

Журнал «Научное обозрение. Технические науки» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-57440 ISSN 2500-0799

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,695
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,319

*Учредитель, издатель и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,*

*Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47
Адрес учредителя: 410056, г. Саратов,
ул. им. Чапаева В.И., д. 56
Адрес редакции: 410035, г. Саратов,
ул. Мамонтовой, д. 5*

**Founder, publisher and edition:
LLC SPC Academy of Natural History,**

Post address: 105037, Moscow, p.o. box 47
Founder's address: 410056, Saratov,
56 Chapaev V.I. str.
Editorial address: 410035, Saratov,
5 Mamontovoi str.

*Подписано в печать 29.12.2023
Дата выхода номера 31.01.2024
Формат 60×90 1/8*

*Типография
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5*

Signed in print 29.12.2023
Release date 31.01.2024
Format 60×90 8.1

Typography
LLC SPC «Academy Of Natural History»
410035, Saratov, 5 Mamontovoi str.

*Технический редактор Доронкина Е.Н.
Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.*

*Распространяется по свободной цене
Тираж 1000 экз. Заказ НО 2023/5
Подписной индекс в электронном каталоге
«Почта России»: ПА518
© ООО НИЦ «Академия Естествознания»*

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.



М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

**С 2014 года издание журнала возобновлено
Академией Естествознания**

**From 2014 edition of the journal resumed
by Academy of Natural History**

Главный редактор: М.Ю. Ледванов
Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov

Редакционная коллегия (Editorial Board)
А.Н. Курзанов (A.N. Kurzanov)
Н.Ю. Стукова (N.Yu. Stukova)
М.Н. Бизенкова (M.N. Bizenkova)
Н.Е. Старчикова (N.E. Starchikova)
Т.В. Шнуровозова (T.V. Shnurovovozova)

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

www.science-education.ru

2023 г.



***В журнале представлены научные обзоры,
статьи проблемного
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,
problem and practical scientific articles***

СОДЕРЖАНИЕ

Технические науки

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРМЕНТИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

Бурак Л.Ч. 5

СТАТЬИ

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТОНКОГО ЗАРЯЖЕННОГО СТЕРЖНЯ

Глуценко А.Г., Шатрова Е.А. 14

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОЗОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И СТИМУЛЯЦИИ ПОСЕВНОГО МАТЕРИАЛА

Вендин С.В., Мануйленко А.Н., Страхов В.Ю., Сухоруков И.Ю. 20

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ В МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Сергеева Е.А. 26

БЕЗОПАСНАЯ РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Тарасова Ю.А. 31

CONTENTS

Technical sciences

REVIEW

USE OF MODERN TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF FERMENTED PRODUCTS

Burak L.Ch. 5

ARTICLES

CALCULATION OF THE ELECTROSTATIC FIELD OF A THIN CHARGED ROD

Gluschenko A.G., Shatrova E.A. 14

DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC OZONATION SYSTEM FOR DISINFECTION AND STIMULATION OF SEED MATERIAL

Vendin S.V., Manuylenko A.N., Strakhov V.Yu., Sukhorukov I.Yu. 20

JUSTIFICATION OF THE RATIONALITY OF USE OF COMPOSITE REINFORCEMENT IN LOW-RISE CONSTRUCTION

Sergeeva E.A. 26

SECURE SOFTWARE DEVELOPMENT

Tarasova Yu.A. 31

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 663.9

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРМЕНТИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ****Бурак Л.Ч.***ООО «Белросаква», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com*

Ферментация является одним из наиболее широко используемых методов консервирования пищевых продуктов и разработки натуральных продуктов с функциональными свойствами. Ферментированные продукты и напитки привлекательны для потребителей, предпочитающих здоровый образ жизни, поскольку они воспринимаются как естественные и потенциальные источники функциональных соединений. Цель статьи – обзор научных исследований о применении новых технологий в качестве процесса вспомогательной ферментации для разработки ферментированных напитков. Научно-технические достижения в области пищевых исследований сыграли решающую роль в эволюции ферментации: от использования и выбора конкретных заквасок до улучшения их характеристик за счет применения новых технологий, получения продуктов с высокими органолептическими показателями и пищевой ценностью. Было установлено, что омический нагрев, высокое гидростатическое давление, ультразвук и импульсное электрическое поле обладают потенциалом в качестве процессов вспомогательной ферментации, способных ускорять микробный метаболизм, улучшать жизнеспособность клеток, сокращать время обработки, увеличивать срок годности продукта и улучшить функциональные и питательные характеристики напитка. Вместе с тем необходимо вести дальнейшие исследования механизмов действия каждой технологии, влияющей на процесс ферментации различных видов пищевого сырья с целью выбора оптимальных параметров обработки, снижения энергопотребления и вредного воздействия на окружающую среду с сохранением пищевой ценности сброженных напитков.

Ключевые слова: ферментация, напитки, ультразвук, импульсное электрическое поле, омический нагрев, высокое гидростатическое давление

**USE OF MODERN TECHNOLOGIES
IN THE PRODUCTION OF FERMENTED PRODUCTS****Burak L.Ch.***LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com*

Fermentation is one of the most widely used methods for food preservation and development of natural products with functional properties. Fermented foods and beverages are attractive to health-conscious consumers because they are perceived as natural and potential sources of functional compounds. The purpose of the article is to review scientific research on the application of new technologies as an assisted fermentation process for the development of fermented beverages. Scientific and technological advances in food research have played a decisive role in the evolution of fermentation: from the use and selection of specific starter cultures to improving their characteristics through the use of new technologies, producing products with high sensory characteristics and nutritional value. Ohmic heating, high hydrostatic pressure, ultrasound and pulsed electric field have been found to have potential as assisted fermentation processes that can accelerate microbial metabolism, improve cell viability, reduce processing time, increase product shelf life and improve the functional and nutritional characteristics of the beverage. At the same time, it is necessary to conduct further research into the mechanisms of action of each technology that affects the fermentation process of various types of food raw materials in order to select optimal processing parameters, reduce energy consumption and harmful effects on the environment while maintaining the nutritional value of fermented drinks.

Keywords: fermentation, drinks, ultrasound, pulsed electric field, ohmic heating, high hydrostatic pressure

Ферментация – одна из старейших и наиболее широко применяемых технологий консервирования пищевых продуктов. В ее основе лежит биологическая активность микроорганизмов, преобразующих вкус и внешний вид пищевых продуктов, увеличивающих срок их хранения. Знания об этой технологии, накопленные за прошедшие годы, а также технологические и научные достижения позволили значительно усовершенствовать процесс, превратив местное производство ферментированных продуктов питания в крупномасштабные контролируемые процессы ферментации [1].

Процесс ферментации можно описать как окисление углеводов в различные продукты, такие как органические кислоты,

спирт и углекислый газ, посредством химических реакций, проводимых в определенных условиях микроорганизмами, которые либо присутствуют в естественной среде, либо добавляются намеренно [2, 3]. В зависимости от основного конечного продукта его подразделяют на спиртовое, молочно-кислое, масляное, пропионовое или искусственное брожение [4]. Конечные метаболиты ферментации могут обладать антимикробной активностью или свойствами, способствующими укреплению здоровья, такими как антигипертензивное действие, усиление системного иммунитета и здоровья желудочно-кишечного тракта, снижение уровня холестерина и артериального давления [5]. В результате срок хранения продуктов

увеличивается, а в некоторых случаях ферментированные продукты становятся более усвояемыми, что повышает их питательные и функциональные качества. Кроме того, участие микроорганизмов в процессе ферментации приводит к значительным изменениям вкуса, аромата и текстуры, которые определяют уникальные характеристики ферментированных продуктов. С этой целью в реакциях ферментации могут участвовать различные микроорганизмы, такие как *LAB*, дрожжи, уксуснокислые бактерии и грибы [6].

В настоящее время стартовые культуры со специфическими микроорганизмами обычно используются на промышленном уровне для улучшения процесса ферментации и получения желаемых конечных продуктов, таких как вкусовые и ароматические соединения, а также витамины, антиоксиданты и биоактивные пептиды [7]. Кроме того, использование заквасок может способствовать ингибированию микроорганизмов порчи и патогенных бактерий в пищевом продукте за счет образования повышенного содержания кислот, антимикробных пептидов и ингибирующих белков [6]. Следовательно, правильный выбор заквасок очень важен для снижения риска неудачной ферментации, одновременно улучшая безопасность, стабильность, физико-химические и органолептические показатели а также функциональность конечного продукта.

Кроме правильного выбора микроорганизмов, оптимизация условий обработки и обеспечение биодоступности питательных веществ для оптимального роста микробов также являются важными аспектами для получения высококачественных, безопасных и стабильных ферментированных продуктов. В связи с этим в течение последних десятилетий исследователи находятся в постоянном поиске альтернатив обработки, которые отвечают этим требованиям и, кроме того, сокращают потребление энергии и время обработки, такие как высокое гидростатическое давление, ультразвук, импульсные электрические поля и омический нагрев. Поэтому цель данной статьи – обзор научных исследований о применении новых технологий в качестве процесса вспомогательной ферментации для разработки ферментированных напитков.

1. Производство ферментированных напитков

Напитки брожения получают в основном из молока, а также злаков, фруктов, овощей или чайных листьев, сброженных различными микроорганизмами. Следует отметить, что распространенность ал-

лергии на белки коровьего молока, непереносимость лактозы и глютеина, а также популярные тенденции к веганскому и вегетарианскому питанию способствовали ускоренному развитию напитков брожения из растительного сырья без глютеина. Как правило, напитки брожения получают действием дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в различных субстратах, поскольку они являются основным микроорганизмом, ответственным за спиртовое брожение [8, 9]. Пиво – наиболее распространенный напиток, и добавление в него различных веществ, которые обладают функциональными свойствами (травы, пробиотики и др.), или удаление из него алкоголя, глютеина или углеводов может привести к желаемому, оптимально индивидуальному напитку, который понравится каждому. Его обычно производят путем экстрагирования сырья из солода и последующего брожения дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* в течение примерно 7–14 дней [10]. Вино также традиционно изготавливается из ферментированного винограда различными видами и штаммами дрожжей, которые взаимодействуют между собой, в результате чего получаются вина с разными качественными характеристиками, при этом *S. cerevisiae* являются наиболее распространенными дрожжами, используемыми в виноделии [11]. В настоящее время другие ягоды и фрукты, такие как абрикос, слива и вишня, учитывая высокое содержание в них фенольных соединений и их антиоксидантный потенциал, используются для производства новых фруктовых вин [12]. Еще одним примером популярного напитка брожения является сидр, который готовят из свежесжатого или концентрированного яблочного сока, сброженного *S. cerevisiae* в течение 10–15 дней [13, 14].

Питьевой йогурт, считающийся традиционно популярным во всем мире ферментированным напитком, получают путем ферментации молока, в частности, с помощью *Lactobacillus bulgaricus* и *Streptococcus thermophilus*. Йогурт играет важную роль в рационе человека, являясь хорошим источником белков с высокой усвояемостью, витаминов А и В, а также минералов, таких как кальций, магний, цинк и фосфор, среди других важных соединений [15, 16]. Кефир является одним из старейших продуктов брожения, который приобрел большую популярность в последние годы благодаря пищевой ценности и функциональным свойствам. Его готовят из любого типа молока и взаимодействия различных homo- и гетероферментативных видов молочнокислых бактерий, таких как *Lactobacillus*

helveticus, *Lactobacillus acidophilus*, *Streptococcus thermophilus*, *Bifidobacterium bifidum*, и дрожжей, таких как *Kluyveromyces*, *Saccharomyces*, *Candida* и *Torulopsis*, присутствующих в «кефирных зернах» [17].

Как упоминалось ранее, из-за высокого спроса на заменители молочных продуктов, в последние годы широко исследуется разработка продуктов, подобных йогурту и кефиру, на растительной основе. Ученые и технологи сосредоточили свои усилия на поиске ингредиентов растительного происхождения, таких как злаки, псевдозерна и бобовые, которые можно использовать в качестве субстрата для ферментации с помощью молочнокислых бактерий, получения продуктов с такими же питательными, функциональными, текстурными и сенсорными характеристиками, как у обычного йогурта или кефира, а также с возможностью размещения *LAB* в течение длительного времени хранения [18]. Установлено, что бобовые, такие как фасоль, горох, нут, вигна и чечевица, являются потенциальными ингредиентами для альтернатив йогурту из-за их повышенной концентрации белка, аминокислотного профиля и гелеобразующих свойств при ферментации с помощью *LAB* [19]. В настоящее время широко потребляется во всем мире чайный гриб, который считается освежающим ферментированным напитком с полезными свойствами для здоровья человека [20]. Его обычно готовят путем ферментации подслащенного черного чая с помощью симбиотического консорциума, состоящего из уксуснокислых бактерий и дрожжей, в течение 7–10 дней при комнатной температуре (20–30 °C), в результате чего получается конечный продукт с кислым и слегка сладким вкусом и пробиотическими свойствами [21].

Как уже отмечалось, разработка новых продуктов с приемлемыми органолептическими показателями, натуральными ингредиентами и функциональными свойствами является одной из основных задач для пищевой промышленности и широким полем для исследовательской работы. В этом отношении внедрение новых процессов, способствующих ферментативной обработке, показало потенциальные результаты, которые можно масштабировать на промышленном уровне для разработки ферментированных напитков.

2. Новые технологии как процессы ферментации для разработки ферментированных напитков

В течение последних десятилетий использовались различные подходы для лучшего понимания микробного метаболизма

и его функциональной роли в ферментации путем внедрения таких инструментов, как методы секвенирования нового поколения и технологии метаомики [22]. В то же время новые процессы и современное оборудование также были внедрены с целью сокращения времени работы и энергозатрат, что привело к созданию конкурентоспособных процессов, основанных на технологических инновациях, повышенных выходах и высококачественной и безопасной продукции [23]. Среди новых технологий, используемых для этой цели, выделяются омический нагрев (ОН), умеренные электрические поля (MEF), импульсные электрические поля (PEF), ультразвук (US) и высокие гидростатические давления (НРР) [23–26].

Большинство новых технологий считаются нетепловыми процессами, которые вызывают все больший интерес среди исследователей, поскольку они безопасны и экологичны. Как правило, нетермический процесс применяется при температуре окружающей среды или ниже 40 °C в течение коротких периодов времени, сохраняя термочувствительные соединения в основном неповрежденными в обработанных продуктах, в отличие от термически обработанных пищевых продуктов. Поэтому применение нетермической обработки может улучшить вкус и питательные свойства ферментированных напитков, а также увеличить скорость химических и ферментационных реакций, сокращая время обработки [27–29].

В течение последних двух десятилетий многие исследователи сосредоточили свое внимание на оптимизации процесса ферментации путем применения нетермической обработки до или во время стадии ферментации для получения сброженных напитков с улучшенными функциональными свойствами, незначительным временем обработки и более длительным сроком хранения. Полученные результаты показали, что PEF, US и НРР высокоэффективны в достижении этих целей. Вместе с тем оценка каждой обработки для конкретного субстрата и микроорганизма очень важна для определения наилучших условий обработки и достижения желаемых результатов.

2.1. Омический нагрев (ОН), умеренные электрические поля (MEF) и импульсные электрические поля (PEF)

Процессы ОН, MEF и PEF включают подачу электрической энергии различной интенсивности на короткие периоды времени (мс-мин) к пищевому продукту, помещенному между двумя электродами. Основное различие между этими техно-

логиями заключается в температуре, достигаемой во время обработки: в то время как ОН считается термической обработкой, при которой продукт действует как электрический резистор, быстро нагреваясь за счет рассеивания электрической энергии, МЕФ и РЕФ принято считать нетепловыми процессами [30]. Тем не менее основным механизмом действия при ОН, МЕФ и РЕФ является электропорация, которая зависит от напряженности электрического поля и может быть необратимой или обратимой, оказывая различное воздействие на обрабатываемый продукт [31].

