформированной структуры влияет контактный фактор – силовое взаимодействие между зернами двух видов щебня (например, в технологических процессах приготовления смеси, нагружения бетонного изделия или при испытании на дробимость обогащенной смеси) (рис. 4).

Наиболее сложный случай взаимодействия между зернами заполнителей двух видов будет возникать при работе единичного зерна щебня из кирпичного боя в объемно-напряженном состоянии в случае всестороннего воздействия на него зерен известнякового щебня (рис. 5б).

С учетом того, что прочность зерен щебня из кирпичного боя меньше прочности зерен известнякового щебня ($R_{щ_{кп}} < R_{щ_{из}}$), деформируемость будет также связана через модули деформации $E_{щ_{кп}} < E_{щ_{из}}$. В этом случае можно принять модель объемно-напряженного состояния, при которой $\sigma_1 \gg \sigma_2 = \sigma_3$ (рис. 5а). Существует связь между нормальным вертикальным давлением (напряжением σ_1) и боковым давлением (напряжением $\sigma_2 = \sigma_3$) в виде $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 \xi$, где ξ – коэффициент бокового давления, который может быть принят для сыпучих, несвязанных систем (сухая смесь заполнителей бетона) – 0,43; для связанных систем (глина, готовая бетонная смесь) – 0,73 [10].

Используя известные соотношения напряженного состояния и вида приложенной нагрузки, можно ориентировочно прогнозировать предельное состояние и применять его в технологических расчетах (например, при приготовлении обогащенной смеси, испытании на прочность бетонного изделия или при испытании на дробимость обогащенной смеси из заполнителей различного вида).

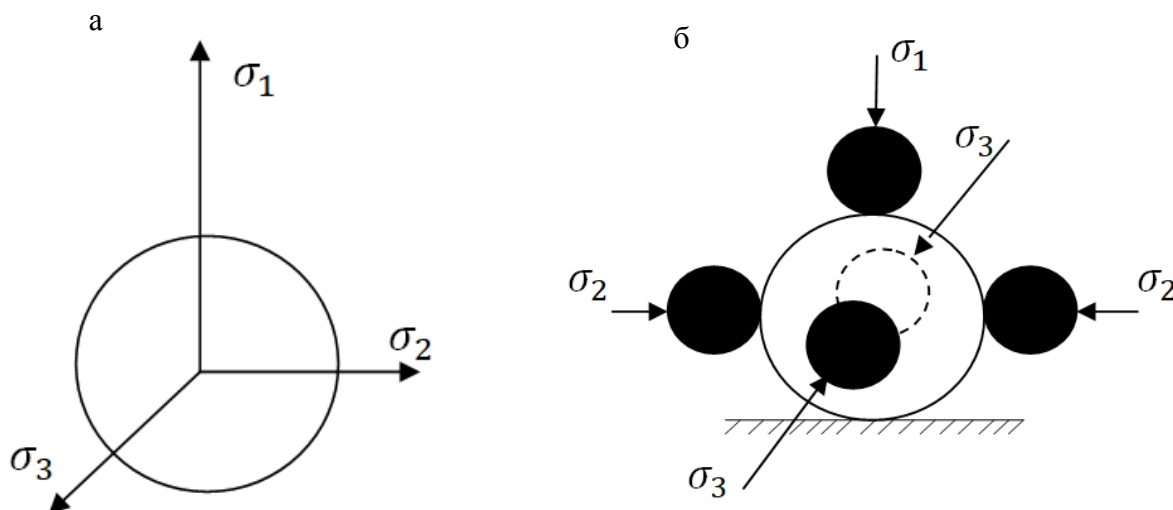


Рис. 5. Схемы работы единичного зерна щебня из кирпичного боя в объемно-напряженном состоянии: а – схема действия напряжений в объемно-напряженном состоянии; б – в случае всестороннего воздействия зерен известнякового щебня при $\sigma_1 \gg \sigma_2 = \sigma_3$

Таким образом, на основе всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ существующих работ, посвященных использованию вторичного минерального сырья в производстве бетонных изделий, показал возможность повторного применения исследуемых материалов в строительстве в качестве эффективного заполнителя бетона.

2. В связи с актуальностью решения проблемы широкого использования вторичного минерального сырья (в частности, щебня из кирпичного силикатного боя) в производстве эффективных бетонных изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами была предложена концепция увязки свойств цемента с двухкомпонентной системой крупного заполнителя.

3. Одним из путей улучшения эксплуатационных свойств тяжелого бетона может быть применение технологии обогащения некондиционного щебня, получаемого из боя силикатного кирпича, путем включения в его состав гранитного щебня для улучшения структуры самой бетонной матрицы, но без снижения при этом ее структурной прочности.

4. Более высокая степень уплотнения/прочности в случае применения в составе бетона силикатного кирпичного боя может быть достигнута при использовании двух видов щебня, причем силикатная кирпичная фракция задается более крупной, чем гранитная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Украинский И.С., Майорова Л.П., Саликов Д.А., Шевчук А.С., Чайников Г.А. Повторное использование бетонного и кирпичного лома в качестве заполнителей в бетон // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2023. Т. 31. № 2. С. 291–301.
2. Ахмед А.А.А. Эффективные композиты с использованием отсеков дробления фрагментов разрушенных зданий и сооружений: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2021. 208 с.
3. Романенко И.И. Применение лома глиняного кирпича в качестве крупного заполнителя бетонов // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8051 (дата обращения: 18.02.2025).
4. Иванова Т.А., Колесникова Л.Г. Оценка эффективности применения бетонного лома в качестве крупного заполнителя для бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7530 (дата обращения: 18.02.2025).
5. Хаджиев М.Р. Керамобетон на основе вторичных заполнителей из кирпичного боя для мелкоштучных стеновых изделий: дис. ... канд. техн. наук. Грозный, 2015. 222 с.
6. Чайников Г.А., Каменчуков Ю.В., Дерюгина И.А. Рециклирование бетона в целях его повторного использования в асфальтобетоне // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса: Материалы национальной научно-практической конференции / отв. ред. П.И. Егоров*. Хабаровск: ТОГУ, 2022. Вып. 22. С. 107–111.
7. Farid Debieb, Kenai S. The Use of Coarse and Fine Crushed Bricks as Aggregate in Concrete // *Construction and Building Materials*. 2008. No. 22. P. 886–893.
8. Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В.В. Определение нормируемых характеристик рециклингового щебня из боя силикатного кирпича и перспективы его применения // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022. Т. 33. № (2). С. 63–73.
9. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник. М.: АСВ, 2003. 500 с.
10. Дашко Р.А., Каган А.А. Механика грунтов в инженерно-геологической практике. М.: Недра, 1977. 237 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vetrofa@mail.ru

СМИРНОВ Матвей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трофимов В.И., Смирнов М.А. К вопросу применения вторичного минерального сырья в качестве эффективного заполнителя тяжелого бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 28–35.

**ON THE USE OF SECONDARY MINERAL RAW MATERIALS
AS AN EFFECTIVE FILLER FOR HEAVY CONCRETE**

V.I. Trofimov, M.A. Smirnov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This article presents an analysis of research conducted by various authors on the applicability of secondary mineral raw materials in construction. The issue of increasing the efficiency of their use in the production of effective concrete building products is discussed. A method for improving the grain size distribution of aggregate made from crushed sand-lime brick by enriching it with high-quality crushed rock from strong rocks is proposed.

Keywords: concrete aggregates, brick chips, enrichment, grain composition, strength.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vitrofa@mail.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Trofimov V.I., Smirnov M.A. On the use of secondary mineral raw materials as an effective filler for heavy concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 28–35.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 629.1.04

МГНОВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ МОМЕНТА, РАЗВИВАЕМОГО СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ПРИ ИНДУКТИВНОЙ И ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКЕ

В.И. Безденежных*Курганский государственный университет (г. Курган)*

© Безденежных В.И., 2025

Аннотация. Цель настоящего исследования – показать, что момент сил, развиваемый синхронной электрической машиной при реактивной нагрузке, не равен нулю. При этом речь идет о мгновенном значении момента сил. В работе применены методы математического моделирования и традиционные электротехнические расчеты. Для сформулированной в статье теоремы представлены три независимых друг от друга доказательства – для любой реактивной нагрузки, индуктивной и емкостной. Отмечено, что, вопреки возможному интуитивному предположению, у индуктивной синхронной электрической машины с реактивной нагрузкой развиваемый момент не равен нулю, а из этого следует, что механическая мощность, развиваемая машиной, также не равна нулю. Полученные результаты рекомендовано использовать при проектировании автоматизированных электрических приводов.

Ключевые слова: синхронная машина, индуктивная, емкостная нагрузка, ЭДС, ток, момент.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-36-39

ВВЕДЕНИЕ

Многие авторитетные специалисты в области электромеханики убеждены, что момент, развиваемый синхронной электрической машиной при реактивной нагрузке, равен нулю. При этом речь идет о мгновенном значении момента. *Цель данного исследования* заключается в том, чтобы показать, что подобное представление не соответствует действительности. *Задача* – получить доказанные теоремой результаты. *Актуальность работы* состоит в том, чтобы обратить внимание специалистов на указанное заблуждение, которое довольно широко распространено.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе применяются методы математического моделирования.

Электродвижущая сила (ЭДС) идеализированной синхронной машины

Электродвижущую силу одного витка обмотки в соответствии с законом электромагнитной индукции можно выразить как $e_1 = -Blv \sin \varphi$, где B – магнитная индукция; l – длина активной части витка; v – линейная скорость активной части витка; φ – фаза.

Для n витков $e_n = -Blnv \sin \varphi$.

Скорость v представляется как $v = \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt}$, где D_r – диаметр якоря.

Таким образом, ЭДС идеализированной синхронной машины [1–3] можно найти как

$$e = -Bln \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теорема. Момент сил синхронной электрической машины при реактивной нагрузке не равен нулю.

Доказательство 1. При реактивной нагрузке развивается реактивная мощность

$$q = ui = U \sin \omega t \cdot I \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) = \pm \frac{1}{2} UI \sin 2\omega t,$$

где u – мгновенное значение напряжения; i – мгновенное значение тока; U – амплитудное значение напряжения; ω – циклическая частота; I – амплитудное значение тока.

Реактивная мощность не равна нулю.

Механическая мощность $p = \mu \omega$, где μ – момент [4].

В соответствии с законом сохранения энергии механическая мощность равна электрической мощности [5]. Из этого следует формула для момента

$$\mu = \frac{p}{\omega} = \frac{q}{\omega} = \pm \frac{UI}{2\omega} \sin 2\omega t.$$

Как и реактивная мощность, момент не равен нулю.

Теорема доказана.

Замечание. Речь не идет о среднем значении момента за период колебаний.

Доказательство 2. Пусть нагрузка является индуктивной. При этом

$$u_L = -L \frac{di}{dt},$$

где u_L – напряжение на нагрузке; L – индуктивность.

В соответствии с законом Кирхгофа $e = u_L$, или $Bln \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi = L \frac{di}{dt}$.

Интегрирование этого выражения дает $i = -\frac{Bln}{L} \frac{D_r}{2} \cos \varphi + I_0 = -I_m \cos \varphi + I_0$.

Начальный ток I_0 можно положить равным нулю.

В соответствии с законом Ампера $f = Blni \sin \varphi$, где f – мгновенное значение силы, действующей на активную часть витка.

Отсюда мгновенное значение момента

$$\mu = Blni \frac{D_r}{2} \sin \varphi = -Bln \frac{Bln}{L} \frac{D_r}{2} \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = -\frac{(Bln)^2}{L} \frac{D_r^2}{8} \sin 2\varphi.$$

Очевидно, что момент не равен нулю.

Теорема доказана.

Доказательство 3. Пусть нагрузка является емкостной. При этом

$$Bln \frac{D_r}{2} \omega \sin \omega t = \frac{1}{C} \int_0^t i dt, \text{ где } C - \text{емкость.}$$

Дифференцирование этого выражения дает

$$i = BlnC \frac{D_r}{2} \omega^2 \cos \omega t.$$

Момент

$$\mu = Blni \frac{D_r}{2} \sin \varphi = BlnBlnC \frac{D_r}{2} \omega^2 \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = (Bln)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^2 \sin 2\varphi.$$

Очевидно, что момент не равен нулю.

Теорема доказана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, у индуктивной синхронной электрической машины с реактивной нагрузкой развиваемый момент не равен нулю. Здесь необходимо отметить, что механическая мощность, развиваемая машиной, также не равна нулю.

Полученные результаты следует использовать в ходе учебного процесса, а также при проектировании электрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
2. Иванов П.Г., Корнеев К.Б. Анализ влияния генераторов тепловых электростанций на режимы работы электросети крупного города России // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 45–50.
3. Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 58–63.
4. Попов И.П. Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 62–69.
5. Павлов В.Д. Механическая мощность при гармонических воздействиях // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2022. № 1 (73). С. 30–38.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЗДЕНЕЖНЫХ Валентина Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Безденежных В.И. Мгновенное значение момента, развиваемого синхронным генератором при индуктивной и емкостной нагрузке // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 36–39.

**INSTANTANEOUS VALUE OF TORQUE DEVELOPED
BY A SYNCHRONOUS GENERATOR
WITH INDUCTIVE AND CAPACITIVE LOAD**

V.I. Bezdeneshnykh

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. The purpose of this study is to demonstrate that the torque developed by a synchronous electric machine under a reactive load is nonzero. This study refers to the instantaneous value of the torque. The study utilizes mathematical modeling methods and traditional electrical engineering calculations. Three independent proofs are presented for the theorem formulated in the article – for any reactive load, inductive, and capacitive. It is noted that, contrary to possible intuitive assumptions, the torque developed by an inductive synchronous electric machine under a reactive load is nonzero, which implies that the mechanical power developed by the machine is also nonzero. The obtained results are recommended for use in the design of automated electric drives.

Keywords: synchronous machine, inductive, capacitive load, EMF, current, torque.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

BEZDENESHNYKH Valentina Ivanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Kurgan State University, 63/4, Sovetskaja street, Kurgan, 640020, Russia. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Bezdeneshnykh V.I. Instantaneous value of torque developed by a synchronous generator with inductive and capacitive load // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 36–39.

УДК 620.19

**ВЫБОР МАГНИТОЖЕСТКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
МАГНИТОПАССИВНЫХ ПОДШИПНИКОВ***А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В., 2025

Аннотация. В современном высокотехнологичном оборудовании магнито-пассивные подшипники применяются в основном для разгрузки механических подшипников или в составе активных электромагнитных подвесов. В статье разработаны рекомендации для обоснованного выбора магнито жестких материалов для оптимальных магнитов магнитосиловых устройств с учетом особенностей их эксплуатации, геометрических размеров, конструкции магнитной цепи подшипника и при условии сохранения остаточной намагниченности на наиболее высоком уровне. Рассмотрены магниты самых востребованных форм: цилиндрической, кольцевой, призматической и конусной. Определены безразмерные критерии оптимальных по размерам магнитов, при выполнении которых достигается заданная несущая способность или жесткость. Установлено, что коэрцитивная сила по намагниченности материала магнитов для силовых механизмов должна быть не менее чем на 10–20 % выше остаточной намагниченности магнитов.

Ключевые слова: магнито пассивные подшипники, магнито жесткие материалы, коэрцитивная сила по намагниченности, намагниченность магнитов, размагничивающее магнитное поле магнита.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-40-49**ВВЕДЕНИЕ**

Особое место среди магнитных механизмов занимают магнито пассивные подшипники [1–4], механические свойства которых – жесткость, несущая способность – выросли более чем на порядок после начала применения в их конструкции современных магнитов. Удельная несущая способность подшипников с магнитами нового поколения может достигать 0,2–0,4 МПа. Магнито пассивные подшипники – это радиальные или упорные бесконтактные подшипники, в которых внешняя нагрузка бесконтактно компенсируется магнитными силами. Источником этих сил являются постоянные магниты. Преимущество таких подшипников перед механическими заключается в том, что они не подвержены износу, имеют незначительные диссипативные потери энергии, обусловленные силами электромагнитного торможения, и не загрязняют окружающую среду смазочными продуктами. Магнито пассивные подшипники в основном применяются для разгрузки механических подшипников или в составе активных электромагнитных подвесов [3–5]. В магнито пассивных подшипниках используются магниты с осевой симметрией формы, но в подшипниках для магнитной разгрузки могут применяться и магниты в виде прямоугольной призмы. В некоторых случаях для магнитной разгрузки можно эффективно использовать как магниты простых форм с постоянным направлением

намагниченности по объему, так и магнитную сборку Хальбаха из магнитов с разнонаправленной намагниченностью [6].

В магнитопассивных подшипниках на магниты воздействует не только внутреннее размагничивающее поле, но и неоднородное размагничивающее поле от сопряженных магнитов. В зависимости от толщины магнитов и их намагниченности суммарное размагничивающее поле может приближаться к значению коэрцитивной силы по намагниченности или даже превышать ее. Поэтому влияние больших размагничивающих полей на магниты способно привести к необратимому уменьшению остаточной намагниченности магнитов, а следовательно, к ухудшению их функциональных свойств и даже к разрушению из-за возникновения механического контакта между магнитами, имеющими относительное движение.

Для предотвращения выхода из строя магнитных подшипников по причине непреднамеренного размагничивания постоянных магнитов необходимо выработать требования к материалам магнитов с учетом их эксплуатации, геометрических размеров, особенностей магнитной цепи подшипника и при условии сохранения остаточной намагниченности на наиболее высоком уровне. В первом приближении эти требования определяются только коэрцитивной силой магнитов при заданной температуре, формой кривой размагничивания, а также геометрическими параметрами магнитной цепи.

Цель работы заключалась в выработке рекомендации по обоснованному выбору магнито жестких материалов для оптимальных магнитов, направленному на предупреждение их размагничивания в процессе эксплуатации и достижение высоких магнитосиловых характеристик подшипников.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ, МАГНИТНОСИЛОВЫХ УСТРОЙСТВ

Наиболее важными магнитными характеристиками постоянных магнитов, определяющими надежность и эффективность работы магнитопассивных подшипников и других устройств с постоянными магнитами (муфт, тормозов, пружин), являются коэрцитивная сила по намагниченности H_{cJ} и намагниченность J в рабочей точке магнита.

Для предупреждения размагничивания отдельного магнита в магнитопассивном подшипнике при рабочей температуре критическое значение размагничивающего поля H_k (соответствует точке Е на кривой размагничивания, рис. 1) должно превосходить собственное размагничивающее магнитное поле магнита H_p в сумме с внешним полем H_e , создаваемым сопряженными магнитами, и определяться свойствами материала магнитов или другими источниками:

$$H_k > H_e(J) + H_p(J) + H_n, \quad (1)$$

где H_n – величина дополнительного магнитного поля, учитывающая сильную неоднородность внешних и внутренних размагничивающих полей и полей от случайных источников.

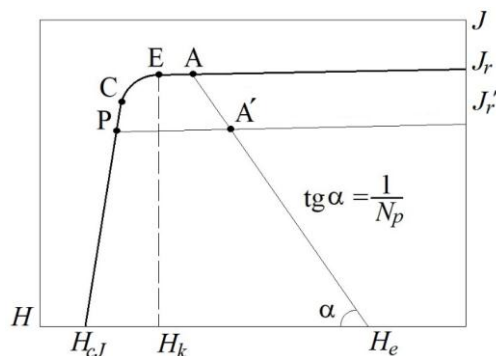


Рис. 1. Обобщенная кривая размагничивания магнита

Величина H_k зависит от магнитных свойств материала магнита, и найти ее значение можно либо в справочных пособиях, либо с помощью уравнений, полученных в работе [7]. Под скалярными величинами H_e и H_p подразумеваются только аксиальные или нормальные к поверхности магнита составляющие векторов напряженности соответствующих размагничивающих полей.

У механизмов, выполненных из закритических магнитомягких материалов $H_k \geq J_r$ (J_r — наибольшая остаточная намагниченность), имеющих близкую к однородной намагниченность, силовые характеристики пропорциональны намагниченности во второй степени, в то время как от объема, например, они зависят в степени, показатель которой меньше единицы. Поэтому магниты для подшипников и других устройств должны иметь максимально возможную, с учетом неравенства (1), намагниченность. Наибольшего значения результирующее размагничивающее поле достигает в том случае, когда сопряженные магниты подшипника намагничены встречно.

МАГНИТНЫЕ ПОДШИПНИКИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ МАГНИТАМИ

Необходимое для расчета размагничивающего поля H_p значение размагничивающего фактора N_p определяется через отношение $H/2R$. Современные магниты, которые используются в электромагнитных устройствах, имеют отношение толщины к характерному размеру полярной поверхности существенно меньше единицы, значит, для цилиндрических магнитов $H/2R \ll 1$ (R , H — радиус и высота магнита). Только при этом условии магниты могут создавать внешнее поле с максимальной энергией и магнитным потоком, а также достигается наибольшая сила их взаимодействия.

Расчеты размагничивающего фактора сплошных и полых цилиндрических тел удобно проводить, пользуясь выражением, полученным в работе [8], с применением метода фиктивных магнитных зарядов:

$$N_p = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1-\tau}{\lambda} - \frac{\lambda}{\pi(1-\tau)} \ln \left[1 + \left(\frac{1-\tau}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $\tau = \frac{r}{R}$; $\lambda = \frac{h}{2R}$ (r , R — внутренний и внешний радиусы; h — высота магнита).

Для цилиндрических магнитов следует принять $\tau = 0$. Приведенная формула отвечает двум обязательным граничным условиям: при $\lambda \rightarrow 0$ N_p стремится к единице, а при $\lambda \rightarrow \infty$ N_p — к нулю. Расчеты, произведенные по формуле (1), очень хорошо согласуются с данными, указанными в обзорной работе [9].

Напряженность внешнего поля цилиндрического магнита несколько увеличивается при сканировании вдоль радиуса от оси к краю магнита. Для оценки величины этого поля можно воспользоваться следующим выражением, которое описывает внешнее поле магнита вдоль его оси:

$$H_z = \frac{J}{2} \left[\frac{L+H}{\sqrt{R^2 + (L+H)^2}} - \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} \right], \quad (3)$$

где $L \equiv z$ – расстояние от полярной поверхности магнита.

Уравнение (2) для максимального значения поля при $L = 0$ можно выразить через параметр λ : $H_z = J\lambda/\sqrt{\lambda^2 + 1}$. Отсюда становится понятно, что по мере уменьшения параметра λ внешнее поле уменьшается, однако внутреннее размагничивающее поле растет.

Остановимся на рассмотрении подшипников с оптимальными по размерам цилиндрическими магнитами. Аналитические расчеты показали, что оптимальными являются магниты, у которых параметр $\lambda = 0,42$, а размагничивающий фактор для них $N_p \approx 0,49$. Это значит, что оптимальные магниты находятся в некотором состоянии с магнитной энергией, близкой к максимальному значению.

Максимальная сила F_{\max} взаимодействия (при зазоре, стремящемся к нулю) между двумя соосно расположенными цилиндрическими магнитами оптимальных размеров выражается как

$$F_{\max} = 0,45 \cdot \mu_0 J^2 V^{\frac{2}{3}}, \quad (4)$$

где $V = 2,6 R^3$ – объем магнита.

Обычно в техническом задании на разработку магнитопассивного подшипника дается сила F_{\max} , поэтому по формуле (4) можно определить объем оптимального магнита и затем легко рассчитать его размеры.

Поле постоянного магнита можно описать в безразмерном виде, воспользовавшись результатами работы [7] и некоторой интегральной функцией ψ , зависящей от параметров $H/R, L/R, \rho/R, z/R$: $H_z/J = \psi(H/R, L/R, \rho/R, z/R)$. Отсюда следует, что оптимальные магниты имеют подобную структуру магнитных полей. При этом безразмерные параметры являются тривиальными геометрическими критериями подобия, нетривиальный критерий имеет вид H_z/J . Результат расчета поля, создаваемого оптимальным цилиндрическим магнитом, приведен на рис. 2. Графики, характеризующие магнитное поле магнита, представлены в безразмерных координатах и являются универсальными для всех магнитов, поскольку учитывают приведенные критерии подобия.

Графики на рис. 2 (кривые 1, 2) показывают изменение размагничивающего поля по оси магнита и в среднем сечении. Из них видно, что фактическое размагничивающее поле может быть почти на 40 % выше, чем определенное с помощью баллистического размагничивающего фактора, и это следует учитывать в формуле (1) через величину H_n , чтобы не допустить локального размагничивания магнита.

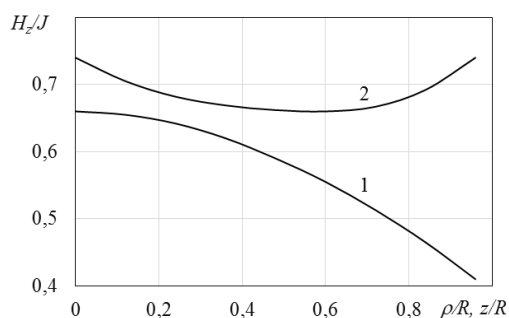


Рис. 2. Изменение относительного размагничивающего поля H_z/J вдоль радиуса (при $z = -h/2$) (1) и вдоль оси z (при $\rho = 0$) (2)

В результате численных расчетов было установлено, что размагничивающее поле от цилиндрического магнита имеет максимум, зависящий от величины полярного радиуса и расстояния z от поверхности (величины зазора L). По мере удаления от поверхности магнита положение максимума смещается от края магнита к центру. Величину максимального поля на расстоянии L от магнита радиуса R можно определить по приближенной формуле

$$H_s \approx J \exp(-7,3 L/R - 0,96). \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что поверхностный слой магнита в подшипнике может находиться под воздействием размагничивающего поля, на 20–30 % превышающего собственное размагничивающее поле магнита.

Приведенные сведения показывают, что для исключения непредвиденного снижения расчетной несущей способности подшипников с оптимальными цилиндрическими магнитами необходимо, чтобы критическое размагничивающее поле материалов магнитов удовлетворяло следующему требованию: $H_k > 0,87J + H_n$.

ПОДШИПНИКИ С КОЛЬЦЕВЫМИ МАГНИТАМИ

Размагничивающий фактор, необходимый для вычисления собственного размагничивающего поля H_s при $\lambda \lesssim 1$, можно достаточно точно определить из формулы (2).

