

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

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Строительство.
Электротехника и химические технологии»**

Научный рецензируемый журнал

№ 1 (21), 2024

Тверь 2024

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2024. № 1 (21). 112 с.

Включает научные статьи, подготовленные на основе результатов исследований и экспериментальных разработок в области строительства, электротехники и химических наук, выполненных учеными и специалистами-практиками ведущих вузов и научно-исследовательских учреждений нашей страны и зарубежья. Представлены работы, соответствующие профилю издания по следующим научным специальностям: 2.1.5 Строительные материалы и изделия; 2.4.4 Электротехнология и электрофизика; 2.6.10 Технология органических веществ.

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

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

ISSN 2658-7459 (печатн.)

ISSN 2686-794X (онлайн)

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Белов В.В., Смирнов М.А., Куляев П.В.</i> Основные направления и проблемы при получении современных высокопрочных бетонов.....	5
<i>Жерносек С.В., Пятов В.В., Гультияев В.И.</i> Расчет теплопередачи в установках периодического действия с регистрами обогрева для тепловлажностной обработки железобетонных изделий.....	12
<i>Левиков А.В., Магдеев А.Ш.</i> Сравнительный анализ возведения рамповых и механизированных автостоянок и их экономическая эффективность.....	20
<i>Трофимов В.И.</i> Применение отходов производства композитных сеток для изготовления дорожных бетонных изделий.....	27

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Дюндин А.С., Корнеев К.Б.</i> Анализ влияния работы автоматики на ведение электроэнергетического режима работы энергосистемы крупного города России	32
<i>Максудов Д.В.</i> Применение численных методов для моделирования работы озонатора	38
<i>Попов И.П.</i> Полный учет энергии электростатического поля заряженных сфер	45
<i>Трунов С.С., Крупнов А.В.</i> Оптимальное проектирование систем электроснабжения на ЭВМ с учетом критериев надежности и экономичности	57

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Бровко Р.В.</i> Теоретические и практические особенности трансформации спиртов в углеводороды	75
<i>Туманов Г.А., Долуда В.Ю., Мальков А.А.</i> Теоретические особенности формирования пен.....	84
<i>Сергеев Е.Б., Цховребов Э.С.</i> Технология извлечения метеоданных с интернет-сайта для оценки экологической безопасности населенных пунктов	96

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Belov V.V., Smirnov M.A., Kulyaev P.V.</i> Main directions and problems in production of modern high-strength concretes.....	5
<i>Zhernosek S.V., Pyatov V.V., Gulyaev V.I.</i> Calculation of heat transfer in periodic installations with heating registers for heat and moisture treatment of reinforced concrete products	12
<i>Levikov A.V., Magdeev A.Sh.</i> Comparative analysis of the construction of ramp and mechanized parking lots and their economic efficiency	20
<i>Trofimov V.I.</i> Application of production waste composite grids for the manufacture of concrete products	27

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Dyundin A.S., Korneev K.B.</i> Analysis of the effect of the automation on the maintenance of the electric power mode of operation of the power system of a large Russian city.....	32
<i>Maksudov D.V.</i> Application of numerical methods for modeling the operation of an ozonator	38
<i>Popov I.P.</i> Complete accounting of the energy of the electrostatic field of charged spheres	45
<i>Trunov S.S., Krupnov A.V.</i> Cad with independent design of power supply systems, taking into account the criteria of reliability and efficiency	57

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Brovko R.V.</i> Theoretical and practical features of the transformation of alcohols into hydrocarbons	75
<i>Tumanov G.A., Doluda V.Yu., Malkov A.A.</i> Theoretical features of foam formation	84
<i>Sergeev E.B., Tskhovrebov E.S.</i> Technology for extracting meteorological data from an internet site to assess the ecological condition of settlements.....	96

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.322

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

*В.В. Белов, М.А. Смирнов, П.В. Куляев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Смирнов М.А.,
Куляев П.В., 2024

Аннотация. Изучение проблемы формирования прочности материалов как дисперсных структур на стыке таких фундаментальных наук, как физическая и коллоидная химия, механика сплошной среды и структурная теория разрушения, открывает возможность эффективного поиска оптимальных составов композитных материалов, построения модели структуры материала в объеме, применения физических законов, а также помогает прогнозировать изменение свойств материала в зависимости от внешних условий. Учет оптимального распределения структурных элементов в объеме строительного материала позволяет достаточно полно описать поведение материала и, в частности, существенно повысить прочность бетона и получить его новые перспективные виды.

Ключевые слова: структура материала, оптимальная рецептура, реконструкция пространственных свойств материала, прочность, модификация химическими добавками, наполнители.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-5-11

Как известно, перспективные направления повышения прочности бетонов с возможностью получения новых видов бетона связаны с применением:

новых модификаторов структуры бетона;
вяжущего на основе композитов;
добавок тонкодисперсной структуры;
волоконистых наполнителей [1, 2].

Сегодня в поле зрения науки и практики находится широкая номенклатура бетонов различного назначения и эксплуатационных свойств. По критерию предела прочности при сжатии их можно условно подразделить на четыре большие группы:

I – рядовые бетоны (с прочностью до 40 МПа), имеющие массовый спрос и потребление на строительном рынке;

II – высокопрочные бетоны (40–80 МПа), широко применяемые в строительстве высотных зданий и сооружений;

III – особо высокопрочные бетоны (80–120 МПа) для конструкций зданий и сооружений повышенной ответственности и большого ресурса эксплуатации;

IV – сверхвысокопрочные бетоны (более 120 МПа) уникального назначения.

Свойства бетона определяются его структурой. Совокупность возможных и необходимых механизмов формирования структуры для каждой группы бетонов систематизирована в статье [3]. Для получения высокопрочных бетонов II группы достаточно эффективны методы повышения их плотности за счет оптимизации зернового состава крупного и мелкого заполнителей, а также за счет снижения водоцементного отношения [3–7].

В проблеме формирования структуры высокопрочных бетонов очень важным моментом является их способность противостоять процессам возникновения и роста трещин под воздействием нагрузок. Для особо высокопрочных (III группа) и сверхвысокопрочных (IV группа) бетонов это актуально, так как при весьма высокой прочности на сжатии они имеют относительно малую прочность при растяжении и низкую трещиностойкость. Иерархия трещинообразования бетонов и совокупности трещин свидетельствуют о целесообразности и необходимости многоуровневого дисперсного армирования. При многоуровневом дисперсном армировании, когда рост субмикротрещин может сдерживаться выращенными в процессе гидратации (самоармирования) кристаллами этрингита, рост микротрещин – волокнами асбеста, а макротрещин – базальтовыми волокнами, достигается весьма эффективное торможение трещин, позволяющее повысить трещиностойкость бетона более чем в четыре раза [3, 8, 9].

При производстве высокопрочных бетонов большое значение имеет процентное соотношение воды и цемента, существенно меньшее 0,4. Это позволяет снизить пористость и, соответственно, повысить прочность матрицы цементного камня. Однако снижение водоцементного соотношения отрицательно влияет на удобство практической укладки бетона, что можно устранить только путем повышения содержания вяжущего с добавкой суперпластификаторов. Получение самоуплотняющихся высокопрочных бетонов с суперпластификаторами связано с преодолением трех противоречивых факторов: получением высокой текучести бетонной смеси с распылом конуса 55–70 см (осадка конуса более 20 см), исключением расслаиваемости ее и достижением высокой прочности бетона 100–150 МПа и более [5, 10].

Известно, что один и тот же цемент при твердении в прессованном виде и в виде суспензии (пасты) имеет отношение R_{28}/R_1 (где R_{28} и R_1 – пределы прочности на сжатие соответственно в возрасте 28 и 1 суток), отличающееся в несколько раз. Поэтому из приведенного анализа условий получения высокопрочных бетонов следует, что оптимальное водоцементное отношение (В/Ц) в бетонах незначительно превышает уровень нормальной густоты (НГ) цементного теста [11]. Это правило оценки водосодержания бетонной смеси должно быть выражено как $В/Ц = НГ/100$. Водоцементное отношение бетонной смеси для высокопрочного бетона можно выразить соотношением [11]:

$$В/Ц = К(НГ/100),$$

где K – коэффициент рецептурной эффективности состава бетона и реологической активности суперпластификатора.

На прочность цементного камня влияет соотношение между кристаллической и гелеобразной составляющими (при оптимальном соотношении достигается лучшая плотность контактов между элементами твердой фазы), а также наличие особо

тонкозернистого микронаполнителя и наноэлементов. Микронаполнитель увеличивает плотность цементного камня, а наноэлементы упрочняют контактную зону. При уменьшении поперечного размера нитевидных кристаллов эттрингита прочность их повышается [12]. Реальный цемент является полиминеральным материалом. Структура затвердевшего цементного камня состоит из кристаллических элементов различных размеров и конфигурации. В соответствии с законами физики твердого тела и вероятностно-статистической теорией прочность подобных материалов зависит от размеров структурных элементов, характера пористости (применительно к цементному камню) и прочности контактов между элементами твердой фазы.

С помощью электронного сканирующего микроскопа и малоугловой рентгенографии авторами [13] было изучено влияние структуры цементного камня на его прочность и энергию разрушения. Применение химических добавок и различных режимов твердения позволило в заметных пределах изменять размеры кристаллов и пор в цементном камне и, соответственно, его прочность. С уменьшением среднего размера кристаллов прочность цементного камня возрастает. Поэтому для получения высокопрочных бетонов особое значение имеет создание плотной тонкозернистой структуры цементного камня.

Повышения плотности и прочности бетона можно добиться скорректированным составом смеси, оптимальным количеством заполнителей, наполнителя и их плотной упаковкой [14]. Применение наполнителей различного происхождения в оптимальном количестве в бетонной смеси позволяет регулировать зерновой состав и достигать некоторых требуемых характеристик сырьевой смеси и бетона [15]. Наполнитель в составе смеси способен снизить пористость бетона и улучшить структурообразование. Кроме того, заменяя часть вяжущего вещества наполнителем, можно улучшить коррозионную стойкость бетона, в частности карбонизационную, причем глубина карбонизации будет зависеть от доли наполнителя в смеси и его удельной поверхности [16].

Использование порошкообразных минеральных модификаторов (ПММ) [17], состоящих из микрокремнезема, алюмо- и карбонатсодержащей добавок в составе бетона позволяет получить камень с высокой контактной зоной, минимальным содержанием пор и микротрещин. Это объясняется спецификой структуры компонентов, обусловленной активно сформированной матрицей вяжущего за счет использования запасенной в порах воды, а также микроструктурой контактных зон заполнителя и цементного камня [17], т.е. полезность микрочастиц в том, что они вбирают в себя воду и отдают ее при гидратации вяжущего для формирования оптимальной структуры бетона.