Было проведено несколько исследований, сочетающих ОН или МЕФ с ферментацией, в которых установлено, что явление электропорации улучшает процесс ферментации за счет увеличения скорости метаболизма и роста микроорганизмов. Тем не менее в зависимости от напряженности электрического поля и характеристик микроорганизма метаболические эффекты могут быть разными [23,30–32]. Т. Gally, О. Rouaud, V. Jury [33] пришли к выводу, что ОН и МЕФ вызывают сублетальные температуры при постоянном распределении в процессе периодической обработки, улучшая технику ферментации и оказывая положительное влияние на активность микроорганизмов. Интересные результаты применения ОН и МЕФ в качестве методов вспомогательной ферментации были установлены авторами Mota et al. [30]. Несмотря на то, что полученные результаты показали большой потенциал для улучшения процессов ферментации с точки зрения сокращения времени обработки, необходимо провести дальнейшие исследования с целью полного анализа происходящих механизмов и оптимизации параметров обработки и эффективности.

Технология ОН также применялась к ферментированным напиткам в целях консервирования. А.Е. Alcántara-Zavala et al. [33] применили ОН (65°C / 5 и 7 мин; 70°C / 3 и 5 мин) к пульке (традиционный мексиканский пробиотик из агавы), чтобы продлить срок годности продукта. Авторы установили, что ОН является потенциальной альтернативой для увеличения срока хранения пульке до 22 дней без негативного воздействия на физико-химические и сенсорные свойства и с сохранением значительного количества молочнокислых бактерий, таких как *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus kefir* и *Saccharomyces cerevisiae*. В другом исследовании пробиотическое ферментированное молоко обрабатывали ОН (4, 6 и 8 В/см, 90–95 °С / 5 мин), а для оценки кинетики

выживаемости *Listeria monocytogenes* как постферментационное загрязнение применяли модель, разработанную автором Weibull [34]. Результаты этого исследования показали, что ОН снижал жизнеспособность *Listeria monocytogenes*, а напитки, обработанные ОН, имели достаточное количество *Lactobacillus acidophilus*. Кроме того, применение ОН улучшило экстракцию биологически активных соединений и органолептические показатели обработанных ферментированных напитков.

Что касается технологии РЕФ, она применялась в производстве ферментированных напитков, демонстрируя перспективность использования для продления срока годности и стабильности напитка, сокращения времени ферментации, производства вторичных метаболитов и улучшения микробного метаболизма, способствующего их росту и увеличению их эффективности [6, 35]. С одной стороны, РЕФ высокой интенсивности (> 15 кВ/см) использовались для консервирования, за счет инактивации патогенов и микроорганизмов порчи. В недавнем исследовании Rios-Corpio et al. [36] сравнили микробную стабильность, физико-химические параметры, содержание биологически активных соединений и сенсорные характеристики ферментированного напитка из граната (*Punica granatum*), обработанного РЕФ (биполярные импульсы 6 мс при 18 кВ/см и 200 Гц) и термической пастеризацией (63 °С, 30 мин, 72 °С, 15 с), которые хранили в течение 56 дней в условиях охлаждения (4 °С). Авторы установили, что микробная нагрузка *Brettanomyces ssp.* была снижена примерно на четыре логарифмических цикла в напитке, обработанном РЕФ. Также концентрация антиоксидантных соединений в термически обработанных напитках была ниже, чем в напитках, обработанных РЕФ. Оба обработанных напитка были стабильны в течение 56 дней хранения; тем не менее напитки, обработанные РЕФ, показали лучшую сенсорную приемлемость. Аналогичным образом установлено, что обработка РЕФ высокой интенсивности (37–53 кВ/см) является потенциальной альтернативой для консервирования напитков из чайного гриба с минимальными изменениями их физико-химических свойств, антиоксидантной активности и содержания биологически активных соединений [37]. Технология РЕФ может использоваться для микробного обеззараживания во время производства вина, обеспечивая сокращение количества *S. cerevisiae* и *S. cerevisiae* до 4,0 log₁₀ циклов. *O. oeni* в красном вине после алкогольного и яблочно-молочно-

го брожения без негативного воздействия на его качественные характеристики с точки зрения эннологических параметров и органолептических показателей [38]. Одним из наиболее важных преимуществ высокоинтенсивного PEF является короткое время обработки, позволяющее избежать повышения температуры и вызвать необратимую электропорацию. В результате микробные клетки могут быть инактивированы, а термолабильные соединения, такие как антиоксиданты и летучие вещества, сохранены, что позволяет получить безопасные, стабильные по сроку хранения и высококачественные продукты [6].

С другой стороны, PEF низкой интенсивности (< 1 кВ/см) использовался для улучшения ферментации *Hanseniaspora sp.* фильтрации и контроля степени сбраживания в производстве слабоалкогольного яблочного сидра [39]. Обработка PEF при 0,29 кВ/см и 10,7 с, примененная к предварительной культуре в течение 6 ч, показала наибольшее снижение содержания алкоголя на 1,6% (об.) со значительным увеличением выхода биомассы и концентрации дрожжей. Авторы также установили, что чувствительность *Hanseniaspora sp.* дрожжей к PEF была более заметна во время лаг-фазы, чем в лог-фазе, с точки зрения уменьшения времени ферментации и снижения содержания этанола. В другом исследовании El Darga et al. [40] сравнили эффективность PEF (0,8 кВ/см – 100 мс; 5 кВ/см – 1 мс), US (24 кГц – 5, 10 и 15 мин) и мягкой пастеризации (50 °C – 15 мин) в качестве предварительной обработки винограда Каберне Фран для алкогольного брожения. Было установлено, что все предварительные обработки усиливали экстракцию фенолов, интенсивность цвета и антиоксидантную активность винограда во время ферментации; тем не менее обработка PEF при 0,8 кВ/см и 5 кВ/см обеспечила самое высокое содержание фенолов, антоцианов и танинов в полученном вине. В другом исследовании применили обработку PEF, чтобы вызвать проницаемость клеток кожицы различных сортов винограда, для улучшения процесса винификации с точки зрения повышения содержания полифенолов или сокращения времени мацерации. Авторы сообщили, что в зависимости от условий обработки и сорта винограда PEF может сократить время мацерации для достижения максимальной концентрации фенолов в вине в течение двух дней [41]. Ученые A. Ricci, G.P. Parpinello, A. Versari собрали информацию в период с 2007 по 2017 г. о технологии PEF, применяемой в виноделии, и пришли к выводу,

что PEF – это недорогой процесс, который может улучшить качество цвета красных вин и профиль полифенолов, значительно сокращая время мацерации. Однако, по мнению авторов, необходимо провести дополнительные исследования, чтобы лучше понять возможные механизмы реакций во время ферментации и мацерации, а также оценить потенциальное электрохимическое загрязнение, вызванное электродами камеры PEF во время обработки [42].

Проведено исследование влияния низкоинтенсивного PEF в процессе производства ферментированных молочных напитков. P. Chanos et al. сообщили, что действие PEF параметрами 1 кВ/см в течение 3 циклов по 50 импульсов и 4 Гц, примененного к смешанной культуре *Streptococcus thermophilus* DIL 5218 и *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* DSM 20081T, инокулированными на восстановленной среде обезжиренного молока, успешно сокращало время брожения йогурта на 12 мин [43]. Было отмечено, что PEF может вызывать клеточный стресс и ускорять метаболизм *LAB*, улучшая их работу во время ферментации. В целом можно утверждать, что PEF низкой/умеренной интенсивности может вызывать обратимую электропорацию в клеточной мембране или клеточной стенке, что ускоряет микробную активность или экстракцию биоактивных соединений с получением ферментированных напитков за более короткое время обработки с улучшенным качеством. Понимание влияния параметров обработки PEF, таких как электрическая сила импульса, ширина импульса, частота импульса, полярность импульса или форма импульса, на микроорганизмы закваски йогурта, а также их связь с развитием уникальных сенсорных характеристик йогурта может открыть новую область исследований для оптимизации процесса ферментации молочных продуктов, а также других ферментированных напитков.

2.2. Ультразвук (US)

US-обработка представляет собой распространение звуковых волн с частотами выше человеческого слуха (20–40 кГц) через жидкую среду, генерирующую сдвиговые поля, возбуждение, турбулентность, вибрацию, давление и акустические потоки. В зависимости от частоты, применяемой при US-обработке, жидкая среда может подвергаться временной или устойчивой кавитации, которая является основным механизмом действия. Применение высокоинтенсивного ультразвука вызывает необходимые физические и химические реакции,

которые обычно повышают эффективность процессов в пищевой промышленности в сторону улучшения массопереноса. Автор E.C. Umego [44] собрал полную и краткую информацию о технологиях ультразвука, применяемых для повышения эффективности ферментации.

Использование US изучалось в различных исследовательских работах для контроля или стимулирования активности микроорганизмов в сброженных напитках. Установлено, что US усиливает рост и метаболическую активность различных микроорганизмов, так, например, показана активация смешанной культуры *Streptococcus thermophilus* и *Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus*, которой инокулировали восстановленную сладкую сыворотку и обрабатывали мощностью 84 Вт в течение 150 с, что приводило к уменьшению времени ферментации до 30 мин и более высокому количеству жизнеспособных клеток, чем в необработанной ферментированной сыворотке [6]. Эффективность ультразвука в основном связана с образованием обратимых пор в мембранах микробных клеток, вызванным кавитацией, увеличивающим их проницаемость для интернализации необходимых питательных веществ и впоследствии способствующим их росту во время ферментации.

Различные авторы проанализировали изменения в формировании структуры геля, вызванные применением US в процессе вспомогательной ферментации при производстве йогурта. Установлено, что US, применяемый перед обработкой или во время ферментации, влияет на образование геля и может положительно или отрицательно изменить текстуру конечного продукта [6]. Например, применение US при 45 кГц в течение 5 мин во время ферментации йогурта привело к образованию крупных коллоидных частиц, нежелательных для этого вида продукта, влияющих на его реологические свойства. И наоборот, как сообщили Carrillo-López et al., обработка молока ультразвуком с частотой 24 кГц перед ферментацией приводит к более высокой твердости йогурта, чем при обработке ультразвуком во время ферментации [45].

Что касается производства алкогольных напитков, обработку ультразвуком использовали на винодельнях для улучшения вкуса, цвета, аромата, фенольного профиля вина и выхода экстракции из винограда в сусле [6]. Недавно US был применен для обработки измельченного винограда с использованием оборудования винодельческого масштаба для оптимизации процес-

са мацерации [6]. Результаты этого исследования показали, что US изменил физические характеристики виноградной кожуры, улучшая фенольную экстракцию и цвет вина с минимальным влиянием на физико-химические свойства готовых вин. Кроме того, переработка в США может повысить эффективность традиционных процессов виноделия, позволяя сократить время мацерации более чем на 50%.

За счет использования ультразвуковой технологии в качестве вспомогательного процесса ферментации был разработан ферментированный напиток с пробиотическими характеристиками и высоким уровнем биоактивных и антиоксидантных соединений. Были приготовлены сывороточно-овсяные напитки по разным рецептурам и обработаны ультразвуком (40 кГц) за 0, 3 и 10 минут до ферментации с *L. casei* 431. Результаты показали, что ферментированный напиток с соотношением сыворотки и овса 50:50, обработанный US в течение 3 мин, продемонстрировал самый высокий рост *L. casei* (7–8,85 Log КОЕ/мл), высокую антиоксидантную активность и хорошие вкусовые свойства как пробиотический напиток с потенциальной пользой для здоровья [46].

2.3. Высокое гидростатическое давление

Обработка ННР – это нетермический метод, основанный на приложении повышенного давления (100–800 МПа) к твердым или жидким продуктам питания в течение короткого времени (3–15 мин). Давление передается на продукт равномерно и мгновенно через несжимаемую передающую среду, обычно воду, при низкой температуре или температуре окружающей среды, что позволяет избежать потери биологических компонентов. Процесс ННР успешно применяется на протяжении многих лет для производства качественных продуктов с функциональными свойствами, свежим вкусом и высокой пищевой ценностью [6].

В отличие от PEF и US, ННР в основном использовался для консервирования ферментированных напитков, вызывая инактивацию бактерий и дрожжей, сохраняя их качественные характеристики и питательный состав. Эффективность ННР для микробной инактивации в основном зависит от приложенного уровня давления, времени (CUT) и времени обработки, характеристик микроорганизмов и состава пищевого сырья [47–49]. G. Rios-Corripio et al. [50] сравнили влияние ННР (500, 550, 600 МПа, 5–10 мин) с термической пастеризацией (63 °C / 1 мин; 72 °C / 15 с) на микробиологические, физико-химические, антиокси-

дантные и сенсорные характеристики сброженного гранатового напитка в течение 42 суток хранения при температуре 4 °С. ННР и термически обработанные напитки были микробиологически стабильны при хранении; тем не менее напитки, обработанные ННР, имели более высокие уровни антиоксидантных соединений сразу после обработки (399,22 мг GA / 100 мл общего количества фенольных соединений и 121,54 мг Q / 100 мл общего количества флавоноидов).

Другие исследования были сосредоточены на оценке микробной жизнеспособности ферментированных напитков после обработки ННР, что в некоторых случаях целесообразно ввиду их пробиотических свойств. Проведена оценка влияния ННР при 200 и 400 МПа в течение 10 мин и 1 мин соответственно на эволюцию начального количества *LAB*, используемых для приготовления сладкого сывороточно-ферментированного напитка. Авторы заметили, что ферментированные напитки сохраняли вкусовые и текстурные свойства сразу после обработки и в течение 45 дней хранения. Кроме того, сообщалось, что ННР при давлении 200 МПа в течение 10 мин поддерживал оптимальную концентрацию всех заквасочных микроорганизмов, в результате чего получался сброженный напиток с потенциальной пользой для здоровья благодаря жизнеспособности молочнокислых бактерий [6]. Следует отметить, что важно найти оптимальный уровень давления, который будет применяться в качестве сублетальных условий для каждого конкретного микроорганизма. Следовательно, необходимы дополнительные исследования в этой области для оптимизации параметров обработки и получения ферментированных напитков с пробиотическими свойствами.

Заключение

Одним из направлений инновационного развития в пищевой промышленности является создание новых продуктов функционального и профилактического назначения. Употребление таких продуктов положительно влияет на микробный состав кишечника и позволяет предотвратить различные заболевания, связанные с образом жизни. Ферментация – это простой и эффективный процесс разработки безопасных и натуральных продуктов с уникальным вкусом и полезными для здоровья свойствами. За прошедшие годы на основе различного пищевого сырья были разработаны многие виды ферментированных напитков, предлагающих потребителям разнообразные альтернативы для введения биоактивных

компонентов в их ежедневный рацион. Научно-технические достижения в области пищевых исследований сыграли решающую роль в эволюции ферментации: от использования и выбора конкретных заквасок до улучшения их характеристик за счет применения новых технологий, получения продуктов с улучшенными органолептическими показателями и пищевой ценностью. В этом отношении было продемонстрировано, что ОН, МEF, PEF, US и ННР обладают потенциалом в качестве процессов вспомогательной ферментации, способных ускорять микробный метаболизм, улучшать жизнеспособность клеток, сократить время обработки, увеличить срок годности продукта и улучшить функциональные и питательные характеристики напитка. Тем не менее необходимо проводить дальнейшие исследования механизмов действия каждой технологии, влияющей на процесс ферментации различных пищевых матриц, для выбора оптимальных параметров обработки и снижения энергопотребления и воздействия на окружающую среду без ущерба для конкретных характеристик сброженных напитков.