Кольцевые магниты, наиболее перспективные для применения в магнитных подшипниках, имеют отношение ширины магнита к среднему радиусу $2(R-r)/(R+r) \ll 1$, поэтому размагничивающее поле таких магнитов в интересующей нас области $r < \rho < R$ можно вычислить с точностью до 15 % по формуле, полученной для постоянного магнита в виде бесконечной пластины с размерами сечения $(R-r) \times H$:

$$H_s = \frac{J}{\pi} \cdot \left[\arctg \frac{R-r}{2L} - \arctg \frac{R-r}{2(L+H)} \right]. \quad (6)$$

Значит, силовые свойства подшипников будут стабильны при любых зазорах L , если критическое поле для материала магнитов

$$H_k > N_R J + \frac{J}{\pi} \arctg \frac{R-r}{2H} + H_n. \quad (7)$$

Для предупреждения размагничивания в средней части магнита следует увеличить значение поля, равное $N_R J$, на 10–20 %.

Оптимальные кольцевые магниты имеют следующие относительные размеры: $r/R \approx 0,64$; $h/2R = h/D \approx 0,13$. При таких размерах размагничивающий фактор $N_p \approx 0,52$, а поэтому их магнитная энергия близка к максимальному значению.

Наибольшее размагничивающее поле в объеме рассматриваемого магнита более чем на 25 % превосходит значение поля, определенного посредством коэффициента N_p . Внешнее размагничивающее поле оптимального цилиндрического магнита достаточно однородно и не превышает $H_e \approx 0,3 J$. Суммарное размагничивающее поле $H_e + H_p$ в кольцевом магните, вычисленное аналитическим методом, слабо зависит от полярного радиуса – величина его проходит через максимум в центре магнита и всего лишь на несколько процентов меньше, чем на краях магнита.

Кольцевые магниты с оптимальными размерами создают меньшее размагничивающее поле, чем цилиндрические того же объема. Различие становится заметнее по мере увеличения радиусов кольцевого магнита. Обобщенное наиболее жесткое требование к материалам оптимальных по размерам кольцевых магнитов должно быть следующим: $H_k > 0,96 J_r + H_n$.

Максимальная сила рассматриваемых магнитов ($L \sim 0$) в зависимости от объема определяется по приближенной формуле

$$F_{\max} = 0,53 \cdot \mu_0 J^2 V^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Удельная магнитная сила взаимодействия (см. формулы (3), (8)) кольцевых магнитов выше, чем цилиндрических, только при малых зазорах $L < 0,1$ мм. Если известна необходимая несущая способность подшипника, то по формуле (8) находится объем магнитов, а затем с помощью геометрических критериев оптимальности вычисляются реальные размеры магнитов и выбирается конкретный материал для магнитов с учетом требования к коэрцитивной силе.

ПОДШИПНИКИ С МАГНИТАМИ В ВИДЕ УСЕЧЕННОГО КОНУСА

Магниты имеют следующие геометрические параметры: R – радиус большего основания магнита; h – высота магнита; j – угол между основанием и образующей конуса. Магниты в подшипнике направлены друг к другу большими основаниями. Для оптимальных по размерам конусообразных магнитов получены геометрические критерии, которые имеют такой вид: $h/R = 1$, $j = 2\pi/3$. Нормальная сила взаимодействия конусообразных оптимальных магнитов на ~5–10 % выше, чем сила взаимодействия цилиндрических магнитов ($h/R = 0,84$) такого же объема.

Баллистический размагничивающий фактор N_p , определенный из анализа топографии поля в среднем сечении магнита, приблизительно равен 0,51. Однако в области, близкой к большей полярной поверхности магнита, размагничивающее поле существенно выше, поэтому целесообразно при выборе магнито жестких материалов принять $N_p \approx 0,85$. Внешнее размагничивающее поле оптимальных магнитов при постоянном L незначительно уменьшается от оси магнита к его краю. Наибольшее размагничивающее поле, создаваемое оптимальным конусообразным магнитом в зависимости от расстояния L до полярной поверхности, можно достаточно точно определить по формуле $H_e \approx J \exp(-1,2 L/R - 2,2)$.

Общее размагничивающее поле $H_e + H_R$ при нулевом зазоре между конусообразными магнитами очень близко к значению, равному намагниченности магнитов J .

ПОДШИПНИКИ С ПРИЗМАТИЧЕСКИМИ МАГНИТАМИ

В магнитных подшипниках, предназначенных для разгрузки механических подшипников или других трущихся узлов машин и механизмов, удобно и целесообразно устанавливать магниты в виде правильной призмы с квадратным сечением, которые намагничены вдоль ребра призмы. Оптимальные магниты имеют соотношение размеров $h/a = 0,42$, где h – высота призмы; a – сторона квадрата в основании.

Максимальная сила взаимодействия оптимальных призматических магнитов выражается как

$$F_{\max} = 0,47 \cdot J^2 V_s^{\frac{2}{3}}, \quad (9)$$

а максимальная магнитная сила в расчете на единицу полярной поверхности как

$$f_{\max} = 0,56 \mu_0 J^2.$$

Для нахождения размагничивающего фактора призматического магнита предлагают [10] воспользоваться формулой

$$N_p = \left[1 + 1,77 \frac{h}{a} \left(\frac{2h}{a} + 1 \right)^{1/2} \right]^{-1}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что размагничивающий фактор оптимального призматического магнита N_p , как и следовало ожидать, равен 0,5. Приведенное значение N_p позволяет определить среднее значение напряженности размагничивающего поля в средней части магнита, локальная же величина размагничивающего фактора в центральной части магнита достигает 0,79J. Для практических расчетов рабочей точки магнитов рекомендуем находить размагничивающий фактор по формуле

$$N_p = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{1,2}{h/a \cdot \sqrt{2+h^2/a^2}}. \quad (11)$$

Величина H_z внешнего (размагничивающего) магнитного поля призматического магнита увеличивается от центра магнита к периферии примерно в 2–2,5 раза. Для расчета внешнего поля H_z на расстоянии L от центра полярной поверхности магнита можно воспользоваться формулой

$$H_z = \frac{J}{\pi} \cdot \left[\arctg \frac{a^2}{2L \cdot \sqrt{2a^2 + 4L^2}} - \arctg \frac{a^2}{2(L+h) \cdot \sqrt{2a^2 + 4(L+h)^2}} \right]. \quad (12)$$

При сближении магнитов однополярными поверхностями до зазора $L = 0$ размагничивающее поле $H_z + H_p$ в центральной области приповерхностного слоя стремится к максимально возможному значению, равному J . Менее подвержены воздействию высоких размагничивающих полей области магнита, примыкающие к боковым граням.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы изучались размагничивающие поля в магнитопассивных подшипниках с магнитами, имеющими все наиболее важные для практики формы: цилиндрическую, кольцевую, призматическую и конусную. Предложены подходы для расчета размагничивающих полей в подшипниках с магнитами произвольных размеров, основанные на подобии магнитных систем.

В исследовании определены безразмерные критерии оптимальных по размерам магнитов, имеющих разные формы, при выполнении которых достигается заданная несущая способность или жесткость подшипников при минимальных затратах дорогостоящего магнито жесткого материала. Установлено, что при оптимальных размерах

магнитов их магнитная энергия близка к максимальной. Усредненная напряженность собственного размагничивающего поля магнитов численно равна приблизительно половине остаточной намагниченности. В отдельных оговоренных областях магнита собственное размагничивающее поле может быть существенно выше, и это необходимо учитывать при расчете магнитных систем подшипников.

Внешнее размагничивающее поле, действующее на сопряженные магниты, нелинейно возрастает при уменьшении зазора между ними. Даны рекомендации по расчету характерных значений этого поля.

При нулевом зазоре между сопряженными магнитами напряженность размагничивающего поля в отдельных областях магнитов достигает значения, численно равного остаточной намагниченности.

Наиболее общий вывод исследования заключается в том, что коэрцитивная сила по намагниченности материала магнитов для силовых механизмов должна быть не менее чем на 10–20 % выше остаточной намагниченности магнитов.

В основном во всех приведенных уравнениях, необходимых для оценки размагничивающих полей, геометрические свойства магнитов выражены через безразмерные параметры. Таким образом, полученные в работе результаты могут быть легко распространены на подобные магнитные системы в других типах магнитных силовых устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yonnet J.P. Passive Magnetic Bearings with Permanent Magnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1978. No. 2. P. 803–805.
2. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние температуры на несущую способность пассивных магнитных подшипников // *Справочник. Инженерный журнал*. 2022. № 8 (305). С. 23–28.
3. Bolotov A.N., Khrenov V.L. Tribology of Bearings and Guides with Magnetic Loading Off // *Journal of Friction and Wear*. 1995. Vol. 16. No. 6. P. 1048–1069.
4. Slininger T.S., Chan W.Y., Severson E.L., Jawdat B.M. An Overview on Passive Magnetic Bearings // *2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. 2021. URL: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10319990> (дата обращения: 15.03.2025).
5. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 69–76.
6. Zhu Z.Q., Howe D. Halbach Permanent Magnet Machines and Applications: a Review // *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*. 2001. Vol. 148. No. 4. P. 299–308.
7. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 69–76.
8. Лаптева К.А., Толмачев И.И. Расчет размагничивающего фактора при продольном намагничивании в магнитопорошковой дефектоскопии // *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 321. № 2. С. 140–144.
9. Сандомирский С.Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. Минск: Беларуская навука, 2015. 243 с.

10. Моисеева Н.С., Резчикова И.И., Королев Д.В., Могргунов Р.Б., Пискорский В.П. Ограничение допустимой коэрцитивной силы, вызванное полем рассеяния магнита // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89. № 7. С. 1055–1058.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЛОТОВ Александр Николаевич – ученый секретарь ученого совета ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: alnikbltov@rambler.ru

НОВИКОВА Ольга Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: onvk@mail.ru

НОВИКОВ Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vnvkv@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Выбор магнито жестких материалов для оптимальных магнитопассивных подшипников // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 40–49.

SELECTION OF MAGNETIC-HARD MATERIALS FOR OPTIMAL MAGNETOPASSIVE BEARINGS

A.N. Bolotov, O.O. Novikova, V.V. Novikov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In modern high-tech equipment, magnetically passive bearings are used mainly to unload mechanical bearings or as part of active electromagnetic suspensions. The paper develops recommendations for a reasonable choice of magnetically hard materials for optimal magnets of magnetic power devices, taking into account the features of their operation, geometric dimensions, design of the magnetic circuit of the bearing and under the condition of maintaining residual magnetization at the highest level. Magnets of the most popular shapes are considered - cylindrical, ring, prismatic and conical. Dimensionless criteria for optimally sized magnets have been defined, which, when met, achieve the specified load-bearing capacity or rigidity. It has been established that the coercive force by magnetization of the magnet material for power mechanisms should be no less than 10–20 % higher than the residual magnetization of the magnets.

Keywords: magnetopassive bearings, magnetically hard materials, coercive force by magnetization, magnetization of magnets, demagnetizing magnetic field of a magnet.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BOLOTOV Alexander Nikolaevich – Academic Secretary of the Academic Council of Tver State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: alnikbltov@rambler.ru

NOVIKOVA Olga Olegovna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: onvk@mail.ru

NOVIKOV Vladislav Vladislavovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vnvkv@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Selection of magnetic-hard materials for optimal magnetopassive bearings // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 40–49.

УДК 669.187:621.186

**ВЗАИМОСВЯЗЬ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ДРУГИХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
ПРИКЛАДНОЙ НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

А.Н. Макаров

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2025

Аннотация. В статье изложены причины низкой конкурентоспособности некоторых отраслей российской промышленности. Отмечено, что в компаниях промышленно развитых стран (ПРС) 55 % персонала занято непосредственно на производстве продукции, 5–10 % – в научно-исследовательских центрах (НИЦ) прикладными научно-исследовательскими работами, 5–10 % трудятся в проектно-конструкторских и аналитических центрах, 15–20 % – в инжиниринговых и сервисных центрах (ИЦ, СЦ). Данная структура позволяет компаниям ПРС выпускать и продавать по всему миру высококонкурентную продукцию. В ряде российских компаний вышеизложенная структура отсутствует, что не позволяет им выйти на высокий уровень. Предложено создавать в российских компаниях НИЦ, ИЦ, СЦ с численностью персонала 15–20 % от всего штатного состава для выпуска качественной продукции и завоевания мирового рынка.

Ключевые слова: промышленная продукция, прикладные научно-исследовательские работы, инжиниринговые центры, сервисные центры.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-49-57

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим причины низкой конкурентоспособности продукции некоторых отраслей российской промышленности. Правительства промышленно развитых стран (ПРС) не разглашают подробностей реализации своих стратегий во избежание появления новых стран-конкурентов. Структура крупных промышленных компаний и численность их персонала – это государственная тайна. Информацию о развитии и функциональной деятельности подразделений компаний ПРС можно получить конкурентной разведкой или в результате многолетнего аналитического исследования.

Автор статьи более 45 лет занимается научно-исследовательской и преподавательской работой в двух университетах: ТвГТУ и НИУ МЭИ; собирает оперативную информацию о структурах и деятельности иностранных компаний из общения с их руководителями на конференциях, выставках, конгрессах; анализирует зарубежные и российские публикации; является членом Американского общества содействия науке, Американского химического общества. В течение этого же периода автор проводил научные исследования на российских предприятиях и в научно-исследовательских институтах в различных регионах России и ближнего зарубежья (ОАО «Северсталь», ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат», ОАО «Орско-Халиловский металлургический комбинат», ОАО «Метчел», ОАО «Донецкий металлургический завод» и др.), поэтому хорошо знает сложившуюся ситуацию на предприятиях [1, 2].

СТРУКТУРА КОМПАНИЙ ПРС И РОССИИ

Результаты многолетних исследований подтверждают, что компании высокоразвитых стран за последние 50 лет создали гибкую, мобильную и высокоэффективную систему разработки и внедрения новой техники и технологий со структурой, которую они тщательно скрывают от конкурентов из других стран. Согласно статистическим данным ПРС, в сельском хозяйстве занято 1,5 % трудящегося населения, в промышленности – 25 %, в сфере услуг – 73,5 % [3–6]. Сфера услуг включает в себя торговый сервис, туризм, гостиничный бизнес, общественное питание и другие отрасли. Различие в цифрах у США, Германии, Франции и других ПРС незначительно. Например, в Великобритании на сельское хозяйство приходится 1,5 % трудящихся, на промышленность – 25,4 %, на сферу услуг – 73,1 % [7, 8].

В 1990–2000 годах находившиеся в России американские эксперты обратили внимание российских экономистов и российского правительства на статистику занятости населения в ПРС, предлагая и в России привлечь в сферу услуг 75 % трудящихся. Российские экономисты до сих пор используют в статьях недостоверные цифры из западных источников и призывают создать аналогичное распределение рабочих мест по отраслям производства в России. В настоящее время в нашей стране на сферу услуг приходится 67 % трудящихся [8].

Путем многолетнего анализа деятельности компаний ПРС автор установил, что в реальности статистика занятости населения в этих странах совершенно другая. Например, в промышленности Великобритании занято 40–45 % трудящихся (причем 20 % участвуют в прикладных научно-исследовательских работах (НИР) для промышленности), в сельском хозяйстве – 1,5 %, сфере услуг – 58,5–53,5 % [6]. Аналогичная кадровая ситуация наблюдается в США, Франции, Германии и других ПРС [5–8]. К сфере научных услуг в ПРС относят прикладную науку и научное обслуживание промышленности, не раскрывая данный факт в статистических данных. В этой сфере работает персонал следующих

центров компаний: научно-исследовательских (НИЦ), инжиниринговых (ИЦ), аналитических (АЦ), проектно-конструкторских (ПКЦ) и сервисных (СЦ). Аналитическим путем установлено, что на заводах высокоразвитых стран трудится 55–75 % персонала компаний, а над разработкой, созданием, исследованием инновационной продукции в НИЦ, АЦ, ИЦ, СЦ, ПКЦ – 45–25 % персонала. Численность персонала, занимающегося в компаниях научной работой, составляет в Великобритании и Франции 4–5 млн человек, в Германии – 5–7 млн, Японии – 6–7 млн, США – 15–20 млн, России – 1,2 млн [8]. Первые 5 стран диверсифицировали мировые рынки товаров и услуг (рис. 1).

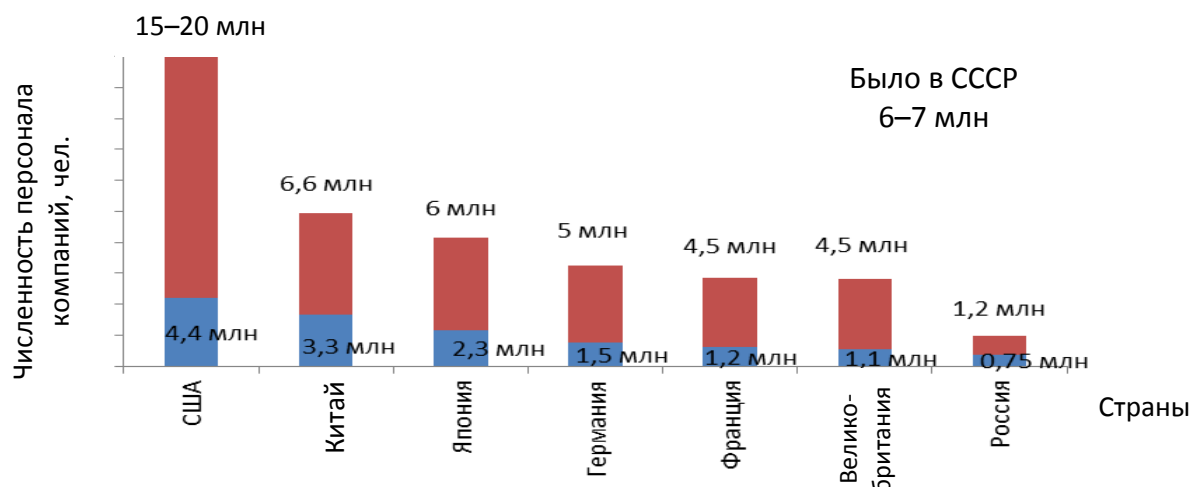


Рис. 1. Диаграмма численности персонала компаний (НИЦ, АЦ, ИЦ, ПКЦ, СЦ), занятых разработкой, сопровождением на рынок, гарантийным и послегарантийным обслуживанием инновационной продукции (нижняя часть столбика – в государственных компаниях, весь столбик – общая численность в государственных и частных компаниях)

В СССР прикладные НИР выполнялись в 6 тыс. отраслевых НИИ с численностью сотрудников и вспомогательного персонала в различные годы от 5 до 6 млн человек. Отраслевые НИИ СССР создавали инновационную продукцию, технику, технологии, вещества, устройства автоматизации во всех отраслях народного хозяйства, поддерживая высокую конкурентоспособность отечественной промышленной продукции в мире. В ходе приватизации 1991–1996 годов обанкротились и прекратили существование 6 тыс. отраслевых НИИ, было ликвидировано около 6 млн рабочих мест, связанных с научно-техническим обеспечением производства. Оставшиеся 250 тыс. преподавателей вузов, 100 тыс. сотрудников академических НИИ были не в состоянии обеспечить объем прикладных НИР, который выполняли 6 млн человек отраслевых НИИ. В подавляющем большинстве российских компаний прикладные НИИ (лаборатории), ИЦ, АЦ, СЦ отсутствуют.

В России банкротство и ликвидация в 1991–1996 годах отраслевых НИИ с 6 млн рабочих мест привели за 30 лет к моральному старению выпускаемой российской продукции, машин, оборудования и вытеснению отечественных производителей не только с внешнего, но и с внутреннего рынка. Выходом в сложившейся ситуации может стать

создание в российских компаниях НИИ, ИЦ, АЦ, СЦ с численностью персонала 10–25 % от всего персонала компаний (рис. 2).

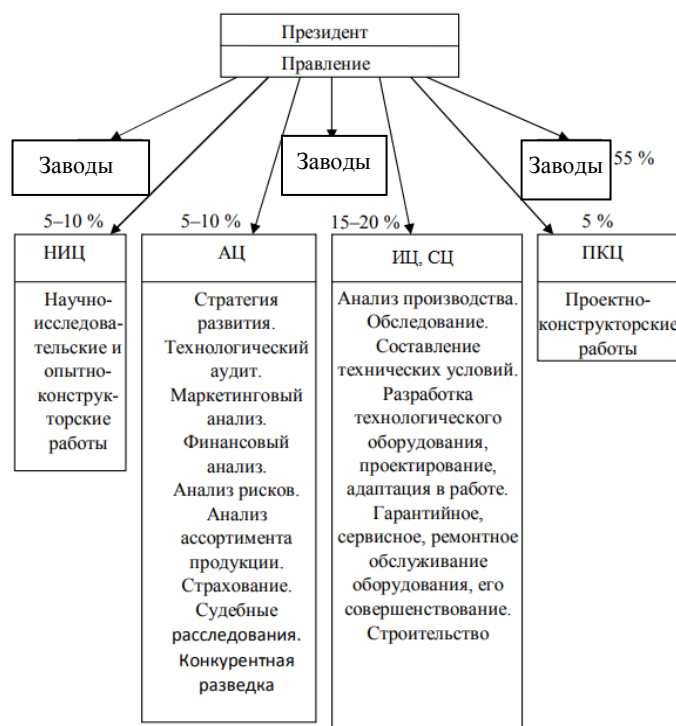


Рис. 2. Структура компаний ПРС в 2020-е годы

В компаниях ПРС, в том числе машиностроительных и металлургических, в условиях рыночной экономики на протяжении последних 80 лет сформировалась гибкая и мобильная система создания и внедрения новой техники и технологий с высокоэффективной структурой. Входящие в состав НИИ, АЦ, ИЦ, СЦ, ПКЦ десятки и сотни научно-исследовательских лабораторий (НИЛ) расположены как в городах своей страны, так и в многочисленных странах мира. Этот процесс произошел как в крупных компаниях и холдингах, так и в средних, малых. Например, многие небольшие машиностроительные или металлургические компании, на заводах которых работает 1–1,5 тыс. человек, имеют дочерние инжиниринговые фирмы, аналитические, научно-исследовательские группы. Такая структура компаний складывалась в конкурентной борьбе за внутренние и международные рынки сбыта.

ПРИМЕРЫ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ РОССИЙСКИХ И ЗАРУБЕЖНЫХ КОМПАНИЙ

В настоящее время, по прошествии 30 с лишним лет с начала перехода на рыночный тип экономики, многие отечественные предприятия имеют изношенное оборудование, не занимаются обновлением технической базы, не имеют стратегии научного развития, научных подразделений и выпускают неконкурентоспособную продукцию. В 1991–2000-е годы некоторые устаревшие, неконкурентоспособные предприятия России оборвали связь с наукой, и их развитие остановилось на 30 лет.

Многие из них до сих пор не создают в своем составе прикладные лаборатории. Обозначенный процесс привел к тому, что эта часть компаний и фирм России приобрела структуру, характерную для предприятий начала XX в.: 97–98 % работников компании заняты на производстве продукции, 2–3 % составляют персонал управления и вспомогательных отделов. Многие малоэффективные компании обанкротились.

Значительных успехов в создании и реализации конкурентоспособной продукции достигли те российские компании, в состав которых при акционировании вошли НИИ, т.е. только 25–30 % от всего их числа. Речь в первую очередь идет о предприятиях металлургического, энергомашиностроительного, электротехнического, оборонного комплексов России. Их производства реконструировали, существенно обновили, внедрили высокотехнологические линии, повысили качество продукции и уровень рентабельности производства. Так, ведущая российская компания в области энергетического машиностроения под названием «Силовые машины» занимает 4-е место в мире по объему установленного и успешно работающего в 57 странах мира энергетического оборудования, а также контролирует около 70 % рынка энергетического оборудования России и СНГ. В состав этой компании входят научно-производственные фирмы, торговые представительства, заводы-изготовители, в разработке нового оборудования для нее участвуют НИИ и университеты. Структура «Силовых машин» и ее производственные мощности похожи на структуру и производственные мощности высокоразвитых компаний ПРС. Это образец развития для многих предприятий других отраслей экономики России [9].

Приведем еще два примера структуры и эффективности зарубежной и российской компаний [9–10]. Южнокорейская компания Samsung производит бытовую технику, аудио- и видеоустройства, телекоммуникационное оборудование, интегральные микросхемы. В компании в 2020 году работало 309 тыс. человек [10]. Структура ее следующая: 50 % персонала занято на производстве продукции, 35 % – в сервисных центрах по всему миру, 15 %, т.е. около 47 тыс. сотрудников, работают в научно-исследовательских центрах и лабораториях.

Совершенно другая, малоэффективная структура в российской компании «Трансмашхолдинг». Она производит вагоны, локомотивы, двигатели и другую технику. Численность персонала составила на 2021 год около 85 тыс. человек. В инжиниринговых, проектно-конструкторских подразделениях компании трудится 1 100 сотрудников, что составляет чуть более 1 % от всего персонала компании, а этого катастрофически недостаточно для выпуска широкой линейки конкурентоспособной продукции. Непонятно, почему руководство не создает в структуре компании научно-исследовательские (рис. 3), инжиниринговые лаборатории и ЦС с численностью персонала 15–30 % от всего количества персонала, чтобы выпускать и продавать по всему миру высококонкурентную продукцию.

На рис. 3 изображена возможная структура НИЦ энергомашиностроительной компании, группы заводов. Такую структуру или близкую к ней имеют ведущие энергомашиностроительные компании мира (Siemens, General Electric, Toshiba), многие компании автомобильной промышленности (Volkswagen, Renault, Toyota, Mercedes, Daimler, Rolls-Royce и др.). На рисунке использованы следующие сокращения лабораторий: ЛС – сталей; ЛЦ – цветных металлов; ЛИ – испытания материалов; ЛМ – металлообработки; ЛП – пластмасс; ЛЛ – лакокрасочных материалов; ЛР – резиновых изделий и прокладочных материалов; ЛК – композиционных и порошковых материалов;

ЛЭ – эстетики; ЛД – дизайна; другие сокращения: ИС – испытательные стенды; ИВЦ – информационно-вычислительный центр.