Заметное влияние на структуру и свойства бетона оказывает заполнитель. Целесообразно, чтобы прочность крупного заполнителя была на 20 % выше прочности бетона [18]. Поэтому на известняковом заполнителе получают бетоны с максимальной прочностью 40–60 МПа, на гранитном – с прочностью 80–120 МПа, на особо прочных горных породах (габбро-диабазе, базальте) – с прочностью 150–180 МПа. Для получения более прочных материалов требуется переход на более мелкие и прочные заполнители, например кварцевые пески из особопрочных горных пород, так как в более мелких зернах более однородна структура и меньше вероятность появления дефектов, снижающих прочность зерен. Введение заполнителя, особенно крупного, огрубляет структуру, повышает вероятность появления серьезных дефектов, в первую очередь в контактной зоне между заполнителем и цементным камнем и, соответственно, понижает прочность бетона [18].

Заполнитель заметно влияет на водопотребность бетонной смеси: с увеличением его содержания и уменьшением крупности водопотребность возрастает. Дополнительная вода, вводимая в бетонную смесь для обеспечения ее заданной подвижности, уменьшает плотность бетона и понижает его прочность в результате образования капиллярной пористости. Введение суперпластификаторов или комплекса «суперпластификатор – микрокремнезем – активизирующий компонент» позволяет существенно снизить водопотребность бетонной смеси, существенно уплотнить и улучшить структуру бетона и тем самым повысить его прочность. В композиционных вяжущих веществах модификаторы, например суперпластификаторы и активные минеральные компоненты, вводятся непосредственно при помоле вяжущего. За счет этого удается увеличить оптимальную дозировку суперпластификатора до 2–3 % (при введении в бетонную смесь 1–1,5 %) и получить вяжущее с повышенной удельной поверхностью (500–600 м²/кг), высокой однородностью и оптимальным для получения плотного цементного камня соотношением между различными элементами твердой фазы. В результате бетонная смесь может укладываться при предельно низких водоцементных отношениях ($V/C \approx 0,2$), в то время как для обычной доброкачественной бетонной смеси минимальные значения V/C составляют приблизительно 0,4, а для бетонной смеси с суперпластификатором – около 0,3. Бетоны на композиционном вяжущем обладают наивысшей плотностью структуры и прочностью.

Следует особо отметить, что применение низких водоцементных отношений обеспечивает быстрый рост прочности высокопрочных бетонов в раннем возрасте. Уже через 8–10 часов прочность может достигать 10–20 МПа, с достаточно высоким расходом цемента, а через сутки – 30–100 МПа. При этом такие бетоны обладают повышенным выделением тепла вследствие быстрой гидратации цемента в раннем возрасте. Это значительно упрощает ведение бетонных работ в зимний период: достаточно применения подогретых смесей и их кратковременного термосного выдерживания без специальных мероприятий, обычно проводимых при зимнем бетонировании. Быстрый набор прочности также резко ускоряет процесс возведения монолитных конструкций и сооружений.

Наиболее эффективно использование в высокопрочных бетонах не отдельных модификаторов, а специально подобранных комплексов в зависимости от назначения бетона и предъявляемых к нему требований. Помимо суперпластификатора вводятся антивоздухововлекающие либо, наоборот, воздухововлекающие или микрогазообразующие добавки, добавки, управляющие структурообразованием, в частности кинетикой схватывания и твердения, расширяющие добавки, активные минеральные компоненты и супертонкие наполнители, волокнистые добавки, наноэлементы и др. Состав комплекса должен соответствовать выбранной технологии и заданным свойствам бетона.

Одной из главных задач при производстве высокопрочных бетонных смесей является обеспечение удобоукладываемости бетонной смеси в течение периода, предусмотренного строительной практикой. Это предполагает:

- постоянный контроль влажности заполнителей;
- высокую точность дозировки;
- использование смесителей, обеспечивающих высокую интенсивность смешивания компонентов;

определение последовательности загрузки компонентов и соответствующей продолжительности смешивания;

учет времени, требующегося для транспортировки и укладки бетона, и соотнесение его с началом твердения (при работе с товарным бетоном); при быстром твердении следует добавить замедлитель;

определение правил дополнительной дозировки пластификатора на строительной площадке [19].

В сравнении с традиционными бетонами у высокопрочных проявляется один существенный недостаток, заключающийся в более интенсивной аутогенной усадке. Это может привести к возникновению сильных напряжений на растяжение в первые же дни после укладки бетона, что, в свою очередь, способствует процессам дальнейшего трещинообразования. При этом за счет внешнего ухода уменьшения аутогенной усадки достичь нельзя. Для борьбы с возникновением трещин в высокопрочных бетонах вследствие аутогенной усадки необходимо наличие микровключений, содержащих свободную воду и равномерно распределенных по всему объему бетона. В качестве таких микровключений весьма эффективно применение полимеров SAP, которые имеют высокую абсорбирующую способность, благодаря чему накапливают молекулы воды и играют, таким образом, роль микронакопителей свободной воды [20].

Дальнейшее создание новых бетонов пойдет по пути использования теории и технологии строительных композиций, причем изучение проблемы формирования прочности материалов как дисперсных структур базируется на стыке таких фундаментальных наук, как физическая и коллоидная химия, механика сплошной среды и структурная теория разрушения. При этом очевидно, что для понимания синтеза прочности и регулирования деформативности структур необходимо уделять должное внимание не только химическим процессам, но и явлениям физического и физико-химического характера, в том числе на стадии приготовления сырьевых смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мащенко К.Г. Модификаторы – шаг к повышению качества бетонов и растворов // *Строительные материалы*. 2004. № 6. С. 62–63.
2. Каримов И.Ш. Тонкодисперсные минеральные наполнители в составах цементных композиций: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.23.05. СПб., 1996. 22 с.
3. Гусев Б.В., Дуамбеков Б.С., Чеховский Ю.В., Корегин В.Н. Влияние микронаполнителей на свойства мелкозернистых бетонов // *Изв. вузов. Стр-во и архитектура*. 1987. № 10. С. 127–130.
4. Быховский И.И. Зависимость эффективной частоты вибрирования бетонной смеси от крупности заполнителя // *Вибрационная техника*. М.: НИИИнфстройдоркоммунмаш, 1966. С. 108–113.
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние структуры цементного камня с добавкой микро-кремнезема и суперпластификатора на свойства бетона // *Бетон и железобетон*. 1992. № 7. С. 4–7.
6. Михайлов Н.В. Основные принципы новой технологии бетона и железобетона. М.: Госстройиздат, 1961. 53 с.
7. Кононова О.В. Разработка технологии бетона с минеральным наполнением с учетом дисперсности наполнителя и цемента: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05.23.05. М., 1989. 20 с.

8. Гусев Б.В. Основные направления развития вибрационного способа уплотнения бетонных смесей / Технология производства сборного железобетона в условиях низких температур: труды. Вып. 175/2. Днепропетровск: ДИИТ, 1975. С. 3–27.
9. Афанасьев А.А. Технология импульсного уплотнения бетонных смесей: автореф. на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук: 05.23.08. М.: Стройиздат, 1987. 49 с.
10. Волженский А.В., Карпова Т.А. Влияние низких водоцементных отношений на свойства цементного камня при длительном хранении // *Строительные материалы*. 1980. № 7. С. 15–16.
11. Лесовик Р.В. Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Белгород, 2009. 496 с.
12. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Портландцемент. Минералогический и гранулометрический составы, процессы модифицирования и гидратации. М.: Стройиздат, 1974. 328 с.
13. Ярлушкина С.Х. Физико-химические процессы, их роль в формировании прочности цементного камня с заполнителями // *Структурообразование бетонов и физико-химические методы его исследования: сборник трудов*. М.: НИИЖБ, 1980. С. 60–69.
14. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Теоретические предпосылки создания цементных композитов повышенной непроницаемости // *Вестник СибАДИ*. 2016. Вып. 1 (47). С. 65–72.
15. Толстой А.Д. Долговечность многокомпонентного бетона в условиях действия агрессивных сред // *Вестник ВСГУТУ*. 2019. № 4 (75). С. 83–88.
16. Хежев Т.А., Кажаров А.Р., Журтов А.В., Семенов Р.Н., Желоков Т.Х., Карданов А.А., Ногеров М.Б. Самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны с применением отходов камнедробления // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 1 (44). С. 89.
17. Белов В.В., Образцов И.В. Исследование закономерностей структурообразования строительных цементных композитов в целях получения оптимальных рецептур приготовления сырьевых смесей // *Сборник научных трудов РААСН*. 2017. Т. 2. С. 85–94.
18. Скрамтаев Б.Г. Теория и прочность бетонов. Новые виды бетонов. Харьков: Госнаучтехиздат, 1934. 236 с.
19. ГОСТ 12730.0-2020. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водопроницаемости.
20. Федосов С.В., Акулова М.В. Плазменная металлизация бетонов. М.: АСВ, 2003. 122 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Смирнов М.А., Куляев П.В. Основные направления и проблемы при получении современных высокопрочных бетонов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 5–11.

**MAIN DIRECTIONS AND PROBLEMS
IN PRODUCTION OF MODERN HIGH-STRENGTH CONCRETES**

V.V. Belov, M.A. Smirnov, P.V. Kulyaev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The study of the problem of forming the strength of materials as dispersed structures at the junction of such fundamental sciences as physical and colloidal chemistry, solid medium mechanics and structural theory of destruction makes it possible to effectively search for optimal compositions of composite materials, build models of the material structure in volume, apply physical laws and predict changes in material properties depending on external conditions. Taking into account the optimal distribution of structural elements in the volume of construction material makes it possible to fully describe the material management and, in particular, significantly increase the strength of concrete and obtain its new promising types.

Keywords: structure of the material, optimal formulation, reconstruction of the spatial properties of the material, strength, modification with chemical additives, fillers.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Smirnov M.A., Kulyaev P.V. Main directions and problems in production of modern high-strength concretes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 5–11.

УДК 621.1

**РАСЧЕТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В УСТАНОВКАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
С РЕГИСТРАМИ ОБОГРЕВА ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ****С.В. Жерносек¹, В.В. Пятов¹, В.И. Гультияев²**¹*Витебский государственный технологический университет
(г. Витебск, Республика Беларусь)*²*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*© Жерносек С.В., Пятов В.В.,
Гультияев В.И., 2024

Аннотация. Работа направлена на повышение энергоэффективности технологий производства изделий из сборного железобетона путем рациональной организации процесса тепловлажностной обработки (ТВО) в установках периодического действия. Проведено исследование механизма теплопередачи на основе критериальных уравнений, описывающих закономерности нагрева оснований формовочных дорожек с использованием регистров на гладких трубах. Анализ основных закономерностей теплового баланса дорожек позволил выполнить расчет необходимого количества насыщенного пара для обеспечения требуемой производительности процесса ТВО изделий при заданных параметрах регистров обогрева и использовании стандартного пластинчатого теплообменника типа «пар-вода» для подготовки вторичного теплоносителя. Результаты работы подтвердили высокую энергоэффективность процесса ТВО железобетонных изделий на формовочных дорожках с регистрами обогрева на гладких трубах.