Список литературы

1. Vinicius De Melo Pereira G., De Carvalho Neto D.P., Junqueira A.C.D.O., Karp S.G., Letti L.A.J., Magalhães Júnior A.I., Soccol C.R. A Review of Selection Criteria for Starter Culture Development in the Food Fermentation Industry // *Food Rev. Int.* 2019. Vol. 36. P.135–167.
2. Taveira I.C., Nogueira K.M.V., Oliveira D.L.G.D., Silva R.D.N. Fermentation: Humanity's oldest biotechnological tool // *Front. Young Minds.* 2021. Vol. 9. P. 1–7.
3. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Ферментированные продукты питания с использованием плодов облепихи // *Chronos: естественные и технические науки.* 2021. Т. 6, № 4 (37). С. 32–46.
4. Marsh A.J., Hill C., Ross R.P., Cotter P.D. Fermented beverages with health-promoting potential: Past and future perspectives // *Trends Food Sci. Technol.* 2014. Vol. 38. P. 113–124.
5. Adebo O.A., Njobeh P.B., Adeboye A.S., Adebisi J.A., Sobowale S.S., Ogundele O.M., Kayitesi E. Advances in Fermentation Technology for Novel Food Products. In *Innovations in Technologies for Fermented Food and Beverage Industries* // Springer International Publishing: Cham, Switzerland. 2018. P. 71–87.
6. Morales de la Peña, M., Miranda-Mejía G.A., Martín-Belloso O. Recent Trends in Fermented Beverages Processing: The Use of Emerging Technologies // *Beverages.* 2023. Vol. 9. P. 51.
7. Baschali A., Tsakalidou E., Kyriacou A., Karavasiloglou N., Matalas A.-L. Traditional low-alcoholic and non-alcoholic fermented beverages consumed in European countries: A neglected food group // *NRR.* 2017. Vol. 30. P. 1–24.
8. Саубенова М.Г., Олейникова Е.А., Амангелды А.А. Биологическая ценность ферментированных продуктов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2019. № 8. С. 124–129.
9. Бурак Л.Ч. Перспективы использования молочнокислых бактерий *L. plantarum* для ферментации фруктовых соков // *Научное обозрение. Биологические науки.* 2022. № 3. С. 63–71.
10. Бурак Л.Ч. Перспективы производства пива с функциональными свойствами // *Технологии пищевой и перера-*

багывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2021. № 2. С. 79–88.

11. Capece A., Romaniello R., Siesto G., Romano P. Conventional and Non-Conventional Yeasts in Beer Production // *Fermentation*. 2018. Vol. 4. P. 38.

12. Ćakar U., Petrović A., Pejin B., Ćakar M., Živković M., Vajs V., Đorđević B. Fruit as a substrate for a wine: A case study of selected berry and drupe fruit wines // *Sci. Hortic.* 2019. Vol. 244. P. 42–49.

13. Rosend J., Kaleda A., Kuldjārv R., Arju G., Nisamedtinov I. The Effect of Apple Juice Concentration on Cider Fermentation and Properties of the Final Product // *Foods*. 2020. Vol. 9. P. 1401.

14. Hou C.Y., Huang P.H., Lai Y.T., Lin S.P., Liou B.K., Lin H.W., Hsieh C.-W., Cheng K.C. Screening and identification of yeasts from fruits and their coculture for cider production // *Fermentation*. 2022. Vol. 8. P. 1.

15. Кузнецова С.В. Моделирование характеристик йогурта с целью повышения качества путем эффективного подбора заквасочных культур IGEA // *Молочная промышленность*. 2022. № 6. С. 14–16.

16. Меньшикова З.Н., Киселева А.С., Терентьев Д.А. Требования, предъявляемые к качеству и безопасности йогурта // *Инновационная наука*. 2020. № 5. С. 68–70.

17. Перченко Н.А., Сергеева О.Н. Разработка полезного продукта – кефира с лекарственными травами // *Актуальные проблемы агропромышленного комплекса: сборник трудов научно-практической конференции преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов Новосибирского ГАУ (Новосибирск, 21–22 октября 2020 г.)*. Вып. 5. Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета «Золотой колос». 2020. С. 300–303.

18. Montemurro M., Pontonio E., Coda R., Rizzello C.G. Plant-based alternatives to yogurt: State-of-the-art and perspectives of new biotechnological challenges // *Foods*. 2021. Vol. 10. P. 316.

19. Boeck T., Sahin A.W., Zannini E., Arendt E.K. Nutritional properties and health aspects of pulses and their use in plant-based yogurt alternatives. *Comp. Rev // Food Sci. Food Saf.* 2021. Vol. 20. P. 3858–3880.

20. Wang B., Rutherford-Markwick K., Zhang X.X., Mutukumira A.N. Kombucha: Production and Microbiological Research // *Foods*. 2022. Vol. 11. P. 3456.

21. Aydar A.Y., Mataracı C.E., Sağlam T.B. Development and modeling of a novel plant-based yoghurt produced by Jerusalem artichoke and almond milk using 1-optimal mixture design // *J. Food Meas. Charact.* 2021. Vol. 15. P. 3079–3087.

22. Mannaa M., Han G., Seo Y.-S., Park I. Evolution of Food Fermentation Processes and the Use of Multi-Omics in Deciphering the Roles of the Microbiota // *Foods*. 2021. Vol. 10. P. 2861.

23. Gavahian M., Mathad G.N., Oliveira C.A., Khaneghah A.M. Combinations of emerging technologies with fermentation: Interaction effects for detoxification of mycotoxins // *Food Res. Int.* 2021. Vol. 141. P. 110104.

24. Yıldız G., Yıldız G., Khan M.R., Aadil R.M. High-intensity ultrasound treatment to produce and preserve the quality of fresh-cut kiwifruit // *J. Food Process. Preserv.* 2022. Vol. 46. P. e16542.

25. Roobab U., Abida A., Chacha J.S., Athar A., Madni G.M., Ranjha M.M.A.N., Rusu A.V., Zeng X.-A., Aadil R.M., Trif M. Applications of innovative non-thermal pulsed electric field technology in developing safer and healthier fruit juices // *Molecules*. 2022. Vol. 27. P. 4031.

26. Jadhav H.B., Annature U.S., Deshmukh R.R. Non-thermal Technologies for Food Processing // *Front. Nutr.* 2021. Vol. 8. P. 657090.

27. Liu H., Xu X., Cui H., Xu J., Yuan Z., Liu J., Li C., Li J., Zhu D. Plant-Based Fermented Beverages and Key Emerging Processing Technologies // *Food. Rev. Int.* 2022. P. 1–20.

28. Roobab U., Khan A.W., Irfan M., Madni G.M., Zeng X.A., Nawaz A., Walayat N., Manzoor M.F., Aadil R.M. Recent developments in ohmic technology for clean label fruit and vegetable processing: An overview // *J. Food Process. Eng.* 2022. Vol. 45. P. e14045.

29. Mukhtar K., Nabi B.G., Arshad R.N., Roobab U., Yaseen B., Ranjha M.M.A.N., Aadil R.M., Ibrahim S.A. Potential Impact of Ultrasound, Pulsed Electric Field, High-Pressure Processing, Microfluidization Against Thermal Treatments Preservation Regarding Sugarcane Juice (*Saccharum officinarum*) // *Ultrason. Sonochem.* 2022. Vol. 90. P. 106194.

30. Mota M.J., Lopes R.P., Koubaa M., Roohinejad S., Barba F.J., Delgadillo I., Saraiva J.A. Fermentation at non-conventional conditions in food-and bio-sciences by the application of advanced processing technologies // *Crit. Rev. Biotech.* 2018. Vol. 38. P. 122–140.

31. Miranda M., Graciela A. Impact of pulsed electric fields on fermentation process during yogurt production, 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://hdl.handle.net/11285/650899> (дата обращения: 16.10.2023).

32. Gavahian M., Farahnaky A. Ohmic-assisted hydrodistillation technology: A review // *Trends Food Sci. Technol.* 2018. Vol. 72. P. 153–161.

33. Gally T., Rouaud O., Jury V., Havet M., Og'è A., Le-Bail A. Proofing of bread dough assisted by ohmic heating. *Innov // Food Sci. Emerg. Technol.* 2017. Vol. 39. P. 55–62.

34. Alcántara-Zavala A.E., de Dios Figueroa-Cárdenas J., Morales-Sánchez E., Aldrete-Tapia J.A., Arvizu-Medrano S.M., Martínez-Flores H.E. Application of ohmic heating to extend shelf life and retain the physicochemical, microbiological, and sensory properties of pulque // *Food Bioprod. Process.* 2019. Vol. 118. P. 139–148.

35. Silva A.B., Scudini H., Ramos G.L.P., Pires R.P., Guimarães J.T., Balthazar C.F., Rocha R.S., Margallo L.P., Pimentel T.C., Siva M.C., et al. Ohmic heating processing of milk for probiotic fermented milk production: Survival kinetics of *Listeria monocytogenes* as contaminant post-fermentation, bioactive compounds retention and sensory acceptance // *Int. J. Food Microbiol.* 2021. Vol. 348. P. 109204.

36. Rios-Corripio G., la Peña, M.M.-d., Welti-Chanes J., Guerrero-Beltrán J.A. Pulsed electric field processing of a pomegranate (*Punica granatum* L.) Fermented beverage // *IFSET*. 2022. Vol. 79. P. 103045.

37. Vazquez-Cabral D., Valdez-Fragoso A., Rocha-Guzman N.E., Moreno-Jimenez M.R., Gonzalez-Laredo R.F., Morales-Martinez P.S., Rojas-Contreras J.A., Mujica-Paz H., Gallegos-Infante J.A. Effect of pulsed electric field (PEF)-treated kombucha analogues from *Quercus obtusata* infusions on bioactives and microorganisms // *IFSET*. 2016. Vol. 34. P. 171–179.

38. Delso C., Berzosa A., Sanz J., Álvarez I., Raso J. Microbial Decontamination of Red Wine by Pulsed Electric Fields (PEF) after Alcoholic and Malolactic Fermentation: Effect on *Saccharomyces cerevisiae*, *Oenococcus oeni*, and Oenological Parameters during Storage // *Foods*. 2023. Vol. 12. P. 278.

39. Al Daccache M. et al. Control of the sugar/ethanol conversion rate during moderate pulsed electric field-assisted fermentation of a *Hanseniaspora* sp. strain to produce low-alcohol cider // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 59. P. 102258.

40. El Darra N., Grimi N., Maroun R.G., Louka N., Vorobiev E. Pulsed electric field, ultrasound, and thermal pretreatments for better phenolic extraction during red fermentation // *Eur. Foods Res. Technol.* 2013. Vol. 236. P. 47–56.

41. Saldaña G., Cebrían G., Abenoza M., Sánchez-Gimeno C., Álvarez I., Raso J. Assessing the efficacy of PEF treatments for improving polyphenol extraction during red wine vinifications // *IFSET*. 2017. Vol. 39. P. 179–187.

42. Ricci A., Parpinello G.P., Versari A. Recent Advances and Applications of Pulsed Electric Fields (PEF) to Improve Polyphenol Extraction and Color Release during Red Winemaking // *Beverages*. 2018. Vol. 4. P. 18.

43. Chanos P., Warncke M.C., Ehrmann M.A., Hertel C. Application of mild pulsed electric fields on starter culture accelerates yogurt fermentation // *Eur. Foods Res. Technol.* 2020. Vol. 246. P. 621–630.
44. Umego E.C., He R., Huang G., Dai C., Ma H. Ultrasound-assisted fermentation: Mechanisms, technologies, and challenges // *J. Food Process. Preserv.* 2021. Vol. 45. P. e15559.
45. Carrillo-Lopez L.M., Garcia-Galicia I.A., Tirado-Gallegos J.M., Sanchez-Vega R., Huerta-Jimenez M., Ashokkumar M., Alarcon-Rojo A.D. Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties // *Ultrason. Sonochem.* 2021. Vol. 73. P. 105467.
46. Pérez-Porras P., Bautista-Ortín A.B., Jurado R., Gómez-Plaza E. Using high-power ultrasounds in red winemaking: Effect of operating conditions on wine physico-chemical and chromatic characteristics // *LWT.* 2021. Vol. 138. P. 110645.
47. Herrera-Ponce A.L., Salmeron-Ochoa I., Rodriguez-Figueroa J.C., Santellano-Estrada E., Garcia-Galicia I.A., Alarcon-Rojo A.D. High-intensity ultrasound as pre-treatment in the development of fermented whey and oat beverages: Effect on the fermentation, antioxidant activity and consumer acceptance // *JFST.* 2021. Vol. 59. P. 796–804.
48. Ma J., Yang H., Chen Y., Feng X., Wu C., Long F. Purified Saponins in *Momordica charantia* Treated with High Hydrostatic Pressure and Ionic Liquid-Based Aqueous Biphasic Systems // *Foods.* 2022. Vol. 11. P. 1930.
49. Ma J., Wang Y., Zhao M., Tong P., Lv L., Gao Z., Liu J., Long F. High Hydrostatic Pressure Treatments Improved Properties of Fermentation of Apple Juice Accompanied by Higher Reserved *Lactobacillus plantarum* // *Foods.* 2023. Vol. 12. P. 441.
50. Rios-Corripio G., Welti-Chanes J., Rodríguez-Martínez V., Guerrero-Beltrán J.Á. Influence of high hydrostatic pressure processing on physicochemical characteristics of a fermented pomegranate (*Punica granatum* L.) Beverage // *IFSET.* 2020. Vol. 59. P. 102249.

СТАТЬИ

УДК 621.372.8

**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ТОНКОГО ЗАРЯЖЕННОГО СТЕРЖНЯ****Глущенко А.Г., Шatroва Е.А.***ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,
Самара, e-mail: gag646@yandex.ru*

Рассмотрено пространственное распределение электростатического поля, создаваемого заряженным стержнем конечной длины. Системы токопроводящих стержней широко используются для моделирования метаматериалов различного диапазона частот. Основное внимание при этом уделяется линейным и плоским периодическим решеткам токопроводящих стержней, формирующих метаструктуры микроволнового и инфракрасного диапазонов с параметрами, аналогичными параметрам естественных кристаллических структур оптического диапазона длин волн. Расчет этих структур проводится преимущественно численными методами. В настоящей работе получено аналитическое решение задачи расчета структуры электростатического поля, формируемого одиночным прямолинейным заряженным стержнем произвольной конечной длины. Получены аналитические соотношения для расчета компонент напряженности электростатического поля и потенциала этого поля. Рассмотрено изменение структуры электростатического поля в зависимости от распределения линейной плотности заряда. Представлены картины распределения интенсивности излучения в различных точках структуры. Установлено, что в частных случаях бесконечно длинного проводника и на больших расстояниях полученные соотношения переходят в известные соотношения для расчета электростатического поля. Полученные соотношения для электростатического поля стержней совместно с соотношениями для расчета электростатического поля заряженных колец позволяют разрабатывать аналитическую теорию искусственных материалов нового типа (метасред).

Ключевые слова: заряженный стержень, электростатическое поле, метасреды, неоднородная плотность**CALCULATION OF THE ELECTROSTATIC FIELD
OF A THIN CHARGED ROD****Gluschenko A.G., Shatrova E.A.***Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara,
e-mail: gag646@yandex.ru*

The spatial distribution of the electrostatic field created by a charged rod of finite length is considered. Conductive rod systems are widely used to model metamaterials across different frequency ranges. The main attention is paid to linear and flat periodic lattices of conductive rods, forming metastructures of the microwave and infrared ranges with parameters similar to those of natural crystalline structures of the optical wavelength range. The calculation of these structures is carried out mainly by numerical methods. In this work, an analytical solution is obtained for the problem of calculating the structure of the electrostatic field formed by a single rectilinear charged rod of arbitrary finite length. Analytical relations are obtained for calculating the components of the electrostatic field strength and the potential of this field. The change in the electrostatic structure depending on the distribution of linear charge density is considered. Pictures of the radiation intensity distribution at various points of the structure are presented. It has been established that in special cases of an infinitely long conductor and at large distances, the obtained relations transform into known relations for calculating the electrostatic field. The obtained relations for the electrostatic field of the rods, together with the relations for calculating the electrostatic field of charged rings, make it possible to develop an analytical theory of a new type of artificial materials (metamedia).

Keywords: charged rod, electrostatic field, metamedia, non-uniform density

Одной из основных задач электродинамики является задача расчета параметров излучающих систем различной конфигурации, решаемая ввиду сложности зачастую численными методами [1, 2]. Задача излучения точечными зарядами является базовой моделью для исследования излучающих систем различного типа [2, 3]. Решения в виде аналитических соотношений, наиболее удобных для анализа физических свойств излучающих структур, ранее были получены только для простейших конфигураций: излучение точечных источников и излучение моделей бесконечно длинных заряженных стержней при однородном распределе-

нии линейной плотности заряда по длине проводника [4, 5]. Возможность получения аналитических решений при расчете полей различных конфигураций излучателей показана в [6]. Для реальных, но более сложных конфигураций используются численные методы расчета, что существенно затрудняет анализ и исследование физических свойств этих структур и проектирование излучающих антенных систем на их основе. Вопрос о необходимости учета неоднородности распределения линейной плотности заряда для корректного расчета излучаемых полей ставился в [7]. В настоящей работе показана возможность аналитического решения зада-

чи расчета электростатического поля, создаваемого заряженным стержнем конечной длины с неоднородным распределением линейной плотности заряда по длине проводника. Получены аналитические соотношения для расчета компонент напряженности и потенциала электростатического поля заряженного стержня для некоторых функций, описывающих неоднородность распределения линейной плотности заряда по оси стержня, переходящие в пределе в известные соотношения для заряженного стержня неограниченных размеров и для точечного заряда. Рассмотрена структура поля в области заряженного стержня и ее зависимость от распределения линейной плотности заряда на стержне.