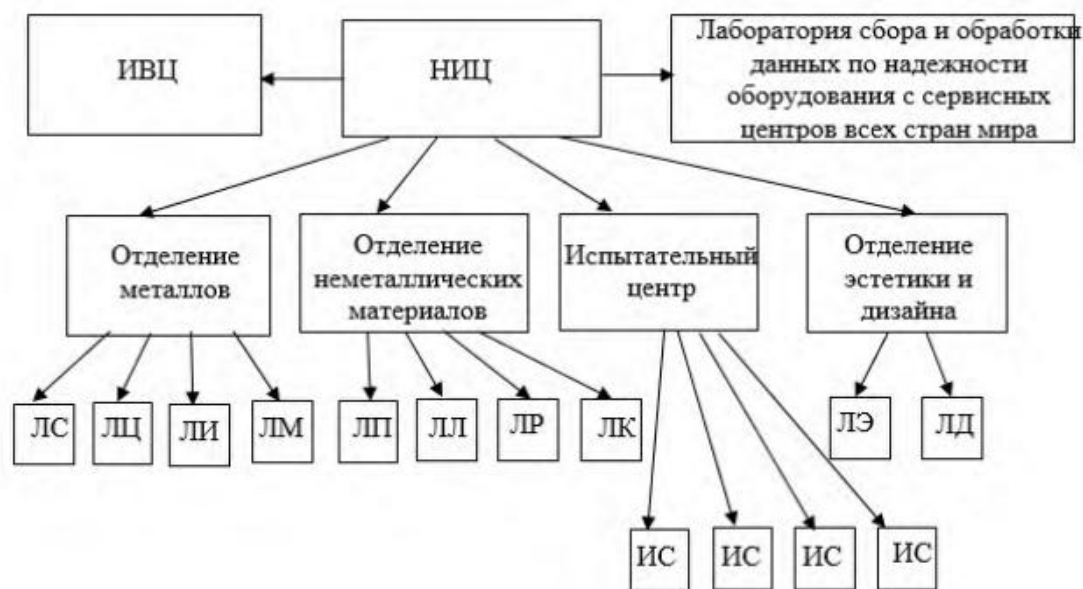


Рис. 3. Структура НИЦ машиностроительной компании ПРС

Сотрудники НИЛ следят за лучшими мировыми разработками по профилю своей лаборатории, за публикациями по всему миру, участвуют в мировых конгрессах, симпозиумах, конференциях, выставках, адаптируют и используют при изготовлении деталей механизмов и машин новейшие достижения науки, лучшие стали, цветные металлы, композитные и порошковые материалы, пластмассовые, лакокрасочные, резинотехнические изделия и др. В результате творческой и слаженной работы НИЛ компания выпускает качественную технику.

Основными задачами, решаемыми НИЦ или научно-исследовательской фирмой машиностроительной компании, являются повышение ресурса и надежности деталей и механизмов, машин в целом и снижение их материалоемкости, энергоемкости, стоимости. Структура НИЦ зависит от отрасли машиностроения (тяжелое, общее, среднее, точное) и может отличаться от изображенной на рис. 3. В транснациональных компаниях цеха, отделения, лаборатории, опытные производства, испытательные стенды, как и СЦ, ИЦ, могут располагаться в различных регионах государства, в котором находится штаб-квартира компании, обеспечивая высокую производственную занятость всего населения. Лаборатории могут находиться в других странах, где материнская компания создала дочерние фирмы.

Следующий положительный пример российской компании – госкорпорация «Росатом» [11]. В научный дивизион «Росатома» входят 15 НИИ и НИЦ, а также сотни научно-исследовательских лабораторий с численностью персонала 10–15 % от всего персонала госкорпорации. В них работают по контрактам ученые университетов, что позволяет «Росатому» быть мировым лидером атомной промышленности и строить АЭС во многих странах мира и на всех континентах Земли.

В РФ оптимальное соотношение между работниками НИИ и отделов конструкторского бюро и персоналом промышленно-производственных цехов наблюдается только в авиационной и ракетно-космической промышленности (25 % – сотрудники НИИ и отделов конструкторского бюро, ученые-контрактники университетов; 75 % – промышленно-производственный персонал, что в цифрах составляет около 120 и 510 тыс. соответственно [12]). В энергомашиностроительных компаниях доля первых из них равна 7–15 %, в остальных отраслях промышленности – 2–7 %. Такое соотношение оказывает на развитие авиационной и ракетно-космической отрасли положительное влияние: в авиапромышленности применяются самые современные высококачественные металлы и неметаллические материалы, продукция отечественного самолето- и вертолетостроения, ракетостроения обладает высоким качеством и надежностью. Сотрудники НИИ авиационной промышленности, ученые университетов создают новые металлы и сплавы и решают сложные проблемы, связанные с процессом работы авиакосмического комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышесказанного можно сделать следующий вывод: в структуре российских компаний необходимо создавать НИЛ с численностью персонала в них 10–15 % от всего персонала компании для выполнения прикладных НИР по созданию инновационной высококонкурентной продукции, а также для завоевания мирового рынка товаров. Компании, состоящей из одного завода, где работает 1 000 человек, в НИЛ для выполнения прикладных НИР необходимо привлечь 200–300 человек, предоставить им доступ к необходимому оборудованию и оргтехнике, литературе, журналам, дать возможность участвовать в российских и международных конференциях и выставках. При выполнении данных условий завод сможет поставлять на российский и мировой рынок качественную продукцию, обеспечивать работников высокой зарплатой, а регион, в котором расположен завод, – большими налогами. Будет достигнут высокий уровень жизни населения как в крупных городах, так и в районных центрах и поселках, стабильное устойчивое функционирование социальной сферы и всего государства. В России необходимо в ближайшие годы создать не менее 6 млн рабочих мест для научных сотрудников в компаниях. Российские университеты, в том числе ТвГТУ, готовы увеличить выпуск магистров, которые заполняют эти места. Подробно структура и эффективность промышленных компаний ПРС и России, методология фундаментальных НИР в университетах и прикладных НИР в компаниях, краткая история университетского образования в ПРС и России изложены в книге автора проекта «А.Н. Макаров. Методология научных исследований в университетах и промышленных компаниях. М. – Вологда: Инфро-Инженерия, 2023. 276 с.», а также в видеоролике, который можно посмотреть, набрав в поисковых системах интернета следующие ключевые слова: «ВКонтакте ТвГТУ, видео, лекции профессора Макарова А.Н.». Учебник написан на основе курсов «Основы научно-исследовательской работы» и «История и методология науки», читаемых автором магистрантам в течение 20 лет. Ежегодно курсы данных лекций обновляются, совершенствуются и дополняются актуальными материалами по дисциплинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
2. Макаров А.Н. Перекройка с переводом. Профессиональное образование нужно начинать со школы // *Поиск*. 2008. № 1–2. С. 7–8.
3. Панарина Е.А. Вузовские ученые готовы взять на себя стратегическую ответственность // *Поиск*. 2008. № 50. С. 8–9.
4. Большая Оксфордская энциклопедия / под ред. Бена Дюпре. М.: Росмэн, 2007. 661 с.
5. Макаров А.Н. Энергетическое образование в России в 1991–2008 годах и в условиях мирового экономического кризиса // *Академия Энергетики*. 2009. № 2. С. 30–34.
6. Макаров А.Н. Учесть неучтенное. Не так страшно положение российской науки, как малюют его некоторые эксперты // *Поиск*. 2010. № 18. С. 9–10.
7. Макаров А.Н. Кувалда не тонет? Промышленники предпочитают обходиться устаревшими технологиями и оборудованием // *Поиск*. 2011. № 6. С. 17–18.
8. Макаров А.Н. Научно-технологическая безопасность России в начале XXI века // *Академия Энергетики*. 2010. № 2. С. 18–22.
9. Макаров А.Н. Методология научных исследований в университетах и промышленных компаниях: учебное пособие. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 276 с.
10. Группа компаний «Самсунг». URL: <https://www.samsung.com> (дата обращения: 08.02.2024).
11. Группа компаний «Росатом». URL: <https://www.rosatom.ru> (дата обращения: 08.02.2024).
12. Боровская Н. Кредит – пропуск в ВУЗ // *Поиск*. 2007. № 34–35. С. 16.
13. Попасть в сотню! Минобрнауки планирует поменять всю систему высшего образования // *Поиск*. 2010. № 40. С. 4.
14. Старт к стандартам. Техническое образование берет курс на международные нормы // *Поиск*. 2010. № 41. С. 12.
15. Макаров А.Н. Наука и образование в модернизации промышленного комплекса // *Академия Энергетики*. 2011. № 2. С. 40–46.
16. Макаров А.Н. Анализ эффективности энергомашиностроительных компаний // *Академия Энергетики*. 2012. № 2. С. 82–89. 285 с.
17. Макаров А.Н. НИР и сопровождение энергомашиностроительной продукции // *Академия Энергетики*. 2013. № 3. С. 72–78.
18. Меры государственного регулирования по развитию энергетического машиностроения РФ // *Академия Энергетики*. 2009. № 1. С. 22–34.
19. Уточкин Ю.И. Особенности современного развития черной металлургии в России // *Электрометаллургия*. 2011. № 9. С. 39–45.
20. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22. E-mail: tgtu_kafedra_ease@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Взаимосвязь устойчивого развития энергомашиностроительной промышленности и других отраслей промышленности, прикладной науки и высшего образования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 49–57.

**INTERRELATIONSHIP BETWEEN SUSTAINABLE DEVELOPMENT
OF POWER ENGINEERING INDUSTRY AND OTHER INDUSTRIES,
APPLIED SCIENCE AND HIGHER EDUCATION**

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents the reasons for the low competitiveness of some sectors of the Russian industry. In companies of industrially developed countries (IDC), 55 % of the personnel are directly involved in production, 5–10 % are engaged in research and development centers (R&D) in applied research work, 5–10 % work in design and analytical centers, 15–20 % – in engineering and service centers (ESC, SC). This structure allows IDC companies to produce and sell highly competitive products worldwide. A number of Russian companies do not have the above structure, which does not allow them to reach a high level. The author of the article proposed to create R&D centers, ESC, SC with 15–20 % of the total staff of companies in Russian companies to produce high-quality products and conquer the world market.

Keywords: industrial products, applied research, engineering centers, service centers.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Interrelationship between sustainable development of power engineering industry and other industries, applied science and higher education // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 49–57.

УДК 669.187:621.365.22

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ
В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА
ФАСОННО-ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА****А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, В.В. Окунева***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., Крупнов А.В., Окунева В.В., 2025

Аннотация. В статье рассмотрена проблема большего удельного расхода электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах малой вместимости фасонно-литейного производства по сравнению с печами большой вместимости. Отмечено влияние габаритов загружаемого металлолома на расход электроэнергии в период его расплавления. Предложен переход на лом в шихте размером не более $200 \times 150 \times 100$ мм в качестве способа снижения затрат электроэнергии на выплавку стали в малотоннажных дуговых печах и приведено обоснование этого способа.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, расход электроэнергии, шихта, температура футеровки, повышение энергоэффективности.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-58-66**ВВЕДЕНИЕ**

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) переменного трехфазного тока и постоянного тока незаменимы в обеспечении сталями и сплавами производства, изделия которого работают в тяжелых и экстремальных условиях, что имеет большое значение для нашей страны.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Дуговые сталеплавильные печи малой вместимости 0,5–12 т имеют большой удельный расход электроэнергии по сравнению с ДСП средней и большой вместимости. Это связано с геометрическими особенностями конструкции ДСП (рис. 1, табл. 1) и режимами работы [1–3].

Удельный расход электроэнергии в ДСП малой вместимости за весь период плавки составляет 700–800 кВт·ч/т, в период расплавления – 475–650 кВт·ч/т, а средний КПД дуг – 0,57. Для ДСП большой вместимости удельный расход в период расплавления составляет 375–385 кВт·ч/т, а КПД дуг – 0,67 [1–3].

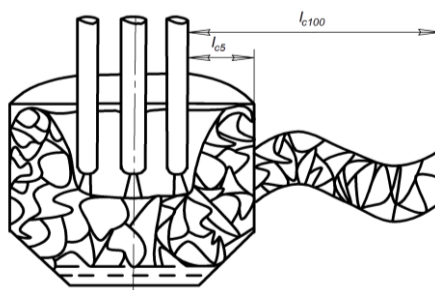


Рис. 1. Расстояния от электродов до стен печи ДСП-5 и ДСП-100

Таблица 1

Параметры ДСП [4]						
Печь \ Параметр	ДСП-0,5	ДСП-1,5	ДСП-3	ДСП-6	ДСП-12	ДСП-100
D_B , м	1,1	1,5	1,8	2,27	2,7	5,4
r_{CT} , м	0,31	0,49	0,55	0,69	0,85	2
d_p , м	0,48	0,52	0,7	0,9	1,0	1,4
$G_Э$, кВт·ч/т	650	540	520	475	450	385

На рис. 2 показано изменение удельного расхода электроэнергии дуговых сталеплавильных печей малой и большой вместимости за 120-летний период.

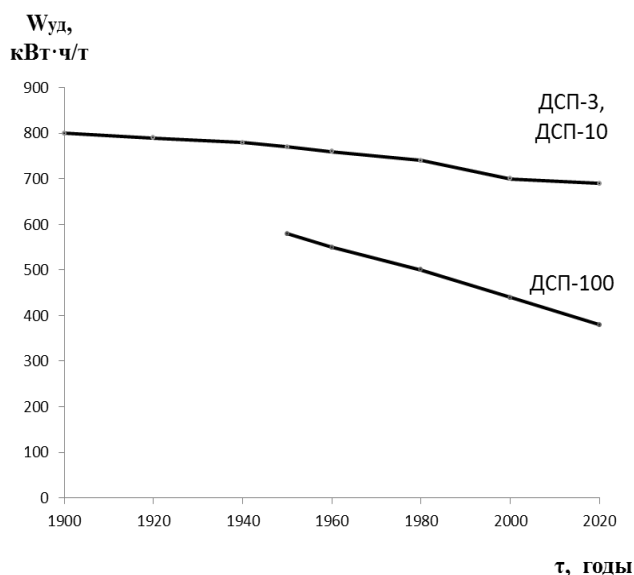


Рис. 2. История изменения удельного расхода электроэнергии в малотоннажных (ДСП-3, ДСП-10) и большегрузных (ДСП-100) печах

Потребление электроэнергии ДСП-3 в начале XX в. составляло 780–800 кВт·ч/т. За 120-летний период оно снизилось до 650–700 кВт·ч/т, т.е. на 14 %. С начала XX в. вместимость печей росла и в 1950-е годы составила 100 т (ДСП-100). В 1950–1960-х годах удельный расход электроэнергии в большегрузных ДСП-100 был 500–650 кВт·ч/т. За последние 70 лет в результате интенсификации процесса плавки стали, использования кислорода, вспенивания шлака и вывода процесса рафинировки в ковш-печь удельный расход электроэнергии в ДСП-100 снизился до 360–375 кВт·ч/т, т.е. на 210–220 % [5].

В малотоннажных печах также возможно применение средств интенсификации плавки и поднятие уровня шлака, но эти мероприятия требуют глубокого анализа, так как в малых печах на первом месте стоит выпуск годного металла требуемого химического состава.

Из графика изменения температуры футеровки (рис. 3), полученного экспериментальным путем, можно выделить особенность изменения температуры: в период прорезки колодцев у ДСП-5 наблюдается рост температуры футеровки, когда как у ДСП-100 температура снижается, что связано с геометрическими размерами печей [5, 6].

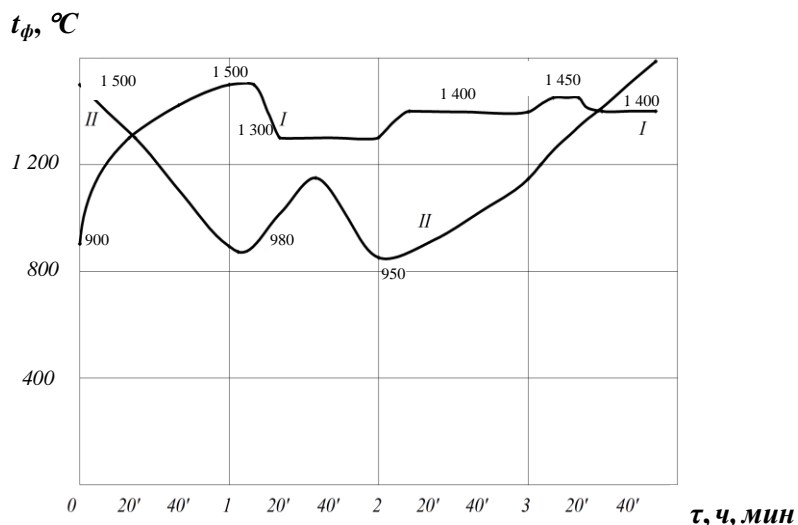


Рис. 3. Изменение температуры футеровки по ходу плавки в печах ДСП-5 (I), ДСП-100 (II)

В ДСП-5 диаметр ванны составляет 2,27 м, диаметр распада электродов – 0,9 мм, кратчайшее расстояние от дуг до стен l_{C5} , определяемое как разность радиуса ванны и радиуса распада электродов, равно 0,69 м, тогда как у ДСП-100 $l_{C100} = 2$ м. Это связано с тем, что часть теплового излучения дуг проходит через пустоты между кусками шихты в малотоннажной ДСП, достигает футеровки стен и вызывает ее нагрев, а соответственно, рост ее температуры, который фиксируют. У большегрузных ДСП из-за большей толщины слоя шихты тепловое излучение дуг почти не достигает стен, а загруженная шихта в начальный период плавки начинает отбирать теплоту стен, снижая их температуру.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАВКИ СТАЛИ

Существующий способ плавки в ДСП вместимостью 0,5–12 т предполагает загрузку крупной шихты размерами $800 \times 500 \times 500$ мм и мелкой шихты размерами от $200 \times 150 \times 100$ мм с последующим ее плавлением [7].

Вследствие небольшого расстояния между электродом и футеровкой 10–20 % теплового излучения дуг через пустоты между кусками шихты достигает футеровки стен печи и бесполезно расходуется на ее нагрев. Полезно расходуется на нагрев шихты и ее расплавление 80–90 % теплового излучения. КПД дуг пропорционально снижается на 10–20 %.

На основе вышесказанного сделан вывод, что чем мельче шихта, тем меньше пустоты между кусками шихты и тем меньше теплового излучения дуг достигнет через пустоты футеровки стен печи, тем меньше потери теплового излучения дуг, тем выше КПД дуг. Чем крупнее шихта, тем крупнее пустоты между кусками шихты и тем больше теплового излучения дуг достигает футеровки стен печи, тем больше потери теплового излучения дуг, тем меньше КПД дуг.

Авторами статьи предложен и запатентован [8] способ плавки стали в ДСП трехфазного тока фасонно-литейного цеха, в основе которого лежит загрузка мелкой шихты габаритами не более $200 \times 150 \times 100$ мм.

Подтверждением реализации способа повышения энергоэффективности плавки за счет применения меньших размеров шихты являются результаты исследования влияния фракционного состава металлолома на технико-экономические показатели работы ДСП на

ОАО «ММК». Был осуществлен ряд плавов в ДСП-180 и получен удельный расход электроэнергии при использовании лома с габаритными размерами кусков в завалке $800 \times 500 \times 500$ мм (лом АЗ, 14 плавов) – 310 кВт·ч/т и $600 \times 500 \times 500$ мм (лом 2А, 59 плавов) – 278 кВт·ч/т. Для повышения экономии электроэнергии использовали в завалке 30 % жидкого чугуна. Снижение расхода электроэнергии при плавке лома меньшего размера составило 11 %, и это связано с сокращением продолжительности работы печи под током. Данные показатели расхода электроэнергии получены за счет уменьшения времени завалки шихты и за счет совершенствования теплообмена между дугами и шихтой [9].

Целесообразно в печах фасонно-литейных цехов использовать шихту меньших размеров ($200 \times 150 \times 100$ мм), так как габариты печей малой вместимости значительно меньше габаритов большегрузных печей. Данный вывод подкрепляется требованиями к размеру товарного лома в Великобритании. Там применяют товарный лом с максимальными размерами кусков до 200 мм и до 150 мм, так как лом больших размеров требует увеличения расхода электроэнергии и большего времени на расплавление. Использование лома средней плотности позволяет снизить удельный расход электроэнергии на 1–2 % и сократить время расплавления шихты на 5 % [10].

На Череповецком металлургическом комбинате (ЧерМК) при исследовании влияния состава шихты на показатели выплавки стали марки 17ГС в ДСП-100 получили удельный расход электроэнергии на расплавление 429 кВт·ч/т при использовании в завалке тяжеловесного лома и 385 кВт·ч/т при использовании лома средней плотности. Эффект экономии электроэнергии составляет 10 % от применения в завалке лома средней плотности. Исследователями сделан вывод: «Расход электроэнергии в период плавления в значительной степени зависит от качества металлолома, которым определяется число подвалок, стабильность горения электрических дуг и их КПД η_d » [11].

В источнике [12] отмечено, что при работе стотонных ДСП с насыпной плотностью лома более 2 т/м^3 отмечаются рост расхода электроэнергии на плавление шихты и увеличение длительности периода плавления. Наличие крупных кусков лома в завалке вызывает рост числа поломок электродов.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО И ТРАДИЦИОННОГО СПОСОБОВ ПЛАВКИ СТАЛИ

Предлагаемый в патенте [8] способ плавки относится к периоду расплавления, а окислительный и восстановительный периоды проводятся по традиционной технологии плавки [13] в ДСП фасонно-литейного цеха.

После выпуска из печи всего жидкого металла в разливочный ковш при открытом своде печи осуществляют загрузку шихты из бадьи.

Традиционным способом шихта загружается в печь бадьей следующим образом: внизу бадьи располагают легковесный мелкий лом для защиты футеровки подины печи от удара при загрузке; лом крупного и среднего размера вперемешку располагают в центре бадьи поверх легковесного мелкого лома; крупные куски располагают в бадье под электродами; по периферии бадьи вместе с ломом крупного и среднего размера располагают лом среднего и мелкого размера; поверх лома среднего и крупного размера располагают легковесный мелкий лом. Для увеличения углерода добавляют в шихту передельный чугун, брикеты кокса или электродный бой. Кокс и электродный бой укладывают в бадье на легковесный мелкий лом и под лом среднего и крупного размера. Передельный чугун располагают в верхней части бадьи поверх лома крупного и среднего

размера. Тугоплавкие легирующие элементы располагают под осью электродов в центре бадьи вперемешку с ломом крупного и среднего размера, легкоплавкие легирующие элементы – ближе к периферии. Для удаления фосфора в процессе плавления в шихту вносят 2–3 % извести от загружаемого объема.

Предлагаемый способ укладки шихты в бадье выглядит так: вниз бадьи укладывают легковесный лом, брикеты стружки; на уложенный легковесный лом и брикеты стружки укладывают карбюризатор – брикеты кокса и электродный бой для науглероживания выпускаемой стали; на уложенный в бадье карбюризатор загружают мелкую шихту размерами до $200 \times 150 \times 100$ мм; монолитные куски лома размерами $200 \times 150 \times 100$ мм в бадье располагают ближе к оси электрода печи; никель для легирования выплавляемой стали закладывают по периферии бадьи вместе с мелкой шихтой; поверх мелкой шихты в бадью укладывают слой из передельного чугуна и легковесного лома.

После завалки шихты свод печи закрывают и опускают электроды до соприкосновения с металлической шихтой. Между электродами и шихтой зажигаются три электрические дуги и начинают прорезать колодцы на максимальной мощности (рис. 4а) – режим А. После прорезки колодцев и формирования лужи металла понижают мощность дуг (рис. 4б) – режим Б. Далее дуги работают на жидкий металл и производится доплавление остатков металла, мощность дуг понижается (рис. 4в) – режим В. Последующие режимы осуществляются на ванну жидкого металла (рис. 4г): легирование – режим Г; окислительный период – режим Д; восстановительный – режим Е; подготовка к выпуску – режим Ж.

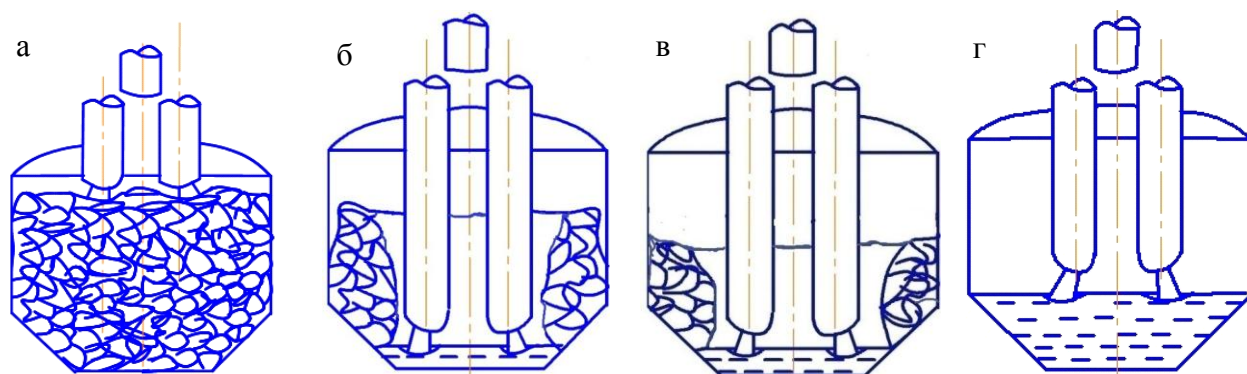


Рис. 4. Процесс расплавления металла в ДСП: а – прорезка колодцев;
б – заглубление электродов в шихту и формирование жидкого металла;
в – работа дуг на жидкий металл и доплавление; г – работа дуг на ванну металла

В табл. 2 представлено сопоставление основных электрических параметров плавки в ДСП-6 с основной футеровкой и мощностью 5 МВА, поясняющих преимущество запатентованного способа, т.е. плавки в печи на мелкой шихте, перед плавкой в печи на традиционной шихте. Необходимая информация о вводимой мощности, интервалах времени каждого режима плавки, удельном расходе электроэнергии взята из источников [1–3]. Аналитические расчеты выполнены согласно методикам из источников [6, 14].

Таблица 2

Сопоставление параметров плавки в ДСП-6 мощностью 5 МВА

Параметры	Единица измерения	Номер электрического режима						
		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
P_a	кВт	4 350	2 900	1 940	566	1 100	1 610	1 100
P_d	кВт	1 400	920	620	180	355	520	355
I_d	кА	12,8	10,6	8,6	4,7	6,2	7,7	6,2
Параметры при плавке на мелкой шихте								
η_d	–	0,79	0,5	0,51	0,76	0,6	0,47	0,6
Q_d	кВт·ч	1 087,5	870	737,2	237,72	1 100	531,3	550
τ	Ч	0,25	0,3	0,38	0,42	1	0,33	0,5
Параметры при плавке на традиционной шихте								
η_d	–	0,77	0,45	0,5	0,76	0,6	0,47	0,6
Q_d	кВт·ч	1 305	957	814,8	237,72	1 100	531,3	550
τ	Ч	0,3	0,33	0,4	0,42	1	0,33	0,5
Сопоставление параметров плавки на различной шихте								
$\Delta\eta_d$	–	0,02	0,05	0,01	0	0	0	0
ΔQ_d	кВт·ч	–217,5	–87	–77,6	0	0	0	0
$\Delta\tau$	ч	–0,05	–0,03	–0,02	0	0	0	0

Суммарный расход электроэнергии на расплавление шихты в ДСП-6 в режимах с А по В составляет на традиционной шихте 3 038 кВт·ч, на мелкой шихте – 2 694,7 кВт·ч, что показывает уменьшение потребления электроэнергии на 343,3 кВт·ч (11 %) при плавании. Снижение расхода электроэнергии связано со снижением теплового излучения дуг на футеровку стен печи и увеличением излучения дуг на шихту, а соответственно, и меньшим нагревом футеровки стен в процессе расплавления (рис. 5).