Ключевые слова: изделия из сборного железобетона, тепло-влажностная обработка, регистры обогрева, установки периодического действия, режимы обработки, теплообменник, насыщенный пар.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-12-19**ВВЕДЕНИЕ**

При производстве бетонных и железобетонных изделий большую роль играет ТВО, непосредственно влияющая на все технологические этапы структурообразования, что сказывается на качестве готового изделия. Обоснованный выбор параметров ТВО обеспечивает высокие показатели качественных свойств сырья, определяемых требованиями к строительным изделиям, за счет физических и физико-химических процессов в обрабатываемом материале, течение которых зависит от воздействия тепла [1–4]. Как известно, примерно треть стоимости строительных изделий – затраты на их ТВО, что составляет до 80 % всех топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), расходуемых на технологический процесс.

С целью снижения расхода ТЭР многие авторы [4–8] рекомендуют:

максимально использовать возможности тепловой инерционности установок и осуществления за счет этого термосного выдерживания разогретых изделий;

учитывать набор прочности в период межсменных перерывов, при выдерживании, а также в период хранения на складах;
снижать максимальную температуру разогрева изделий;
применять цементы с более высоким показателем активности при ТВО;
добавлять быстротвердеющие цементы;
применять химические добавки, интенсифицирующие твердение бетона при тепловом воздействии.

Для ускорения твердения используются установки для ТВО, которые выбираются в зависимости от технологической схемы производства, объема и типа выпускаемой продукции. На промышленных предприятиях по выпуску изделий из сборного железобетона применяются установки периодического действия (формовочные дорожки, пропарочные ямные камеры, вибростолы).

Рациональная организация процесса производства бетонных изделий предполагает комплексный анализ энергетического баланса, определение удельных норм расхода энергоресурсов, использование рациональных режимов тепловой обработки в зависимости от класса (марки) бетона, теплотехнических свойств строительных материалов, технологической схемы [1, 8–13].

С целью повышения энергоэффективности ТВО наряду с традиционными способами пропаривания железобетонных изделий с использованием насыщенного пара в настоящее время на промышленных предприятиях внедряются усовершенствованные системы парораспределения. Известны работы, посвященные внедрению установок ТВО бетонных изделий с применением трубчатых электронагревателей, использованием продуктов сгорания природного газа, тепловых регистров и других источников тепла, позволяющих значительно увеличить энергоэффективность и уменьшить технологические затраты по сравнению с пропариванием [1–4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемая в работе установка включает формовочные дорожки, обогреваемые регистрами (табл. 1). Одиночный регистр представляет собой массив гладких стальных труб, параллельно расположенных под основанием формовочной дорожки и соединенных между собой (рисунок). Трубы регистров в нижней части межтрубного пространства изолированы от бетонного основания теплоизоляционным материалом (фольгоизол, толщина 10 мм). Межтрубное пространство заполнено воздухом. Теплоноситель (вода) в регистрах подогревается посредством пластинчатого теплообменного аппарата, греющим теплоносителем при этом является насыщенный пар, вырабатываемый парогенератором или паровым котлоагрегатом.

Для определения коэффициента теплоотдачи α в трубах от горячей воды к воздуху в щели используется уравнение

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_b}{d}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта; λ_b – коэффициент теплопроводности воды, $\lambda_b = 0,685 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$.

Число Nu определяется в зависимости от характера движения и агрегатного состояния теплоносителей по критериальным уравнениям различного вида. Число

Нуссельта найдем из критериального уравнения для турбулентного режима течения жидкости (уравнение Михеева) [14–16]:

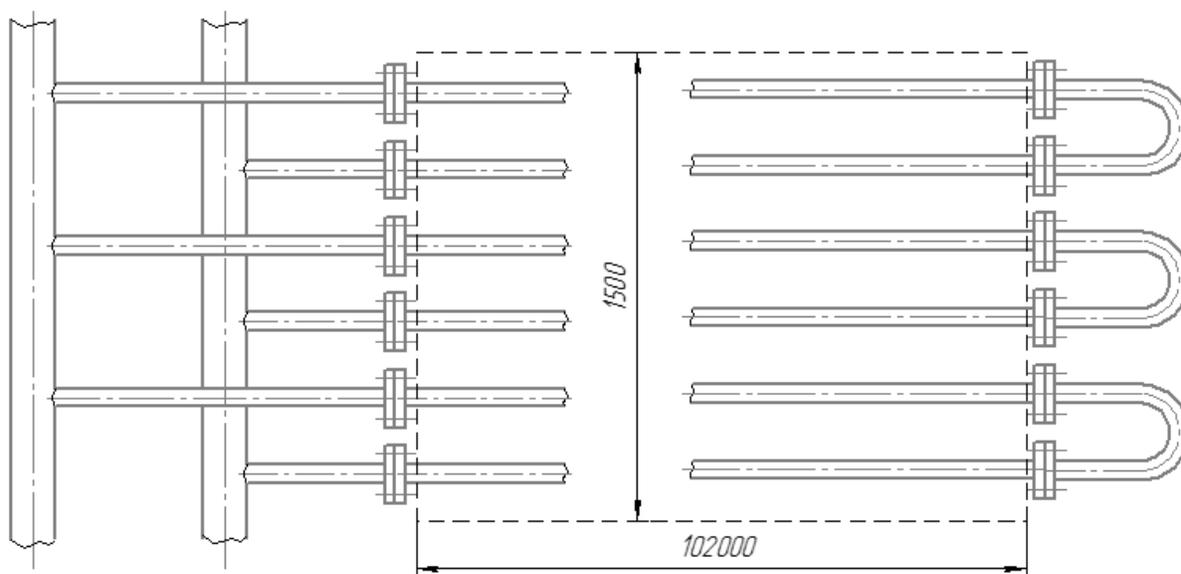
$$\text{Nu} = 0,021\text{Re}^{0,8}\text{Pr}^{0,43}, \quad (2)$$

где $\text{Re} = \vartheta d / \nu_b$ – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля.

Таблица 1

Параметры установки для ТВО изделий из сборного железобетона

Параметр	Значение
Первичный теплоноситель	Насыщенный водяной пар при давлении $P = 0,4$ МПа; температура пара $t_n = 120\text{--}150$ °С
Вторичный теплоноситель	Вода $t_{в1} = 110$ °С
Размеры дорожек: длина ширина высота межтрубного пространства	$l = 102$ м $b = 1,5$ м $h = 0,18$ м
Характеристика регистра	Шесть труб $d = 40$ мм, $l = 102$ м
Основание дорожек	Стальной лист $\delta_{л} = 0,01$ м, $\rho_{л} = 7\,910$ кг/м ³ ; $\lambda_{л} = 45,4$ Вт/м °С; $c_{л} = 0,462$ кДж/кг °С
Режим термообработки: разогрев изотермическая выдержка	$\tau_1 = 3$ ч $\tau_2 = 11$ ч



Принципиальная схема теплового регистра
для прогрева формовочных дорожек

Критерий Рейнольдса находим по формуле

$$Re = \vartheta d / \nu_B, \quad (3)$$

где ϑ – скорость движения воды в трубах; ν_B – кинематическая вязкость воды.

Предварительно принимаем $\vartheta = 0,9$ м/с.

При $t_B = 110$ °С $\nu_B = 0,272 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $Pr = 1,6$.

Термическим сопротивлением теплоотдачи $R_\alpha = 1/\alpha_1$ и теплопроводности стальной трубы $R_\lambda = \delta_{тр} / \lambda_{тр}$ можно пренебречь.

Определяем коэффициент теплоотдачи α_2 от поверхности горячей трубы к воздуху в воздушной щели при средней температуре воздуха в периоде разогрева $t_B - 50$ °С по формуле [14, 15]:

$$Nu_2 = 0,76 (GrPr)^{0,25}, \quad (4)$$

где Gr – критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta \delta^3 \Delta t_{\text{ср}}}{\nu_{\text{воз}}^2}, \quad (5)$$

где β – коэффициент объемного расширения воздуха.

Коэффициент объемного расширения находим по формуле [14]:

$$\beta = \frac{1}{T}. \quad (6)$$

Принимая для воздуха $Pr_{\text{воз}} = 0,698$ [12], вычислим произведение:

$$(GrPr)^{0,25} = (3,2 \cdot 10^7 \cdot 0,698)^{0,25} = 60,7.$$

Из уравнения теплопередачи находим плотность теплового потока через стенку трубы от горячего теплоносителя, которым является вода в трубах регистра, к воздуху в межтрубном пространстве и к металлической поверхности основания дорожек [14]:

$$q = k(t_{\text{воз}} - t_B), \quad (7)$$

где k – коэффициент теплопередачи для плоской стенки, зависящий от коэффициентов теплоотдачи, термического сопротивления стенки и загрязнений [14, 15]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{тр}}{\lambda_{тр}} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (8)$$

Величинами термического сопротивления теплоотдачи $1/\alpha_1$ и теплопроводности $\delta_{тр} / \lambda_{тр}$ можно пренебречь ввиду их незначительности.

Получим

$$k \approx \alpha_2. \quad (9)$$

Необходимая мощность теплового потока

$$N = qF, \quad (10)$$

где F – площадь металлической поверхности основания дорожек.

Из уравнения теплового баланса определяем расход теплоты на нагрев металлического основания дорожек:

$$Q = M_{\text{л}} c_m t_{\text{л}}, \quad (11)$$

где $M_{\text{л}}$ – масса металлического листа основания.

Для определения необходимого расхода теплоносителя, подаваемого на нагрев воды в теплообменный аппарат на коллектор подачи тепловых регистров, составляем уравнение теплового баланса:

$$N = G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot \Delta t, \quad (12)$$

где N – мощность теплового потока; $G_{\text{в}}$ – массовый расход вторичного теплоносителя; Δt – температурный напор.

Температуру теплоносителя, возвращаемого из теплового регистра на подогрев в теплообменный аппарат, принимаем $t_{\text{в}2} = 70$ °С.

Из уравнения (12) находим расход теплоносителя.

Часовой расход вторичного теплоносителя (воды) в теплообменном аппарате

$$V_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot 3600. \quad (13)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расход первичного теплоносителя (насыщенного пара) на нагрев воды в теплообменном аппарате из уравнения баланса тепла составит

$$Q = D(i_{\text{н}1} - i_{\text{н}2})\eta = G_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{в}1} - t_{\text{в}2}), \quad (14)$$

где η – коэффициент сохранения теплоты пластинчатого теплообменного аппарата;

$i_{\text{н}1}, i_{\text{н}2}$ – энтальпия пара на входе и выходе из теплообменника.