Целью работы являлось аналитическое решение задачи расчета электростатического поля заряженного стержня с неоднородным распределением плотности заряда по длине стержня, получение обобщения ранее известных аналитических соотношений для расчета компонент напряженности электростатического поля для неоднородного распределения линейной плотности заряда по стержню, численное исследование структуры электростатического поля, создаваемого заряженным стержнем.

Материалы и методы исследования

Для исследования использовались уравнения классической электростатики для расчета полей стержней ограниченных в пространстве размеров. Получено графическое представление поля излучения в пространстве.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим тонкий заряженный стержень с плотностью распределения зарядов, вдоль оси стержня, описываемой в общем случае функцией $\tau(x)$ (рис. 1). Проведем расчет поля в произвольной точке А, положение которой определяется расстоянием r_0 от оси стержня и углами β_1, β_2 , под которыми видны концы стержня из точки наблюдения. Из рисунка следует, что соотношения между геометрическими параметрами имеют вид

$$r = \frac{r_0}{\cos \alpha}, \quad dx \cdot \cos \alpha = r \cdot d\alpha.$$

Компоненты напряженности электростатического поля, создаваемого каждым элементом $dq = \tau(x)dx$ заряженного стержня (рис. 1) под углом α , определяются соотношениями

$$dE_x = dE \sin \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \sin \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau(x)dx}{r^2} \sin \alpha,$$

$$dE_y = dE \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau(x)dx}{r^2} \cos \alpha.$$

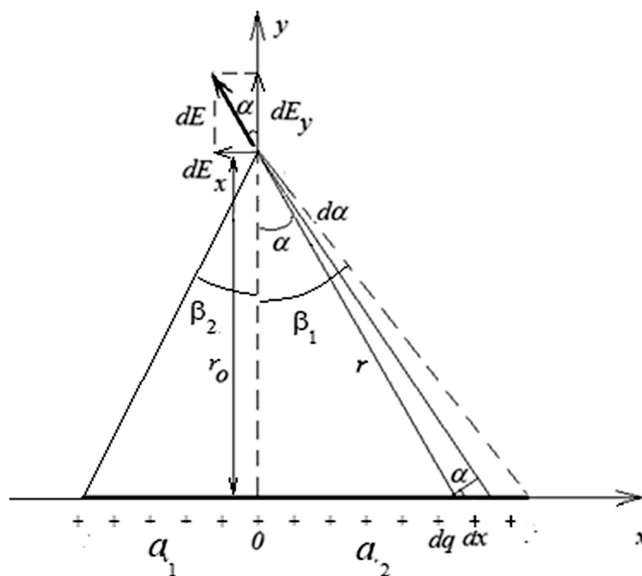


Рис. 1. К расчету электростатического поля, создаваемого заряженным стержнем, расположенным вдоль оси Ox в области $(-a_1, a_2)$

Тогда x и y компоненты поля

$$E_x = \int_{\beta_1}^{\beta_2} dE_x = \int_{\beta_1}^{\beta_2} dE \cdot \sin \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau(\alpha) \sin \alpha d\alpha}{r_0},$$

$$E_y = \int_{\beta_1}^{\beta_2} dE_y = \int_{\beta_1}^{\beta_2} dE \cdot \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau(\alpha) \cos \alpha d\alpha}{r_0}.$$

Потенциал электростатического поля, создаваемого стержнем в той же точке:

$$\varphi = \int_{\beta_1}^{\beta_2} d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{dq}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau(x) dx}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau(\alpha) d\alpha}{\cos \alpha}.$$

В частном случае однородного распределения линейной плотности заряда вдоль оси стержня ($\tau(x) = \text{const}$) имеем для компонент напряженности поля соотношения

$$E_y = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r_0} (\sin \beta_1 + \sin \beta_2) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r_0} \left(\frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + r_0^2}} + \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + r_0^2}} \right),$$

$$E_x = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r_0} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\sqrt{a_1^2 + r_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{a_2^2 + r_0^2}} \right),$$

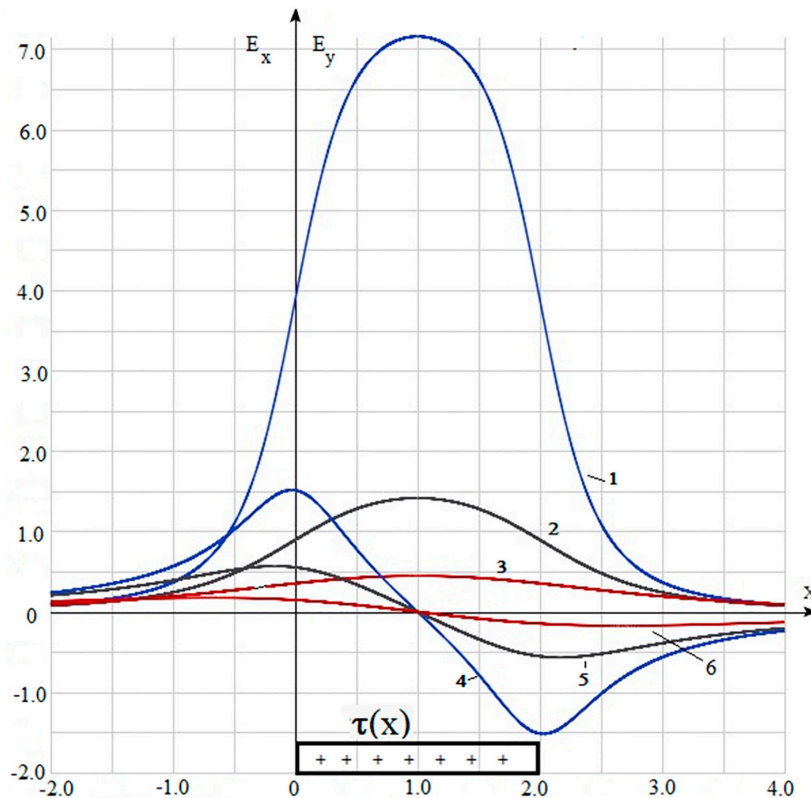


Рис. 2. Изменение нормированных на $k\tau$ ($k = 9 \cdot 10^9$) компонент напряженности электрического поля (E_x (кривые 4, 5, 6), E_y (кривые 1, 2, 3)) вдоль оси заряженного стержня с линейной плотностью распределения заряда $\tau = \text{const}$, $l = 2$, $a_1 = 0$, кривые 1, 4 – $r_0 = 0,5$, кривые 2, 5 – $r_0 = 1$, кривые 3, 6 – $r_0 = 2$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau d\alpha}{\cos \alpha} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_0} \ln \left(\frac{\left| \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_2}{2} \right) + \frac{\pi}{4} \right|}{\left| \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_1}{2} \right) - \frac{\pi}{4} \right|} \right) =$$

и для потенциала:

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_0} \ln \left| \frac{\left(a_2 + r_0 + \sqrt{r_0^2 + a_2^2} \right) \cdot \left(a_1 + r_0 + \sqrt{r_0^2 + a_1^2} \right)}{\left(a_2 - r_0 - \sqrt{r_0^2 + a_2^2} \right) \cdot \left(a_1 - r_0 - \sqrt{r_0^2 + a_1^2} \right)} \right|$$

Характер изменения компонент поля вдоль осей, параллельных оси стержня вблизи стержня, показан на рис. 2.

Характер изменения поля при разном удалении от стержня сохраняется, уменьшаясь по величине.

Изменения компонент поля при удалении точки наблюдения в направлении, перпендикулярном оси стержня, у одного из концов стержня показан на рис. 3, уменьшаясь по величине.

Наблюдается рост E_y компоненты поля при приближении к центральной части стержня. В центральной части стержня по оси перпендикулярной стержню компонента электростатического поля $E_x = 0$ при этом на любом расстоянии от стержня. На больших расстояниях от стержня (при $r_0 \gg a_1, a_2$), когда заряженный стержень можно считать точечным источником, расчетное соотношение для компонент напряженности электрического поля принимает известный вид

$$E_y = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r_0^2} (a_1 + a_2) = \frac{\tau l}{4\pi\epsilon_0 r_0^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_0^2}, \quad E_x \rightarrow 0, \quad \varphi \rightarrow \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_0}.$$

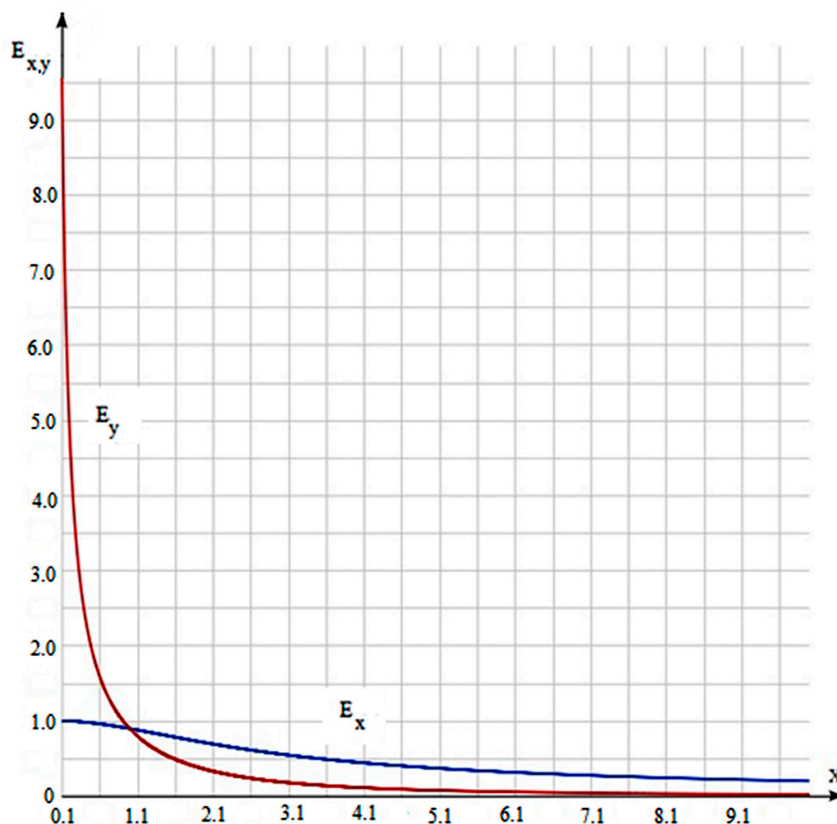


Рис. 3. Зависимость нормированных на $k\epsilon_0 r_0^2$ компонент поля от расстояния до стержня (длина стержня $l = 2$, $x = r_0/l$, $a_1 = 0$, $a_2 = l$)

В случае неоднородного распределения линейной плотности заряда вдоль оси стержня, описываемого функцией $\tau = \chi\alpha$, компоненты поля определяются соотношениями

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau(\alpha) \sin \alpha d\alpha}{r_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\chi\alpha \sin \alpha d\alpha}{r_0} =$$

$$= \frac{\chi}{4\pi\epsilon_0 r_0} (\sin \beta_2 - \beta_2 \cos \beta_2 + \sin \beta_1 - \beta_1 \cos \beta_1),$$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau(\alpha) \cos \alpha d\alpha}{r_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\chi\alpha \cos \alpha d\alpha}{r_0} =$$

$$= \frac{\chi}{4\pi\epsilon_0 r_0} (\beta_2 \sin \beta_2 + \cos \beta_2 - \beta_1 \sin \beta_1 - \cos \beta_1).$$

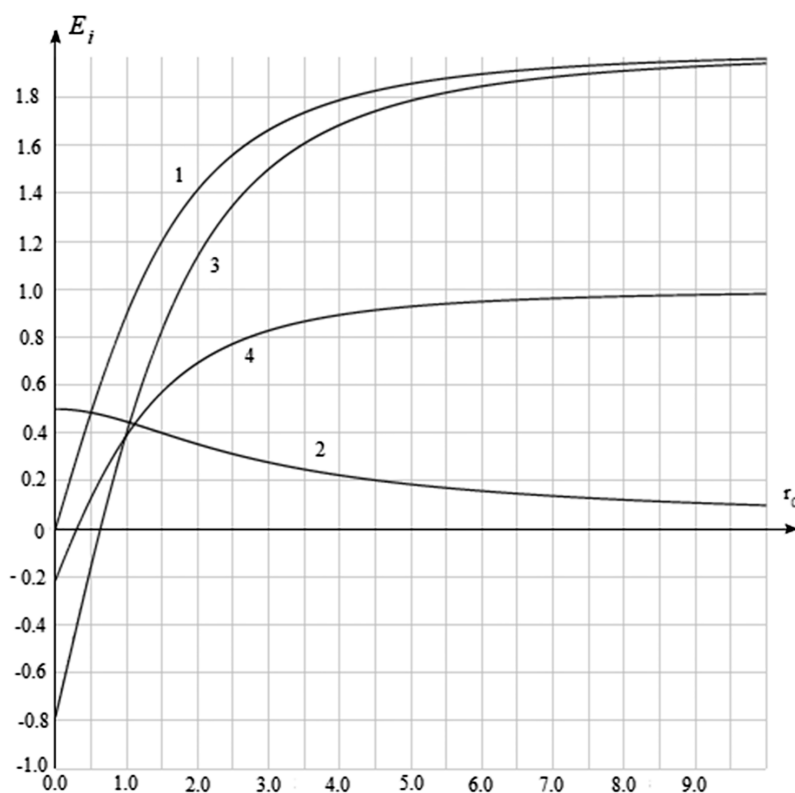


Рис. 4. Зависимость нормированных на kr (кривые 1, 2) и на $k\chi$ компонент E_x , E_y поля от расстояния до стержня при однородной (1, 2) и неоднородной (3, 4) линейной плотности распределения зарядов (здесь кривые 1, 4 – E_y – компоненты поля, кривые 2, 3 – E_x – компоненты поля)

На рис. 4 показана зависимость перпендикулярной и касательной к оси стержня компонент напряженности электростатического поля в зависимости от расстояния от оси стержня при однородном и неоднородном, описываемой линейной функцией, распределениях линейной плотности заряда. Изменение распределения линейной плотности заряда существенно влияет на структуру электрического поля – меняет не только величину,

но и направление поля вблизи заряженного стержня. При этом нормированная перпендикулярная к оси стержня компонента поля при удалении от стержня имеет одинаковый характер изменения и различается при приближении к стержню, касательная составляющая поля (рис. 1) меняет характер изменения (вместо убывания величины компоненты поля при однородном распределении заряда – величина поля возрастает).

В случае другого типа неоднородного распределения линейной плотности заряда, описываемого квадратичной функцией распределения, $\tau = \chi_2 \alpha^2$ компоненты поля определяются соотношениями

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau(\alpha) \sin \alpha d\alpha}{r_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\chi_2 \alpha^2 \sin \alpha d\alpha}{r_0} =$$

$$= \frac{\chi_2}{4\pi\epsilon_0 r_0} [2\beta_2 \sin \beta_2 + (2 - \beta_2^2) \cos \beta_2 + 2\beta_1^2 \sin \beta_1 + (\beta_1^2 - 2) \cos \beta_1],$$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tau(\alpha) \cos \alpha d\alpha}{r_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\chi_2 \alpha^2 \cos \alpha d\alpha}{r_0} =$$

$$= \frac{\chi_2}{4\pi\epsilon_0 r_0} [(\beta_2^2 - 2) \sin \beta_2 + 2\beta_2 \cos \beta_2 + (\beta_1^2 - 2) \sin \beta_1 + 2\beta_1 \cos \beta_1].$$

Неоднородность распределения плотности заряда приводит к существенному изменению структуры поля вблизи концов заряженного стержня, что необходимо учитывать при расчете реальных структур. Таким образом, используемая во многих работах модель однородной плотности распределения не отражает реальной ситуации. Полученные в данной работе результаты позволяют обобщить ранее известные результаты и провести их коррекцию.