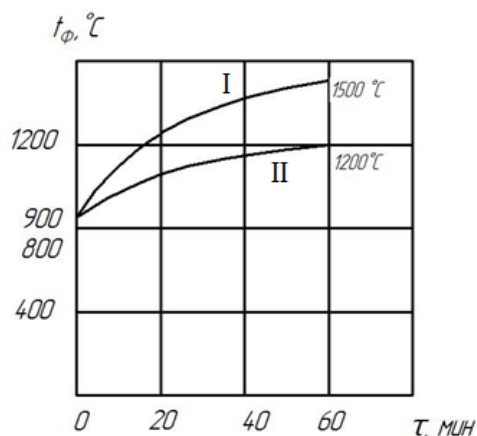


Рис. 5. Изменение температуры футеровки стен в период расплавления шихты по способам: I – традиционному; II – предлагаемому

Процесс плавания протекает с уменьшением времени плавания без изменения вводимой мощности, так как расплавление кусков металла меньшего размера осуществляется быстрее расплавления кусков металла большего размера.

Средневзвешенный КПД дуги ДСП-6 в период расплавления за режимы с А по В составляет для традиционной шихты 0,57, а для предлагаемой шихты 0,6. КПД дуги при плавке шихты размерами не более $200 \times 150 \times 100$ мм возрастает на 5 % по отношению к плавке традиционной шихты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергоэффективность работы ДСП малой вместимости 0,5–12 т фасонно-литейных цехов определяет стоимость производимой продукции, которая нужна промышленным предприятиям России.

Удельный расход электроэнергии у фасонно-литейных печей в период расплавления составляет 475–650 кВт·ч/т, а средний КПД дуг – 0,57, что связано с габаритными параметрами этих печей (малым расстоянием между осью электрода и стеной печи – 0,31–0,85 м) и разрешенными максимальными габаритами кусков загружаемого лома $800 \times 500 \times 500$ мм. В связи с этим через пустоты в шихте потоки теплового излучения от дуг достигают футеровки стен, что подтверждено быстрым ростом ее температуры в период расплавления.

В результате исследования установлено, что уменьшение габаритов кусков загружаемого лома приводит к снижению удельного расхода электроэнергии: на ДСП-100 ЧерМК при завалке тяжеловесного лома установлен расход 429 кВт·ч/т, а при завалке лома средней плотности – 385 кВт·ч/т; на ДСП-180 ОАО «ММК» на ломе с габаритами $800 \times 500 \times 500$ мм установлен расход 310 кВт·ч/т, а на ломе с габаритами $600 \times 500 \times 500$ мм – 278 кВт·ч/т.

Переход на габариты загружаемой шихты не более $200 \times 150 \times 100$ мм для печей малой вместимости ДСП-0,5–ДСП-12 обеспечит снижение расхода электроэнергии в период расплавления и повысит КПД дуги. Процесс плавки протекает с уменьшением времени без изменения вводимой мощности, так как расплавление кусков металла меньшего размера осуществляется быстрее расплавления кусков металла большего размера. Сокращение времени плавки также связано со снижением бесполезного теплового излучения дуг на футеровку стен печи через пустоты в шихте и с повышением полезного теплового излучения дуг на шихту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Н. Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть I. Расчет и анализ взаимосвязи КПД дуг и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 4. С. 29–35.
2. Макаров А.Н. Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть II. Расчет и анализ взаимосвязи расположения дуг, стен и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 5. С. 21–27.
3. Макаров А.Н., Окунева В.В., Кузнецов А.В. Влияние высоты слоя шлака, состава газа, емкости печей на КПД дуг и теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Влияние высоты слоя шлака и емкости печи на КПД дуг // *Металлург*. 2020. № 10. С. 11–18.
4. Макаров А.Н. Влияние емкости, расстояния от дуг до стен на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах // *Вестник Тверского государственного*

технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 72–81.

5. Кузнецов А.В. Разработка методики расчета КПД дуг и повышение энергоэффективности малотоннажных дуговых сталеплавильных печей: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2020. 154 с.

6. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.

7. Сойфер В.М. Выплавка стали в кислых электропечах. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.

8. Патент РФ 2767318, МПК C21C 5/52. *Способ плавки стали в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока фасонно-литейного цеха* / Макаров А.Н., Крупнов А.В., Окунева В.В. Заявл. 11.03.2020. Опубл. 17.03.2022, Бюл. № 8.

9. Павлов В.В., Ивин Ю.А., Пехтерев С.В., Мацко И.И., Логунова О.С. Влияние фракционного состава металлолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи. // *Электрометаллургия*. 2011. № 11. С. 2–6.

10. Протасов А.В., Пасечник Н.В., Сивак Б.А. Электрометаллургические мини-заводы. М.: Metallurgizdat, 2013. 420 с.

11. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю., Попов А.Н., Галкин В.С. Экономия электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах. М.: Энергоатомиздат, 1987. 102 с.

12. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. М.: Metallurgiya, 1990. 174 с.

13. Электрометаллургия стали и ферросплавов / под ред. Д.Я. Поволоцкого. М.: Metallurgiya, 1984. 568 с.

14. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: bukashka_89@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н., Крупнов А.В., Окунева В.В. Способ повышения энергоэффективности выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока фасонно-литейного производства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 58–66.

**A METHOD FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY
OF STEEL SMELTING IN ARC STEELMAKING FURNACES
OF THREE-PHASE CURRENT OF SHAPED CASTING PRODUCTION**

A.N. Makarov, A.V. Krupnov, V.V. Okuneva
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This article discusses the problem of higher specific power consumption in low-capacity arc steelmaking furnaces of shaped foundry production compared with large-capacity furnaces. The influence of the dimensions of the loaded scrap metal on the energy consumption during its melting is explained. A transition to scrap dimensions in a charge of no more than $200 \times 150 \times 100$ mm is proposed as a way to reduce energy consumption for steel smelting in low-tonnage arc furnaces and its justification is given.

Keywords: electric arc furnace, power consumption, charge, lining temperature, energy efficiency improvement.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

OKUNEVA Victoria Valeryevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: bukashka_89@inbox.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N., Krupnov A.V., Okuneva V.V. A method for increasing the energy efficiency of steel smelting in arc steelmaking furnaces of three-phase current of shaped casting production // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 58–66.

УДК 621.31

**ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ
ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
РАБОТ НА ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ 0,4 кВ*****В.В. Окунева, С.Н. Зубков****Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Окунева В.В., Зубков С.Н., 2025

Аннотация. В статье изложены инновационные подходы к обучению персонала, работающего с электроустановками. Данные методы основаны на использовании виртуальной реальности. Проанализированы различные методы обучения по охране труда и технике безопасности. Рассмотрено внедрение VR-технологий на практике, а также представлены их преимущества перед традиционными методами обучения. Отмечено, что массовое внедрение виртуальной и дополненной реальности в программы обучения по охране труда позволит повысить уровень знаний и навыков персонала, снизить затраты на обучение. Показано, что использование виртуальных симуляторов сокращает потребность в дорогостоящих натурных полигонах и уменьшает износ реального оборудования.

Ключевые слова: охрана труда, техника безопасности, VR-технологии, инновации, энергетика, тренажер.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-67-73**ВВЕДЕНИЕ**

Современные производственные процессы, особенно в энергетике, требуют высокого уровня подготовки персонала, работающего с электроустановками. Традиционные методы обучения, такие как лекции, инструктажи и натурные тренировки, уже не отвечают современным требованиям безопасности и эффективности. В условиях усложнения технологий и роста рисков, связанных с человеческим фактором, актуальными становятся инновационные подходы к обучению, основанные на использовании виртуальной реальности (VR). На российском рынке представлено множество отечественных универсальных VR-тренажеров для обучения по технике безопасности и охране труда в сфере энергетики. В настоящей статье будет рассмотрено, почему VR-технологии являются инновационными, как они внедряются на практике и какие преимущества предлагают по сравнению с традиционными методами обучения.

**ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ:
ОТ ПЛАКАТОВ К ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

Исторически обучение по технике безопасности и охране труда прошло долгий путь развития. В начале XX в. основными инструментами были плакаты, инструктажи и натурные тренировки. Однако с ростом сложности электроустановок и ужесточением требований к безопасности стала ощутима нехватка новых методов. В 1970-х годах в США

и Европе начали внедрять первые симуляторы, которые позволяли отрабатывать навыки без риска для жизни и здоровья персонала.

Традиционные методы обучения (лекции, инструктажи и тренировки на полигонах, физических симуляторах) имеют ряд существенных недостатков. Во-первых, они часто не обеспечивают достаточного уровня практической подготовки. Сотрудники могут теоретически знать правила безопасности, но не иметь возможности отработать их в условиях, приближенных к реальным. Во-вторых, натурные тренировки сопряжены с риском травматизма, особенно при отработке опасных операций, таких как переключения на электроустановках. В-третьих, организация подобных тренировок требует значительных финансовых и временных затрат, включая аренду оборудования, подготовку полигонов и привлечение инструкторов. Кроме того, традиционные методы обучения не всегда учитывают индивидуальные особенности сотрудников. Например, новички и опытные работники могут нуждаться в разных подходах к обучению, но стандартные программы часто не предусматривают такой дифференциации. В результате эффективность обучения снижается, а риск допущения ошибок на производстве остается высоким [6, 12, 14].

С развитием компьютерных технологий в 1990-х годах появились цифровые тренажеры, ставшие основой для современных решений, поскольку в них используются виртуальная (VR) и дополненная (AR) реальности [1, 3, 5, 7, 16]. Технологии VR и AR не только повышают эффективность обучения, но и снижают затраты на организацию учебного процесса [7, 11].

ПРЕИМУЩЕСТВА VR-ТЕХНОЛОГИЙ КАК ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ

Виртуальная реальность предлагает принципиально новый подход к обучению, который устраняет многие недостатки традиционных методов.

Во-первых, VR-тренажеры позволяют создавать реалистичные симуляции рабочих процессов, включая аварийные ситуации. Это дает возможность сотрудникам отрабатывать навыки в безопасной среде, где ошибки не приводят к реальным последствиям. Например, работник может многократно выполнять операции по отключению и заземлению электроустановок, не рискуя получить травму.

Во-вторых, VR-технологии обеспечивают глубокое погружение в процесс обучения. Исследования показывают, что обучение в виртуальной среде способствует более устойчивому запоминанию информации, так как задействует не только зрительное, но и тактильное восприятие. Это особенно важно для отработки действий в стрессовых ситуациях, таких как аварии на электроустановках.

В-третьих, VR-тренажеры, как показано на рисунке, позволяют адаптировать обучение под индивидуальные потребности сотрудников. Например, система может автоматически настраивать уровень сложности заданий в зависимости от опыта и навыков обучаемого. Это делает процесс более эффективным и персонализированным [2, 4, 14, 22, 26–28].

Требования к работе тренажера



Ноутбук/
компьютер



Файл
(с тренажером)



VR-очки

✓ Наше решение работает с любыми VR-шлемами любого производителя

✓ Проекты реализуются с помощью технологий с открытым исходным кодом (open-source), в том числе Unity, Unreal Engine

Поставка

1. Тренажер

Отгружаем исполняемый файл exe с лицензионным ключом в «облако», где его можно скачать. Техподдержка помогает установить и настроить тренажер.

2. Аппаратно-программный комплекс: тренажер + VR-шлем + ноутбук

Устанавливаем и настраиваем тренажер самостоятельно. Готовый к использованию аппаратно-программный комплекс направляем покупателю.

3. Аппаратно-программный комплекс: тренажер + VR-шлем

Отгружаем исполняемый файл exe с лицензионным ключом в «облако», где его можно скачать. VR-шлем направляем покупателю. Техподдержка помогает установить и настроить тренажер.

VR-тренажер «Обучение по охране труда»

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Согласно данным Международной организации труда (МОТ), ежегодно в мире происходит около 2,93 млн смертей, связанных с несчастными случаями на производстве и профессиональными заболеваниями. Значительная часть этих случаев приходится на энергетический сектор, где работа с электроустановками сопряжена с повышенным риском. Основными причинами аварий и травматизма являются нарушения правил эксплуатации оборудования, использование устаревшей техники и недостаточный контроль за соблюдением норм безопасности [23, 24].

В развитых странах, таких как США, Германия и Япония, уровень смертельного травматизма значительно ниже, чем в странах развивающихся. Это связано с более строгими нормативными требованиями и использованием современных методов обучения. В России уровень смертельного травматизма составляет около 5 случаев на 100 000 работников, что выше, чем в развитых странах, но ниже, чем в развивающихся [18].

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР КАК КЛЮЧЕВОЙ ВЫЗОВ

Человеческий фактор остается одной из основных причин аварий на электроустановках. Согласно исследованиям, порядка 80 % несчастных случаев происходит из-за ошибок персонала, связанных с недостаточной подготовкой, усталостью, стрессом или невнимательностью. Это делает обучение по охране труда критически важным элементом обеспечения безопасности на производстве [19, 20].

Для улучшения ситуации необходимо разрабатывать программы обучения, которые не только охватывают технические аспекты, но и включают стратегии управления стрессом, распознавания опасностей и противодействия давлению со стороны. Особое внимание следует уделять командной работе и тренировкам для руководителей, чтобы они могли создавать условия для безопасного труда [25].

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ: РОССИЙСКИЙ И МИРОВОЙ ОПЫТ

В России активно внедряются инновационные методы обучения на основе технологий VR, AR и MR (смешанной реальности) в виде различных тренажеров и интерактивных стендов [8, 15, 17]. Одними из ключевых игроков на российском рынке VR-решений являются компании «ПРОМВИАР» и VR Pro, которые разрабатывают универсальные тренажеры для обучения по технике безопасности и охране труда. Продукты компаний активно внедряются в энергетике, нефтегазовой отрасли и строительстве, показывают высокую эффективность при подготовке персонала. Например, «ПРОМВИАР» разрабатывает универсальные VR-тренажеры, которые позволяют совершенствовать навыки работы на электроустановках 0,4 кВ в безопасной виртуальной среде. Эти тренажеры адаптированы под российские нормативные требования, такие как ПУЭ (Правила устройства электроустановок) и ПТЭЭП (Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей), что делает их особенно востребованными на рынке. Сотрудники выполняют типовые операции, такие как переключения и поиск неисправностей, в виртуальной среде. Это позволяет снизить риск допущения реальных ошибок и повысить уровень квалификации персонала. Результаты внедрения тренажеров на одном из предприятий показали снижение травматизма на 30 % за счет отработки опасных ситуаций в виртуальной среде. Существуют также успешные примеры использования тренажеров для обучения персонала работе с электрооборудованием на опасных производственных объектах. Сотрудники могут многократно выполнять сложные операции, такие как замена предохранителей и диагностика оборудования, что снижает вероятность допущения ошибок и повышает безопасность на производстве [25].

За рубежом (в США, Германии и Японии) VR и AR уже стали стандартом в области обучения по охране труда. Крупные компании, такие как General Electric, Siemens и ТЕРСО, активно используют VR-тренажеры для подготовки персонала. Эти технологии позволяют не только уменьшить количество несчастных случаев, но и повысить эффективность обучения [4, 22, 26–28].

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ И СОЦИАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИЙ

Массовое внедрение VR и AR в обучение по охране труда позволяет повысить уровень знаний и навыков персонала, а также снизить затраты на обучение. Использование виртуальных симуляторов сокращает потребность в дорогостоящих натуральных полигонах и уменьшает износ реального оборудования. Кроме того, сокращение числа несчастных случаев и травм напрямую влияет на экономические показатели предприятия: уменьшаются затраты на лечение пострадавших, компенсации и штрафы. Социально-психологический эффект от внедрения инновационных методов обучения также значителен. VR и AR повышают мотивацию сотрудников к обучению, снижают уровень стресса при реальных чрезвычайных ситуациях и способствуют формированию культуры безопасного труда [8–10, 13, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В будущем развитие технологий, таких как искусственный интеллект (AI) и интернет вещей (IoT), сделает обучение по охране труда еще более эффективным. Внедрение в работу компаний AI позволит анализировать действия обучаемых и автоматически адаптировать сценарии к уровню их подготовки. Расширение библиотеки

сценариев и интеграция с IoT дадут возможность создавать более реалистичные симуляции и улучшать качество обучения [21, 29–31].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрушко Д.Ю. Применение технологий виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе: проблемы и перспективы // *Научное обозрение. Педагогические науки*. 2018. № 6. С. 5–10.
2. Близнюк Е.Д. VR-технологии в процессе обучения по охране труда // *Задачи и возможности международного трансфера*. 2023. С. 75–78.
3. Бутусова А.Ю., Крюкова Ю.А., Попова А.Г., Тимофеев А.В. Анализ изменений подхода к управлению охраной труда за счет цифровизации. *Студент года: Сборник статей XXV Международного научно-исследовательского конкурса*. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. С. 51–54.
4. Буянова М.О. Понятие охраны труда в России и Германии: сравнительный аспект // *Право*. 2016. № 4. С. 198–204.
5. Владимирова Г.Е., Владимиров Н.В. Развитие правового регулирования охраны труда в Российской Федерации: история и современность // *Юридическая наука*. 2021. № 5. С. 4–8.
6. Волкова Е.Ю. Обучение по охране труда: проблемы и перспективы // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2012. Спецвыпуск № 1. С. 128–132.
7. Гонтаренко А.Ф., Кловач Е.В., Цирин И.В. Производственный травматизм и инновации в обучении по охране труда // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 3. С. 84–92.
8. Елин А.М. Основные цели и задачи реформирования охраны труда в Российской Федерации // *Охрана и экономика труда*. 2013. № 3. С. 4–10.
9. Елин А.М., Анохин А.В. Современные принципы и подходы к обучению охране труда персонала организаций // *Охрана и экономика труда*. 2017. № 1. С. 88–98.
10. Елин А.М., Михина Т.В., Савосин А.В. Мониторинг передового опыта в области охраны труда // *Охрана и экономика труда*. 2015. № 2. С. 68–72.
11. Иванов Г.С. Охрана труда: от античности к современности // *Вестник Евразийской науки*. 2016. Т. 8. № 3 (34). С. 31–43.
12. Карауш С.А., Герасимова О.О. История охраны труда в России: учебное пособие. Томск: ТГАСУ, 2005. 122 с.
13. Кондаурова И.А. Влияние современных технологий на развитие сферы охраны труда: вероятные вызовы и возможности // *Вестник Донецкого национального университета. Серия В. Экономика и право*. 2021. № 2. С. 69–77.
14. Кулев И.Ю., Кожухова В.В. Эффективность использования инновационных технологий в обучении по охране труда. *Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика: Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции: в 3 ч.* Уфа: НИЦ Вестник науки, 2023. Ч. 1. С. 130–133.
15. Славин О.А., Гринь Е.С. Обзор технологий виртуальной и дополненной реальности // *Труды Института системного анализа Российской академии наук*. 2019. № 3 (69). С. 42–54.
16. Трофимова Н.Н. Инновационные способы иммерсивного обучения работников предприятий с использованием технологий виртуальной реальности: зарубежный опыт // *Актуальные проблемы экономики и управления*. 2020. № 4. С. 143–147.

17. Шайхы Р.Т., Есбенбетова Ж.Х. Применение инновационных технологий в области охраны труда. *Правовая система России: история и современность: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции*. Уфа: Агентство международных исследований, 2018. С. 92–95.
18. Casey T.W., Mason H.M., Huang J., Franklin R.C. Shaping Frontline Practices: A Scoping Review of Human Factors Implicated in Electrical Safety Incidents // *Safety*. 2021. Vol. 7. No. 4. P. 76–83.
19. Jamil S., Golding A., Floyd H.L., Capelli-Schellpfeffer M. Human Factors in Electrical Safety // *Record of Conference Papers – Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*. 2007. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4365804?arnumber=4365804> (дата обращения: 06.10.2025).
20. Rosenstock L., Cullen M.R., Fingerhut M. Advancing Worker Health and Safety in the Developing World // *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2005. Vol. 47. No. 2. P. 132–136.
21. Shanu S., Narula D., Nayana, Pathak L.K., Mahato S. AR/VR Technology for Autonomous Vehicles and Knowledge-Based Risk Assessment // *Virtual and Augmented Reality for Automobile Industry: Innovation Vision and Applications*. 2022. Vol. 412. P. 87–109.
22. Stefan H., Mortimer M., Horan B., McMillan S. How Effective is Virtual Reality for Electrical Safety Training? Evaluating Trainees' Reactions, Learning, and Training Duration // *Journal of Safety Research*. 2024. Vol. 90. No. 2. P. 48–61.
23. Safety and Health at Work | International Labour Organization. URL: <https://www.ilo.org/topics-and-sectors/safety-and-health-work> (дата обращения: 06.12.2024).
24. Statistics on Safety and Health at Work – ILOSTAT. URL: <https://ilostat.ilo.org/topics/safety-and-health-at-work/> (дата обращения: 28.02.2025).
25. ПРОМВИАР – российский инновационный разработчик универсальных VR-тренажеров, входит в реестр Минцифры РФ. URL: <https://promvr.net/company/?yclid=m42dmkactw297011427> (дата обращения: 06.12.2024).
26. TEPCO and Pocket Queries to Collaborate on Mixed-reality Solution for Industrial Workplaces | TEPCO. URL: <https://www4.tepco.co.jp/en/hd/newsroom/press/archives/2018/180517-01-e.html> (дата обращения: 06.12.2024).
27. Virtual Training Solutions – Siemens Global. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/services/digital-enterprise-services/training-services/virtual-training-solutions.html> (дата обращения: 06.12.2024).
28. IEEE – The World's Largest Technical Professional Organization Dedicated to Advancing Technology for the Benefit of Humanity. URL: <https://www.ieee.org/> (дата обращения: 06.12.2024).
29. Advancedservices | HitachiEnergy. URL: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/facts/service/advanced-services> (дата обращения: 06.12.2024).
30. KOSHA | In Focus | What's New (VR to Provide Safety and Health Training). URL: <https://kosha.or.kr/english/news/whatsNew.do?mode=view&articleNo=55370&article.offset=190&articleLimit=10> (дата обращения: 06.12.2024).
31. Enhancing Education with Innovation: Workplace Training Goes Virtual | News & Stories | bp America. URL: https://www.bp.com/en_us/united-states/home/news/features-and-highlights/enhancing-education-with-innovation-workplace-training-goes-virtual.html (дата обращения: 06.12.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Bukashka_89@inbox.ru

ЗУБКОВ Сергей Николаевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sergei2076@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Окунева В.В., Зубков С.Н. Инновационные методы обучения по технике безопасности и охране труда при проведении работ на электроустановках потребителей 0,4 кВ // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 67–73.

**INNOVATIVE METHOD SOFSAFETY AND LABOR PROTECTION TRAINING
IN CARRYING OUT WORK ON ELECTRICAL INSTALLATIONS
OF CONSUMERS OF 0,4 kV**

V.V. Okuneva, S.N. Zubkov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article describes innovative approaches to the training of personnel working with electrical installations. These methods are based on the use of virtual reality. Various methods of occupational health and safety education are analyzed. The implementation of VR technologies in practice is considered, as well as their advantages over traditional teaching methods are presented. It was noted that the massive introduction of virtual and augmented reality into occupational safety training programs will increase the level of knowledge and skills of staff and reduce training costs. It is shown that the use of virtual simulators reduces the need for expensive full-scale landfills and reduces wear on real equipment.

Keywords: laborprotection, safety technology, VR technologies, innovations, energy, simulator.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

OKUNEVA Victoria Valerievna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Bukashka_89@inbox.ru

ZUBKOV Sergey Nikolaevich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sergei2076@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Okuneva V.V., Zubkov S.N. Innovative method sofsafety and labor protection training in carrying out work on electrical installations of consumers of 0,4 kV // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 67–73.

УДК 621.311:004.052

КИБЕРУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**М.Д. Шубин, А.Ю. Русин***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Шубин М.Д., Русин А.Ю., 2025

Аннотация. В статье представлена модель цифрового двойника, предназначенная для критически важных киберинфраструктур. Она сосредоточена на анализе возможных проблем, возникающих при интеграции вычислительных, коммуникационных и физических компонентов данных киберинфраструктур. Особое внимание уделяется электроэнергетическому сектору, поскольку нарушения его устойчивости могут привести к серьезным рискам для страны. Для расширения возможностей взаимодействия с системой, повышения осведомленности о происходящих событиях и улучшения мер реагирования на киберинциденты разработана комплексная модель. Она основана на исследованиях в области информационной безопасности, ситуационной осведомленности и формирования общей оперативной картины. Применение модели способствует сокращению времени реагирования, что позволяет минимизировать ущерб от кибератак для электроэнергетических систем. В заключение обсуждены перспективы применения данного подхода в будущих исследованиях и отмечена его значимость для электроэнергетики.

Ключевые слова: цифровой двойник, устойчивость, реагирование на инциденты, предотвращение инцидентов, ситуационная осведомленность, искусственный интеллект.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-74-80

Социальные, экономические и политические системы в значительной мере зависят от критически важных киберинфраструктур (СЦИ), которые обеспечивают ключевые услуги для их функционирования. За последние двадцать лет эти системы активно интегрируют вычислительные, коммуникационные и киберфизические компоненты. С одной стороны, такая интеграция повышает удобство, эффективность и устойчивость систем. С другой стороны, выход в киберпространство сопровождается новыми рисками. Основная проблема состоит в том, что указанные инфраструктуры становятся уязвимыми к кибератакам, которые направлены как на системы управления, так и на кражу данных [1].

В настоящей статье фокус сделан на энергетическом секторе, особенно на анализе электроэнергетических СЦИ, таких как операторы электросетей. Уязвимости цифровых систем и длительное воздействие расширенных постоянных угроз (АРТ) создают серьезные риски и потенциально могут нанести ущерб политическим и экономическим системам, а также поставить под угрозу национальную безопасность [2]. Таким образом, для обеспечения устойчивости СЦИ необходимо разрабатывать и внедрять эффективные механизмы предотвращения инцидентов и реагирования на них.