С учетом потерь по эксергетическому балансу, КПД принимаем равным 80 % [17]. При температуре насыщенного пара $t_{\text{н}} \approx 143$ °С ($P = 3$ бар) энтальпии составят $i_{\text{н}1} = 2725$ кДж/кг и $i_{\text{н}2} = 561$ кДж/кг. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета регистров обогрева для ТВО железобетонных изделий
в установках периодического действия

Расчетный параметр	Формула	Вычисленное значение
α_1	(1)	5 490 Вт/(м ² °С)
α_2	(1)	8,2 Вт/(м ² °С)
Nu_1	(2)	320,6
V_B	(2)	1,65 м ³ /ч
Re_1	(3)	132 353
Nu_2	(4)	46,22
Gr	(5)	$3,2 \cdot 10^7$
β	(6)	$3,1 \cdot 10^{-3}$ 1/К
q	(7)	492 Вт/м ²
k	(9)	8,2 Вт/(м ² °С)
N	(10)	76 кВт
Q	(11)	279 209 кДж (77,5 кВт/ч)
D	(14)	0,056 кг/с

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что при применении тепловых регистров для прогрева формовочных дорожек для железобетонных изделий расход пара составляет приблизительно 200 кг/ч на одну дорожку с размерами 102 x 1,5 м. При этом удельный расход пара составляет 110–150 кг/м³ с учетом коэффициента загрузки формовочных дорожек и габаритных размеров изделия, что соответствует современным показателям энергоэффективности процесса влажностно-тепловой обработки бетонных изделий и в 1,5–2 меньше, чем при использовании систем парораспределения в ямных камерах [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования механизма теплопередачи в процессе нагрева металлических оснований формовочных дорожек с использованием регистров на гладких трубах и представлены результаты расчета критериальных уравнений теплопередачи. Исследованы основные закономерности теплового баланса дорожек, определен расход насыщенного пара для процесса ТВО железобетонных изделий при заданных параметрах регистров обогрева и использовании стандартного пластинчатого теплообменника типа «пар-вода» для подготовки вторичного теплоносителя. На основе величины удельного расхода пара проведен анализ энергоэффективности процесса ТВО железобетонных изделий на формовочных дорожках с регистрами обогрева на гладких трубах. Результаты исследований могут быть использованы в инженерной практике при расчетах процессов ТВО бетонных изделий в установках периодического действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепловые агрегаты и установки: учебное пособие. М.: МИСИ – МГСУ, 2020. 96 с.

2. Алимов Л.А., Воронин В.В., Технология строительных изделий и конструкций: Бетонведение. М.: Академия, 2010. 425 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2011. 528 с.
4. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1977. 159 с.
5. Рекомендации по тепловой обработке тяжелого бетона с учетом активности цемента при пропаривании. М.: Госстрой СССР, 1984. 20 с.
6. Пособие по тепловой обработке сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85). М.: Стройиздат, 1989.
7. Рекомендации по снижению расхода тепловой энергии в камерах для тепловлажностной обработки железобетонных изделий. М.: Стройиздат, 1984. 56 с.
8. Баженов Ю.М. Алимов Л.А., Воронин В.В., Трескова Н.В. Проектирование предприятий по производству строительных материалов и изделий. М.: АСВ, 2005. 472 с.
9. СН 513-79. Временные нормы для расчета расхода тепловой энергии при тепловлажностной обработке сборных бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях. М.: Стройиздат, 1980. 48 с.
10. СНиП 3.09.01-85. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 44 с.
11. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М., 2005. 140 с.
12. Строительные материалы: справочник под ред. А.С. Болдырева, П.П. Золотова. М.: Стройиздат, 1989. 567 с.
13. Митронов В.А., Лемешев А.С., Семенник В.Э., Жерносек С.В., Марущак А.С. Теплотехнический расчет пропарочных ямных камер // *Материалы докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов: в 2 т.* Витебск: УО «ВГТУ», 2023. Т. 2. С. 467–470.
14. Михеев М. А. Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
15. Расчет теплообменных аппаратов: методические указания к курсовому и дипломному проектированию / сост. Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин. Волгоград: ВолГАСУ, 2013. 68 с.
16. Дударовская О.Г., Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Моделирование теплоотдачи в каналах с хаотичной насадочной упаковкой с учетом затухания турбулентности в пограничном слое // *Фундаментальные исследования.* 2016. № 3-1. С. 20–24.
17. Столяренко В.И., Жерносек С.В., Ольшанский В.И., Марущак А.С., Мовсесян В.Ю. Исследование эффективности пластинчатого теплообменника // *Материалы и технологии.* 2020. № 1 (5). С. 33–38.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖЕРНОСЕК Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики, УО «Витебский государственный технологический университет», 210038, Беларусь, г. Витебск, Московский пр., д. 72. E-mail: zs_85@mail.ru

ПЯТОВ Владислав Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплоэнергетики, УО «Витебский государственный технологический университет», 210038, Беларусь, г. Витебск, Московский пр., д. 72. E-mail: zs_85@mail.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Жерносек С.В., Пятов В.В., Гульяев В.И. Расчет теплопередачи в установках периодического действия с регистрами обогрева для тепло-влажностной обработки железобетонных изделий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 12–19.

**CALCULATION OF HEAT TRANSFER IN PERIODIC INSTALLATIONS
WITH HEATING REGISTERS FOR HEAT AND MOISTURE TREATMENT
OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS**

S.V. Zhernosek¹, V.V. Pyatov¹, V.I. Gulyaev²

¹ *Vitebsk State Technological University
(Vitebsk, The Republic of Belarus)*

² *Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The work is aimed at improving the energy efficiency of technologies for the production of precast concrete products through the rational organization of the heat and moisture treatment process in periodic installations. A study of the heat transfer mechanism based on criteria equations describing the heating patterns of the bases of molding tracks using registers on smooth pipes has been carried out. An analysis of the main patterns of the heat balance of the tracks made it possible to calculate the required amount of saturated steam to ensure the required performance of the heat treatment process of products with the given parameters of the heating registers and the use of a standard plate heat exchanger of the “steam-water” type for the preparation of the secondary coolant. The results of the work confirmed the high energy efficiency of the process of making reinforced concrete products on molding tracks with heating registers on smooth pipes.

Keywords: precast concrete products, heat and moisture treatment, heating registers, periodic installations, processing modes, heat exchanger, saturated steam.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ZHERNOSEK Sergey Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Engineering, Vitebsk State Technological University, 72 Moskovsky Ave., Vitebsk, Belarus, 210038. E-mail: zs_85@mail.ru

PYATOV Vladislav Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Thermal Power Engineering Vitebsk State Technological University, 72 Moskovsky Ave., Vitebsk, Belarus, 210038. E-mail: zs_85@mail.ru

GULTYAEV Vadim Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Roads, Substructures and Foundations, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vig0@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Zhernosek S.V., Pyatov V.V., Gulyaev V.I. Calculation of heat transfer in periodic installations with heating registers for heat and moisture treatment of reinforced concrete products // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 12–19.

УДК 656.015

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗВЕДЕНИЯ
РАМПОВЫХ И МЕХАНИЗИРОВАННЫХ АВТОСТОЯНОК
И ИХ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ***А.В. Левиков, А.Ш. Магдеев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Левиков А.В., Магдеев А.Ш., 2024

Аннотация. Стремительное развитие современных городов и мегаполисов, повышение уровня урбанизации, рост населения, и, соответственно, увеличение количества автомобилей приводят к нехватке организованных парковочных мест. В статье раскрыты преимущества и недостатки различных способов проектирования и строительства автостоянок и предложен анализ экономической эффективности рамповых и механизированных автостоянок в условиях существующей застройки. По результатам анализа различных вариантов создания парковочных пространств в исторических центрах городов определен оптимальный способ с позиции капитальных и эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: надземная парковка, механизированная парковка, автостоянка, экономическая эффективность автостоянок, классификация автостоянок.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-20-26**ВВЕДЕНИЕ**

В последние десятилетия отмечается стремительный рост автомобилизации населения во всех городах мира. Сегодня на одну тысячу горожан приходится порядка 350–450 автомобилей, что побуждает городские власти отказаться от бесплатного использования перегруженных парковочных общественных пространств и перейти на обустройство организованных платных парковок, спрос на которые можно регулировать стоимостью парковочного места в час. С одной стороны, регулированием спроса на парковки одновременно решается проблема трафика в перегруженных автомобилями зонах (это, как правило, центральные улицы и районы городов). С другой стороны, подобные ограничения передвижения личного транспорта снижают уровень комфорта жизни горожан.

В России практика платных парковочных мест начала активно внедряться в 2012 году с Москвы. Она показала свою эффективность с 1930-х годов в США и с 1960-х годов в странах Западной Европы [1]. Однако многие города России, возникшие в X–XV веках, имеют индивидуальные особенности планировочной структуры дорожной сети центральных районов, и обустройство платных парковок в совокупности с пропускной сетью общественного транспорта не удовлетворяет потребности жителей. Для решения данной проблемы в исторических центральных районах требуется особый подход, связанный с созданием новых объемов и мест для стоянки личного транспорта. Например, по состоянию на конец 2023 года в историческом центре Твери на площади 650 тыс. кв. м организовано всего 1 386 парковочных мест (рис. 1), в то время как одна многоуровневая парковка площадью до 2 тыс. кв. м способна вместить порядка 240–300 автомобилей, что составляет около 20 % всех организованных на данный момент

стояночных машино-мест. Размещение многоуровневых парковок в ключевых местах центральных районов городов может в несколько раз увеличить вместимость стоянок для долгосрочной парковки личного транспорта.

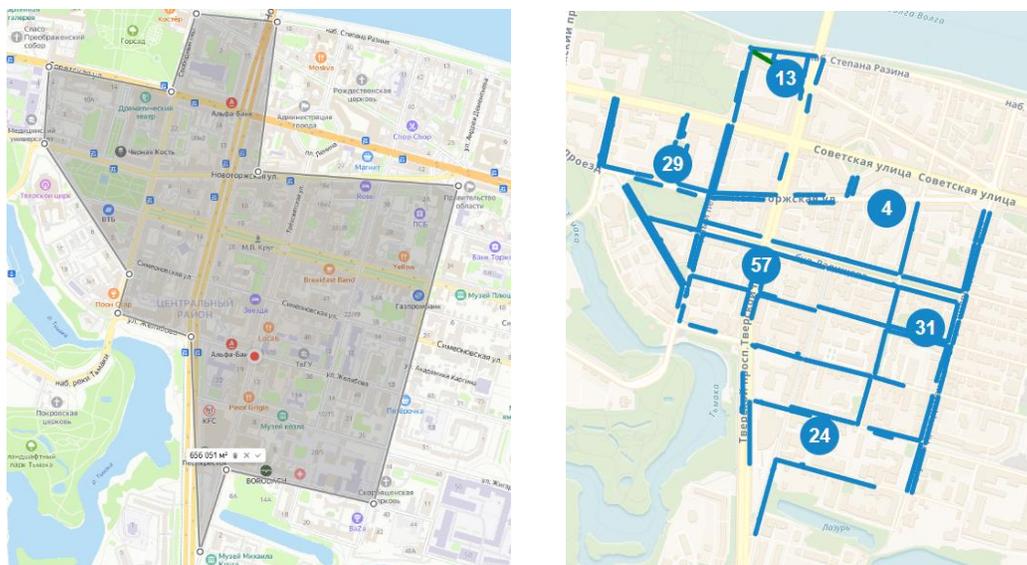


Рис. 1. Парковочное пространство Твери (декабрь 2023 г.)