Заключение

Рассмотрена зависимость структуры электростатического поля, создаваемого заряженным стержнем конечной длины в зависимости от распределения линейной плотности заряда. Получены аналитические соотношения для расчета компонент вектора напряженности электрического поля при однородном и неоднородном распределении линейной плотности заряда вдоль заряженного стержня. Полученные соотношения обобщают известные соотношения для предельного случая бесконечно длинного стержня с однородным распределением линейной плотности заряда. Распределение

заряда влияет на характер поля вблизи источника поля, что может быть использовано для исследования распределения зарядов путем измерения структуры распределения полей в области источников поля.

Список литературы

1. Britannica [Электронный ресурс]. URL: <https://www.britannica.com/science/electricity/Deriving-electric-field-from-potential> (дата обращения: 31.10.2023).
2. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics. Cambridge, United Kingdom; New York, NY: Cambridge University Press, 2017. 599 p.
3. Zangwill A. Modern electrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 976 p.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. СПб.: Лань, 2021. 500 с.
5. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. М.: Издательство физико-математической литературы, 2001. 640 с.
6. Глушенко А.Г., Глушенко А.А., Глушенко В.А. Магнитное поле системы круговых токов // Научное обозрение. Технические науки. 2023. № 1. С. 21–25.
7. Иванова А.Н. Расчет электростатического поля заряженного стержня с неоднородной плотностью заряда // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» [Электронный ресурс]. URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018008813> (дата обращения: 31.10.2023).

УДК 621.384.52:631.53.04

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОЗОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И СТИМУЛЯЦИИ ПОСЕВНОГО МАТЕРИАЛА

Вендин С.В., Мануйленко А.Н., Страхов В.Ю., Сухоруков И.Ю.

*ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина»,
Белгород, e-mail: manuylenko_an@bsaa.edu.ru*

В настоящее время растениеводство является одним из основных аспектов экономики, поэтому в условиях повышенной конкуренции производители АПК стараются выращивать больше при меньших затратах. При сборе посевного материала и его хранении на его поверхности образуется патогенная микрофлора, поэтому для улучшения количества здоровых и качественных семян необходимо проводить процедуру обеззараживания и стимуляции. На данный момент активно применяются обработка химическими веществами, а также физические способы воздействия, которые можно представить как механические (температурная обработка, ворошение) и электрофизические (микроволновое излучение, инфракрасное излучение, ультрафиолетовое излучение, ультразвук и озонирование). Одним из перспективных направлений выделен способ электроозонирования посевного материала. В работе представлена конструкция электроозонаторной установки для обеззараживания и стимуляции посевного материала, особенностью которой является электродная система, представляющая собой керамические основания, где закреплены вольфрамовые электроды в виде сетки с сотовой формой ячейки. Конструкция установки позволяет повысить производительность процесса озонирования и равномерность облучения семян при комбинировании ее с механическим способом воздействия на семена путем их ворошения. Представлена одна из возможных схем управления процессом электроозонирования семенного материала в зернохранилище.

Ключевые слова: посевной материал, обработка, обеззараживание, озон, электротехнология, электрический озонатор

DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC OZONATION SYSTEM FOR DISINFECTION AND STIMULATION OF SEED MATERIAL

Vendin S.V., Manuylenko A.N., Strakhov V.Yu., Sukhorukov I.Yu.

*Belgorod state agricultural university named after V.Gorin, Belgorod,
e-mail:manuylenko_an@bsaa.edu.ru*

Currently, crop production is one of the main aspects of the economy, therefore, in conditions of increased competition, agricultural producers are trying to grow more, at lower costs. When collecting seed material and storing it, pathogenic microflora forms on its surface, therefore, in order to improve the number of healthy and high-quality seeds, it is necessary to carry out a disinfection and stimulation procedure. At the moment, chemical treatment is actively used, as well as physical methods of exposure, which can be represented as mechanical (temperature treatment, stirring) and electrophysical (microwave radiation, infrared radiation, ultraviolet radiation, ultrasound and ozonation). One of the promising directions is the method of electroozoning of seed material. The paper presents the design of an electric detonator installation for disinfection and stimulation of seed material, the feature of which is an electrode system, which is a ceramic base, where tungsten electrodes are fixed in the form of a grid, with a honeycomb cell shape. The design of the installation makes it possible to increase the productivity of the ozonation process and the uniformity of irradiation of the seed volume, when combined with a mechanical method of influencing seeds by stirring them. One of the possible schemes for controlling the process of electroozoning of seed material in a granary is presented.

Keywords: seed material, treatment, disinfection, ozone, electric ozonator, electrical technology

В настоящее время к основным направлениям агропромышленного комплекса Российской Федерации можно отнести следующие: растениеводство, животноводство и птицеводство. Доля производимой продукции в представленных отраслях от всего аграрного сектора составляет примерно 50–60%. В отрасли растениеводства основную массу составляет зерновое хозяйство, причем преобладающими зерновыми культурами являются озимая и яровая пшеница, на втором месте – рожь, ячмень и овес.

В сложившихся условиях рыночной конкуренции эффективность такой отрасли, как растениеводство, напрямую зависит

от качественной и здоровой базы посевного (семенного) материала. Поэтому научные исследования, направленные на разработку способов и технических средств для обработки зерновых культур, способствующих обеззараживанию и стимуляции, являются актуальными [1, 2].

Для обработки семенного материала перспективно применение такой электротехнологии, как озонирование. Газообразный озон разрушает белковые оболочки бактерий, в ходе чего они погибают, также он взаимодействует и с прочей патогенной микрофлорой на поверхности семенного материала и поверхностях, где он нахо-

дится. Помимо обеззараживающего воздействия, газ озон положительно воздействует на биохимические связи в семенах на клеточном уровне, что приводит к дополнительной стимуляции и лучшему росту будущего ростка сельскохозяйственной культуры [3, 4].

Несмотря на явные достоинства электротехнологии озонирования, в настоящее время трудность обработки представляет обеспечение равномерности обработки всего объема семенного материала. Поэтому разработка технических средств для осуществления обеззараживания и стимуляции семян зерновых культур посредством электроозонирования, при которых в полной мере будет обеспечена равномерность обработки озонем, является важной задачей как для науки, так и для сельского хозяйства.

Цель исследования – разработка конструкции электрического озонатора, обеспечивающего обеззараживание посевного материала в соответствии с требованиями санитарных норм, а также стимуляцию физиологических параметров зерновых культур сельскохозяйственного назначения.

Материалы и методы исследования

Научные исследования по разработке конструкции электроозонаторной установки для обеззараживания и стимуляции посевного материала проводились во ФГБОУ

ВО Белгородский ГАУ на кафедре электрооборудования и электротехнологий в АПК. В ходе проведения научно-исследовательской работы прибегали к обзору литературы, патентному поиску устройств и технических средств, направленных на обеззараживание и стимуляцию посевного материала с различным электрофизическим воздействием. Также были использованы методы математической статистики и регрессионного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении анализа существующих способов обеззараживания и стимуляции посевного материала были выделены основные способы, которые представлены на рисунке 1 [5-7].

Из способов, представленных на рисунке 1, авторами был выделен электрофизический способ посредством электрического озонирования, так как, согласно данным литературных источников, он является перспективным в силу своего воздействия на вирусы, бактерии и прочую патогенную микрофлору, а также обеспечивает высокую проникающую способность, аналогичную проникающей способности воздуха [8, 9]. Показатель минимальной концентрации озона для угнетающего воздействия на патогенную микрофлору представлен в таблице [9].

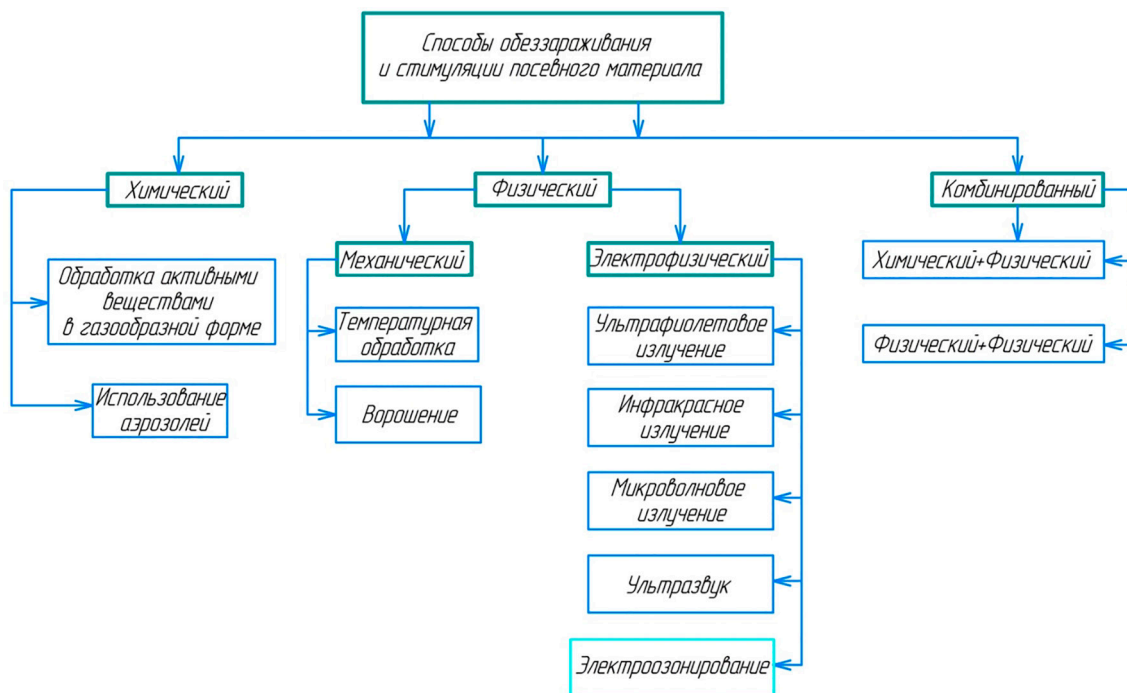


Рис. 1. Перспективные способы обеззараживания и стимуляции посевного материала

Показатель минимальной концентрации озона для угнетающего воздействия на патогенную микрофлору

Объект, на который будет воздействовать озон	Концентрация озона, мг/м ³
Микробы	2
Бактерии	15
Вирусы	15
Паразиты	2
Плесень	20

Для осуществления процесса обеззараживания и последующей стимуляции зерновых и прочего семенного материала авторским коллективом была разработана следующая конструкция электроозонаторной установки, конструктивная схема которой представлена на рисунке 2 [10].

Предлагаемая конструкция электрического озонатора для обеззараживания и стимуляции посевного материала состоит из следующих элементов: привода вентилятора 2, который размещен в корпусе электро-

озонатора 3, выполненного в виде воздуховода. Для осуществления жесткой фиксации привода вентилятора 2 и снижения вибрационных воздействий он соединен с корпусом электроозонатора 3 посредством кронштейна крепления электрической машины с вентилятором 1. Лопасти привода вентилятора 2 используются для осуществления забора и подачи воздуха на концевой датчик типа флюгер 4 и в область электродной системы 6. На концевом датчике типа флюгер 4 находятся подвижный и неподвижный контакты, которые взаимодействуют с источником высокого напряжения 5. Источник высокого напряжения 5 также размещен в корпусе электроозонатора 3, что обеспечивает его охлаждение потоками воздуха и способствует корректному формированию потребного напряжения. Также в корпус электроозонатора 3 выполнен монтаж электродной системы 6, которая представляет собой керамические основания, где закреплены вольфрамовые электроды в виде сетки с сотовой формой ячейки.

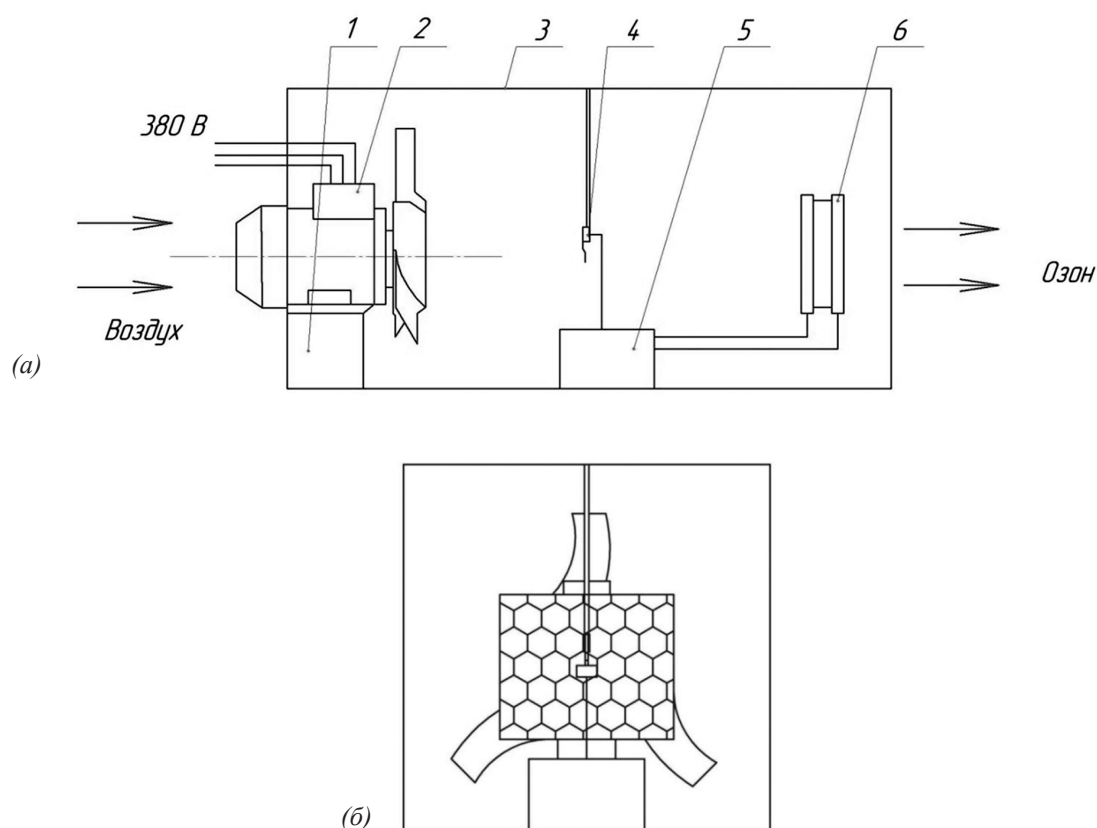


Рис. 2. Конструктивная схема разработанной электроозонаторной установки (а) и схема электродной системы (б): 1 – кронштейн крепления электрической машины с вентилятором; 2 – привод вентилятора; 3 – корпус электроозонатора; 4 – концевой датчик типа флюгер; 5 – источник высокого напряжения; 6 – электродная система

Представленное устройство работает следующим образом: производим монтаж привода вентилятора 2 на кронштейн крепления 1, производим подачу питания переменным током на привод вентилятора 2; после начала его вращения на крыльчатке вентилятора происходит забор воздуха извне и подача его по корпусу электроозонатора 3; затем образовавшееся давление воздушных масс от крыльчатки вентилятора воздействует на концевой датчик типа флюгер 4, вследствие чего его подвижный контакт замыкает неподвижный, и фаза управления поступает к источнику высокого напряжения 5, после чего источник высокого напряжения создает требуемое напряжение для подачи его на электродную систему 6, где происходит формирование электрического разряда высокого напряжения; полученный разряд проходит через воздушную среду, нагнетаемую приводом вентилятора 2, вследствие чего происходит процесс синтеза газообразной формы озона O_3 путем диссоциации молекулы кислорода O_2 . Образовавшийся газ выносится из зоны электродная система 6 образовавшимся потоком воздуха от лопастей привод вентилятора 2 и далее по корпусу электроозонатора 3 и далее распространяется по помещению и воздействует на окружающие объекты.