В рамках статьи представлена модель киберустойчивости для СЦИ. Она объединяет профилактику и реагирование на различных уровнях организации, предлагая интегрировать систему цифровых двойников [3, 4]. Цифровые двойники позволяют

создать безопасную тестовую среду для киберфизических систем, повышают ситуационную осведомленность и эффективность операционных сценариев, что улучшает координацию при реагировании на инциденты, киберготовность и управление киберинцидентами.

Предыдущие исследования в области управления информационной безопасностью, акцентированные на инцидентах, составляют основу для метода исследования дизайна действий (ADR) [5]. Эта концептуальная модель включает в себя возможности для обнаружения атак на CCI с помощью детальной аналитики данных и причинного анализа, позволяющего определять источники аномалий, что дает возможность использовать цифрового двойника для тестирования стратегий смягчения последствий, включая превентивные меры и обучение.

В литературе по киберустойчивости выделяют две ключевые парадигмы, применяемые организациями для защиты своих информационных ресурсов: парадигму предотвращения и парадигму реагирования.

Парадигма предотвращения ориентирована на внедрение зрелой системы разведки угроз, адаптированной к нуждам критически важной киберинфраструктуры. Такие превентивные структуры формируются на основе анализа прошлого опыта с целью предсказания будущих угроз.

Парадигма реагирования, напротив, направлена на обеспечение готовности организации к противодействию новым, непредсказуемым угрозам. Данный подход требует быстрых и решительных действий; гибкость в данном случае особенно важна для обеспечения оперативного реагирования [6].

Несмотря на различия, данные подходы не исключают друг друга и могут эффективно объединяться для повышения устойчивости и гибкости организации [7]. Некоторые авторы отмечают, что ситуация реагирования в таком контексте обладает обучающим потенциалом, создавая «формирующую среду», способствующую инновациям и обучению. Хотя основная цель реагирования заключается в обеспечении его непрерывности, успешное решение этой задачи требует четкой, оперативной и скоординированной коммуникации с теми, кто отвечает за превентивные меры [8].

Кроме того, в литературе подчеркивается, что работа в пространстве ситуационной осведомленности (SA) улучшает оценку рисков и управление ими в CCI. Ситуационная осведомленность описывается как метод мониторинга состояния сетевой инфраструктуры организации и оценки влияния текущей сетевой ситуации на критические задачи. Преимущества SA затрагивают обе парадигмы и усиливаются при их совместном использовании, поддерживая организационное обучение.

Исследования также указывают на разрыв между теорией и практикой в межорганизационном управлении кризисами, где ключевым аспектом является обмен информацией [9]. Этот обмен зачастую отсутствует или работает неэффективно из-за внутренних политик, таких как принцип «необходимости знать или не знать», который активируется во время кризисов. Организации также могут воздерживаться от раскрытия информации из-за стратегических или репутационных рисков. В этих условиях общая оперативная картина (COP) может служить посредником, особенно в межорганизационном взаимодействии.

Цифровые двойники играют важную роль в киберустойчивости как технологический артефакт. Цифровой двойник представляет собой виртуальное отражение физической системы, такой как CCI [3, 4]. В отличие от традиционных офлайн-моделей, он

более детально воспроизводит функциональность системы, включая как физические характеристики, так и ИТ-интерфейсы, протоколы, а также высокоуровневую операционную и управляющую логику. Как правило, цифровые двойники работают в реальном времени, параллельно с физической системой. Кроме того, цифровые двойники могут использоваться как платформа для тестирования новых технологий и процедур.

Несмотря на широкое признание цифровых двойников в практике, отсутствует систематическая модель, описывающая их организационное применение. Требуется исследование взаимодействия между участниками CCI и уровнями, на которых оно происходит. В этом контексте цель исследования – разработать и проверить модель киберустойчивости критической киберинфраструктуры с помощью интеграции цифрового двойника.

Литературные данные стали основой для представления результатов проекта, выполненного в рамках подхода ADR, направленного на повышение киберустойчивости критически важной инфраструктуры. ADR является специализированным ответвлением метода научных исследований дизайна (DSR) [5], в границах которого анализируется процесс непрерывной адаптации артефакта к специфике его локального применения. В методологии выделено три исследовательских цикла DSR: строгость, дизайн (или проектирование) и релевантность.

Цикл строгости связывает мероприятия проектирования с существующими знаниями, одновременно интегрируя и расширяя их. Цикл проектирования, являющийся основным из трех циклов DSR, фокусируется на итеративном процессе создания и оценки артефакта. Цикл релевантности увязывает проектные задачи с их практической средой, обеспечивая соответствие дизайна требованиям реальных задач. В качестве теоретической основы исследования были использованы знания об управлении рисками в сложных технологических системах [7].

Первоначально использовались предыдущие исследования в области киберустойчивости для определения главной проблемы проектирования. В частности, для разработки модели, ориентированной на инциденты и объединяющей парадигмы реагирования и предотвращения на основе двухконтурного процесса обучения, был использован подход, базирующийся на концептуальной модели Баскервиля.

Изложенные ранее концепции, касающиеся рисков в высокотехнологичных системах, активно использовались при разработке комплексной модели киберустойчивости критической информационной инфраструктуры. Созданная модель представляет собой теоретически обоснованный артефакт, сочетающий объяснительные аспекты теорий организационного обучения с проектной направленностью цикла действий, цель которого заключается в обеспечении безопасности [5].

В то же время взаимодействие с практиками выявило, что базовая модель недостаточно учитывает высокую степень автоматизации современных CCI и их взаимосвязь с внешними субъектами. На этапе разработки, реализации и оценки проекта ADR участники выделили цифровой двойник и компьютерное моделирование как ключевые элементы для создания киберустойчивой структуры CCI. Эта структура включает три основных уровня, соответствующих вертикальной иерархии большинства организаций, связанных с CCI. Технический уровень охватывает непосредственно саму CCI, и при возникновении инцидента процесс реагирования организации инициирует обнаружение угрозы и реагирование на нее, за которыми следует подтверждение инцидента, а также фазы восстановления и укрепления системы. По мере продвижения

мероприятий подключается операционный уровень, охватывающий координацию, коммуникацию, контроль и разведку.

Функционирует ССИ и в более широкой экосистеме, где на этапе обнаружения на техническом уровне запускается процесс обмена информацией с внешними субъектами. Этот обмен направлен на формирование межсекторального стратегического взаимодействия в отношении инцидента, охватывающего не только другие организации, но и институциональных участников, таких как государственные и правоохранительные органы. На организационном и экосистемном уровнях выполняются три ключевые функции – информирование, сдерживание и установление стандартов, – которые обеспечивают обратную связь для профилактических мер. На операционном уровне они переводятся в организационные требования, а на уровне экосистемы – в политические стандарты. Оба набора требований воплощаются в виде превентивных технических решений, таких как индикаторы и системы раннего оповещения [3, 4].

С использованием интегрированного цифрового двойника, имитирующего исходную ССИ, эти элементы могут быть направлены на реализацию превентивных мер. Такой подход имеет ряд преимуществ. Во-первых, цифровой двойник представляет собой ценность для технического уровня, предлагая ССИ-платформу в виде «песочницы» для киберфизических систем и возможности киберполигона. Таким образом, цифровые двойники могут частично разгрузить реальную ССИ. Кроме того, на операционном уровне они позволяют интегрировать обучение, ориентированное на ситуационную осведомленность, во все функции организации. Тот же подход применим и на межведомственном уровне экосистемы, где цифровой двойник помогает принимать решения, фокусируясь на СОР. Основное преимущество этой модели заключается в том, что интегрированный цифровой двойник предоставляет тестовую среду и механизмы для проверки набора превентивных мер, включая контрольные индикаторы и раннее предупреждение. Таким образом, он эффективно соединяет парадигмы предотвращения и реагирования благодаря централизации инцидента в процессе обучения. Еще одним преимуществом является экосистемная природа такой интеграции [8].

Энергетическая инфраструктура – это одна из наиболее критически важных систем, поддерживающих функционирование многих других отраслей. Однако уникальные особенности культур и процедур каждой организации затрудняют координацию при киберинцидентах, так как взаимодействие между участниками усложняется конфликтами и отсутствием единого механизма обмена данными. Информация о киберугрозах часто распространяется через неформальные, доверительные сети, что снижает осведомленность об уязвимостях.

Для повышения киберустойчивости в критически важных инфраструктурах проводились значительные исследования, включая разработку процессов и стандартов для разных отраслей. Операторам электросетей важно своевременно выявлять угрозы и быстро передавать информацию как внутри отрасли, так и регулирующим органам. Международное сотрудничество и согласованные приоритеты в реагировании на инциденты помогут быстрее выявлять угрозы и ликвидировать их, что позволит защитить ССИ в энергетическом секторе.

В то же время цифровизация ССИ, несмотря на свои преимущества, увеличивает сложность системы и повышает риски кибератак. Уязвимости присутствуют на всех уровнях: от генерации до распределения и рыночных услуг, что требует постоянного обновления решений по защите. Кроме атак, усилившаяся взаимосвязанность

инфраструктуры также создает риск непреднамеренных инцидентов, таких как ошибки персонала или технические сбои [10].

Внедрение цифрового двойника в критически важные инфраструктуры способствует повышению их киберустойчивости, объединяя функции профилактики и реагирования и поддерживая как внутриорганизационное, так и межорганизационное обучение. Значима роль SA и COP, которые способствуют согласованности действий и, как следствие, эффективной защите CCI в рамках действующих правовых норм.

Вклад настоящего исследования в обеспечение устойчивости критических киберинфраструктур состоит в следующем. Во-первых, адаптирована и операционализирована модель Баскервиля, которая теперь учитывает развитие технологий и возможностей мониторинга киберугроз, объединяя инструменты профилактики и реагирования. Во-вторых, добавлен межорганизационный компонент к инцидент-ориентированному подходу, что позволяет учитывать взаимозависимости киберинцидентов на трех уровнях: операционном, внутриорганизационном и экосистемном. В-третьих, рассмотрено новое понимание нормативных рамок, которые становятся более стандартизирующими и превентивными, задавая технологические и организационные требования [7].

Практическое значение модели заключается в интеграции передовых подходов к управлению киберинцидентами и кибербезопасностью [4, 11, 12], что позволяет сократить время реагирования и уменьшить последствия атак на CCI. Эта модель служит обучающей средой для операторов, помогая повышать готовность, SA и формируя COP с другими участниками экосистемы. При этом важной задачей остается укрепление межорганизационного доверия для повышения обмена информацией, что требует надежной защиты данных и соблюдения конфиденциальности.

Таким образом, были представлены результаты проекта ADR, нацеленного на повышение киберустойчивости критически важных инфраструктур. После проведения анализа актуальной литературы в данной области была разработана концептуальная модель, основанная на применении интегрированного цифрового двойника в многоуровневом процессе организационного обучения, сосредоточенном на управлении отказами CCI. Оценка модели проводилась в контексте экосистемы электроэнергетики ЕС, и она включала различные фазы процесса, а также используемые артефакты и вовлеченные субъекты.

Перспективные исследования киберустойчивости децентрализованных инфраструктур могут выявить техносциальные аспекты использования цифровых двойников, в том числе их влияние на преобразование институциональной логики в вычислительные и алгоритмические структуры. Создание комплексной теории проектирования киберустойчивости в CCI требует прохождения всех этапов процесса ADR, который предполагает рефлекссию и обучение после разработки и оценки артефакта в организационной среде.

Кроме того, предложенные принципы проектирования требуют дальнейшей проверки с помощью реализации концептуальных прототипов в различных контекстах CCI. Однако для полноценной оценки предложенной модели нужны длительные исследования, которые должны выполняться междисциплинарными командами, включающими специалистов в области инженерии, управления информацией, науки о данных, информационной безопасности, а также симуляции и обучения для управления рисками стихийных бедствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC Technology Report. Cyber Security and Resilience Guidelines for the Smart Energy Operational Environment. 2019. URL: <https://www.iec.ch/basecamp/cyber-security-and-resilience-guidelines-smart-energy-operational-environment> (дата обращения: 25.05.2025).
2. Lemay A., Calvet J., Menet F., Fernandez J.M. Survey of Publicly Available Reports on Advanced Persistent Threat Actors // *Computers & Security*. 2019. Vol. 72. P. 26–59.
3. Dietz M., Pernul G. Digital Twin: Empowering Enterprises Towards a System-of-Systems Approach // *Business & Information Systems Engineering*. 2020. Vol. 62. No. 2. P. 179–184.
4. Meske C., Osmundsen K.S., Junglas I.A. Designing and Implementing Digital Twins in the Energy Grid Sector // *MIS Quarterly Executive*. 2021. Vol. 20. No. 3. P. 45–54.
5. Baskerville R., Baiyere A., Gregor S., Hevner A., Rossi M. Design Science Research Contributions: Finding a Balance between Artifact and Theory // *Journal of the Association for Information Systems*. 2019. Vol. 19. No. 5. P. 358–376.
6. Spagnoletti P., Kazemargi N., Prencipe A. Agile Practices and Organizational Agility in Software Ecosystems // *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2021. Vol. 69. No. 6. P. 3604–3617.
7. Spagnoletti P., Za S. Digital Resilience to Normal Accidents in High-Reliability Organizations // *Engineering the Transformation of the Enterprise: A Design Science Research Perspective* / Eds. Aier S., Rohner P., Schelp J. Cham: Springer, 2021. 353 p.
8. Ahmad A., Desouza K.C., Maynard S.B., Naseer H., Baskerville R.L. How Integration of Cyber Security Management and Incident Response Enables Organizational Learning // *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 2020. Vol. 71. No. 8. P. 939–953.
9. Steen-Tveit K. Identifying Information Requirements for Improving the Common Operational Picture in Multi-Agency Operations // *Proceedings of the 17th ISCRAM Conference*. 2020. URL: https://idl.iscram.org/files/kristinesteen-tveit/2020/2226_KristineSteen-Tveit2020.pdf (дата обращения: 25.05.2025).
10. Chaudhary T., Jordan J., Salomone M., Baxter P. Patchwork of Confusion: The Cybersecurity Coordination Problem // *Journal of Cybersecurity*. 2019. Vol. 4. No. 1. P. 56–64.
11. Horita F., Baptista J., Albuquerque J.P. Exploring the Use of IoT Data for Heightened Situational Awareness in Centralised Monitoring Control Rooms // *Information Systems Frontiers*. 2020. Vol. 25. No. 1. P. 275–290.
12. Naseer A., Naseer H., Ahmad A., Maynard S.B., Siddiqui A.M. Real-time Analytics, Incident Response Process Agility and Enterprise Cybersecurity Performance: A Contingent Resource-based Analysis // *International Journal of Information*. 2021. Vol 59. No. 8. P. 102–334.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУБИН Михаил Дмитриевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mikhail-shubin@bk.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шубин М.Д., Русин А.Ю. Киберустойчивость электроэнергетических систем // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 74–80.

CYBER-RESILIENCE OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

M.D. Shubin, A.Yu. Rusin
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents a digital twin model designed for mission-critical cyberinfrastructures. It focuses on analyzing possible problems that arise when integrating computing, communication, and physical components of these cyberinfrastructures. Particular attention is being paid to the electricity sector, as disruptions to its sustainability can lead to serious risks for the country. A comprehensive model has been developed to expand the possibilities of interacting with the system, increase awareness of ongoing events and improve responses to cyber incidents. It is based on research in the field of information security, situational awareness and the formation of an overall operational picture. The use of the model helps to reduce the response time, which minimizes the damage from cyber attacks to electric power systems. In conclusion, the prospects of applying this approach in future research are discussed and its importance for the electric power industry is noted.

Keywords: digital twin, resilience, incident response, incident prevention, situational awareness, artificial intelligence.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SHUBIN Mikhail Dmitrievich – Master’s Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mikhail-shubin@bk.ru

RUSIN Aleksandr Yur’evich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: alexrusin@inbox.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Shubin M.D., Rusin A.Yu. Cyber-resilience of electric power systems // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 74–80.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 678.075: 625.7/8: 665.6

РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СБС-ПОЛИМЕРОВ В БАЗОВЫХ ПЛАСТИФИКАТОРАХ И ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МАСЛАХ

**Я.А. Ерохина¹, П.А. Дужий², А.С. Пилипенко³, А.С. Беляков³, К.П. Пашенко⁴,
К.С. Котежов⁵, Д.Ю. Небратенко^{1, 3, 5}**

¹ *Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (г. Москва)*

² *МИРЭА – Российский технологический университет (г. Москва)*

³ *Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (г. Москва)*

⁴ *Астраханский государственный технический университет (г. Астрахань)*

⁵ *Российский университет транспорта (г. Москва)*

© Ерохина Я.А., Дужий П.А., Пилипенко А.С., Беляков А.Ю.,
Пашенко К.П., Котежов К.С., Небратенко Д.Ю., 2025

Аннотация. Постоянно повышающаяся нагрузка автомобильных дорог и увеличение интенсивности движения грузового транспорта требуют улучшения эксплуатационных показателей битумных вяжущих. Основой таких изменений, оказывающей положительное влияние на целый комплекс параметров итоговых дорожных покрытий, является модификация традиционных битумов СБС-полимерами. В работе рассмотрены основные закономерности набухания бутадиен-стирольных термоэластопластов различного состава и строения в товарных нефтяных пластификаторах, традиционно составляющих от 30 до 60 % в составе смесевых вяжущих. Для проведения испытаний была разработана простая установка по определению изменения эффективного радиуса исследуемых частиц полимера в проходящем солнечном свете с применением прямоугольных кювет из оптического бесцветного стекла К-8 производства компании Hellma. Видеофиксация изображений проводилась при комнатной температуре и атмосферном давлении без перемешивания. Обработка полученных данных происходила в системах AutoCad, 3Ds Max. В качестве СБС-полимеров были рассмотрены линейные марки бутадиен-стирольных термоэластопластов. При этом анализ динамики набухания и последующего растворения термоэластопластов показал, что индустриальное масло И-20 и базовое нефтяное масло SN-150 обладают повышенной совместимостью с СБС-полимерами.

Ключевые слова: СБС-полимеры, базовые масла, набухание бутадиен-стирольных термоэластопластов, битумы нефтяные дорожные, полимерно-битумные вяжущие.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-81-93

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные климатические изменения и новые стратегические программы развития и освоения северных регионов Российской Федерации постоянно требуют от специалистов, занимающихся дорожным материаловедением, поиска новых вариантов повышения низкотемпературных показателей дорожных вяжущих и, как следствие, увеличения межремонтных сроков автомобильных дорог [1, 2, 3].

Тем не менее, несмотря на осознание и принятие всей сложности многокомпонентных коллоидных систем, каковыми являются традиционные для Российской Федерации окисленные битумы на основе сернистых нефтей [3, 4], достаточно продолжительное время отраслевая наука не обращала должного внимания на необходимость изучения как свойств самих компонентов, входящих в состав органических вяжущих, так и различных процессов деструкции и полимеризации, происходящих в дорожных вяжущих в ходе их переработки, а также при эксплуатации итоговых асфальтобетонных покрытий.

Например, при классификации нефтяных дорожных битумов основной акцент до сих пор делается исключительно на их реологических показателях, а компонентный состав, обеспечивающий получение регламентируемых показателей как исходных вяжущих, так и вяжущих после RTFOT- и PAV-старения [5, 6], не оценивается даже в случае получения из нефтяных дорожных битумов полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) [7, 8].

Однако для последнего случая компонентный состав исходного битума имеет решающее значение, поскольку его варьирование позволяет регулировать количество бутadiен-стирольного термоэластопласта (СБС-полимера, БС ТЭП), используемого для модификации [9, 10]. В ходе набухания в битумном вяжущем гранулы СБС-полимера увеличиваются в трех измерениях и, постепенно разбухая, занимают весь доступный объем. Это принципиально изменяет свойства как самих вяжущих, так и полимерасфальтобетонов на их основе. При этом стоит учитывать, что удельная доля термоэластопласта в себестоимости ПБВ приближается к 50 % и оптимизация соотношения «вяжущее / СБС-полимер» становится весьма важной задачей [11, 12]. Правильный выбор пластифицирующих агентов для обеспечения максимального набухания бутadiен-стирольных термоэластопластов необходимо осуществлять для каждой пары «БС ТЭП / углеводородный пластификатор».

На текущий момент возможна оценка качества распределения СБС-полимера по объему ПБВ с помощью ряда методов, наиболее наглядным из которых является так называемый тубный метод [13, 14]. Он заключается в термостатировании рассматриваемого смесового состава в вертикальном положении в алюминиевой трубке при температуре порядка 180 °С в течение трех суток [15]. К сожалению, данный метод также не дает реального представления о взаимодействии компонентов в составе битума (а затем и ПБВ), однако определенным образом учитывает разницу в реологических свойствах многокомпонентных битумных вяжущих и полимерных модификаторов класса БС ТЭП.

При этом в связи с изменением фактической стоимости нефтяных пластификаторов, крупнотоннажно выпускаемых для разных отраслей промышленности и ранее широко применявшихся в дорожном материаловедении для регулирования компонентного состава, все большее внимание на предприятиях, изготавливающих ПБВ, уделяется изучению возможности замещения товарных масел различного рода нетоварными продуктами как

нефтяного, так и растительного происхождения. Однако на текущий момент не существует доступных и воспроизводимых методов оценки растворяющей способности мелкотоварных пластифицирующих агентов.

Именно поэтому в настоящей работе была поставлена задача оценки и изучения взаимодействия жидкой масляной фазы нефтяного битума, моделируемой с использованием базовых и промышленных масел, и нескольких марок линейно-бутадиен-стирольных термоэластопластов отечественного и зарубежного производства, обеспечивающих упруго-прочностные показатели итогового ПБВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка процесса набухания и последующего растворения СБС-полимеров проводилась с использованием как базовых нефтяных пластификаторов, так и товарных промышленных масел, крупнотоннажно выпускаемых большинством нефтяных компаний в России.

Основными компонентами для изучения являлись базовые масла, производимые на ПАО «Славнефть-Ярославнефтеоргсинтез», марок SN-150, SN-400, а также масло SN-650, изготавливаемое на ПАО АНК «Башнефть» – «Башнефть-Новыйл». Они широко используются в качестве сырья для производства товарных масел различного применения (моторных, промышленных и др.) [16, 17, 18]. Технические показатели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-технические показатели базовых масел [16, 17, 18]

Показатель	Метод испытания	Марка базового масла		
		SN-150	SN-400	SN-650
Внешний вид	п. 7.2 СТО 00149765-003-2010	Однородная бесцветная прозрачная жидкость	Однородная желтоватая прозрачная жидкость	Однородная светло-коричневая жидкость
Вязкость кинематическая при 100 °С, мм ² /с	ГОСТ 33-2016	5,400	9,246	13,420
Вязкость кинематическая при 40 °С, мм ² /с	ГОСТ 33-2016	31,400	78,96	–
Индекс вязкости	ГОСТ 25371	106	93	95
Массовая доля воды, %	ГОСТ 2477	Следы	Следы	Следы
Плотность при 15 °С, кг/м ³	ASTM D 4052	869,2	884,2	900
Температура застывания, °С	ГОСТ 20287, метод Б	Минус 16	Минус 16	Минус 16
Температура вспышки в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333-2021	213	240	255

Окончание табл. 1

Показатель	Метод испытания	Марка базового масла		
		SN-150	SN-400	SN-650
Содержание механических примесей, %	ГОСТ 6370	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют
Зольность, %	ГОСТ 1461	0,003	0,003	0,003
Цвет на колориметре ЦНТ, ед. ЦНТ	ГОСТ 20281	1,0	2,1	3,1
Массовая доля серы в базовом масле, %	ASTM D4294	0,064	0,120	1,100

Вторая группа пластификаторов представляла собой индустриальные масла, соответствующие ГОСТ 20799-2022 и произведенные ООО «РН-Смазочные материалы» в г. Рязани [19, 20, 21]. Технические показатели приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-технические показатели индустриальных масел [19, 20, 21]

Показатель	Метод испытания	Марка базового масла		
		И-20А	И-40А	И-50А
Вязкость кинематическая при 100/50/40 °С, мм ² /с	ГОСТ 33-2016	5,396/21,19 /31,39	8,943/49,5 /78,96	11,51/63,49 /104,0
Плотность при 20 °С, кг/м ³	ASTM D 4052	866,0	878,0	881,4
Температура застывания, °С	ГОСТ 20287, метод Б	Минус 18	Минус 16	Минус 15
Температура текучести, °С	ГОСТ 20287, метод А	Минус 15	Минус 15	Минус 12
Температура вспышки в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333-2021	216	220	234
Температура самовоспламенения, °С	ГОСТ 12.1.044-89	356	361	364
Цвет на колориметре ЦНТ, ед. ЦНТ	ГОСТ 20281-91	0,5	2,0	3,0

В качестве полимерных модификаторов в работе рассматривались исключительно бутадиен-стирольные термоэластопласты линейного строения. Применение при изготовлении ПБВ именно СБС-полимеров регламентировано требованиями ГОСТ Р 52056-2003 «Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол. Технические условия», разработанного Федеральным государственным унитарным предприятием «Государственный дорожный научно-исследовательский институт» (ФГУП «СоюзДорНИИ») и действующего на территории Российской Федерации с 1 января 2004 года.

В качестве СБС-полимеров были использованы линейные марки бутадиен-стирольных термоэластопластов отечественного и зарубежного производства, технические показатели которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-химические показатели бутадиен-стирольных термоэластопластов
отечественного и зарубежного производства [22–25]

Наименование показателя	Марки СБС-полимеров			
	ДСТ Л 30-01	Kraton D0243	Kraton D0246	Kraton D1192
Содержание связанного стирола, %	31	30–34	26	30
Содержание 1,2-винил, %	14±2,0	33–37	28–30	48–50
Содержание диблока, %	10±2,0	75±2,0	55±2,0	Менее 10
Средневесовая молекулярная масса M_w , усл. ед.	78–85 тыс.	62–71 тыс.	68–73 тыс.	75–78 тыс.
Полидисперсность M_w/M_n	1,16–1,19	1,10–1,15	1,13–1,15	1,15–1,18
Показатель текучести расплава, 190 °С, 5 кгс, г/10 мин	0–1	18–20	3–4	0–1
Условная прочность при удлинении 300 %, МПа	2,0	1,0	2,0	4,8
Условная прочность при растяжении, МПа	9,6	2,0	2,9	33,0
Относительное удлинение при разрыве, %	650	820	880	1 тыс.
Эластичность по отскоку, %	55	35	45	65

Термоэластопласт линейный бутадиен-стирольный ДСТ Л 30-01 является одним из первых промышленно выпускаемых СБС-полимеров в России (АО «Воронеж-синтезкаучук») и представляет собой продукт блоксополимеризации стирола и бутадиена в растворе углеводородов в присутствии литийорганического катализатора [22]. Он имеет типовую линейную структуру с преобладающим содержанием 1,4-присоединения звеньев в полибутадиеновом блоке, опудрен стеаратом кальция или диоксидом кремния. Содержание стирола не превышает 30 %. Данная марка отличается высоким содержанием трехблочных структур, приближающимся к 90 %, и является наиболее часто используемой при полимерной модификации нефтяных дорожных битумов в соответствии с ГОСТ Р 52056-2003. ДСТ Л 30-01 обладает параметром растворимости, равным $17,8 \text{ МДж}^{0,5}/\text{м}^{1,5}$ и характеризующим влияние полибутадиеновых и полистирольных блоков в составе термоэластопластов [13].