Пространство сложившихся городских территорий, выделенных под дорожное движение, не увеличивается, и поэтому все свободные места используются для стоянок автомобилей в виде стихийных парковок [2]. Водителям приходится оставлять свои автомобили на обочинах дороги, что приводит к ухудшению видимости и сужению проезжей части, тем самым уменьшается пропускная способность улиц (рис. 2). Для предотвращения аварийных ситуаций приходится устраивать одностороннее движение в местах большого скопления автомобилей.



Рис. 2. Устройство одностороннего движения и сужение проезжей части в Твери

Вопрос выбора типа автостоянок актуален и требует комплексного подхода при их разработке и проектировании с учетом экономической эффективности.

Цель исследования состоит в анализе имеющихся видов автостоянок и выявлении экономически выгодной системы для парковки автомобиля в условиях существующей застройки.

Классификация автостоянок

Автостоянки можно классифицировать по способу перемещения транспортного средства (рамповые, механизированные); наличию ограждающих конструкций (открытые, закрытые); положению в пространстве (надземные, подземные, надземно-подземные); наличию уровней (одно-, многоуровневые) и по этажности (одно-, многоэтажные) [3] (рис. 3).

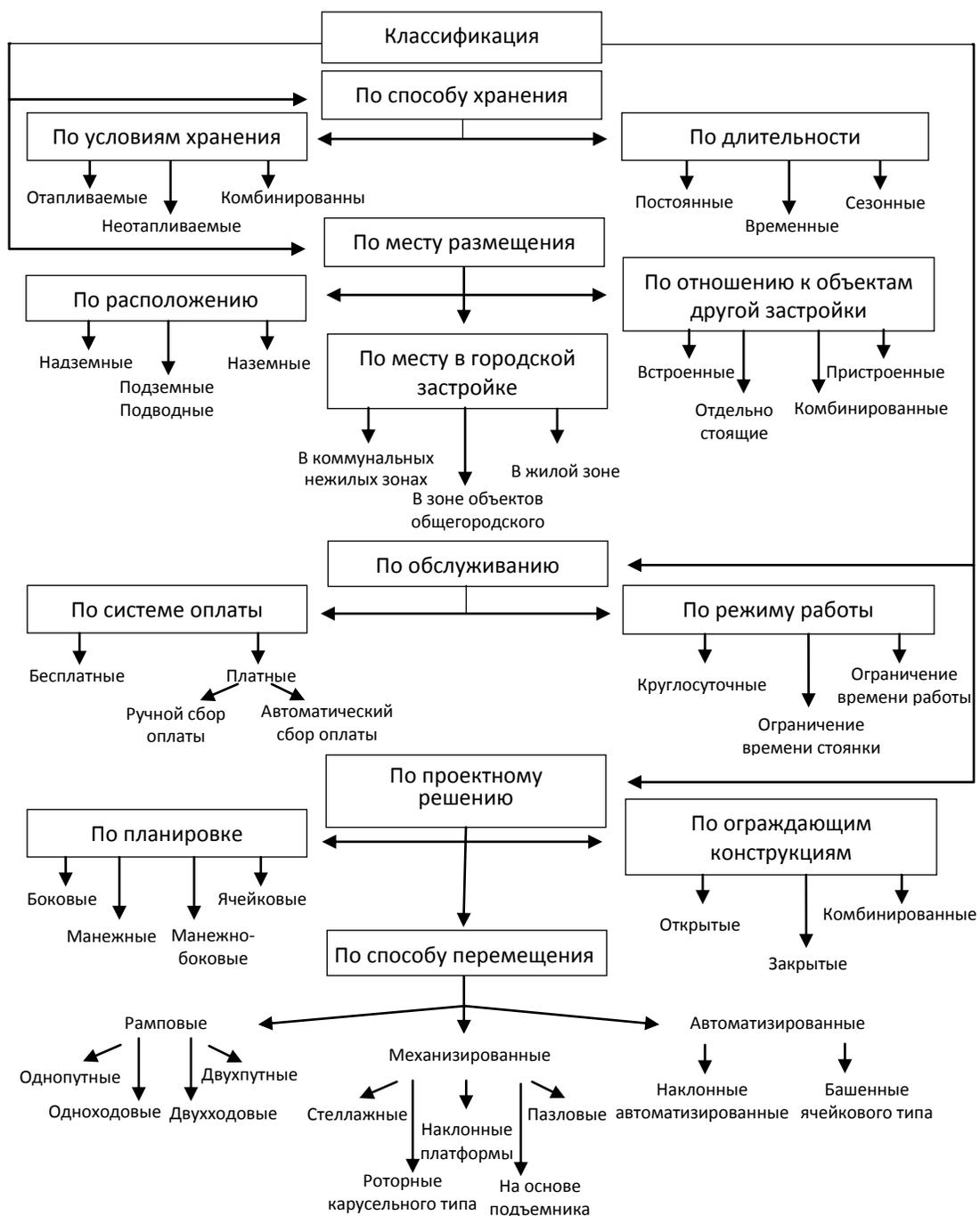


Рис. 3. Классификация парковок

Каждый вид автостоянки имеет как достоинства, так и недостатки, что следует учитывать при проектировании, и предполагает определенный подход к созданию парковочного пространства, например выбор расчетной модели, технологии транзита автомобилей, используемых материалов и т.п. [4].

Многоуровневые (надземные, надземно-подземные и подземные) парковки рампового типа могут быть открытого типа, когда 50 % площади наружных ограждающих конструкций составляют проемы, и закрытого типа с наружными ограждающими конструкциями без проемов, защищающими транспортное средство от неблагоприятных погодных условий. По длительности хранения автомобилей можно выделить парковки кратковременного и длительного хранения. Под длительным хранением понимают нахождение транспортного средства на парковочном месте более восьми часов. Как правило, такой тип парковок необходим в жилых районах. Автостоянка кратковременного хранения востребована в центральных районах города, вблизи деловых и офисных центров. Для парковки данного типа характерна небольшая высота (1–5 уровней); основным ее преимуществом является малая удаленность от места назначения [3].

Для строительства многоуровневых надземных или подземных рамповых автостоянок существует ряд ограничений. В настоящее время разрабатываются инновационные способы решения проблем, связанных со строительством многоэтажных автостоянок.

Становится необходимым использование более эффективных и безопасных систем парковки, учитывающих все существующие риски и требования пользователей. К ним, в частности, относятся частично или полностью автоматизированные механизированные автостоянки [5] (рис. 4).

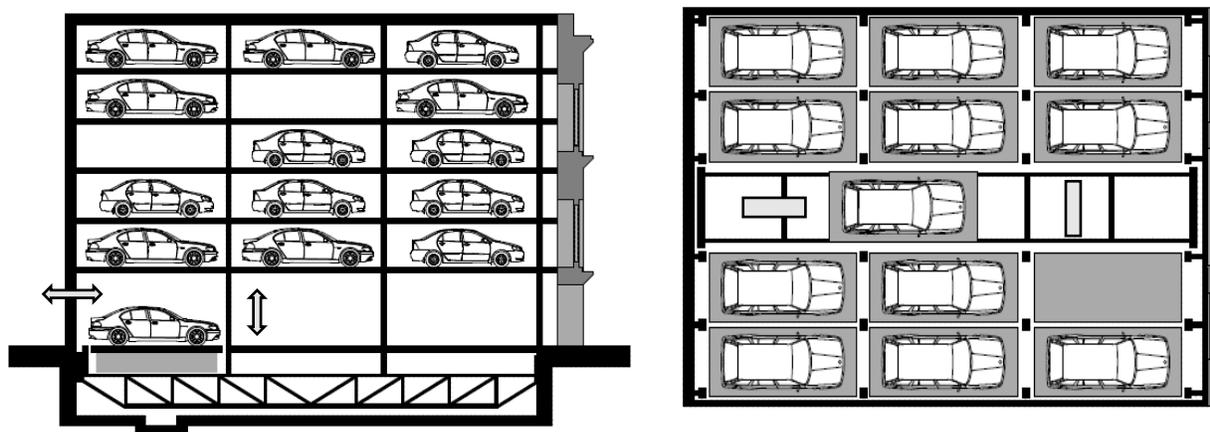


Рис. 4. Принципиальная схема устройства механизированной автостоянки

Механизированная автостоянка обеспечивает транспортировку автомобиля в свободное место хранения за счет специального оборудования без участия водителя. Преимущество использования данной системы заключается в увеличении парковочных мест на небольших территориях за счет отсутствия проездов и рамп. В статье [6] приводится ориентировочная площадь машино-места (с учетом места для парковки, проездов и рамп) в рамповой стоянке, которая составляет 40 кв. м, в то время как площадь одного машино-места на механизированной автостоянке не превышает 15 кв. м.

Можно сделать вывод, что в центральных районах с высокой стоимостью земли предпочтительно строительство многоуровневой механизированной надземной, надземно-подземной или подземной автостоянки, что позволит более рационально использовать территорию.

Экономическая эффективность

Для оценки экономической эффективности выбранного варианта необходимо проанализировать стоимость на возведение и эксплуатацию стоянок механизированного и рампового типа в зависимости от площади машино-места.

Стоимость строительства механизированной автостоянки на этапе возведения значительно ниже, чем у рамповой стоянки с аналогичной вместимостью (рис. 5). В то же время надземные автостоянки с естественной вентиляцией оказываются более выгодными, чем подземные. При необходимости создания автостоянки на участках различной площади рекомендуется строить компактные варианты, а максимальной эффективности можно добиться на наиболее ценных территориях. За счет сокращения расходов на освещение и вентиляцию механизированные парковки не требуют больших затрат на ежегодный осмотр и обслуживание. Надземные автостоянки с механизированными подъемниками экономически целесообразны при проектировании на сложных участках с высокой стоимостью, а также в случае, когда невозможно заложить большое количество подземных уровней.



Рис. 5. Предварительные затраты на строительство автостоянки с учетом стоимости эксплуатации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время востребован экономически выгодный тип автостоянок в исторической застройке, обеспечивающий возможность максимального использования территории на малом, но дорогостоящем участке земли в условиях плотной городской застройки. Проведенный анализ выявил, что при новом строительстве парковочных пространств в исторических центрах городов наиболее экономически выгодными с точки зрения капитальных и эксплуатационных затрат многоуровневые надземные механизированные парковки.

Использование новых технологий и современного специализированного оборудования для автоматизированных автостоянок позволит не только снизить нагрузки на дорожные и уличные сети, но и получить экономический эффект. При этом следует подчеркнуть необходимость комплексного подхода при разработке и проектировании нового парковочного пространства в условиях городской застройки. Создание автостоянок должно основываться не только на экономическом, санитарно-гигиеническом и экологическом факторах, но и на эстетическом восприятии архитектурной среды.