Для обеспечения изменения режимных параметров по производительности источника высокого напряжения в разрабатываемой конструкции электроозонаторной установки для обеззараживания и стимуляции посевного материала было принято решение использовать источник высокого напряжения импульсного типа. Благодаря каскаду из конденсаторов и диодов на первых создается удвоенное амплитудное значение входного напряжения. Поэтому, подобрав нужные параметры и количество конденсаторов и диодов в электрической схеме высокого напряжения, можно получить требуемые выходные параметры по напряжению. Но стоит учесть и то, что основные элементы умножителя напряжения необходимо расположить таким образом, чтобы добиться максимального расстояния между выходными выводами, умножителем, схемой преобразователя и корпусом.

Схема умножителя напряжения каскадного типа представлена на рисунке 3.

Для обеспечения производительности по озону от 1 до 20 мг/м³ рекомендуется напряжение на каскадах умножителя поддерживать в диапазоне от 10 до 40 кВ, что при условии замены набора схемы умножителя напряжения выполнимо.

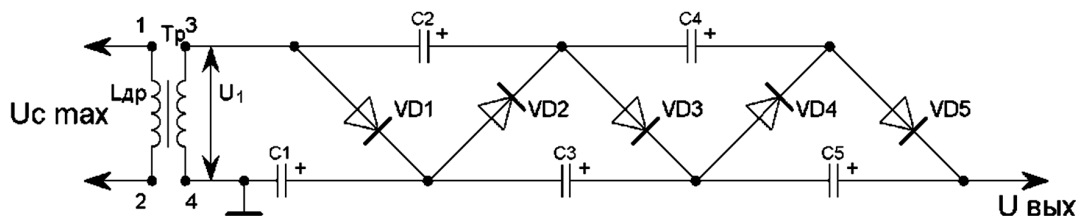


Рис. 3. Схема умножителя напряжения каскадного типа

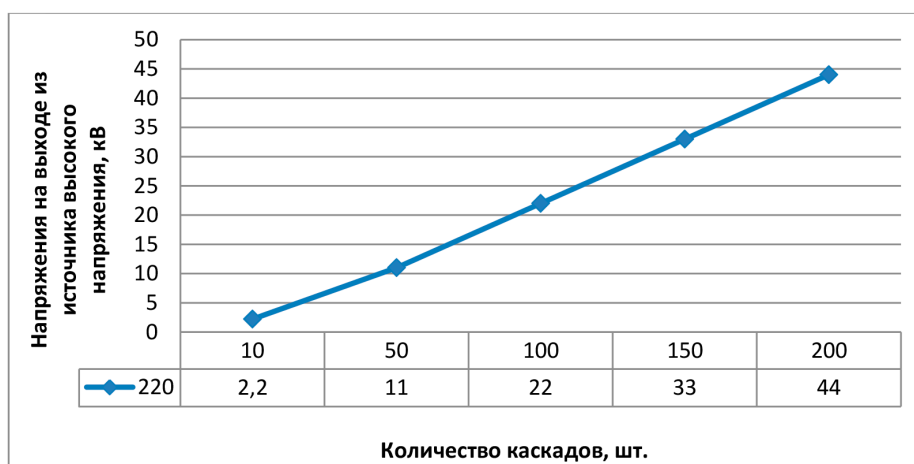


Рис. 4. Зависимость напряжения на выходе из источника высокого напряжения от количества задействованных каскадов

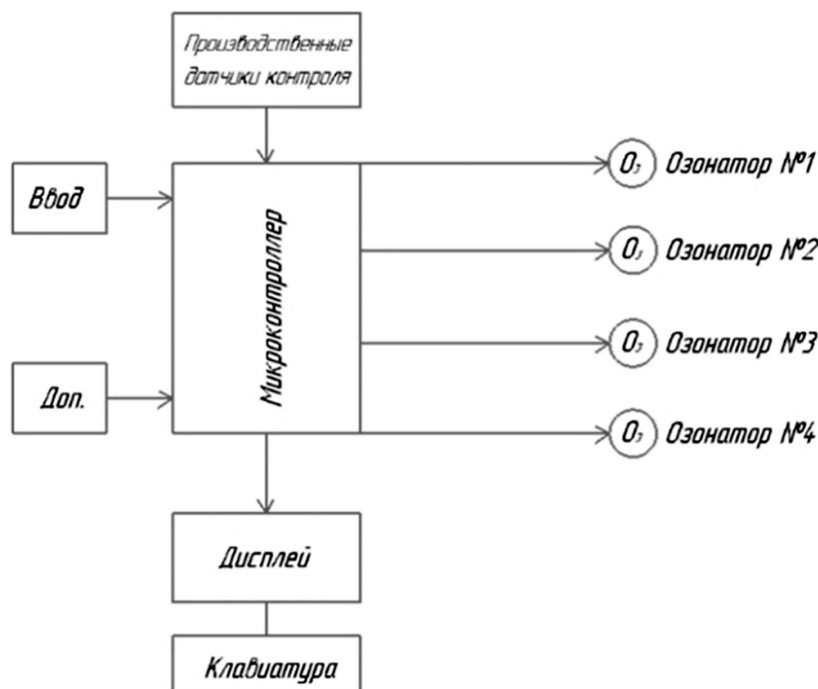


Рис. 5. Функциональная схема управления процессом электроозонирования посевного материала в зернохранилище

Определить показатель напряжения на выходе из источника высокого напряжения при условии использования каскадного умножителя напряжения можно по следующей формуле:

$$U_{\text{вых}} = n \cdot U_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где n – количество каскадов, шт.;

$U_{\text{вх}}$ – входящее напряжение на умножитель, при использовании стандартной питающей сети $U_{\text{вх}} = 220$ В.

Исходя из формулы (1) была получена следующая зависимость напряжения на выходе из источника высокого напряжения от количества задействованных каскадов (рис. 4).

Исходя из полученной зависимости напряжения на выходе из источника высокого напряжения от количества задействованных каскадов можно сделать вывод, что для того, чтобы собрать схему умножителя с показателем выходного напряжения в диапазоне 10 до 40 кВ, необходимо будет использовать от 50 до 180 каскадов.

Для обеспечения равномерности обработки озонем посевного материала предлагается использовать несколько озонаторных установок в целях осуществления контроля обрабатываемых зон и равномерности заполнения зерносклада озонем. Также для улучшения конечного эффекта рекомендуется комбинировать работу электро-

озонаторных установок с процессом ворошения семян, что будет способствовать улучшению проникновения озono-воздушной смеси и равномерной обработке поверхности семян.

В качестве одной из возможных схем управления процессом электроозонирования посевного материала в зернохранилище можно использовать функциональную схему, представленную на рисунке 5.

Выводы

Предлагаемая система электрического озонирования для обеззараживания и стимуляции посевного материала с контролем обрабатываемых зон в зернохранилище на базе разработанной конструкции электроозонаторной установки и применением технологии ворошения позволит улучшить равномерность обработки озонем объема семян и повысить производительность технологического процесса в целом. А благодаря воздействию газообразного озона на биохимические связи в семенах на клеточном уровне будут осуществляться дополнительная стимуляция и улучшение роста будущего ростка сельскохозяйственной культуры.

Список литературы

1. Щитов С.В., Воякин С.Н., Калинин А.В. Совершенствование технологии предпосевной обработки сои // Научное обозрение. 2014. № 8-3. С. 848–850.

2. Скрипник В.В. Озонирование как эффективный метод обработки посевного и посадочного материала // Энергия будущего: в рамках рынка НТИ Энерджинет: материалы научно-практической конференции молодых ученых электро-энергетического факультета. Ставрополь: ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ, 2021. С. 11–15.
3. Баскаков И.В., Орбинский В.И., Гиевский А.М., Чернышов А.В., Тарасенко А.П. Влияние предпосевного озонирования семян на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12, № 4 (63). С. 13–20.
4. Страхов В.Ю., Вендин С.В. Применение электрофизических методов обработки семян // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке: материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2023. С. 215–217.
5. Тибирьков А.П., Юдаев И.В. Электрофизическая обработка семян – новый агроприем при возделывании ярового ячменя на юге России // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-22. С. 4930-4933.
6. Вендин С.В., Саенко Ю.В., Страхов, В.Ю., Семернина М.А. Конвейерная установка для проращивания зерна // Сельский механизатор. 2019. № 12. С. 26–27.
7. Михальков Д.Е., Кочергина А.С. Применение инновационных способов предпосевной обработки семян на возделывании горчицы сизой на территории Волгоградской области // Приоритетные направления развития современной науки молодых учёных аграриев: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных. Солёное Займище: Прикаспийский Научно-исследовательский институт аридного земледелия, 2016. С. 150-154.
8. Ермаков Д.Б., Шевчук Н.И. Продуктивность ячменя в зависимости от приемов озонирования посевного материала // Вклад молодых ученых в аграрную науку: материалы Международной научно-практической конференции. Кинель: Самарская государственная сельскохозяйственная академия, 2017. С. 14-16.
9. Ермаков Д.Б. Оценка эффективности озонирования посевного материала сортов ячменя // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 1. С. 21-22.
10. Патент № 205379. Электрический озонатор воздуха: № 205379: заявл. 23.03.2020:опубл. 13.07.2021 / А.Н. Мануйленко, С.В. Вендин; заявитель, патентообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. 5 с.

УДК 691.87:693.554-422.2

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ В МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Сергеева Е.А.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Казань, e-mail: prof.sergeeva@gmail.com

В работе показаны тенденции развития рынка сверхлегких высокопрочных волокон и перспективы их использования в композитной арматуре (КА). Объектом данного исследования является строительная арматура – как традиционная стальная арматура, так и из волокнистых полимерных композитов. Показано, что в связи с недостаточной проработанностью нормативной базы наибольшее использование КА получило в малоэтажном домостроении, конструктивные решения которого не требуют экспертиз и согласований. Выявлена недостаточность комплексных исследований, направленных на сравнительное обобщение свойств КА различной природы и их применимости в малоэтажном строительстве. Проведен анализ преимуществ и недостатков КА различной природы. Систематизированы характеристики различных типов КА и стали. Отмечено, что наибольшее распространение получила стеклопластиковая арматура в связи с меньшей стоимостью относительно других видов КА. Приведены преимущества и ограничения использования базальтовой, углеродной и арамидной КА. Несмотря на высокую стоимость такой арматуры относительно стеклопластиковой КА, она выдерживает большие изгибающие и растягивающие нагрузки, что позволяет использовать ее в ответственных строительных конструкциях и в сейсмоопасных регионах. Обоснованы направления рационального использования различных видов КА, в том числе гибридной, с модификацией поверхности волокнистого компонента для повышения прочности связи с полимерной матрицей.

Ключевые слова: сверхлегкое высокопрочное волокно, композитная арматура, сталь, стеклопластик, базальтопластик, углепластик, арамидопластик, гибридная арматура

JUSTIFICATION OF THE RATIONALITY OF USE OF COMPOSITE REINFORCEMENT IN LOW-RISE CONSTRUCTION

Sergeeva E.A.

Kazan National Research Technological University, Kazan, e-mail: prof.sergeeva@gmail.com

The trends in the development of the market for ultra-light high-strength fibers and the prospects for their use in composite reinforcement (CR) are shown. The object of this research is construction reinforcement, both traditional steel reinforcement and fiber polymer composites. It is shown that due to the insufficient elaboration of the regulatory framework, CR has received the greatest use in low-rise housing construction, the design solutions of which do not require examinations and approvals. The insufficiency of comprehensive studies aimed at comparative generalization of the properties of CR of various natures and their applicability in low-rise construction has been revealed. An analysis of the advantages and disadvantages of CR of various natures was carried out. The characteristics of various types of CR and steel are systematized. It is noted that fiberglass reinforcement is most widespread due to its lower cost relative to other types of CR. The advantages and limitations of using basalt, carbon and aramid CR are presented. Despite the high cost of such reinforcement, relative to fiberglass reinforcement, it can withstand large bending and tensile loads, which makes it possible to use it in critical building structures and in earthquake-prone regions. Directions for the rational use of various types of CR, including hybrid ones, with modification of the surface of the fibrous component to increase the bond strength with the polymer matrix are substantiated.

Keywords: ultra-light high-strength fiber, composite reinforcement, steel, fiberglass, basalt plastic, carbon plastic, aramid plastic, hybrid reinforcement

Волокнистые полимерные композиты (ВПК), активно используемые в военных целях, авиа- и ракетостроении, находят все большее применение в гражданских отраслях. Прогнозируется ежегодный прирост рынка ВПК на 11,3% в период до 2025 г. с преобладающей долей сегмента стекловолоконных композитов. Аналогичный прирост, но с меньшими долями рынка, ожидается в ряду «углепластик – базальтопластик – арамидопластик – другие волокнистые материалы, пропитанные полимерной матрицей» [1].

В массовом гражданском строительстве, в частности коттеджном, наиболее широкое применение ВПК получили в виде композитной арматуры (КА) различного назначения [2].

Объектом данного исследования является строительная арматура – как традиционная стальная арматура, так и из ВПК. Предметом исследования является выявление преимуществ и недостатков арматуры различной природы.

Следует отметить, что КА применяется для армирования бетона, в частности в смешанном армировании со стальной арматурой, в виде гибких связей в многослойных стеновых конструкциях, в зонах воздействия агрессивных сред, блуждающих токов и пр. Несмотря на то что КА имеет ряд преимуществ перед стальной арматурой (сочетание легкости и прочности, хемо- и коррозионной стойкости, термостабильности, диэлектрических свойств и др.),

в исследованиях отмечаются: недостаточные модуль упругости и огнестойкость, а также невозможность сварки и изготовления гнутых изделий на стройплощадке [3]. Такие особенности КА и необходимость некоторых изменений технологии строительства (повышение огнестойкости сооружений, заказ соединительных элементов или соединение прутков стяжками), ценовые барьеры по некоторым видам КА ограничивают масштабы перехода от стальной арматуры к композитной в многоэтажном строительстве.

Кроме того, ряд исследователей на основе анализа СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», СП 164.132580.2014. «Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами», СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» и других российских нормативных документов указывают на недостаточность как регламентирующей базы для расчета конструкций с КА взамен стальной, так и документально закрепленных требований контроля качества, методов испытаний, типовых решений, стандартизации изделий и т.д. [4]. Вследствие этого наибольшее использование КА получила в малоэтажном домостроении, конструктивные решения которого не требуют экспертиз и согласований. В связи с этим актуальными являются исследования, направленные на обоснование рациональности использования КА из различных ВПК и стали в малоэтажном строительстве.

Целью исследования является сравнительный анализ металлической и неметаллической КА. Для достижения цели решались задачи:

- анализа преимуществ и недостатков КА из ВПК различной природы;
- рассмотрения характеристик различных типов КА из ВПК;
- сравнения КА из ВПК с традиционной металлической арматурой.

Материалы и методы исследования

В ходе исследования накопленного научно-практического опыта применения КА в строительстве использовались теоретические (анализ, синтез, сравнение, обобщение, поиск противоречий) и эмпирические (ретроспективные изыскания, систематизация опыта) методы.

Вопросы использования ВПК, в частности в виде КА, применяемой для армирования бетонных сооружений, рассмотрены в работах: А. Авдеевой, Ю. Барабанщикова, Р. Бароева, И. Буторова, С. Дрокина, А. Дронова, Н. Макушевой, С. Меркулова, В. Старо-

верова, А. Степанова, А. Цурупы и других авторов.

Особенности КА на основе стекло-, базальто-, арамидо-, углеволокна, их свойства, направления применения, долговечность, способы монтажа и взаимодействие с бетоном исследованы в работах таких зарубежных авторов, как: С. Bakis, С. Burningham, J. Cheng, К. Ibrahim, В. Jarek, R. Sonnenschein, N. Tăranu, J. Zhang, и многих других.

Известно достаточное число исследований, направленных на изучение свойств КА на основе стекло- и базальтового волокна [2], арамида [5] и углеволокна, в том числе демонстрирующих результаты сравнительных испытаний отдельных ВПК и стальной арматуры, исследующих вопросы прочности сцепления арматуры с бетоном, а также способы крепления и соединения армирующих прутков [6]. Однако выявлена недостаточность комплексных исследований, направленных на сравнительное обобщение свойств ВПК различной природы и их применимости в малоэтажном строительстве.

Результаты исследования и их обсуждение

Применение КА в малоэтажном строительстве возможно в армировании фундаментов, при возведении монолитных стен с применением опалубочных конструкций, при возведении многослойных стеновых конструкций с гибкими связями, в процессе ремонта бетонных конструкций, при возведении мостовых сооружений и пролетов на опорах при прибрежном расположении малоэтажных комплексов.