Выпускаемые компанией KratonTM СБС-полимеры хорошо известны широким набором свойств. Например, марка Kraton D0243 характеризуется наличием большого числа диблочных структур (до 75 %) [23], которое для марки Kraton D0246 составляет 55 % [24]. Важно отметить, что у ДСТ Л 30-01 и Kraton D1192 преобладают трехблочные компоненты и количество диблока не превышает 8–10 %. При этом отличительная черта полимера марки Kraton D1192 заключается в большом количестве звеньев 1,2-присоединения – до 48–50 % [25]. Все указанные отличия в составе и строении полимеров будут проявляться при взаимодействии с жидкой масляной фазой битума, для моделирования которой в данном исследовании использованы товарные нефтяные пластификаторы.

В ходе проведения исследовательской части работы было использовано простое по конструкции устройство для непрерывного наблюдения процессов поверхностного поглощения упругоэластичными гранулами СБС-полимеров разных марок

пластификаторов нефтяного происхождения различного состава. Установка представляла собой прямоугольный закрытый контейнер, малая из сторон которого была обращена к естественному источнику солнечного света, проникавшего в него через щелевое отверстие в задней части контейнера. Прямоугольные кюветы К-8, изготовленные из оптического бесцветного стекла, были расположены непосредственно перед щелью (рис. 1).

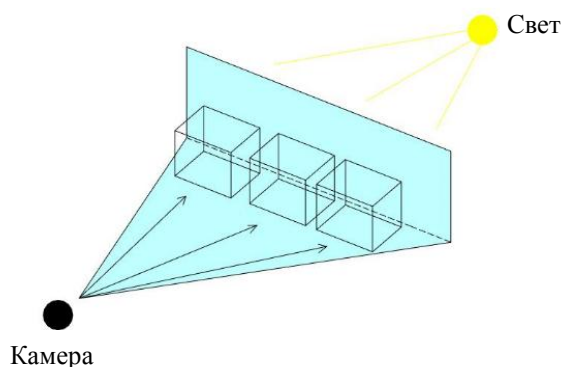


Рис. 1. Схема опытной установки для непрерывного мониторинга поверхностного взаимодействия СБС-полимеров и пластификаторов

В передней части контейнера был закреплен смартфон Samsung GT-I9300I, оснащенный оптической системой с разрешением видеосъемки 1920×1080 пикселей (Full HD). Камерой осуществлялась видеозапись процессов набухания различных типов пластификаторов и марок СБС-полимеров (рис. 2). Обработка полученных изображений происходила с постоянной периодичностью. Процесс проводился в статическом режиме при комнатной температуре и атмосферном давлении. Продолжительность данного этапа мониторинга не превышала 3 сут. После извлечения гетерогенных смесей из контейнера для видеозаписи полученные составы перемещались в бюксы, из которых гранулы полимеров периодически извлекались, просушивались фильтровальной бумагой, а затем фиксировались их геометрические размеры.

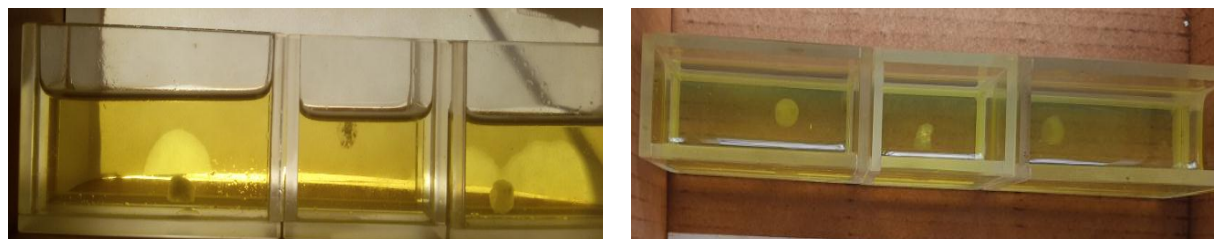


Рис. 2. Первоначальный этап набухания разных марок СБС-полимеров в базовом масле SN-150

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью сопоставления качественных показателей базовых нефтяных пластификаторов и промышленных масел на лабораторном рефрактометре ИРФ-22 с обогревающей головкой было проведено определение показателя преломления в диапазоне температур от 20 до 60 °С. Полученные данные представлены на рис. 3.

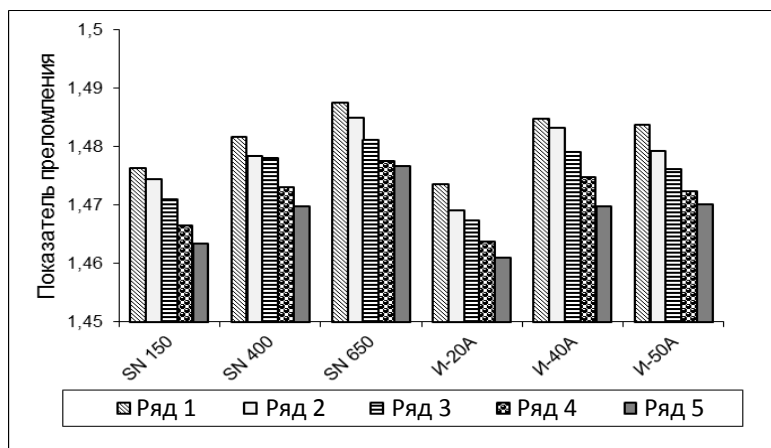


Рис. 3. Температурная динамика показателей преломления базовых и промышленных масел, использованных в исследовании, °С: ряд 1 – 20; ряд 2 – 30; ряд 3 – 40; ряд 4 – 50; ряд 5 – 60

Важно отметить, что динамика изменения показателя преломления для всех рассматриваемых пластифицирующих агентов практически идентична. Показательно, что абсолютные значения, характеризующие компонентный состав масел, крайне близки в парах SN-150/И-20А, SN-400/И-40А, SN-650/И-50А. При этом степень светопропускания и для базовых, и для промышленных масел уменьшается с ростом числа атомов углерода в основной углеводородной цепи пластификатора. На это указывает и изменение светопропускания по ГОСТ 20281-91.

Суммарное время наблюдения набухания по изложенной выше методике не превышало 45–50 сут, поскольку (вне зависимости от вида использованных пластификаторов) в указанный период данный процесс для всех исследованных марок бутадиен-стирольных термоэластопластов стабилизировался.

Сведения о динамике набухания в базовых и промышленных маслах при нормальных условиях представлены на рис. 4 и в табл. 3.

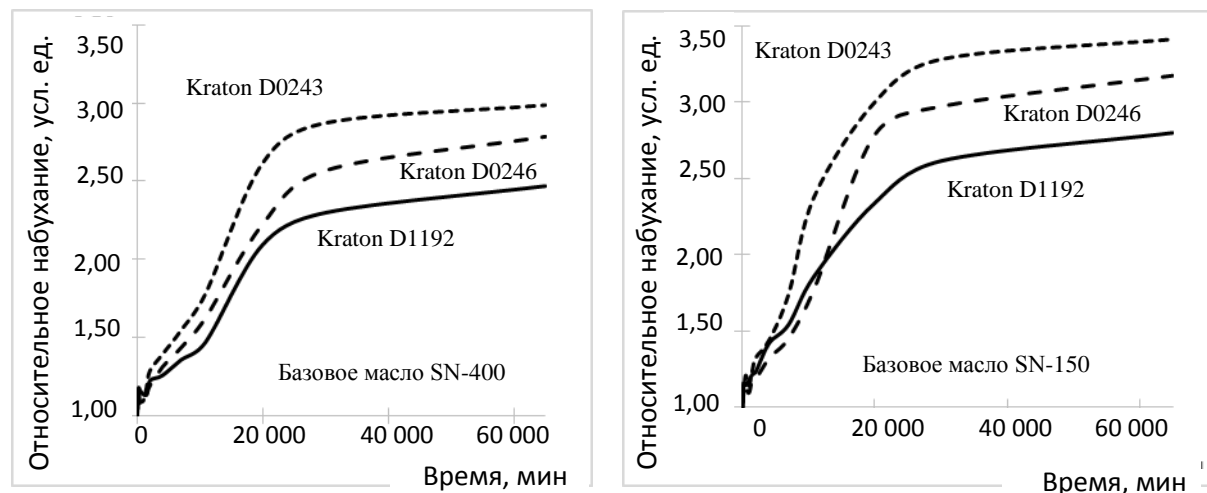


Рис. 4. Динамика набухания СБС-полимеров в базовых маслах

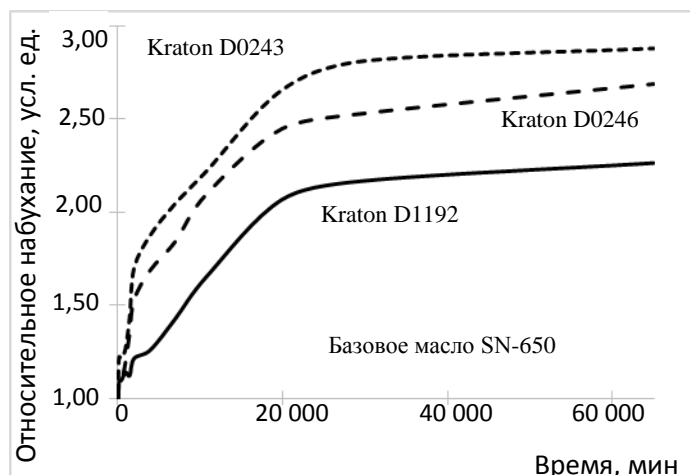


Рис. 4. Продолжение

В рассмотренных базовых маслах все использованные марки СБС-полимеров ведут себя аналогичным образом: в течение первых 10 тыс. мин наблюдается активное набухание гранул БС ТЭП, причем чем больше диблока содержала марка, тем выше ее степень набухания. Однако уже к 20 тыс. мин интенсивность увеличения объема гранул существенно уменьшалась и стабилизировалась к 45–50 сут наблюдений.

Таблица 4

Набухание СБС-полимеров в промышленных маслах И-20А/И-40А/И-50А

Время набухания, мин	Относительное изменение размера частицы полимера, усл. ед.			
	Kraton D0243	Kraton D0246	Kraton D1192	ДСТ Л 30-01
0	1,00/1,00/1,00	1,00/1,00/1,00	1,00/1,00/1,00	1,00/1,00/1,00
60	1,03/1,03/1,00	1,01/1,03/0,89	1,05/1,01/0,85	1,01/1,06/0,98
120	1,03/1,05/1,03	1,03/1,06/0,92	1,00/1,08/0,89	1,05/1,13/1,02
180	1,08/1,04/1,10	1,02/1,10/0,98	1,13/1,08/0,95	1,18/1,13/1,09
240	1,07/1,05/1,15	1,01/1,11/1,02	1,13/1,12/0,99	1,18/1,17/1,14
1 000	1,19/1,06/1,19	1,04/1,08/1,11	1,14/1,08/1,04	1,20/1,13/1,19
2 040	1,30/1,25/1,51	1,13/1,14/1,42	1,20/1,16/1,11	1,26/1,22/1,27
4 020	1,37/1,53/1,58	1,26/1,26/1,57	1,24/1,29/1,15	1,30/1,36/1,32
10 860	2,02/1,87/1,90	1,97/1,46/1,93	1,68/1,59/1,57	1,76/1,67/1,81
19 975	2,68/2,54/2,35	2,65/2,01/2,21	2,23/1,99/1,90	2,50/2,19/2,18
30 055	3,02/2,79/2,45	2,98/2,25/2,35	2,38/2,18/2,00	2,65/2,33/2,30
65 000	3,27/2,90/2,51	3,02/2,57/2,50	2,67/2,35/2,06	2,81/2,63/2,37

Данные табл. 4 подтверждают, что динамика изменения параметрических размеров частиц исследуемых полимеров в промышленных маслах (И-20А, И-40А, И-50А) аналогична показателям, полученным для рассматриваемых СБС-полимеров в базовых маслах (SN-150, SN-400, SN-650). При этом абсолютные значения для базовых

масел несколько выше, чем для индустриальных. Указанное обстоятельство позволяет сделать вывод о преобладающей эффективности базового масла SN-150 для обеспечения набухания БС ТЭП со средневесовой молекулярной массой до 85 тыс. усл. ед.

Тем не менее, учитывая, что процессы асфальтосмещения и укладки полимерасфальтобетонов проводятся при достаточно высоких температурах (порядка 160–180 °С), а летучесть как базовых, так и индустриальных масел с ростом температуры существенно возрастает (см. рис. 3), целесообразно рассматривать в качестве эффективных пластификаторов нефтяные масла марок SN-400 и И-40А. А для оперативной качественной оценки растворяющей способности нетоварных пластификаторов можно рекомендовать простой и доступный лабораторный рефрактометр ИРФ-22.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в представленной работе рассмотрены основные закономерности набухания бутadiен-стирольных термоэластопластов различного состава и строения в товарных нефтяных пластификаторах: базовых и индустриальных маслах. Разработанная опытная установка для непрерывного мониторинга процессов поверхностного взаимодействия СБС-полимеров и пластификаторов позволила зафиксировать процесс набухания в период 45–50 сут. Показано, что в качестве пластифицирующего агента для рассматриваемых в работе марок СБС-полимеров с технологической точки зрения предпочтительной является марка базового масла SN-150 (или индустриальное масло И-20А на его основе), а оптимальным по физико-химическим, реологическим и экономическим параметрам представляется базовое масло SN-400 (или индустриальное масло И-40А на его основе). При подборе компонентного состава ПБВ рекомендовано рассматривать лабораторный рефрактометр ИРФ-22 как средство для оперативной качественной оценки растворяющей способности товарных и нетоварных нефтяных пластификаторов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность ООО «РН-Смазочные материалы» и ООО «СИБУР» за предоставление образцов товарной продукции, использованных в ходе исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров Н.В. Нормирование свойств модифицированных битумов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. Т. 20. № 5. С. 198–203.
2. Гохман Л.М. Дорожный полимерасфальтобетон. М.: Экон-Информ, 2017. 477 с.
3. Обухова С.Ю., Королев Е.В., Гладких В.А. Влияние углеродного наномодификатора на процессы старения полимерно-модифицированных вяжущих. Часть I: Теоретическое исследование // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2023. № 4 (28). С. 6–14.
4. Гуреев А.А., Чернышева Е.А., Коновалов А.А., Кожевникова Ю.В. Производство нефтяных битумов. М.: Нефть и газ, 2007. 102 с.
5. Zuzhong Li, Huijie Liu, Weixi Chen, Yanping Yin, Mengyuan Li, Yuan Li, Zepeng Zhao. Influence of Residual SB Di-block in SBS on the Thermo-oxidative Aging Behaviors of SBS and SBS Modified Asphalt // *Materials and Structures*. 2022. Vol. 55. No. 23. URL: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-022-01882-3> (дата обращения: 25.06.2025).

6. Durrieu F., Farcas F., Mouillet V. The Influence of UV Aging of a Styrene/Butadiene/Styrene Modified Bitumen: Comparison between Laboratory and On-site Aging // *Fuel*. 2007. Vol. 86. No. 10–11. P. 1446–1451.
7. Дошлов О.И., Спешиллов Е.Г. Полимерно-битумное вяжущее – высокотехнологичная основа для асфальта нового поколения // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 6. С. 140–144.
8. Балабанов В.Б. Влияние пластификатора на свойства полимерно-битумных вяжущих // *Объединенный научный журнал*. 2006. № 2. С. 66–72.
9. Гохман Л.М. Теоретические основы строения битумов и других органических вяжущих материалов // *Химия и технология топлив и масел*. 1993. № 3. С. 25–28.
10. Гохман Л.М. Расчет состава полимерно-битумного вяжущего // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2008. № 4 (47). С. 33–34.
11. Гужов С.А., Санакулов А.Б., Лебедев В.В., Небрятенко Д.Ю. Эффективность применения полимерно-битумных вяжущих на объектах НП «БКАД» // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2021. № 12 (109). С. 60–68.
12. Берлин А.А., Никольский В.Г., Красоткина И.А., Дударева Т.В., Зверева У.Г., Гордеева И.В., Сорокин А.В., Рожков И.М., Харпаев А.В. Опыт применения стандартов Superpave // *Автомобильные дороги*. 2016. № 3 (1012). С. 73–80.
13. Братчун В.И., Загородняя А.В., Беспалов В.Л., Ромасюк Е.А. О комплексной модификации микроструктуры асфальтобетона дивинил-стирольным термоэластопластом // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. № 1 (141). С. 5–16.
14. Загородняя А.В. Методика исследования стабильности битумополимерных вяжущих при хранении // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2021. № 1 (147). С. 68–73.
15. ГОСТ EN 13399-2013. Битумы и битуминозные вяжущие. Определение стабильности модифицированных битумов при хранении. М.: Стандартинформ, 2014. 5 с.
16. Масло SN-150. URL: <https://tnh16.ru/storage/productions/October2023/obu90WzM9npF3OkTclIL.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
17. Масло SN-400. URL: <https://tnh16.ru/storage/productions/October2023/0aMBo9DaW73HkI622pvJ.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
18. Масло SN-650. URL: https://static.insales-cdn.com/files/1/7803/31260283/original/Техническое_описание_базового_масла_SN-650_Башнефть.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
19. Индустриальное масло И-20А. URL: <https://rosneft-lubricants.ru/products/i-20a.html#Масла%20индустриальные%20И%20предста> (дата обращения: 25.06.2025).
20. Индустриальное масло И-40А. URL: <https://rosneft-lubricants.ru/products/i-40a.html#Масла%20индустриальные%20И%20предста> (дата обращения: 25.06.2025).
21. Индустриальное масло И-50А. URL: <https://rosneft-lubricants.ru/products/i-50a.html#Масла%20индустриальные%20И%20предста> (дата обращения: 25.06.2025).
22. TDS_ДСТ_Л30-01. URL: https://shop.sibur.ru/catalog/termoelastoplasty_butadien_stirolnye/lineynaya_struktura/lineynaya_struktura_poroshok/dst_l_30_01_poroshok_gofrokonteyner_883805/ (дата обращения: 15.06.2025).
23. Technical Specification K0552 Europe for KRATONTM D0243 E Polymer. URL: <https://kraton.com/wp-content/uploads/2024/06/kratond0243e.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).

24. Technical Specification K0622 Europe for KRATON™ D0246 E Polymer. URL: <https://kraton.com/products/kraton-d/> (дата обращения: 15.07.2025).
25. Technical Specification K0523 Europe for KRATON™ D1192 E Polymer. URL: <https://sds.kraton.com/product-sds/shared-files/94711/KratonD1192E.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРОХИНА Яна Александровна – студентка, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1. E-mail: yana021200erokhina@gmail.com

ДУЖИЙ Павел Александрович – студент, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78. E-mail: bnmd00@yandex.ru

ПИЛИПЕНКО Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Российская Федерация, Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: pilipenko.ans@gmail.com

БЕЛЯКОВ Артем Юрьевич – студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Российская Федерация, Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: belakovv.artem@yandex.ru

ПАЩЕНКО Константин Петрович – кандидат химических наук, доцент кафедры химии, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1. E-mail: kpp@rambler.ru

КОТЕЖОВ Кирилл Сергеевич – студент, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127055, г. Москва, ул. Образцова, д. 9. E-mail: kirill_K@mail.ru

НЕБРАТЕНКО Дмитрий Юрьевич – доцент кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1; доцент кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; кандидат химических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, аэродромов, оснований и фундаментов, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127055, г. Москва, ул. Образцова, д. 9. E-mail: nebratenko@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Ерохина Я.А., Дужий П.А., Пилипенко А.С., Беляков А.Ю., Пашенко К.П., Котежов К.С., Небрatenко Д.Ю. Реологическое поведение СБС-полимеров в базовых пластификаторах и промышленных маслах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 81–93.

**RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SBS POLYMERS
IN BASE PLASTICIZERS AND INDUSTRIAL OILS**

*Ya.A. Erokhina¹, P.A. Duzhy², A.S. Pilipenko³, A.Yu. Belyakov³, K.P. Pashchenko⁴,
K.S. Kotezhov⁵, D.Yu. Nebratenko^{1,3,5}*

¹ *Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow)*

² *MIREA – Russian Technological University (Moscow)*

³ *National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)*

⁴ *Astrakhan State Technical University (Astrakhan)*

⁵ *Russian University of Transport (Moscow)*

Abstract. The constantly increasing load on highways and the increase in cargo capacity require improved performance of bitumen binders. The basis of such changes, which has a positive effect on a whole range of parameters of the final road surfaces, is the modification of traditional bitumen with SBS polymers. The paper considers the main patterns of swelling of styrene-butadiene thermoplastics of various compositions and structures in commercial and non-commercial petroleum and vegetable plasticizers, which make up from 30 to 60 % of the composition of mixed binders. To carry out the tests, a simple installation was developed to determine the change in the effective radius of the polymer particles under study in passing sunlight using rectangular cuvettes made of optical colorless glass K-8 manufactured by Hellma. The images were videotaped at room temperature and atmospheric pressure without stirring. The received data was processed in the AutoCAD, 3Ds Max system. Linear and radial grades of styrene butadiene thermoplastics of domestic and foreign production were considered as SBS polymers. The duration of observations did not exceed 45 days, because, regardless of the type of plasticizers used, during this period all brands of styrene-butadiene thermoplastics completely spontaneously dissolved, and their outer diameter was not recorded by optics with a video resolution of 1920 × 1080 pixels. At the same time, an analysis of the dynamics of swelling and subsequent dissolution of thermoplastics showed that light tallow oil, a wood processing product, has increased compatibility with SBS polymers with a double solubility parameter characterizing polybutadiene and polystyrene blocks in thermoplastics.

Keywords: SBS polymers, industrial and base oils, polymer swelling, petroleum road bitumen, polymer-bitumen binders.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

EROKHINA Yana Alexandrovna – Student, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russia. E-mail: yana021200erokhina@gmail.com

DUZHY Pavel Alexanrovich – Student, MIREA – Russian Technological University, 78, Vernadsky avenue, Moscow, 119454, Russia. E-mail: bnmd00@yandex.ru

PILIPENKO Anton Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: pilipenko.ans@gmail.com

BELYAKOV Artem Yurievich – Bachelor's Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering. 26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: belakovv.artem@yandex.ru

PASHCHENKO Konstantin Petrovich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry, Astrakhan State Technical University, 16/1, Tatishcheva street, Astrakhan, 414056, Russia. E-mail: kpp@rambler.ru

KOTEZHOV Kirill Sergeevich – Student, Russian University of Transport, 9, Obraztsova street 127055, Moscow, Russia. E-mail: kirill_K@mail.ru

NEBRATENKO Dmitry Yurievich – Associate Professor of the Department of Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russia; Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russia; Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways, Airfields, Bases and Foundations, Russian University of Transport, 9, Obraztsova street, 127055, Moscow, Russia. E-mail: nebratenko@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Erokhina Ya.A., Duzhy P.A., Pilipenko A.S., Belyakov A.Yu., Paschenko K.P., Kotov K.S., Nebratenko D.Yu. Rheological behavior of SBS polymers in base plasticizers and industrial oils // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26). pp. 81–93.

УДК 66.094.94, 577.114.4

ГИДРОЛИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНОГО ТВЕРДОГО КИСЛОТНОГО КАТАЛИЗАТОРА

*Л.Д. Панскова, Е.П. Гаврилова, О.В. Манаенков,
О.В. Кислица, М.Г. Сульман*

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Панскова Л.Д., Гаврилова Е.П., Манаенков О.В.,
Кислица О.В., Сульман М.Г., 2025

Аннотация. В статье рассмотрены полисахариды растений – одни из самых распространенных природных биополимеров, представляющих большой интерес в качестве сырья для получения востребованных моносахаридов: глюкозы, фруктозы, ксилозы. Наиболее перспективными и доступными полисахаридами являются целлюлоза, инулин и гемицеллюлоза, получаемые из растительной биомассы. Распространенным процессом переработки растительных полисахаридов до сахаров выступает кислотный гидролиз, в котором участвуют минеральные кислоты, однако их применение сопряжено с рядом существенных недостатков: коррозией оборудования, необходимостью утилизации и т.п. В связи с этим наиболее многообещающими представляются твердые кислотные катализаторы. Их использование существенно упрощает и универсализирует технологический процесс, позволяя применять его в более широком диапазоне реакций; в отличие от жидких, твердые катализаторы часто поддаются регенерации, что уменьшает

затраты на производство и количество отходов, а главное – значительно снижает коррозионную активность. Существуют такие типы твердых кислотных катализаторов, как цеолиты, гетерополикислоты, сульфированные оксиды металлов и органо-неорганические композиты. В этой области перспективными представляются твердые кислотные катализаторы на основе пористых органических полимеров. К их преимуществам относятся высокая плотность кислотных центров на поверхности, низкая коррозионная активность, устойчивость к химическим и термическим воздействиям, возможность функционализации, значительная площадь поверхности и невысокая стоимость, обусловленная относительной легкостью производства.

Ключевые слова: гидролиз, целлюлоза, инулин, ксилоза, сверхсшитый полистирол.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-93-103

ВВЕДЕНИЕ

Лигноцеллюлозная биомасса – самый богатый источник возобновляемого органического углерода на планете. Она широко используется в крупномасштабном производстве востребованных химических веществ. В основном лигноцеллюлозная биомасса состоит из трех макромолекулярных компонентов: целлюлозы (40–60 %), гемицеллюлозы (20–40 %) и лигнина (10–24 %) [1]. При катализируемом кислотой термическом гидролизе полимерные сахара деполимеризуются до своих мономерных форм. На рис. 1 показана схема конверсии полисахаридных компонентов лигноцеллюлозной биомассы в фурфурол и его производные [2].