Полагаем, что в ближайшие годы проектированию и строительству автоматизированных автостоянок будет уделено значительное внимание в концепции пространственного развития современного города, охватывающей создание объектов транспортной инфраструктуры, жилищного строительства (в том числе реновацию), развитие общественного и, безусловно, парковочного пространства).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Д.А. Организация платных парковок в России и за рубежом // *European research*. 2016. № 1 (12). С. 54–55.
2. Стадничук Н.Н., Ямилова В.В. Особенности проектирования парковок в условиях современной городской среды // *История и педагогика естествознания*. 2015. № 4. С. 54–56.
3. Воропаев Л.Ю. Принципы проектирования автостоянок в жилых комплексах. Дис. ... канд. тех. наук. Москва. 2015. 64 с.
4. Приказчиков А.С., Молоканов В.В. Строительство и проектирование многоэтажных паркингов в условиях существующей городской застройки // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 6. С. 243–246.
5. Львова О.М., Тулин П.К. Подземные автоматизированные паркинги в центре города // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 4. С. 11–15.
6. Воропаев Л.Ю. Факторы, влияющие на архитектурно-планировочные решения автостоянок в жилых комплексах // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2014. № 4 (29). С. 1–13.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛЕВИКОВ Александр Валерьевич – кандидат философских наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: leviksa@mail.ru
МАГДЕЕВ Андрей Шавкатович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: andrey1649@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Левиков А.В., Магдеев А.Ш. Сравнительный анализ возведения рамповых и механизированных автостоянок и их экономическая эффективность // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 20–26.

**ON THE USE OF POLYURETHANE SINGLE-COMPONENT ADHESIVE FOAM
IN THE MANUFACTURE OF AERATED CONCRETE JUMPERS**

A.V. Levikov, A.Sh. Magdeev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The rapid development of modern cities and megacities, an increase in the level of urbanization, population growth, and, accordingly, an increase in the number of cars lead to a shortage of organized parking spaces. The article reveals the advantages and disadvantages of various methods of designing and constructing parking lots and offers an analysis of the economic efficiency of ramp and mechanized parking lots in the conditions of existing development. Based on the results of the analysis of various options for creating parking spaces in historical city centers, the optimal method has been determined from the point of view of capital and operating costs.

Keywords: aboveground parking, mechanized parking, parking, economic efficiency of parking lots, classification of parking lots.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

LEVIKOV Alexander Valeryevich – Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: leviksa@mail.ru

MAGDEEV Andrey Shavkatovich – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: andrey1649@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Levnikov A.V., Magdeev A.Sh. Comparative analysis of the construction of ramp and mechanized parking lots and their economic efficiency // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 20–26.

УДК 691.328,502.174.1

**ПРИМЕНЕНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИТНЫХ СЕТОК
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫХ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ****В.И. Трофимов***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Трофимов В.И., 2024

Аннотация. В статье рассмотрены способы армирования бетона на основе отходов промышленного производства композитных сеток и многоанкерной фибры различной длины с целью повышения эффективности работы дорожных бетонных изделий. Приведены результаты испытаний модельных образцов, армированных фиброй. Испытания показали возможность эффективного использования отходов в производстве дорожных бетонных плит повышенной прочности.

Ключевые слова: отходы производства, дорожная плита, прочность, дисперсное армирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-27-31

В настоящее время повышение эффективности экономического развития страны невозможно без ресурсо- и энергосбережения. Одним из решений указанной проблемы является широкое использование вторичных ресурсов и отходов промышленного производства для получения высококачественных строительных материалов и изделий с внедрением безотходных технологий, позволяющих снизить сырьевые и энергетические затраты с учетом требований экологической безопасности.

При этом получение высокоэффективных строительных материалов и изделий на основе различных промышленных отходов и побочных продуктов обусловлено как наличием широкой сырьевой базы, так и их востребованностью строительной отраслью.

В настоящее время используют различные методы армирования бетона. Большинство исследователей изучают сетчатую арматуру, включая композитную, и анализируют ее влияние на физико-механические свойства бетона. Полученные на данный момент результаты испытаний свидетельствуют о наличии ряда преимуществ подобных композитных материалов перед обычным бетоном (рис. 1) [1].

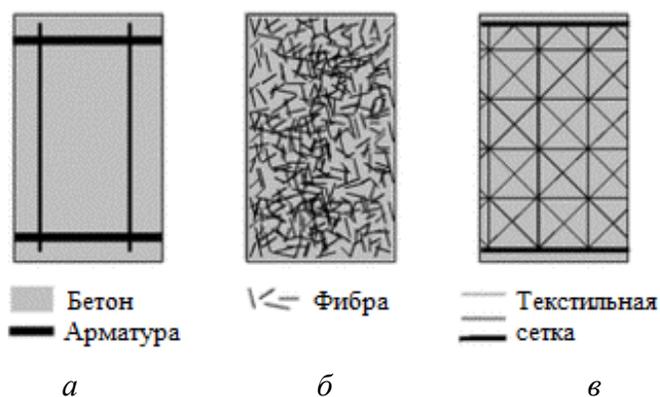


Рис. 1. Виды армирования бетонов: железобетон (а); фибробетон (б); текстиль-бетон (в)

В настоящее время полимерные и полимеркомпозитные сетки широко применяются во многих отраслях народного хозяйства: химической, пищевой, строительной и др. Так, в строительстве полимеркомпозитные сетки используются, в частности, при возведении дорожных насыпей, укреплении стеновых штукатурных слоев, усилении строительных конструкций (главным образом как непрерывный армирующий элемент).

Современные сетки для армирования бетона изображены на рис. 2. Каждая из них имеет определенные технические характеристики и может быть использована под конкретные практические задачи [2]. В то же время в практике производства строительных изделий и конструкций все большую популярность набирает дисперсное армирование на основе отрезков нитей – фибры [3].

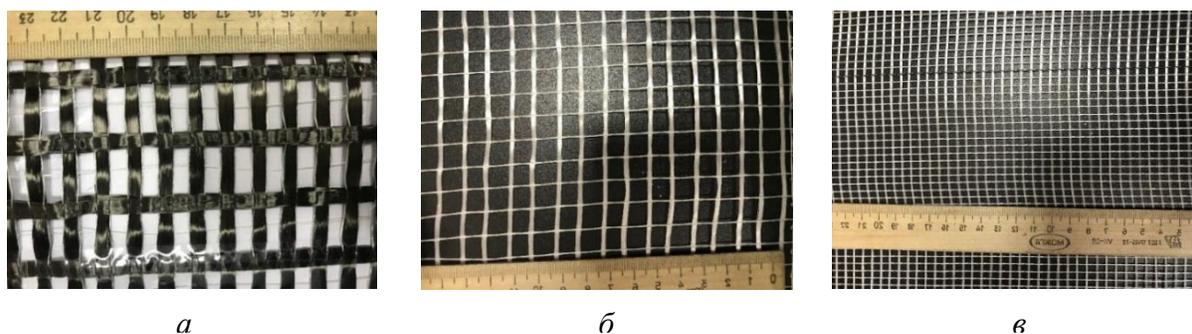


Рис. 2. Виды полимерных и полимеркомпозитных сеток:
углеродная с ячейками 10 x 20 мм (а); стеклопластиковая
с ячейками 10 мм (б); стеклопластиковая с ячейками 5 мм (в)

Установлено, что фибра с анкерами, как и рифленая фибра, показывает лучшие результаты испытаний по повышению физико-механических свойств бетона по сравнению с гладкой фиброй [4, 5]. Влияние, т.е. активное деформационное взаимодействие работы многоанкерной фибры, значительно больше влияния гладкой фибры. При этом размер деформированной области с учетом развития упругих и пластических деформаций составляет примерно $3,5-5,5d$ [6].

На основе выявленного положительного эффекта от использования фибры повышенного сцепления нами была предложена полимеркомпозитная фибра с улучшенными «анкерующими» свойствами: фибросетка, многоанкерная фибра и объемная фибра (рис. 3) [7–9].

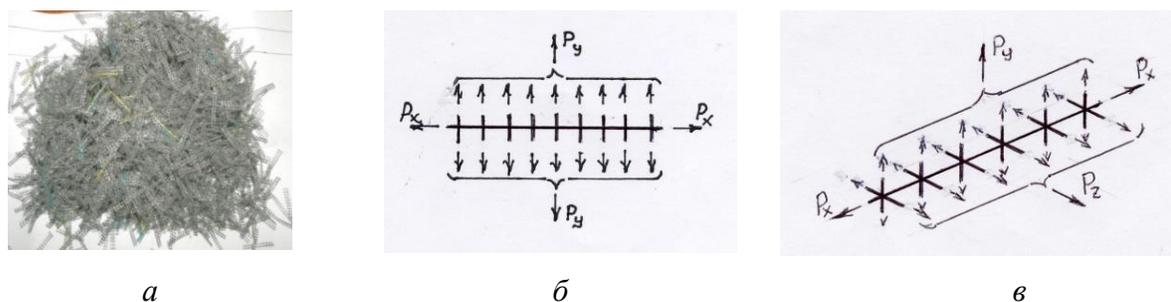


Рис. 3. Виды фибры с повышенной «анкерующей» способностью:
фибросетка (а); многоанкерная (б) и объемная фибра (в)

Применение полимеркомпозитной фибросетки в производстве дорожных бетонных плит и бетонных водопропускных сооружений для строительства в арктических зонах было исследовано на моделях. Фибросетки нарезались из отходов производства москитных полимеркомпозитных сеток, используемых для изготовления оконных блоков.

Для моделей дорожных плит применялись фибросетки длиной 5 и 10 мм в качестве комбинированного армирования (полиармирования). Их содержание в мелкозернистой бетонной смеси варьировалось в диапазоне 0–6 %.

В качестве дисперсного полиармирования использовались полимеркомпозитные микросетки с размером отверстий 1,5 x 1,5 мм двух видов: $l_1 = 10$ мм и $l_2 = 5$ мм. Соотношение содержания таких микросеток от их общего количества в бетоне $l_1 : l_2 = 70 : 30$. Для испытаний на изгиб формовались балочки из цементно-песчаного раствора, армированные фиброй.

Основные результаты испытаний представлены на рис. 4.

Из графика зависимости прочности при изгибе $R_{изг}$ от процентного содержания фибры A видно, что наибольшая прочность $R_{изг} = 8,16$ МПа достигается при $A = 4$ %. Рост прочности на изгиб наблюдается при внедрении микросеток вплоть до 4 %, после чего происходит ее снижение.