В зависимости от состава КА различают арматуру на основе волокон неорганической природы (стеклянные, базальтовые, углеродные) и органических арамидных волокон, а также гибридную арматуру, включающую волокна различных типов. В качестве полимерных матриц используют эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые и другие смолы. Основной технологией получения КА является безфильтрная пултрузия.

Состав арматуры определяет ее свойства, кроме того, от типа волокон и распространенности технологий их производства зависит стоимость КА. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики сверхлегких высокопрочных волокон, доступных на российском рынке для производства КА, и стали.

Согласно таблице 1, плотность волокон и, соответственно, вес КА убывают в ряду: сталь, базальтопластик, стеклопластик, углепластик, арамидопластик. Модуль упругости повышается в ряду: стеклопластик, базальтопластик – арамидопластик, сталь, углепластик.

Таблица 1

Сравнительные свойства волокон в составе КА и стали

Свойства	Углеволокно	Стекловолокно	Арамидное волокно	Базальтовое волокно	Сталь
Плотность, кг/м ³	1800–1900*	2530–2540	1440	2700	7850
Модуль упругости, ГПа	230–370	72–89	83–124	90	200
Прочность на разрыв, МПа	1790–2480	3400–4600	2920–3600	4000	500
Относительное удлинение, %	0,50–11	1,93–2,12	2,90–3,50	2,25	2,50

Примечание: по данным производителей; * – диапазоны значений в таблице 1 указывают на наличие нескольких марок волокна с различными характеристиками

Таблица 2

Сравнительные характеристики композитов армирующих стержней

Характеристики	Углепластик	Стеклопластик	Базальтопластик
Прочность на растяжение, МПа	2000–3000	1000	1200
Огнестойкость, 0С	От 600	До 300	До 600
Плотность, кг/м ³	1600	2200	2200
Устойчивость к коррозии	Высокая	Высокая	Высокая
Упругость, ГПа	До 350	До 45	До 50
Теплопроводность, Вт/(м ² С)	От 1,0	До 1,0	До 1,0

Примечание: составлено по данным [9].

Прочность возрастает в ряду: сталь, углепластик, арамидопластик, стеклопластик, базальтопластик. Относительное удлинение (способность воспринимать растягивающие напряжения без хрупкого разрыва) повышается в ряду: углепластик, стеклопластик, базальтопластик, сталь, арамидопластик. Соответственно, достоинства материалов по одним характеристикам сочетаются с низкими значениями других.

Преимущества по стоимости относительно стали имеет только стеклопластиковая арматура [7], занимающая наибольшую долю рынка и наиболее востребованная в малоэтажном строительстве. Стоимость базальтопластиковой арматуры незначительно превышает стоимость стали, в то время как углепластик и арамидопластик демонстрируют существенно более высокую стоимость, что ограничивает их применение в малоэтажном строительстве.

Наибольшее применение ВПК нашли в производстве арматуры и других элементов малоэтажного строительства в экологически неблагоприятных промышленных районах химии, нефтехимии и металлургии, а также вблизи морской воды. В данном случае используют полимербетон, где вместо стальной арматуры применяется стойкая к коррозии композитная стекло-, базальто- или углепластиковая арматура, причем

последняя в 2 раза прочнее стеклопластиковой и до 6 раз прочнее стальной арматуры [8]. Среди российских производителей базальто- и стеклопластиковых армирующих стержней можно выделить ООО «Бийский завод стеклопластиков», ООО «Московский завод композитных материалов», ООО «Гален» и иные, а углепластиковой – ХК «Композит». Производство арамидного волокна в России под торговой маркой «Русар» направлено преимущественно на цели оборонно-промышленного комплекса, а недостаточные масштабы и высокая стоимость технологии производства волокна и конечных изделий в виде КА ограничивают их применение в строительстве.

Сравнительные характеристики армирующих стержней из различных типов композитов на основе угле-, стекло- и базальтовых волокон представлены в таблице 2.

Можно отметить наиболее высокую прочность на растяжение (в 2–3 раза), огнестойкость (в 2 раза выше стеклопластика) и упругость углепластика (≈ 7 раз) относительно стекло-, базальтопластика, в сочетании с более низкой плотностью (низким весом). Однако стоимость углеволоконной КА ограничивает ее широкое применение в малоэтажном строительстве.

По результатам исследования нескольких видов арматуры: базальтовой, углерод-

ной и стеклянной, посредством тестирования армированных ими бетонных элементов на сжатие вдоль армирующих стержней, с определением прочности и деформируемости бетонных элементов и сравнением со стальной арматурой получено, что армирование композитными стержнями приводит к повышению прочности на сжатие бетонных элементов и уменьшению их деформируемости. При испытаниях бетонных элементов с продольным армированием, где сжатие производилось поперек армирующих стержней, существенных отличий в несущей способности не обнаружено. Показано, что комбинированное использование арматуры из композитного стержня и армирующих волокон, распределенных в объеме бетонной композиции, позволяет достичь максимальной прочности и минимальной деформируемости образцов [10].

Установлено, что отдельные виды КА, используемые взамен стальной арматуры на территориях с повышенной угрозой коррозии, в частности когда в составе КА армирующее волокно имеет минеральную природу и наряду с высокой прочностью обладает хрупкостью и недостаточной эластичностью, ограничены к использованию в сейсмоопасных зонах. Непластичный отклик минеральной КА на динамические нагрузки предлагается устранять посредством создания гибридных композитов.

Гибридные армирующие стержни имеют различный состав: включают как непрерывные армирующие волокна, так и рубленое волокно с полимерной матрицей; имеют сердечник из стали или стеклопластика; включают углеродные, стеклянные и/или арамидные волокна. Показано, что сокращению затрат на производство стержня в сочетании с коррозионной стойкостью и устойчивостью к динамическим нагрузкам способствует конструкция со стальным сердечником (8 мм), с оплеткой из непрерывных арамидных и стеклянных волокон, с рубленным углеволокном в полимерной матрице, что позволяет использовать преимущества всех материалов в работе арматуры [11]. Для повышения прочности связи волокнистой компоненты с матрицей применяют различные способы модификации [12], в том числе плазменную активацию для лучшей адгезии высокопрочных волокон к смоле [13].

На примере КА на основе базальтовых волокон показано, что по сравнению с углеродными, стеклянными и другими композитами, а также сталью арматура имеет лучшее высокотемпературное сопротивление и низкую стоимость, более устойчива к коррозионным воздействиям, что важно

при малоэтажном строительстве вблизи морской воды. При возведении сооружений в рамках малоэтажного комплекса (мостовые палубы, гаражные элементы), на бетонных опорах, контактирующих с морской водой, где выполнено базальтовое армирование вместо стального, кроме коррозионной стойкости, отмечено повышение прочности и вязкости материала [14].

Также важным является значение диаметра армирующего стержня. Так, испытаниями на сжатие и методом pull-out (вытягивание стержня, на примере базальтовой арматуры) установлено, что с ростом диаметра КА выше 10 мм наблюдалось снижение прочности связи арматуры с бетоном. Для повышения адгезии КА к бетону предлагаются армирующие стержни, покрытые песком, что повышает коэффициент сцепления арматуры с бетоном, при этом с ростом коэффициента армирования данными стержнями повышается жесткость и снижается деформация бетонных образцов. Установлено, что бетон, армированный покрытым песком стеклопластиковым стержнем, имеет модуль упругости в 2 раза более высокий, чем стеклопластиковая арматура без песчаного покрытия [6].

При малоэтажном строительстве в условиях чрезвычайных ситуаций и в сейсмоопасных регионах перспективно изготовление КА из полиэтиленпластика, который превосходит по удельной прочности металлы в 6 раз, стеклопластики в 2,5 раза, углепластики в 1,6 раза, а также обладает повышенной стойкостью к ударным нагрузкам. В результате не происходит хрупкого разрушения композита, а наблюдается рассеяние энергии удара по волокнам из сверхвысокомолекулярного полиэтилена [15].

Заключение

Арматура из ВПК имеет преимущества перед стальными стержнями по удельной прочности, долговечности, коррозионной стойкости, диэлектрическим свойствам и пр. В малоэтажном строительстве наибольшее распространение получила стеклопластиковая КА в связи с низкой стоимостью и широкой доступностью на рынке. Применение КА более эффективно при возведении малоэтажных сооружений на территориях воздействия неблагоприятных факторов (нефтеперерабатывающие, химические предприятия), а также вблизи морских акваторий, где стальные стержни подвергаются коррозии. Диэлектрические свойства КА делают возможным малоэтажное строительство вблизи территорий с блуждающим током и электроосмосом. Возможность поглощать и рассеивать удар-

ные колебания открывает потенциал применения КА, в частности на основе органических полимеров, в сейсмоопасных регионах и зонах чрезвычайных ситуаций.

Для широкого применения КА необходимо дальнейшее совершенствование и масштабирование технологий их получения, так, чтобы повысить конкурентоспособность базальтопластика, арамидопластика и углепластика по цене относительно стали. Кроме того, необходимо стандартизировать методы оценки свойств, расчета конструкций, контроля качества изделий с применением КА. Для получения синергетического эффекта от сочетания свойств отдельных сверхлегких высокопрочных армирующих волокон перспективно проведение дальнейших исследований гибридных конструкций в целях повышения модуля упругости армированных сооружений с сохранением прочности и снижением стоимости.

Список литературы

1. Рынок волокнистых полимерных композитов будет расти до 2025 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://basalt.today/ru/2017/12/14065/> (дата обращения: 03.10.2023).
2. Алексеева Л.А., Игнатович А.В. Бетон с композитной арматурой в коттеджном строительстве // *Alfabuild*. 2017. № 1 (1). С. 16-26.
3. Габрусенко В.В. Особенности проектирования конструкций из бетона с композитной арматурой // *Проектирование и строительство в Сибири*. 2013. № 6(77). С. 20-24.
4. Бронников И.В. Композитная арматура – проблемы и перспективы применения // *Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral»*. 2019. № 3. С. 223-228.
5. Сергеева Е.А., Костина К.Д. Анализ ассортимента арамидных волокон и их свойств // *Вестник Технологического университета*. 2015. Т. 18, № 14. С. 124-125.
6. Shahad A.A. Jabbar, Saad B.H. Farid. Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures // *Karbala International Journal of Modern Science*. 2018. No. 4. P. 216-227.
7. Ширтанов А.А. Экономическая целесообразность применения композитной арматуры в строительстве // *Вестник науки*. 2023. Т. 3, № 11 (68). С. 195-200.
8. Costa L. Timber concrete composite floors with prefabricated Fiber Reinforced Concrete. Avdelningen för Konstruktionsteknik. Lunds Tekniska Högskola. Lunds Universitet, 2011. 189 p.
9. Окольникова Г.Э., Герасимов С.В. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве // *Экология и строительство*. 2015. № 3. С. 14-21.
10. Nevskii A.V. et al. Strength and deformability of compressed concrete elements with various types of nonmetallic fiber and rods reinforcement under static loading // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2015. № 71. P. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012037.
11. Behnam B., Eamon C. Analysis of alternative ductile fiber-reinforced polymer reinforcing bar concepts // *Journal of Composite Materials*. 2014. No. 48(6). P. 723-733.
12. Ершов И.П., Сергеева Е.А., Зенитова Л.А., Абдуллин И.Ш. Модификация синтетических волокон и нитей. Обзор // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15, № 18. С. 136-143.
13. Сергеева Е.А., Ибатуллина А.Р., Кадыров Ф.Ф. Повышение адгезионной способности сверхвысокомолекулярного полиэтиленового волокна с помощью плазменной обработки // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15, № 17. С. 123-126.
14. Þórhallsson E., Snæbjörnsson J. Basalt fibers as new material for reinforcement and confinement of concrete // *Solid State Phenomena*. Vol. 249. P. 79-84. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.249.79.
15. Сергеева Е.А. Регулирование свойств полиолефиновых волокон и нитей с помощью неравновесной низкотемпературной плазмы // *Химические волокна*. 2010. № 3. С. 24.

УДК 004

БЕЗОПАСНАЯ РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Тарасова Ю.А.

ООО «Антифишинг», Тверь, e-mail: tarasovayuliya00@gmail.com

Информационная безопасность и защита данных являются одними из ключевых элементов эффективной работы современного программного обеспечения. Это повышает актуальность написания качественного кода и сведения к минимуму потенциальной возможности атак со стороны злоумышленников. В данной статье рассматриваются основные типы атак, такие как атаки на XML-парсеры (защита от XXE), DDoS (Distributed Denial-of-Service), SQL-инъекции, XSS (Cross-Site Scripting) и некоторые другие виды уязвимостей. Приводятся основные рекомендации и требования при написании безопасного кода, применяя которые на практике компании и разработчики смогут повысить стабильность и снизить уязвимость программного обеспечения. В данной статье была поставлена цель провести анализ основных аспектов, связанных с безопасным программированием. Были изучены и проанализированы принципы и методы, которые помогут разработчикам создавать программное обеспечение с повышенным уровнем безопасности. Безопасное программирование является неотъемлемой частью разработки, и анализ, представленный в данной статье, направлен на выявление наиболее эффективных подходов и решений в этой области. В статье рассмотрены такие важные аспекты, как защита от уязвимостей, обработка входных данных, а также выбор безопасных инструментов и технологий. Статья предоставит читателям ценную информацию и рекомендации, которые помогут создать безопасное и надежное программное обеспечение. Научная ценность работы состоит в предпринимаемой попытке систематизации знаний относительно вопроса методик написания программ, устойчивых к кибератакам. Результаты работы могут быть полезны для специалистов, задачей которых является разработка высокоэффективных и безопасных программ.

Ключевые слова: защита данных, безопасный код, программирование, вредоносная программа, программное обеспечение, информационная безопасность, уязвимость, атака

SECURE SOFTWARE DEVELOPMENT

Tarasova Yu.A.

LLC Antiphishing, Tver, e-mail: tarasovayuliya00@gmail.com

Information security and data protection are key elements of effective modern software development. This increases the importance of writing quality code and minimizing the potential for attacks from malicious actors. This article examines the main types of attacks, such as XML parser attacks (protection against XXE), DDoS (Distributed Denial-of-Service), SQL injections, XSS (Cross-Site Scripting), and other vulnerabilities. It provides essential recommendations and requirements for writing secure code, which, when applied in practice, can enhance the stability and reduce the vulnerability of software. The objective of this article is to analyze key aspects related to secure programming. We aim to explore the principles and methods that help developers create software with a high level of security. Secure programming is an integral part of the development process, and our analysis focuses on identifying the most effective approaches and solutions in this field. We will examine important aspects such as vulnerability protection, input data handling, and the selection of secure tools and technologies. Our article will provide readers with valuable information and recommendations to aid in the creation of secure and reliable software. The scientific value of this work lies in the attempt to systematize knowledge regarding the methodology of writing programs resilient to cyber-attacks. The findings of this study can be beneficial to specialists involved in the development of high-performance and secure software.

Keywords: data protection, secure code, programming, malware, software, information security, vulnerability, attack

Обеспечение безопасности и работоспособности является неотъемлемой частью проектирования программного обеспечения. Важно отметить, что внедрение решений по обеспечению информационной безопасности после разработки является дорогостоящей задачей. В связи с этим особенно актуализируются вопросы, связанные с повышением уровня безопасности на этапе проектирования программ [1].

В результате этого особенную актуальность получает такое направление развития, как безопасный код (безопасное программирование). Написание безопасного кода представляет собой такой принцип разработки программного обеспечения, при котором разработчики пытаются учесть всевозможные ошибки и минимизировать

вероятность их возникновения. Это значительно повышает стабильность и снижает уязвимость программного обеспечения. Безопасное программирование способно защитить данные пользователя и снизить вероятность их кражи или фальсификации [2].

Таким образом, рассматриваемое направление имеет значительный уровень актуальности на сегодняшний день. В связи с этим складывается необходимость более детального рассмотрения и анализа основных вопросов относительно принципов и правил написания безопасного кода. Представленные результаты исследования отражают комплексный подход к анализу по теме и могут стать полезным материалом для специалистов, ведущих свою деятельность в данной области [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Ключевыми аспектами по рассматриваемой теме являются: защита от атак на XML-парсеры (защита от XXE); кодирование и экранирование при работе с браузерами; работа с Cookie и HTTP-заголовками; обработка входных данных и работа с SQL. Анализ и учет при разработке данных аспектов являются принципами безопасного программирования. В последующих материалах представлены основные результаты анализа по отдельности данных аспектов [4, 5].