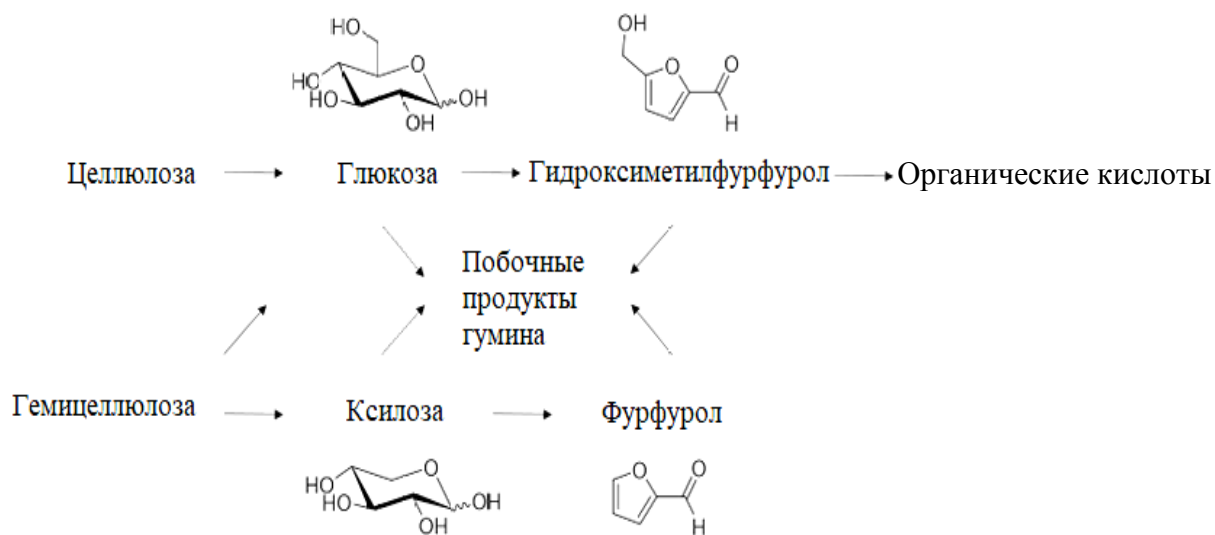


Рис. 1. Пути преобразования целлюлозы из гемицеллюлозы при кислотном гидролизе

Гемицеллюлозы состоят из мономера гексозы и пентозы, которые соединены между собой и могут быть разветвленными. Пентозы – это β -D-ксилоза и α -L-арабиноза, а гексозы – это β -D-манноза, β -D-глюкоза и β -D-галактоза. Некоторые гемицеллюлозы могут содержать уроновые кислоты, такие как 4-о-метил- β -D-глюкуроновая и галактуроновая кислоты, в боковых цепях [3]. Ксилан представляет значительный интерес из-за своего потенциала в производстве упаковочных пленок и покрытий для пищевых продуктов, а также из-за возможности его использования в биомедицинских продуктах [4].

Инулин – это простой растительный полисахарид, состоящий из семейства линейных $\beta(2\rightarrow1)$ полифруктофуранозил-D-глюкозных полимерных цепочек, в которых неразветвленная цепь колец фруктозы заканчивается одним глюкозным кольцом. Инулин используется в качестве запасного углевода растениями семейства Астровые, к которым относятся георгины, цикорий, артишоки, лук и чеснок [5]. В процессе кислотного или ферментативного разложения инулина образуются D-фруктоза и небольшое количество глюкозы. Промежуточные продукты распада инулина (инулоиды) не обладают восстановительными свойствами [6]. Инулин причисляют к фруктанам, которые представляют собой линейные либо разветвленные углеводы, полученные из сахарозы. Основываясь на структурных отличиях, выделяют три вида фруктанов: инулин (связь $\beta 2\rightarrow 1$), леван (связь $\beta 2\rightarrow 6$) и гримман (связи $\beta 2\rightarrow 1$ и $\beta 2\rightarrow 6$). Длина цепи растительных фруктанов, определяемая степенью полимеризации, – величина переменная [7].

Целлюлоза – это наиболее часто встречающийся в природе биополимер. Она является одним из главных составляющих элементов клеточных оболочек большинства растений. Целлюлоза представляет собой высокомолекулярный линейный полисахарид, включающий повторяющиеся остатки β -D-глюкозы, соединенные β -1,4-гликозидными связями [8].

Гидролиз всех перечисленных выше полисахаридов в промышленности осуществляется минеральными кислотами, которые обладают рядом существенных недостатков: высокой коррозионностью, трудностью отделения от продуктов реакции. С введением все более жестких экологических стандартов использование неорганических кислот становится менее привлекательным, и реальной альтернативой им могут стать твердые кислоты. Весьма перспективным является применение твердых кислотных катализаторов на основе пористых полимеров, в частности сверхсшитого полистирола.

Сверхсшитый полистирол (СПС) – это полимерная матрица, пористая структура которой самопроизвольно образуется в процессе синтеза. Благодаря высокой степени сверхсшивки (более 100 %) СПС сформирован из жестких полостей диаметром около 2–3 нм [9]. Сверхсшитый полистирол способен к набуханию в растворителях различной природы [10], что делает возможным включение органометаллических соединений в его пористую структуру [11]. Присутствие микро- и мезопор в матрице обуславливает наличие пространственных наноструктур, способствующих формированию металлсодержащих наночастиц активной фазы катализаторов [12]. К другим достоинствам СПС относятся его механическая прочность, химическая и термическая (до 400 °C) стабильность, развитая удельная площадь поверхности (порядка 1 000 м²/г).

В данной работе предложена методика гидролиза полисахаридов до соответствующих моносахаридов с применением сульфированного сверхсшитого полистирола.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе исследования в качестве исходного сырья был взят сверхсшитый полистирол MN270 (Purolite, UK), который не имеет функциональных групп. Кроме того, в процессе исследования использовались серная кислота (99,999 %, Sigma-Aldrich, USA), 1,2-дихлорэтан (99,8 %, Sigma-Aldrich, USA), этанол (95 %, Acros Organics, USA), инулин (≥ 90 %, Tokyo Chemical Industry, Япония), ксилан (90 %, Sigma-Aldrich, USA), микрокристаллическая целлюлоза (97 %, Sigma-Aldrich, USA).

Сульфированный СПС MN-270 получают по следующей методике. В круглодонную колбу помещают 0,5 г полимера и 5 мл 1,2-дихлорэтана. Смесь перемешивают в течение 1 ч при температуре 25 °С и скорости вращения мешалки 200 об/мин. Далее к смеси прибавляют 25 мл концентрированной серной кислоты и нагревают до 80 °С. Смесь выдерживают при этой температуре в течение 1 ч при интенсивном перемешивании (1 000 об/мин). Затем суспензию осторожно выливают в стакан, наполненный льдом (около 300 мл дистиллированной воды). Сульфированный полимер отделяют на бумажном фильтре в воронке Бюхнера и промывают большим количеством дистиллированной воды (около 1 л) и 95%-м этанолом. После этого полимер сушат в течение 24 ч при температуре 65 °С.

Гидролиз полисахаридов проводился в стальном реакторе высокого давления Part Instrument 4843 объемом 50 см³. В типичном эксперименте навеску полисахарида и катализатора помещают в колбу реактора, приливают 30 мл дистиллированной воды и герметизируют. Далее реактор 3–4 раза продувают азотом под давлением 5 бар, после чего включают нагрев и перемешивание в 100 об/мин. По достижении рабочей температуры обороты мешалки повышают до 600 об/мин, что является началом отсчета времени эксперимента. По окончании эксперимента реактор остужают и отделяют катализатор на бумажном фильтре. Количественное определение моносахаров осуществляли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе реакции сульфирования исходного СПС MN270 был получен образец твердого кислотного катализатора, обозначенный как SMN270-1Н. Процесс сульфирования занял 1 ч при температуре 80 °С. Полученный образец был исследован с помощью метода низкотемпературной адсорбции азота. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Описание пористости сульфированного полимера

Образец	$S_{БЭТ}$, м ² /г	S_L , м ² /г	S_t , м ² /г	V , см ³ /г
СПС MN270 исходный	1 236	1 380	347 ¹ ; 925 ² ; 1272 ³	0,41
SMN270-1Н	687	774	151 ¹ ; 536 ² ; 687 ³	0,24

Примечания: ¹ – удельная площадь поверхности по расчету модели t-график; ² – удельная площадь поверхности микропор; ³ – общая удельная площадь поверхности.

В ходе исследования были проанализированы два образца: исходный СПС марки MN270 и синтезированный СПС MN270-1Н. Результаты анализа представлены на рис. 2 и 3. Изотерма низкотемпературной адсорбции азота для исходного СПС MN270, согласно классификации ИЮПАК (Международного союза теоретической и прикладной химии), относится к типу I. Такие изотермы характерны для материалов с высокой микропористостью.

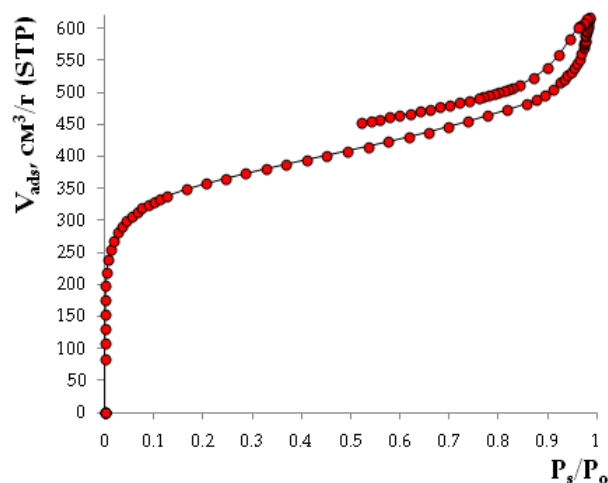


Рис. 2. Изотерма адсорбции
исходного СПС MN270

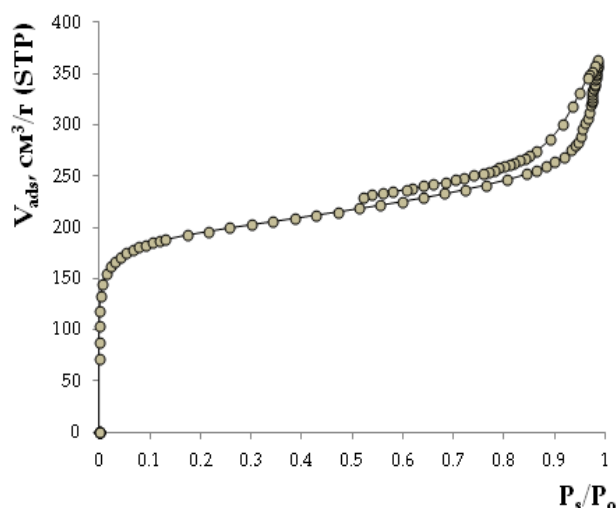


Рис. 3. Изотерма адсорбции
полученного SMN270-1Н

Термогравиметрический анализ сульфированного СПС показал, что SMN270 стабилен до 200–250 °С, тогда как исходный СПС MN270 разрушается при температурах выше 400 °С из-за десульфирования.

Было проведено исследование влияния температуры на процесс гидролиза гемицеллюлозы (ксилана) в диапазоне температур от 120 до 160 °С при времени реакции (τ) 1 ч. В результате установили оптимальное значение температуры для гидролиза ксилана. Было показано, что максимальная степень конверсии ксилана (100 %) достигается при температуре 150 °С, выход ксилозы при этом составляет 60,1 %. Зависимость выхода ксилозы от температуры представлена на рис. 4.

Повышение температуры до 160 °С привело к значительному уменьшению выхода ксилозы до 35,6 %, что может быть связано с процессами термической деструкции моносахарида. При понижении температуры до 140 и 130 °С выход ксилозы составил 17,7 и 8 % соответственно. Наименьший выход ксилозы, равный 4 %, был зафиксирован при температуре 120 °С, что, очевидно, связано с недостаточной глубиной гидролиза макромолекул исходного полисахарида и, соответственно, с преобладанием олигосахаридных продуктов гидролиза в реакционной массе.

Для оценки влияния времени на реакцию гидролиза ксилана было проведено пять опытов при постоянной температуре 140 °С. Время каждого опыта составляло 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 ч. В результате проведенных исследований было установлено, что максимальный выход ксилозы, составляющий 54,9 %, был достигнут за 2,5 ч. При этом выход ксилозы при продолжительности реакции 2 ч достиг уровня 53,3 %. Результаты исследования показаны на рис. 5.

При анализе на временных отрезках 0,5, 1 и 1,5 ч были зафиксированы следующие показатели выхода ксилозы: 11; 17,7 и 22,6 % соответственно. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что временной период меньше 2,5 ч является недостаточным для полного завершения процесса гидролиза и достижения максимального выхода целевого продукта.

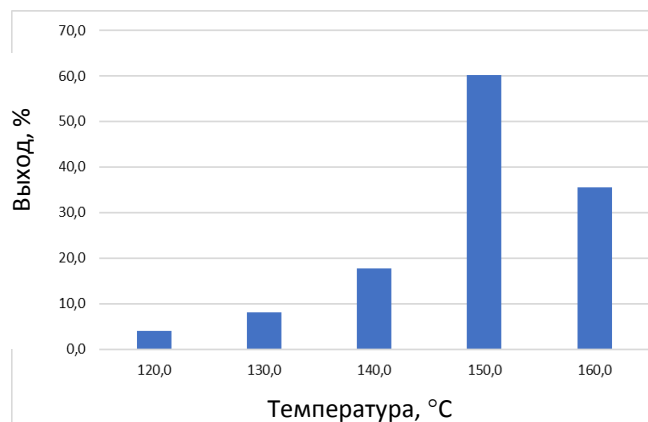


Рис. 4. Зависимость выхода ксилозы от температуры реакции ($\tau = 1$ ч)

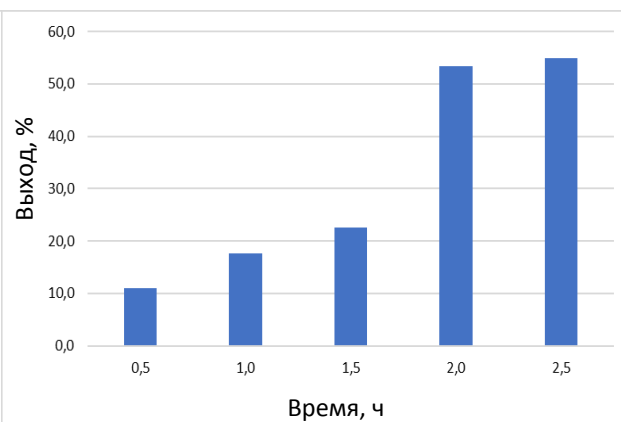
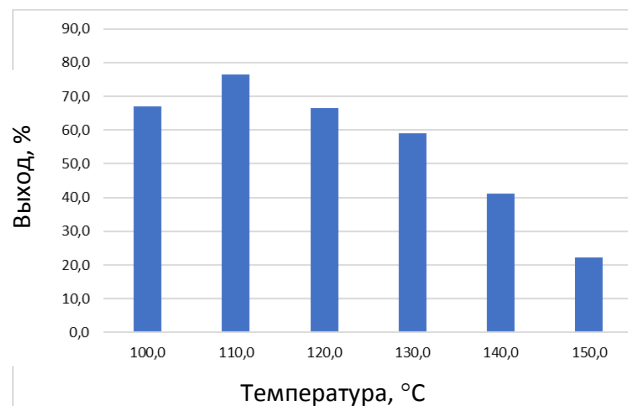
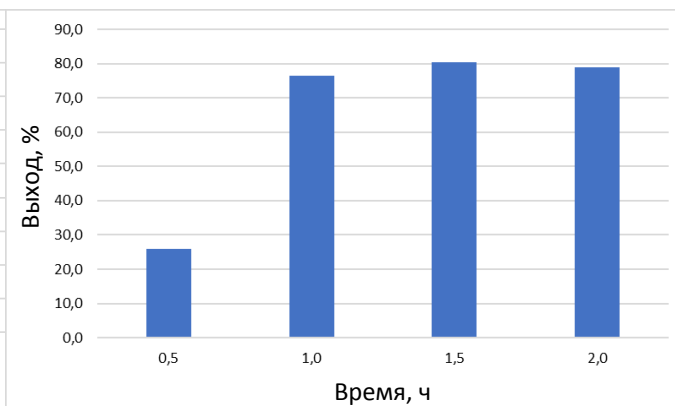


Рис. 5. Зависимость выхода ксилозы от времени реакции ($t = 140$ °С)

Другим исходным субстратом являлся инулин. Гидролиз инулина был осуществлен по вышеуказанной методике. Эксперименты проводились при температурах от 100 до 150 °С. Время каждого эксперимента составляло 1 ч.

Анализ полученных данных показал, что максимальный выход фруктозы был достигнут при температуре 110 °С, составив 76,4 %. Дальнейшее повышение температуры приводило к последовательному снижению выхода фруктозы: при 120 °С он составил 66,5 %, при 130 °С – 59,1 %, а при 140 °С – 41,1 %. При достижении температуры 150 °С выход фруктозы сократился до 22,3 %, а также наблюдалось образование растворов, окрашенных в желто-бурый цвет, что является индикатором начальной стадии карамелизации фруктозы. Зависимость выхода фруктозы от температуры представлена на рис. 6.

Для оценки зависимости выхода фруктозы при гидролизе инулина от времени реакции были проведены эксперименты на временных отрезках 0,5; 1; 1,5 и 2 ч с постоянной температурой 110 °С (рис. 7).

Рис. 6. Зависимость выхода фруктозы от температуры реакции ($\tau = 1$ ч)Рис. 7. Зависимость выхода фруктозы от времени реакции ($t = 110$ °C)

При максимальной длительности эксперимента, составляющей 1,5 ч, наблюдается наивысший процент выхода фруктозы, достигающий 80,3 %. С увеличением времени реакции до 2 ч отмечается незначительное снижение данного показателя до 79 %. В условиях продолжительности гидролиза 1 ч выход фруктозы составляет 76,4 %, что указывает на достижение значительной, но не совсем полной конверсии субстрата. При сокращении времени до 0,5 ч наблюдается значительно меньший выход фруктозы, составляющий 26 %.

В качестве исходного субстрата также подвергалась испытаниям целлюлоза. По вышеописанной методике было проведено три эксперимента по гидролизу целлюлозы при температурах 150, 170 и 190 °C. Время каждого опыта составило 3 ч.

При высоких температурах происходит термическая деструкция глюкозы. Целлюлоза же является устойчивым полимером, требующим применения экстремальных температурных условий для инициирования гидролитических процессов. При использовании микрокристаллической целлюлозы, не подвергнутой предварительной механической обработке перед гидролизом, были зафиксированы сравнительно низкие выходы глюкозы. Наибольший процент конверсии целлюлозы в глюкозу был достигнут при температуре 170 °C – 14,5 %. При температуре 150 °C выход глюкозы составил 6,3 %, а при 190 °C – 4,5 %. Все результаты представлены на рис. 8.

Снижение выхода глюкозы при указанных температурных условиях обусловлено сложной микрокристаллической структурой целлюлозы, которая существенно ограничивает проникновение гидролизующих агентов к полимерной матрице. Это явление связано с высокой степенью упорядоченности и плотной упаковкой молекул целлюлозы, что создает значительные препятствия для проникновения молекул воды и катализатора, необходимых при гидролизе гликозидных связей.

Для исследования процесса гидролиза целлюлозы с целью определения зависимости выхода глюкозы от продолжительности реакции провели три эксперимента при постоянной температуре 170 °C. Продолжительность каждого из опытов составляла 2, 2,5 и 3 ч соответственно. Анализ результатов показал, что максимальный выход глюкозы был достигнут при продолжительности реакции 2,5 ч и составил 14,9 %. Результаты представлены на рис. 9.

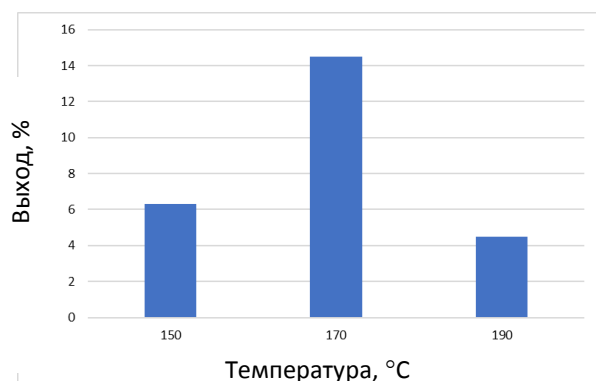


Рис. 8. Зависимость выхода глюкозы от температуры реакции ($\tau = 3$ ч)

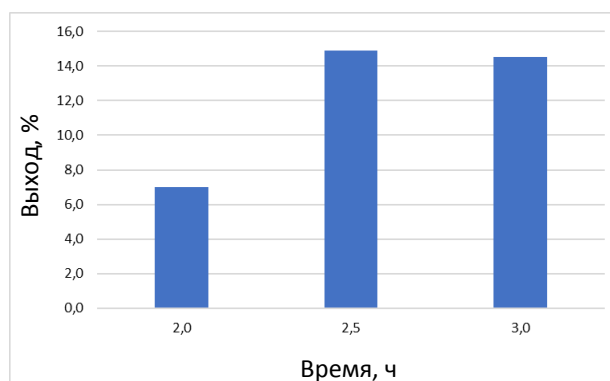


Рис. 9. Зависимость выхода глюкозы от времени реакции ($t = 170$ °C)

Сокращение времени реакции до 2 ч привело к значительному снижению выхода глюкозы до 7 %. Это снижение может быть объяснено особенностями молекулярной структуры целлюлозы, которая требует определенного времени для гидролиза моносахаридов. При увеличении продолжительности гидролиза с 2,5 до 3 ч выявлено незначительное отклонение в выходах продукта, которое составило 14,5 %.

В ходе исследования процесса гидролиза полисахаридов была проведена вариация соотношений субстрата и катализатора для нахождения оптимального соотношения, чтобы максимизировать выход продукта. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние соотношения «субстрат : катализатор» на выход продукта

Соотношение	Выход ксилозы, %	Выход фруктозы, %	Выход глюкозы, %
1 : 1	54,8	82,8	14,9
3 : 2	60,1	80,3	10,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании процессов гидролиза ксилана, инулина и целлюлозы с использованием твердого кислотного катализатора на основе сульфированного сверхсшитого полистирола были изучены зависимости выхода целевых продуктов от времени реакции, температуры и соотношения между субстратом и катализатором.

Оптимальными условиями для гидролиза ксилана оказались температура 150 °C и время реакции 2,5 ч. При таких условиях выход ксилозы составил 60,1 и 54,9 % соответственно.

Для инулина оптимальная температура составляет 110 °С, при ней выход фруктозы составил 76,4 %. Время реакции 1,5 ч обеспечило максимальный выход фруктозы – 80,3 %.

Оптимальная температура для целлюлозы оказалась равна 170 °С, но выход глюкозы был значительно ниже – всего 14,5 % при этой температуре и 14,9 % при времени реакции 2,5 ч. Это указывает на сложность гидролиза целлюлозы из-за особенностей ее микрокристаллической структуры.

Результаты экспериментов по гидролизу инулина с отработанным катализатором показали снижение выхода фруктозы почти в два раза, что, очевидно, связано с образованием гуминов на поверхности катализатора и, как следствие, блокировкой его активных кислотных центров.

Таким образом, согласно проведенному исследованию, катализатор SMN270-1H может стать эффективной заменой традиционных кислотных катализаторов (минеральных кислот) в процессах гидролиза компонентов растительной биомассы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (25-79-20018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Putro J.N., Soetaredjo F.E., Lin S.-Y., Ju Y.-H., Ismadji S. Pretreatment and Conversion of Lignocellulose Biomass into Valuable Chemicals // *RSC Advances*. 2016. Vol. 6. P. 46834–46852.
2. Beckendorff A., Lamp A., Kaltschmitt M. Optimization of Hydrolysis Conditions for Xylans and Straw Hydrolysates by HPLC Analysis // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. Vol. 13. P. 3361–3374.
3. Postma D. Chemical and Physical Modification of Wood Based Hemicelluloses for Use in the Pulp and Paper Industry. Cand. Diss. (Chemical Engineering). Stellenbosch, South Africa. 2012. 148 p.
4. Da Silva A.E., Marcelino H.R., Gomes M.C.S., Oliveira E.E., Jr Nagashima T., Egito E.S.T. Xylan, a Promising Hemicellulose for Pharmaceutical Use // *Products and Applications of Biopolymers* / Ed. C. Verbeek. London: IntechOpen Limited, 2012. P. 61–84.
5. Petrovsky N., Cooper P.D. AdvaxTM, a Novel Microcrystalline Polysaccharide Particle Engineered from Delta Inulin, Provides Robust Adjuvant Potency Together with Tolerability and Safety // *Vaccine*. 2015. Vol. 33. P. 5920–5926.
6. Сербаева Э.Р., Якупова А.Б., Магамусова Ю.Р., Фархутдинова К.А., Ахметова Г.Р., Кулуев Б.Р. Инулин: природные источники, особенности метаболизма в растениях и практическое применение // *Биомика*. 2020. Т. 12. № 1. С. 67–79.
7. Zeaiter Z., Regonesi M.E., Cavini S., Labra M., Sello G., Gennaro P. Extraction and Characterization of Inulin-Type Fructans from Artichoke Wastes and Their Effect on the Growth of Intestinal Bacteria Associated with Health // *BioMed Research International*. 2019. No. 2. P. 1–8.
8. Khandelwal M., Windle A. Hierarchical Organisation in the Most Abundant Biopolymer – Cellulose // *Mater. Res. Symp. Proc.* 2013. Vol. 1504. P. 1–6.
9. Пастухов А.В. Физико-химические свойства и структурная подвижность свёрхсшитых полистиролов: дис. ... д-ра хим. наук. М., 2009. 385 с.
10. Bronstein L.M. Nanoparticles in Nanostructured Polymers // *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* / Ed. H.S. Nalwa. 2004. Vol. 7. P. 193–206.