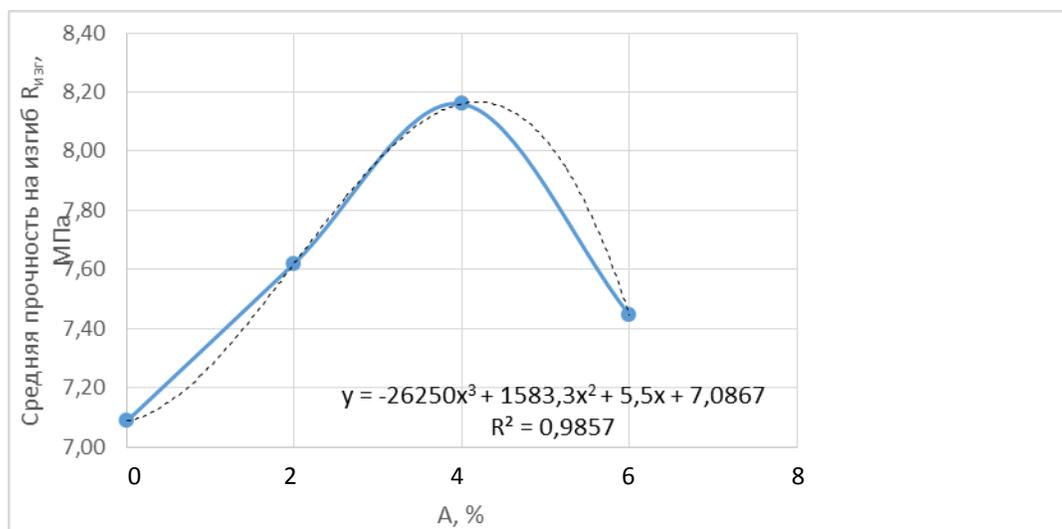


Рис. 4. Результаты испытаний образцов-балочек по зависимости $R_{изг} = f(A)$

В результате аппроксимации зависимости $R_{изг} = f(A)$ была получена математическая модель в виде уравнения регрессии. Были выполнены испытания по применимости многоанкерной фибры, нарезанной из отходов производства москитных сеток, для улучшения водно-физических свойств бетона для строительства водопропускных сооружений. Использовалась многоанкерная фибра длиной до 20 мм. Ее содержание в мелкозернистой бетонной смеси составляло 5 %. Часть результатов испытаний на сжатие образцов в сухом и водонасыщенном состоянии представлена в таблице.

Результаты испытаний на сжатие образцов
в сухом и водонасыщенном состоянии

Характеристики образцов	Длина фибры, мм			
	0	10	15	20
Масса сухого образца, г	2 306,0	2 285,0	2 309,0	2 294,0
Масса образца, насыщенного в течение 72 ч, г	2 323,1	2 288,7	2 326,7	2 307,1
Прочность на сжатие насыщенных образцов, МПа	39,7	40,6	39,0	43,6
Прочность на сжатие сухих образцов, МПа	40,5	42,5	36,7	43,2
Коэффициент размягчения $K_{разм}$	0,98	0,955	1,06	1,01

Таким образом, у образцов, изготовленных с включением волокон жесткой полимеркомпозитной многоанкерной фибры, прочностные свойства в водонасыщенном состоянии не снижаются.

Таким образом, проведенные лабораторные испытания подтверждают целесообразность применения полимеркомпозитной фибры повышенного сцепления, а именно фибросеток и многоанкерной фибры, получаемых из промышленных отходов, для изготовления строительных фибробетонных изделий с улучшенными прочностными и эксплуатационными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесовик Р.В., Агеева М.С., Ключев С.В., Лесовик Г.А., Сопин Д.М. Разработка методологии проектирования мелкозернистых фибро-текстиль бетонов на техногенных песках Белгородской области // *Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и правительством Белгородской области*. Белгород: БГТУ им. В.В. Шухова, 2015. С. 227–241.
2. Смирнова О.М., Шибанов М.Д., Черенько А.В. Влияние водоцементного отношения цементного камня на свойства текстиль-армированного // *Инновации в строительстве – 2017: материалы международной научно-практ. конф.* Брянск: Брян. гос. инженер.-технол. ун-т, 2017. Т. 1. С. 132–136.
3. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: АСВ, 2004. 560 с.
4. Демьянова В.С. Дисперсно-армированный сталефибробетон // *Строительные материалы*. 2006. № 9. С. 54–55.
5. Banthia N., Bindiganavile V., Jones J., Novak J. Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products // *PCI Journal. Summer*. 2012. № 57 (3), pp. 33–46.
6. Оатул А.А. Предложения к построению теории сцепления арматуры с бетоном // *Бетон и железобетон*. 1968. № 12. С. 17.

7. Патент РФ 2490406. *Арматурный элемент для дисперсного армирования бетона* / Трофимов В.И., Соколов Э.В., Лопаков Р.И., Данилова О.Г.; Заявл. 10.01.2012. Оpubл. 20.08.2013. Бюл. № 23.
8. Патент РФ 2582254. *Фибра для дисперсного армирования бетона* / Трофимов В.И., Смелянский И.В., Пупенин К.И.; Заявл. 26.11.2014. Оpubл. 20.04.2016. Бюл. № 11.
9. Патент РФ 2601705. *Фибра для дисперсного армирования бетона* / Трофимов В.И., Бучкин А.В., Пупенин К.И.; Заявл. 26.11.2014. Оpubл. 20.04.2016. Бюл. № 11.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трофимов В.И. Применение отходов производства композитных сеток для изготовления дорожных бетонных изделий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 27–31.

APPLICATION OF PRODUCTION WASTE COMPOSITE GRIDS FOR THE MANUFACTURE OF CONCRETE PRODUCTS

V.I. Trofimov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article analyzes the methods used for concrete reinforcement based on the use of waste from industrial production of composite grids to improve the efficiency of road concrete products. It is proposed to strengthen the road concrete slab to perform dispersed reinforcement with composite microgrids and multi-anchor fiber of various lengths obtained from production waste. The results of tests of model samples reinforced with a new fiber are presented. The tests proved the possibility of their effective use in the production of high-strength road concrete slabs.

Keywords: production waste, road plate, strength, dispersed reinforcement.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Trofimov V.I. Application of production waste composite grids for the manufacture of concrete products // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 27–31.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3.051.24+621.311.16

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ АВТОМАТИКИ НА ВЕДЕНИЕ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
КРУПНОГО ГОРОДА РОССИИ***А.С. Дюндин, К.Б. Корнеев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Дюндин А.С., Корнеев К.Б., 2024

Аннотация. В статье представлены результаты расчета влияния установки автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН) на ведение электроэнергетического режима работы энергосистемы крупного города, имеющего дефицит мощности собственных электростанций. Обоснованы места расположения и необходимость установки АОСН. Приведены примеры расчета электроэнергетического режима работы энергосистемы города.

Ключевые слова: контролируемое сечение, максимально допустимый переток, аварийное отключение, электроэнергетический режим.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-32-38

Основу обеспечения надежного диспетчерского управления и выполнения основных задач планирования электроэнергетических режимов на всех этапах составляет определение области допустимых параметров электроэнергетического режима энергосистемы.

Одним из главных инструментов анализа статической аperiodической устойчивости энергосистемы является анализ перетоков мощности по линиям электропередачи в сечениях. Под сечением понимается совокупность электросетевых элементов (трансформаторов, линий электропередачи), осуществляющих связь двух частей энергосистемы между собой или электростанции с энергосистемой [5]. Сечением может выступать как одиночная линия электропередачи, так и группа линий и трансформаторов.

Поиск «опасных» сечений (так называемое «бутылочное горлышко») предлагается производить путем расчетного утяжеления режима в соответствии с выбранными траекториями развития электроэнергетического режима.

На практике расчеты по определению предельных по статической аperiodической устойчивости энергосистемы и поиск области допустимых электроэнергетических режимов в целом выполняются на компьютере в специализированных программных средствах.

Для того чтобы обеспечить надежный и эффективный процесс передачи мощности по электрическим сетям, отслеживаются перетоки активной мощности в контролируемых сечениях. В сечениях электрической сети определяются величины максимально

допустимых перетоков активной мощности (МДП), соблюдение которых должно обеспечиваться на всех этапах планирования и управления электрическим режимом. Расчет максимально допустимых перетоков представляет собой трудоемкую задачу, так как необходимо учесть множество факторов (топологию прилегающей сети, состав и загрузку генерирующего оборудования, состояние и настройку устройств противоаварийной автоматики, температуру окружающей среды и др.), влияющих на величину допустимых перетоков. Для того чтобы учесть все факторы, необходимо выполнять расчет максимально допустимых перетоков в режиме реального времени в темпе изменения условий работы энергосистемы [2].

В настоящее время в условиях широкомасштабного внедрения информационных технологий стало возможным определение МДП в цикле обработки телеметрии. Точное и соответствующее текущей режимной ситуации в энергосистеме определение МДП позволяет максимально полно использовать пропускную способность существующих линий электропередачи при выполнении требований нормативной документации к надежности электроснабжения потребителей.

В диспетчерских центрах АО «Системный оператор Единой энергетической системы» в цикле расчета МДП выполняется:

- расчет параметров установившегося режима (УР);
- утяжеление полученного УР для определения предельного перетока по статической устойчивости для заданных контролируемых сечений;
- определение перетоков в контролируемых сечениях, соответствующих нормативным запасам по статической аperiodической устойчивости [8, 9].

В связи с постепенным увеличением износа основных фондов электроэнергетики, а также по причине сложной геополитической ситуации в 2023 году исследование выполнялось на основе укрупненной модели энергосистемы города европейской части России, в которой присутствует единое городское кольцо на высоком напряжении, одна или две узловые подстанции, обеспечивающие связь данного городского кольца и нескольких центров питания, обеспечивающих поступление электроэнергии на напряжении 220–500 кВ. Кроме того, в модели города имеется несколько радиальных и кольцевых элементов на напряжении 35–110 кВ.

Как правило, для областей европейской части России характерно наличие одной или нескольких магистральных линий электропередач на напряжении 500 или 750 кВ (рис. 1). Кроме того, для областных центров и крупных промышленных городов, как правило, подходят линии напряжением 220–330 кВ [3]. При этом для городов, расположенных на равнинной части страны без больших рек, формирующих значительный пространственный разрыв между частями города, характерно наличие замкнутого городского кольца электроснабжения. Для городов, стоящих на крупных реках (это в первую очередь города Поволжья), характерно наличие полукольца электроснабжения, так как строительство линии электропередач вдоль берега реки сопряжено как с необходимостью прохода через историческую городскую застройку, так и с трудностями, связанными с размещением опор линий электропередачи в затопляемой пойме [1, 7].