Защита от атак на XML-парсеры является важной частью обеспечения безопасности веб-приложений и систем, которые обрабатывают XML-данные. XML (Extensible Markup Language) – это формат данных, который широко используется для обмена данными между различными приложениями. Однако неправильная обработка XML может привести к различным уязвимостям и атакам, таким как атаки на внедрение кода (XML Injection) или атаки на отказ в обслуживании (Denial of Service, DoS) [6, 7] (рис. 1).

Вследствие этого для защиты от атак на XML-парсеры можно рекомендовать выполнение следующих требований при написании кода [8, 9]:

- обеспечение валидации и фильтрации входных данных. Предотвращение внедрения вредоносного XML-кода начинается с валидации и фильтрации входных данных, поступающих от пользователей или внешних источников. Решение данных задач может включать в себя проверку на наличие недопустимых символов и структуру XML-документов;
- использование безопасных парсеров. Необходимо использовать безопасные XML-парсеры, которые обеспечивают защиту от атак. Примерами являются парсеры с поддержкой OWASP XML Security Gateway или другие инструменты, спроектированные с учетом безопасности;
- защита от DDoS атак. Для предотвращения атак данного типа необходимо

ограничивать глубину и сложность парсинга XML-документов. Это позволяет избежать ресурсоемких атак на вычислительную систему;

- обеспечение возможности аутентификации и авторизации. Важно гарантировать возможность того, что только авторизованные пользователи имеют доступ к XML-документам и могут выполнять действия на основе XML-данных;

- регулярные обновления и обучение персонала. Это является дополнительным требованием помимо представленных ранее принципов безопасного программирования. В дополнение для обеспечения должного уровня информационной безопасности важно постоянно обновлять XML-парсеры и библиотеки для обеспечения безопасности. Также важно проводить обучение персонала с учетом современных угроз и методов защиты.

Следующим аспектом безопасного программирования является экранирование (Escaping) – это важный аспект обеспечения безопасности при работе с браузерами и обработке пользовательских данных [10, 11]. Экранирование используется для предотвращения внедрения вредоносного кода (как HTML, JavaScript, CSS или SQL-инъекции) через пользовательские данные, примером чего является ввод, который пользователи отправляют на сервер или отображается в браузере (рис. 2).

Важно отметить следующие принципы написания безопасного кода в рамках данной области:

- HTML экранирование (HTML Escaping). Когда пользовательские данные выводятся на веб-страницу, они должны быть экранированы. Это нужно для того, чтобы все HTML-теги и специальные символы (например, <, >, &) были представлены как текст, а не интерпретированы как код. Это предотвращает XSS (Cross-Site Scripting) атаки, при которых злоумышленники внедряют вредоносный JavaScript на страницу;

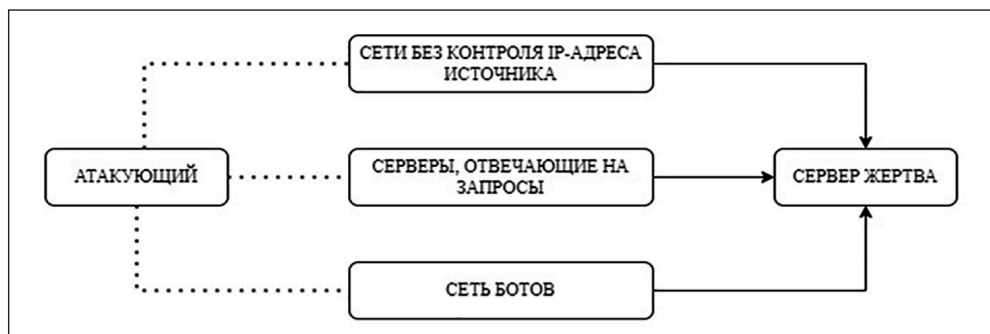


Рис. 1. Принцип DDoS-атаки

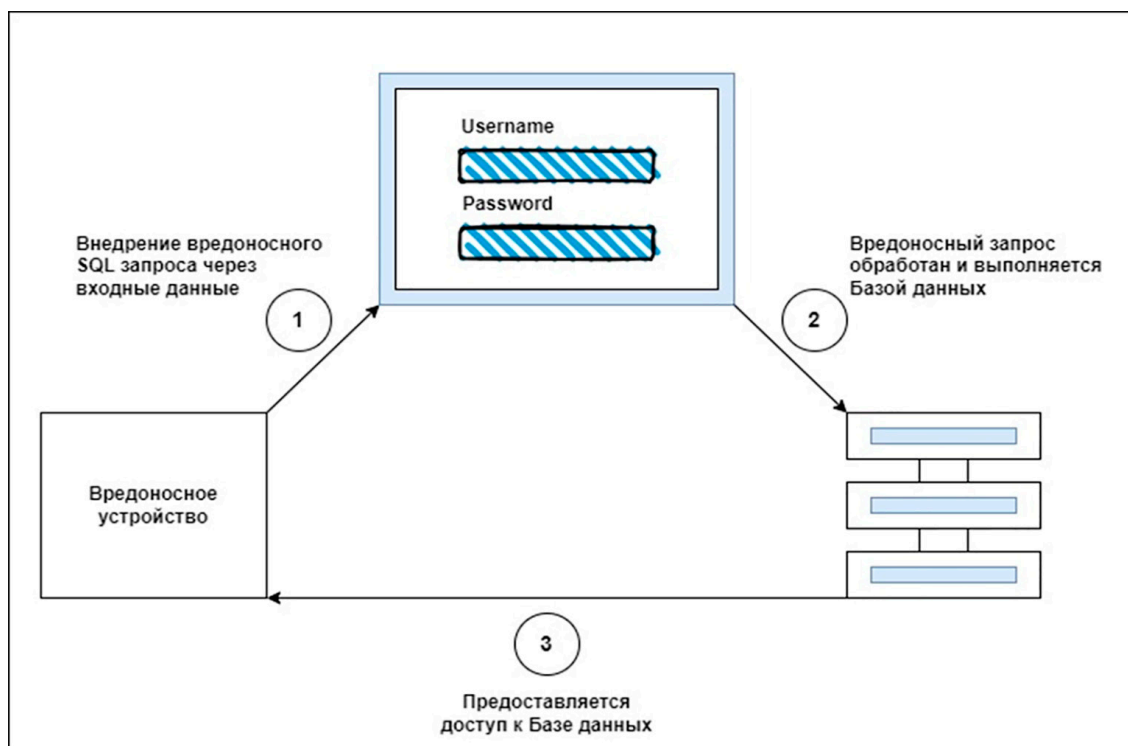


Рис. 2. Схема SQL-инъекции

– JavaScript экранирование (JavaScript Escaping). Если пользовательские данные используются в JavaScript-коде, они также должны быть экранированы, чтобы избежать выполнения вредоносных скриптов. Это особенно важно, когда данные вставляются в строки JavaScript, например, для работы с DOM;

– CSS экранирование (CSS Escaping). Если пользовательские данные влияют на стили CSS, то экранирование должно применяться для избегания инъекций CSS. Это позволяет избежать изменения стилей страницы нежелательным образом;

– SQL экранирование (SQL Escaping). При построении SQL-запросов из пользовательских данных, экранирование используется для предотвращения SQL-инъекций. Это гарантирует, что пользовательские данные не могут быть использованы для выполнения зловердных SQL-запросов к базе данных.

При этом можно отметить следующие примеры функций экранирования:

– в PHP: htmlspecialchars() и mysqli_real_escape_string() для HTML-экранирования и SQL-экранирования соответственно;

– в JavaScript: encodeURIComponent() для URL-экранирования и методы, такие как createElement(), для безопасного создания DOM-элементов.

Важно понимать, что правильное экранирование должно соответствовать контексту использования данных (HTML, JavaScript, CSS, SQL) и выполняться на серверной стороне перед выводом данных на клиентскую сторону. Это помогает предотвратить множество видов атак и обеспечивает безопасность веб-приложений и пользовательских данных [12].

Продолжая анализ по представленной теме, важно отметить, что работа с Cookie и HTTP-заголовками в контексте безопасного кода имеет также большое значение для защиты веб-приложений от различных угроз. Далее представлены некоторые ключевые моменты относительно данного вопроса:

1. Cookie безопасность:

– HttpOnly – необходимо устанавливать флаг HttpOnly для Cookie. Это предотвращает доступ к Cookie из JavaScript и снижает риск кражи сессии (session hijacking).

– Secure – необходимо устанавливать флаг Secure для Cookie, если они должны использоваться только через HTTPS. Это предотвращает перехват Cookie в открытых сетях.

– SameSite – необходимо использовать атрибут SameSite для ограничения того, какие сайты могут получать доступ к вашим Cookie. Рекомендуется установить его как «Strict» или «Lax» [13].

2. HTTP-заголовки безопасности:

– HTTP Strict Transport Security (HSTS). Необходимо включить заголовок HSTS, чтобы заставить клиентов использовать только HTTPS. Это предотвращает атаки перехвата. Примеры:

```
markdownCopy code
Strict-Transport-Security:max-age=31536000;
includeSubDomains; preload
```

– Content Security Policy (CSP). Необходимо установить заголовок CSP, чтобы ограничить источники, с которых загружается контент на сайте. Это помогает предотвратить атаки XSS. Примеры:

```
markdownCopy code
Content-Security-Policy: default-src 'self';
script-src 'self' 'unsafe-inline' 'unsafe-eval';
style-src 'self' 'unsafe-inline'
```

– X-Content-Type-Options. Необходимо установить заголовок X-Content-Type-Options для предотвращения атак с подменной типа контента. Примеры:

```
markdownCopy code
X-Content-Type-Options: nosniff
```

– X-Frame-Options: Необходимо установить заголовок X-Frame-Options для предотвращения атак clickjacking. Примеры:

```
markdownCopy code
X-Frame-Options: DENY
```

– X-XSS-Protection. Необходимо установить заголовок X-XSS-Protection для защиты от атак типа XSS. Примеры:

```
markdownCopy code
X-XSS-Protection: 1; mode=block
```

– Referrer-Policy. Необходимо установить заголовок Referrer-Policy, чтобы контролировать, какие данные о referer отправляются при переходах между страницами. Примеры:

```
markdownCopy code
Referrer-Policy: same-origin
```

Данные меры при написании кода помогут улучшить безопасность веб-приложения, защищая Cookie и управляя HTTP-заголовками. Заключительным из основных аспектов написания безопасного кода является работа с SQL. Обработка

входных данных и работа с SQL в рамках безопасного кода крайне важны для предотвращения атак на базу данных, таких как, например, SQL инъекции. Далее представлены основные меры безопасности относительно данного вопроса [14]:

1. Обработка входных данных:

– параметризованные запросы. Важно всегда использовать параметризованные запросы или подготавливаемые выражения для выполнения SQL-запросов. Это предотвращает возможность выполнения SQL-инъекции;

– валидация входных данных. Необходимо обеспечить возможность при написании кода по проверке входных данных на корректность и соответствие ожидаемому формату;

– использование ORM. Использование Object-Relational Mapping (ORM) фреймворков, таких как SQLAlchemy в Python или Entity Framework в .NET, может упростить работу с базой данных и предотвратить многие типы инъекций.

2. Защита от SQL-инъекций:

– экранирование строк. Если отсутствует возможность использовать параметризованные запросы, то необходимо обязательно экранировать строки перед вставкой их в SQL запросы. При этом можно воспользоваться функциями экранирования, предоставляемыми конкретной СУБД;

– ограничение прав доступа. Важно назначить минимальные права доступа к базе данных пользователям и приложениям. «Принцип наименьших привилегий» помогает ограничить возможности злоумышленников;

– мониторинг и журналирование. Важно вести журнал запросов к базе данных и выполнять его мониторинг на предмет подозрительной активности. Это поможет быстро выявить попытки атак;

– обновление библиотеки и СУБД. Необходимо регулярно обновлять библиотеки и саму СУБД для устранения известных уязвимостей;

– защита от времени выполнения. Защита от атак может обеспечиваться на основе таймингов, устанавливая максимальное время выполнения запросов и отключая выполнение нескольких запросов в одном [15].

Заключение

Таким образом, основной целью представленного исследования являлось выполнение анализа относительно ключевых вопросов, связанных с написанием безопасного кода. В результате работы произведен анализ по таким направлениям, как защита

от атак на XML-парсеры (защита от XXE), кодирование и экранирование при работе с браузерами, работа с Cookie и HTTP-заголовками, а также обработка входных данных и работа с SQL.

Материалы статьи отражают комплексный подход к анализу по представленному направлению, связанному с безопасным программированием.

В заключение необходимо отметить, что интенсивно расширяющееся использование информационных технологий и программного обеспечения значительно увеличивает риски информационной безопасности. Электронная информация и данные, хранящиеся на веб-серверах, в информационных системах и иных ресурсах непрерывно подвергаются потенциальным угрозам со стороны злоумышленников. В связи с этим на сегодняшний день занимают особенное значение вопросы, связанные с безопасным программированием для возможности предотвращения негативных последствий уже на этапе проектирования программного обеспечения. Также, как уже было отмечено ранее, такой подход является наиболее экономически эффективным, так как интеграция мер по защите информации уже к готовым решениям является более дорогой задачей.

Список литературы

1. Попов В.Г., Галиаскаров Д.Ф., Гвоздев Л.Б. Актуальность обеспечения информационной безопасности в сетях IoT // StudNet. 2021. № 4 (4). С. 94–100.
2. Осинцев А.А., Лапонина О.Р. Тестирование уязвимостей во внешних сущностях xml веб-приложений // International Journal of Open Information Technologies. 2019. № 7 (10). С. 71–79.
3. Шутько Н.А. Теоретические понятия защиты Web-приложений от уязвимостей // Вестник науки. 2022. № 4-11 (56). С. 8–11.
4. The NIST National Vulnerability Database (NVD). [Электронный ресурс]. URL: <https://nvd.nist.gov> (дата обращения: 05.09.2023).
5. Шелухин О.И., Игумнов В.О. Гибридный способ обеспечения конфиденциальности пользователя при работе с веб-браузером // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. № 6. С. 4–12.
6. Сигалов Д.А., Хашаев А.А., Гамаюнов Д.Ю. Обнаружение серверных точек взаимодействия в веб-приложениях на основе анализа клиентского JavaScript-кода // Прикладная дискретная математика. 2022. № 53. С. 32–54.
7. Беликов Г.В., Крылов И.Д., Селищев В.А. SQL-инъекция как способ обхода авторизации // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 217–221.
8. Наумова А.В., Чукова Д.И. Безопасное проектирование базы данных при использовании ORM // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 3 (31). С. 14–20.
9. Байко Д.А., Гурвиц Г.А. Специфика создания современного бизнес-приложения в среде СУБД и обеспечение его безопасной работы // Проблемы Науки. 2019. № 1 (134). С. 20–28.
10. Комаров Т.И., Чепик Н.А., Иванов М.А. Разработка высокопроизводительного и безопасного с точки зрения работ с памятью ядра ОС // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 3 (31). С. 25–32.
11. Polyzos G.C., Fotiou N. Building a reliable Internet of things using information-centric networking // Journal of Reliable Intelligent Environments. 2015. No. 1. P. 47–58.
12. L. Li, M.S. Hossain, A.A. Abd El- Latif, M.F. Alhamid. Distortion less secret image sharing scheme for Internet of Things system // Cluster Computing. 2017. P. 1–15.
13. Cetinkaya A., Ishii H., Hayakawa T. An Overview on Denial-of-Service Attacks in Control Systems // Attack Models and Security Analyses. 2019. No. 21. P. 1–29.
14. Chifor B., Patriciu V. Mitigating DoS attacks in publish-subscribe IoT networks // Proc. of Conf. Electronics, Computers and Artificial Intelligence. 2017. P. 1–6.
15. Maynard P., McLaughlin K., Sezer S. Decomposition and sequential-AND analysis of known cyber-attacks on critical infrastructure control systems // Journal of Cybersecurit. 2020. No. 6(1). P. 1–20.