11. Davankov V.A. Structure and Properties of Hypercrosslinked Polystyrene // *Reactive Polymers*. 1990. Vol. 13. P. 27–42.
12. Sidorov S.N., Bronstein L.M., Davankov V.A., Tsyurupa M.P., Solodovnikov S.P., Valetsky P.M. Cobalt Nanoparticle Formation in the Pores of Hyper-Cross-Linked Polystyrene: Control of Nanoparticle Growth and Morphology // *Chemistry of Materials*. 1999. Vol. 11. P. 3210–3215.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАНСКОВА Любовь Дмитриевна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: panskova@gmail.com

ГАВРИЛОВА Евгения Павловна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ga.evgenya@yandex.ru

МАНАЕНКОВ Олег Викторович – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ovman@yandex.ru

КИСЛИЦА Ольга Витальевна – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kislitza@yandex.ru

СУЛЬМАН Михаил Геннадьевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: cience@science.tver.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Панскова Л.Д., Гаврилова Е.П., Манаенков О.В., Кислица О.В., Сульман М.Г. Гидролиз растительных полисахаридов с использованием полимерного твердого кислотного катализатора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 93–103.

HYDROLYSIS OF PLANT POLYSACCHARIDES USING A POLYMERIC SOLID ACID CATALYST

*L.D. Panskova, E.P. Gavrilova, O.V. Manaenkov,
O.V. Kislitsa, M.G. Sulman*
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article examines plant polysaccharides, some of the most common natural biopolymers, which are of great interest as raw materials for obtaining in-demand monosaccharides: glucose, fructose, and xylose. The most promising and readily available polysaccharides are cellulose, inulin, and hemicellulose, all derived from plant biomass. Acid

hydrolysis, which uses mineral acids, is a common process for converting plant polysaccharides into sugars. However, their use is associated with a number of significant drawbacks, including equipment corrosion, the need for disposal, and so on. Therefore, solid acid catalysts appear to be the most promising. Their use significantly simplifies and diversifies the process, allowing it to be applied to a wider range of reactions. Unlike liquid catalysts, solid catalysts are often regenerable, reducing production costs and waste, and, most importantly, significantly reducing corrosivity. Solid acid catalysts include zeolites, heteropoly acids, sulfonated metal oxides, and organo-inorganic composites. Solid acid catalysts based on porous organic polymers hold promise in this area. Their advantages include a high density of acid sites on the surface, low corrosion activity, resistance to chemical and thermal influences, the ability to be functionalized, a large surface area, and low cost due to their relative ease of production.

Keywords: hydrolysis, cellulose, inulin, xylose, hypercrosslinked polystyrene.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PANSKOVA Lyubov Dmitrievna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: panskoval@gmail.com

GAVRILOVA Evgeniya Pavlovna – Undergraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ga.evgenya@yandex.ru

MANAENKOV Oleg Viktorovich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ovman@yandex.ru

KISLITSA Olga Vitalievna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kislitza@yandex.ru

SULMAN Mikhail Gennadievich – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: cience@science.tver.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Panskova L.D., Gavrilova E.P., Manaenkov O.V., Kislitsa O.V., Sulman M.G. Hydrolysis of plant polysaccharides using a polymeric solid acid catalyst // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 93–103.

УДК 543.84.849

**ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ АНТОЦИАНОВ
ИЗ ПЛОДОВ ЧЕРНИКИ, ЖИМОЛОСТИ И АРОНИИ****Д.Ю. Цветков, А.И. Петрова, Н.В. Лакина,
В.Ю. Долуда, А.И. Сидоров***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В.,
Долуда В.Ю., Сидоров А.И., 2025

Аннотация. Работа посвящена исследованию фармацевтических свойств плодов черники, жимолости и аронии черноплодной, а также обзору существующих методов анализа данных плодов с акцентом на определение антоцианов. Методики биологического анализа, описанные в международных научных журналах и государственных фармакопеях, играют ключевую роль в исследовании. Содержание таких стандартов включает в себя информацию об их качественном и количественном составе, структуре, свойствах, стабильности, а также о влиянии различных факторов на эти характеристики. Исследования антоцианов имеют широкий спектр применения – от пищевой промышленности до медицины. Количественное определение общего содержания антоцианов спектрофотометрическим методом выявило значительные различия между исследованными видами ягод. Черника продемонстрировала наибольшее содержание антоцианов – 2,41 %, в то время как арония черноплодная содержала наименьшее их количество – 0,27 %.

Ключевые слова: антоцианы, полифенольные соединения, сосудоукрепляющее действие, экстракция, УФ-спектрофотометрия, цианидин-3-О-глюкозид, мальвидин, петунидин.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-104-112**ВВЕДЕНИЕ**

Антоцианы принадлежат к большой и широко распространенной группе веществ, называемых флавоноидами (или фенольными гликозидами). Антоцианы (от греч. anthos – цветок и kyanos – синий, лазоревый) являются самой крупной группой водорастворимых пигментов в царстве растений. Эти соединения окрашивают плоды, листья, лепестки в цвета от розового до черно-фиолетового [1].

Антоцианы представляют собой класс флавоноидов растительного происхождения, которые поступают в организм людей и животных вместе с употребляемой пищей. Именно эти соединения придают характерные темно-фиолетовые, синие и красные оттенки разнообразным плодам.

Антоцианы обладают рядом ценных биологических свойств:

1. Антиоксидантное действие. Они нейтрализуют свободные радикалы, предотвращая повреждение клеточных мембран, что благотворно сказывается на зрении.

2. Укрепление кровеносных сосудов. Антоцианы способствуют снижению хрупкости капилляров.

3. Использование в офтальмологии. Данные вещества улучшают структуру клеток и соединительной ткани, восстанавливают отток внутриглазной жидкости и приводят в норму внутриглазное давление.

4. Бактерицидный эффект. Антоцианы уничтожают широкий спектр вредных бактерий.

5. Применение для профилактики и лечения инфекций. Соединения повышают общую сопротивляемость организма болезням.

6. Воздействие на мозговую деятельность. Антоцианы обеспечивают защиту нейронов от повреждений, стимулируют синаптическую передачу и улучшают кровоснабжение мозга.

Людьми, склонным к аллергическим реакциям на ягоды, фрукты и овощи, следует проявлять особую осторожность при употреблении антоцианов. Перед началом приема биологически активных добавок рекомендуется консультация с врачом.

Изучение антоцианов является актуальной темой многочисленных исследований, представленных в литературных источниках, и эта актуальность обусловлена полезностью их свойств и широким спектром применения. Они используются как в фармацевтике (в качестве добавок), так и в пищевой индустрии (в виде безвредных красителей) [2, 3].

Среди антоциановых пигментов, встречающихся чаще всего в гликолизированной форме, цианидин-3-глюкозид является основным антоцианом, содержащимся в большинстве растений. Гликозиды этих веществ обладают высокой антиоксидантной активностью, обеспечивающей инактивацию свободных радикалов, а также антибактериальным эффектом [4].

Окрашенные антоциановые пигменты широко используются в фармацевтической, пищевой и косметической промышленности. В фармацевтической промышленности применение антоцианов не ограничивается только окрашиванием оболочек таблеток. Доступен ряд пероральных препаратов, содержащих антоцианы: пищевые добавки, укрепляющие зрение; препараты, поддерживающие людей с гипертонией и другими сердечно-сосудистыми проблемами; препараты от симптомов простуды и гриппа.

По причине широкого применения антоцианов в различных отраслях промышленности и в медицине возникает потребность в надежных качественных и количественных методиках определения их содержания в том или ином виде растительного сырья [5, 6].

Настоящая работа посвящена изучению способов экстракции и подбору наиболее эффективных методов количественного определения различных по химической структуре антоцианов из плодов черники обыкновенной (*Vaccinii myrtilli fructus*), жимолости (*Lonicera edulis*), аронии черноплодной (*Aroniae melanocarpae*).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка сырья и материалов

Процесс подготовки лекарственного растительного сырья (ЛРС), во время которого из высушенных плодов черники, жимолости и аронии черноплодной, приобретенных на маркетплейсах, получают экстракцию биологически активных веществ (БАВ), состоит из следующих этапов: около 50–60 г сырья измельчают до частиц, проходящих через сито с отверстиями 1 мм; измельченный материал просеивают через сито для отделения крупных частиц; из просеянного сырья отбирают точную навеску для дальнейшей работы.

Экстракцию проводили при помощи установки для экстракции антоцианов из ЛРС (рис. 1). Для приготовления исследуемого экстракта брали 1,0 г (точная навеска) измельченного сырья и добавляли 250 мл экстрагента (в качестве экстрагентов использовали дистиллированную воду, спирт этиловый 40, 75, 96 % и соляную кислоту 0,1, 0,2, 0,3 М). Раствор нагревали на плитке в течение 30 мин. Полученный раствор центрифугировали в течение 15 мин со скоростью 5 000 об/мин.

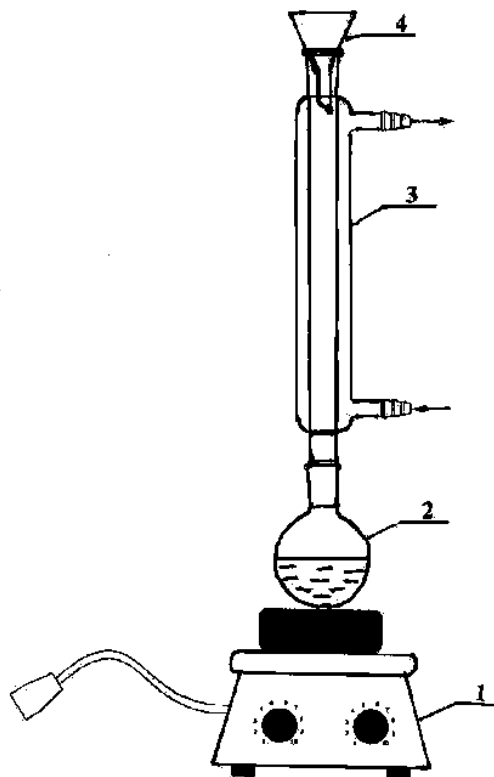


Рис. 1. Схема установки для экстракции антоцианов из плодов черники, ежевики и аронии черноплодной:
1 – нагревательный элемент (плитка электрическая);
2 – колба для экстрагирования;
3 – обратный холодильник;
4 – стеклянная воронка для загрузки образцов ягод

**Стадии количественного анализа антоцианов,
полученных с помощью спиртовой и водной экстракции**

Полученные образцы экстрактов фильтровали с помощью водоструйного насоса, необходимую аликвоту отбирали и проводили спектрофотометрию в ультрафиолетовой области (УФ-спектрофотометрию) в интервале длин волн 250–257 нм.

**Метод определения антоцианов в ЛРС
методом инфракрасной спектrophотометрии (ИК-спектrophотометрии)**

Для определения полифенолов методом ИК-спектrophотометрии получали экстракты из лекарственного растительного сырья: сушеной черники, жимолости и аронии черноплодной. В качестве экстрагента использовался этиловый спирт с концентрацией 96 %, подкисленный соляной кислотой. В нем отлично растворяются исследуемые антоцианы.

Полученные экстракты доводили до определенного значения pH, чтобы не испортить оборудование, и исследовали на ИК-Фурье-спектrophотометре в кювете наружного отражения в диапазоне от 600 до 4 000 см⁻¹, так как в данной области для экстрактов из лекарственного растительного сырья на полученном графике не будет шума, препятствующего исследованию пиков определенных веществ. Полученные графики подвергаются расшифровке с помощью встроенной библиотеки данных и справочника по ИК-спектrophотометрии.

Метод определения антоцианов в ЛРС методом УФ-спектrophотометрии

УФ-спектrophотометрия проводилась на основании ФС.2.5.0050.15 «Черники обыкновенной плоды», ФС.2.5.0003.15 «Аронии черноплодной сухие плоды» и ОФС.1.2.1.1.0003.15 «Спектrophотометрия в УФ и видимой областях» [15–17]. Для этого были использованы растворы различных концентраций соляной кислоты (0,1; 0,2; 0,3 М) и этилового спирта (40, 75, 90 %), подкисленного соляной кислотой, а также дистиллированная вода.

Приготовление экстракта состоит из следующих этапов. Аналитическую пробу сырья измельчают до величины частиц, проходящих сквозь сито с отверстиями размером 3 мм. Около 1 г (точная навеска) измельченного сырья помещают в круглодонную колбу со шлифом вместимостью 250 мл и прибавляют 30 мл растворителя. Колбу закрывают пробкой и взвешивают с точностью до ±0,01 г, затем присоединяют к обратному холодильнику и нагревают на кипящей водяной бане в течение 30 мин, затем охлаждают до комнатной температуры. Извлечение фильтруют через бумажный фильтр.

Приготовление раствора экстракта происходит так: 1 мл раствора помещают в мерную колбу вместимостью 25 мл, доводят объем раствора кислотой до метки и перемешивают.

Оптическую плотность приготовленных растворов измеряли с использованием спектrophотометра UV5Bio.

Содержание антоцианов в пересчете на цианидин-3-О-глюкозид находят по формуле

$$X = \frac{A \times 50 \times 25 \times 100}{600 \times a \times 1 \times (100 - W)},$$

где X – содержание антоцианов, %; A – оптическая плотность испытуемого раствора; a – навеска ЛРС; 600 – удельный показатель поглощения цианидин-3-О-глюкозида; W – влажность сырья, %.

Влажность сырья устанавливается в соответствии с ОФС.1.5.3.0007.15 «Определение влажности лекарственного растительного сырья».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 представлен ИК-спектр спиртового экстракта плодов черники с характерными полосами поглощения для цианидин-3-О-глюкозида.

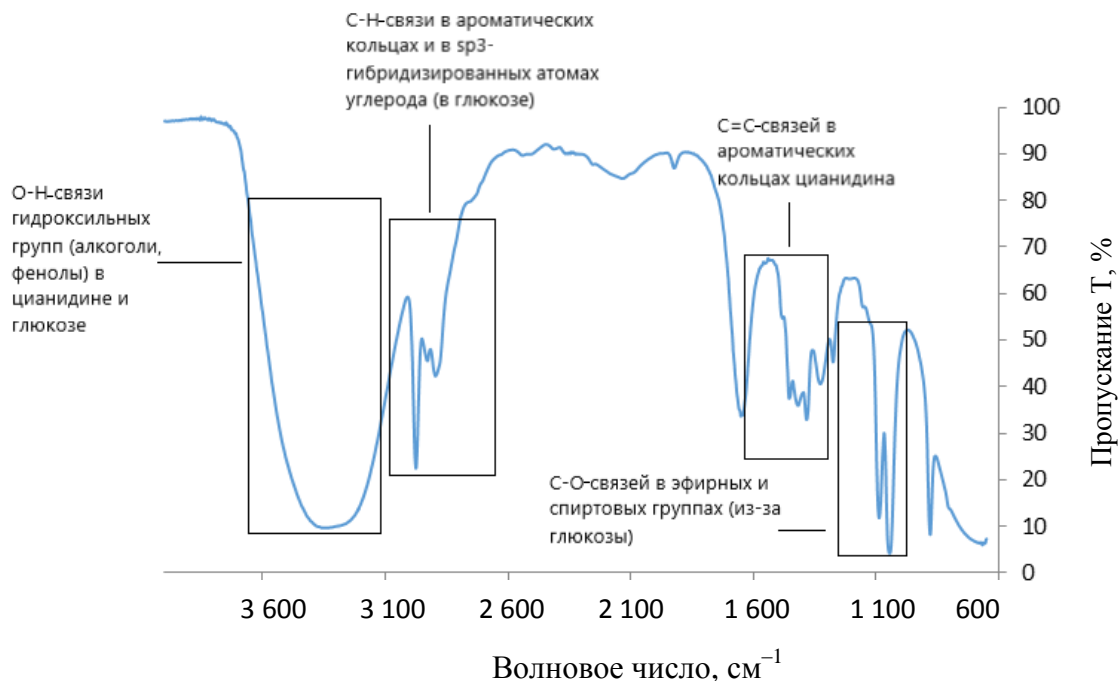


Рис. 2. Инфракрасный спектр спиртового экстракта плодов черники

Анализ ИК-спектров в диапазоне $4000\text{--}650\text{ см}^{-1}$ выявил характерные пики в области $2000\text{--}1380\text{ см}^{-1}$. Пик при 1638 см^{-1} указывает на двойную связь кислородного цикла, сопряженную с бензольным ядром, подтверждая наличие бензольного кольца, о чем свидетельствуют и другие пики в этом диапазоне. Наблюдались также характерные для антоцианов полосы поглощения средней или высокой интенсивности около 1580 см^{-1} и 1520 см^{-1} соответственно, а полоса при 1464 см^{-1} соответствует метильным группам мальвидина. Почти у всех антоцианов присутствует полоса поглощения около 1650 см^{-1} , которая характеризуется наличием двойной связи в бензольном ядре.

Общее сходство показали ИК-спектры экстрактов из разных сортов ягод, но при этом они различались по интенсивности полос и площадей под кривыми, что является уникальным признаком для каждого сорта. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о наличии разных гликозидных остатков в ЛСР: глюкозиды – в чернике; диглюкозиды – в жимолости; галактозиды – в аронии черноплодной.

Сравнительная характеристика количественного содержания антоцианов в кислотных экстрактах плодов черники, жимолости и аронии черноплодной представлена на рис. 3.

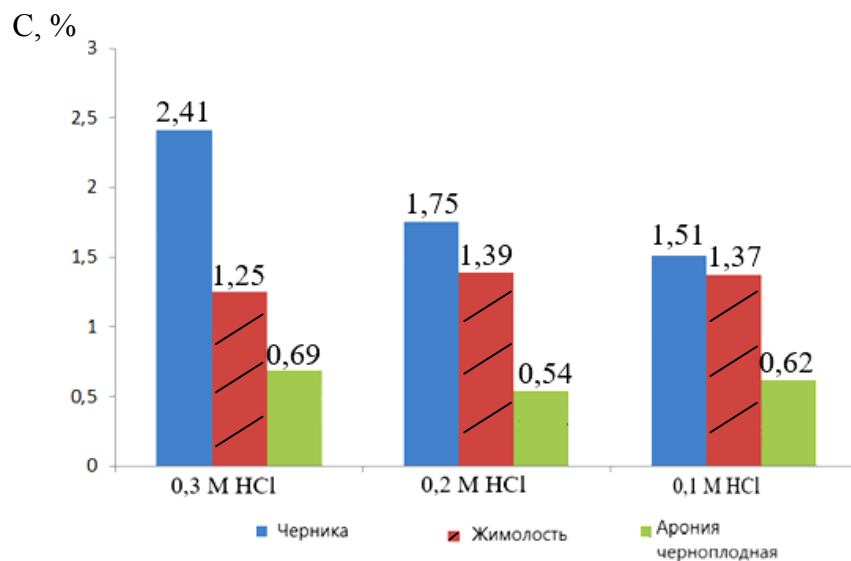


Рис. 3. Сравнительная характеристика количественного содержания антоцианов в кислотных экстрактах плодов черники, жимолости и аронии черноплодной

Из рис. 3 видно, что суммарное содержание антоцианов в спиртовых экстракциях плодов черники гораздо больше, чем в плодах аронии черноплодной. При экстрагировании плодов жимолости различными концентрациями этилового спирта суммарное содержание антоцианов практически не изменилось.

В плодах черники содержание антоцианов достаточно велико. Например, дельфинидин присутствует в форме дельфинидин-3-О-галактозида, который (благодаря своим противовоспалительным свойствам) эффективен в облегчении симптомов, связанных с ревматоидным артритом, а петунидин – в форме петунидин-3-О-арабинозида, который оказывает благоприятное воздействие на регенерацию родопсина, увеличивает светочувствительность сетчатки в различных условиях освещения и улучшает остроту зрения при низкой освещенности. Мальвидин же может содержаться в форме мальвидин-3-О-галактозида, демонстрирующего потенциальную терапевтическую ценность в лечении заболеваний желудочно-кишечного тракта естественного происхождения. Как и другие антоцианы, пеонидин присутствует в различных формах гликозидов, например, в форме пеонидин-3-О-галактозида, который улучшает структурную целостность сосудов, влияя на метаболизм коллагена (основного компонента сосудистой стенки).

Однако УФ-спектры спиртовых экстрактов аронии и жимолости содержат порядка 0,45 и 1 % антоцианов в форме пеоницина, и по фармакологическим свойствам такой антоциан обладает антиоксидантной активностью, нейтрализуя свободнорадикальные формы кислорода и предотвращая их негативное воздействие на ткани и органы. Кроме того, плоды богаты различными гликозидами цианидина (например, цианидин-3-О-ксилозидом, который обладает антиоксидантными свойствами, нейтрализуя свободные радикалы, и оказывает антиканцерогенное действие). Большинство гликозидов цианидина поддерживают здоровье сердечно-сосудистой системы, улучшая кровоток и снижая артериальное давление, а также оказывают нейропротекторное действие, защищая клетки мозга от повреждений и улучшая когнитивные функции.

Аналогичное содержание гликозидов присутствует в плодах жимолости. Основным антоцианом является цианидин-3,5-дигликозид, который обладает высокой антиоксидантной и противовоспалительной активностью. Пеларгонидин обнаружен в плодах жимолости в форме пеларгонидин-3-О-гликозида, который помогает в регуляции уровня сахара в крови.

Таким образом, при выполнении экстракций с использованием различных растворителей были получены следующие данные.

Наибольшее количество антоцианов из черники выделилось при экстрагировании 70 % C_2H_5OH подкисленного 0,1МНСI – порядка 2,41 %, а наименьшее – при экстрагировании водой.

При экстрагировании жимолости 96 % C_2H_5OH подкисленного 0,1МНСI выделилось наибольшее количество антоцианов – порядка 1,40 %, а наименьшее – при экстрагировании водой.

При экстрагировании черноплодной рябины 96 % C_2H_5OH подкисленного 0,1МНСI выделилось наибольшее количество антоцианов – порядка 1,19 %, а наименьшее – при экстрагировании водой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования антоцианов, обладающих широким спектром биологической активности, в последние годы приобретают все большее значение не только с научной, но и с экономической точки зрения. Интерес к антоцианам обусловлен их потенциальным применением в различных отраслях, включая пищевую промышленность, фармацевтику, косметику и сельское хозяйство.

С экономической точки зрения антоцианы представляют собой перспективный рынок с растущим спросом. Потребители все больше ориентируются на здоровый образ жизни и продукты с добавленной ценностью, что стимулирует спрос на натуральные красители и антиоксиданты, которыми и являются антоцианы.

Наращивание объемов производства и переработки антоциансодержащего сырья, разработка новых технологий экстракции и стабилизации, а также расширение спектра применения антоцианов требуют значительных инвестиций. При этом потенциальная экономическая выгода от коммерциализации продуктов на основе антоцианов может быть весьма существенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаревич А.М., Шутова А.Г., Спиридович Е.В., Решетников В.Н. Функции и свойства антоцианов растительного сырья // *Труды Белорусского Государственного Университета. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*. 2009. Т. 4. № 2. С.147–157.
2. Mazza G., Miniati E. Anthocyanins in Fruits, Vegetables and Grains. Boca Raton: CRC Press, 1993. 384 p.
3. He J., Giusti M.M. Anthocyanins: Natural Colorants with Health-promoting Properties // *Annual Review of Food Science and Technology*. 2010. Vol. 1. No 1. P. 163–187.
4. Дейнека Л.А., Шапошников А.А., Дейнека В.И., Сорокопудов В.Н. Антоцианы: природные антиоксиданты и не только // *Научные ведомости БелГУ. Сер. Медицина. Фармация*. 2006. № 2 (22). Вып. 4. С. 92–100.

5. Lila M.A. Anthocyanins and Human Health: An In Vitro Investigative Approach // *Journal of Biomed Biotechnol.* 2004. No. 2004 (5). P. 306–313.
6. Куркин В.А., Рязанова Т.К. Новые подходы в области стандартизации сырья и препаратов черники обыкновенной // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2011. Т. 13. № 1 (8). С. 167–173.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЦВЕТКОВ Дмитрий Юрьевич – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: dm.cwetkow@mail.ru

ПЕТРОВА Арина Игоревна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: arinapetrova989@gmail.com

ЛАКИНА Наталия Валерьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: lakina@yandex.ru

ДОЛУДА Валентин Юрьевич – доктор химических наук, заведующий кафедрой химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: doludav@yandex.ru

СИДОРОВ Александр Иванович – кандидат химических наук, профессор кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sidorov_science@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И. Изучение методов выделения антоцианов из плодов черники, жимолости и аронии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 104–112.

STUDYING METHODS OF ANTIOCYANIN EXTRACTION FROM BLUEBERRY, HONEYSUCKLE AND ARONIA FRUITS

*D.Yu. Tsvetkov, A.I. Petrova, N.V. Lakina,
V.Yu. Doluda, A.I. Sidorov
Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. This work is devoted to the study of pharmaceutical properties of blueberry, honeysuckle and aronia fruits, as well as a review of existing methods of analyzing these fruits, with an emphasis on the determination of anthocyanins. The methods of biological analysis described in international scientific journals and state pharmacopoeias thus play a key role in this study. The content of such standards includes information about their qualitative and quantitative composition, structure, properties, stability, as well as the influence of various factors on these characteristics. Anthocyanin research has a wide range of applications, from the food industry to

medicine. Quantitative determination of the total anthocyanin content by the spectrophotometric method revealed significant differences between the studied berry species. Blueberries showed the highest anthocyanin content of 2,41 %, while aronia aronia contained the lowest amount of anthocyanins of 0,27 %.

Keywords: anthocyanins, polyphenolic compounds, vasoconstrictor effect, extraction, UV spectrophotometry, cyanidine-3-O-glucoside, malvidin, petunidin.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TSVETKOV Dmitry Yurievich – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dm.cwetkow@mail.ru

PETROVA Arina Igorevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: arinapetrova989@gmail.com

LAKINA Natalia Valeryevna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: lakina@yandex.ru

DOLUDA Valentin Yuryevich – Doctor of Chemistry, Head of the Department of Polymer Chemistry and Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

SIDOROV Alexander Ivanovich – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sidorov_science@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Tsvetkov D.Yu., Petrova A.I., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sidorov A.I. Studying methods of antiocyanin extraction from blueberry, honeysuckle and aronia fruits // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 104–112.

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

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Адрес редакции: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22

Тел. редакции: +7 (4822) 78-89-00. **E-mail:** common@tstu.tver.ru

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 Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь

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

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

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

Колесников А.С. – к.т.н., профессор Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, г. Чимкент, Республика Казахстан

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, г. Бейрут, 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

Севостьянов А.А. – к.т.н., доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

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

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

Федюк Р.С. – д.т.н., доцент Дальневосточного федерального университета

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 (26), 2025

Редактор Е.Г. Подгорная
Корректор С.В. Борисов

Подписано в печать 01.12.2025

Дата выхода в свет 29.12.2025

Формат 60 x 84 1/8

Физ. печ. л. 14,25

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 13,25

Заказ № 51174

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 12,40

С – 114

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22
Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»
170034, Тверь, пр. Чайковского, д. 9, офис 514