Высоковольтные линии 220–330 кВ входят в транзит соответствующего напряжения, проходящий по территории области и соединяющий между собой энергосистемы соседних областей и регионов [6]. Переток мощности по такому транзиту направлен преимущественно в сторону энергодефицитных областей и районов. По этим линиям подключены городские узловые линии, предназначенные для электроснабжения

городов. Было установлено, что городские центры питания (внутригородские электростанции) не могут в полной мере покрыть потребности города. Для многих крупных городов характерно достаточно близкое (не далее 100 км) расположение больших электростанций – АЭС, ГРЭС или ГЭС. Такая станция выступает крупным энергоузлом, питающим как сам город, так и прилегающие к нему районы, собственная генерация которых (без учета указанных больших электростанций) незначительна. При этом потребление этих районов составляет ориентировочно от 120 % летом до 250 % зимой от собственной генерации районов и города. Таким образом, указанные районы являются дефицитными; примерно половина их нагрузки покрывается за счет внешнего перетока по узловой подстанции. При отключении линии, питающей такую узловую подстанцию от расположенного рядом центра питания, электроснабжение города будет осуществляться по второй линии, так как энергосистеме страны присуще наличие кольцевых схем. Тем не менее такое изменение питания сопряжено с некоторыми сложностями в управлении новым режимом энергосистемы. Однако в этом случае при наложении аварийного отключения одной или двух линий 220–330 кВ, подходящих к узловой подстанции, на ремонт двух или одной других линий 220–330 кВ возможна потеря питания на шинах распределительного устройства данной подстанции.



Рис. 1. Карта европейской части России с нанесенными на нее линиями напряжением 750 кВ (синие) и 500 кВ (красные). По данным сайта «Схемы ЛЭП и электроснабжения России» (<https://frexosm.ru/power/>)

В данной ситуации произойдет недопустимое снижение напряжения в обширном районе городской электросети 110 кВ, прилегающей к узловой подстанции. Таким

образом, необходимо принимать меры для обеспечения допустимости параметров такого послеаварийного режима.

С этой целью потребуется организация контролируемого сечения (КС) городской электросети. Контроль перетока в сечении осуществляется исключительно в случае питания распределительного устройства узловой подстанции только по одной из линий 220–330 кВ.

В состав такого КС войдут элементы, ограничивающие район сети 110 кВ с пониженными уровнями напряжения в послеаварийном режиме, а именно:

автотрансформаторы или силовые трансформаторы, расположенные непосредственно на узловой подстанции;

воздушная линия, отходящая от узловой подстанции в сторону по часовой стрелке обхода городского кольца;

воздушная линия, отходящая от узловой подстанции в сторону против часовой стрелки обхода городского кольца;

воздушная линия (или линии), ведущая к наиболее ответственным и мощным потребителям, не входящим в городское кольцо;

воздушные линии, соединяющие рассматриваемый район расположения крупного города и соседних районов, не подключенных к исследуемой городской узловой подстанции;

проходящие по исследуемой области воздушные линии на напряжении 110 кВ, предназначенные для связи с магистральными линиями другого напряжения и не имеющие связи с питающими линиями, выход которых из строя рассматривается в данном исследовании.

Расчетные условия. Под расчетными условиями понимается набор характерных схемно-режимных ситуаций, а именно состав включенного оборудования: генераторов городских источников электроэнергии (ТЭС и/или ТЭЦ) и батарей статических конденсаторов (БСК). При проведении предварительных расчетов выявлено, что наибольшее влияние на величину МДП в модели КС оказывают генераторы наиболее мощных ТЭС и ТЭЦ, а также БСК, расположенные на смежных подстанциях, не имеющих прямых связей с отключаемой узловой подстанцией. Таблицы расчетных условий получаются в результате перебора всех возможных комбинаций состояния данного оборудования. Величины МДП и аварийно допустимого перетока для каждого случая будут свои, особенно с учетом изменяющихся режимов потребления (по суточному графику нагрузки, по дням недели и по сезону).

Расчет допустимых перетоков должен осуществляться в соответствии с методикой, изложенной в [4]. При этом величина МДП должна удовлетворять сразу нескольким критериям. В рассматриваемом примере определяющим критерием для контролируемого сечения является обеспечение 10%-го запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки в послеаварийном режиме. При расчетах МДП напряжение в контрольном пункте на шинах напряжения городского кольца узловой подстанции 110 кВ может заметно снизиться и составить для аварийного режима величину в 92 кВ, что является недопустимым с учетом возможного диапазона регулирования напряжения на трансформаторах подстанций, входящих в городское кольцо.

Для предотвращения развития такой ситуации предлагается установить автоматику ограничения снижения напряжения (АОСН) на узловой подстанции крупного города для увеличения МДП, от действия которой должны отключаться выключатели линий,

питающих больших единичных потребителей (как правило, это отдельные заводы с категорией надежности электроснабжения не выше II) со стороны узловой подстанции, а также линий, питающих внутригородские подстанции со стороны городских ТЭС и ТЭЦ. При этом величина МДП в КС увеличится на объем нагрузки, отключаемой от действия АОСН, который суммарно составляет до 25 % от городского энергопотребления. В качестве уставки по напряжению принято аварийно допустимое напряжение на шинах 110 кВ узловой подстанции, составляющее 98 кВ.

Данная мера позволит предотвратить каскадное отключение воздушных линий, питающих прилегающие к узловой подстанции энергорайоны, вызванное срабатыванием автоматики ограничения перегрузки оборудования, устанавливаемой на этих линиях, и, как следствие, предотвратить полное обесточение города и прилегающих районов.

Полученные результаты можно использовать при планировании электроэнергетического режима и при управлении им, что повысит надежность электроснабжения потребителей областей европейской части России [10].

Обратное включение отключенных потребителей будет возможно после включения в работу любой линии, питающих узловую подстанцию, либо после замещения объема отключенных от АОСН потребителей вводом графиков временного отключения потребления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минэнерго России от 28.02.2023 № 108 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2023–2028 годы». URL: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/24125/204377> (дата обращения: 04.11.2023).
2. Об утверждении Правил вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации, а также о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросу совершенствования порядка вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации: постановление Правительства РФ от 30 января 2021 г. № 86. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573476473> (дата обращения: 30.10.2023).
3. Инструкция по проектированию городских электрических сетей РД 34.20.185-94. М.: Энергоатомиздат, 1995. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004921> (дата обращения: 30.10.2023).
4. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 40–50.
5. Ерошенко С.А., Егоров А.О., Самойленко В.О., Хальясмаа А.И. Расчеты допустимых перетоков мощности в энергосистемах. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2017. 86 с.
6. Высокоскоростные магистрали. Земельно-имущественный комплекс // Российские железные дороги (РЖД). URL: <http://www.hsrail.ru/Projects-vsm/ZIO/> (дата обращения: 04.11.2023).
7. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Приложение 1 к решению Совета директоров ПАО «Россети» (протокол заседания от 02.04.2021 № 450). URL: https://rosseti-lenenergo.ru/upload/_about/tehniceskay_politika/Положение%20о%20ЕТП.pdf (дата обращения: 04.11.2023).

8. СТО 59012820.27.010.002-2020. Правила перехода на работу в вынужденном режиме (с изменениями на 7 июля 2023 г.). URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/st_forced_2023.pdf (дата обращения: 04.11.2023).
9. Методические указания по устойчивости энергосистем (утверждены приказом Минэнерго России от 3 августа 2018 г. № 630). 15 с.
10. Степанов А.А., Осеи-Овусу Р. Перспективное планирование развития электроэнергетического сектора // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 48–56.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЮНДИН Андрей Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ddrey86@rambler.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: energy-tver@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Дюндин А.С., Корнеев К.Б. Анализ влияния работы автоматики на ведение электроэнергетического режима работы энергосистемы крупного города России // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 1 (21). С. 32–38.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE AUTOMATION ON THE MAINTENANCE OF THE ELECTRIC POWER MODE OF OPERATION OF THE POWER SYSTEM OF A LARGE RUSSIAN CITY

A.S. Dyundin, K.B. Korneev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article describes the results of calculating the impact of the installation of voltage reduction limitation automation on the maintenance of the electric power mode of operation of the power system of a city with a shortage of its own power plants. The locations and the need to install voltage reduction limitation automation are justified. Examples of calculating the electric power mode of operation of the city's power system are given.

Keywords: controlled cross-section, maximum allowable overflow, emergency shutdown, electric power mode.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

DYUNDIN Andrey Sergeevich – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ddrey86@rambler.ru

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Dyundin A.S., Korneev K.B. Analysis of the effect of the automation of voltage reduction limitation on the maintenance of the electric power mode of operation of the power system of a large Russian city // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 32–38.

УДК 537.523

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ОЗОНАТОРА

Д.В. Максудов

Уфимский университет науки и технологий (г. Уфа)

© Максудов Д.В., 2024

Аннотация. Разработана математическая модель физических процессов, протекающих в озонаторе, а также представлены результаты численных расчетов, выполненных при реализации указанной модели при помощи программного пакета Scilab. Для верификации результатов численных экспериментов проведены натурные экспериментальные исследования зависимости концентрации озона от времени.

Ключевые слова: озонатор, газоразрядные процессы, численные методы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-38-45

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отмечается значительный интерес исследователей к вопросам получения и применения озона. Высокая окислительная способность данной модификации кислорода делает привлекательной ее использование в различных областях человеческой деятельности, в том числе в нефтегазовой, химической и пищевой промышленности, в санитарии и медицине, а также для очистки воды, воздуха и выхлопных газов.

Как показывают экспериментальные исследования, эффективность образования озона зависит от различных факторов: амплитуды питающего напряжения [1]; плотности мощности барьерного разряда [2, 3]; температуры, давления, состава газа и скорости его потока [2–5]; формы электродов и диэлектрического барьера [7, 8]. При этом многие из этих параметров являются взаимозависимыми, что усложняет моделирование.

Таким образом, существенную проблему представляет необходимость разработки модели физических процессов в озонаторе, учитывающей большое количество взаимозависимых параметров, таких как температура, концентрация озона, мощность барьерного разряда и ряд других, что необходимо для решения задачи оптимизации

конструкции озонатора и характеристик его питания по критерию минимизации удельных затрат энергии при производстве озона. Отсутствие в настоящее время такой многофакторной модели отмечается, в частности, британскими исследователями [9], которые пытались применить нейронные сети для решения задачи оптимизации процесса образования озона.

В данной статье представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований для озонатора, разработанного на кафедре электромеханики УУНиТ. Данный озонатор включает диэлектрический блок сотовой структуры, в каналы которого в шахматном порядке вложены две группы электродов. Разность потенциала между последними приводит к возникновению барьерного разряда, а стенки каналов при этом выступают в роли диэлектрических барьеров.

1. Математическое моделирование зависимости температуры озонатора и концентрации озона от времени

Внутри озонатора во время его работы происходят многочисленные антагонистические реакции образования и разложения озона. Основными из них являются следующие:



где M – некая молекула газа, и



В дальнейшем будут учитываться только реакции (R1) и (R2), влияние остальных реакций образования и разложения озона считается пренебрежимо малым.

С учетом реакций (R1) и (R2) кинетическое уравнение образования озона имеет вид [6]:

$$\frac{d[O_3]}{dt} = K_1 [O_2][O] - K_2 [O_3][O], \quad (1)$$

где $[O_3]$ – концентрация озона; $[O_2]$ – концентрация молекулярного кислорода; $[O]$ – концентрация атомарного кислорода; K_1 и K_2 – константы скорости для реакций (R1) и (R2).

Атомарный кислород образуется в результате реакции распада молекул кислорода при их столкновении с электронами:



которая протекает в канале барьерного разряда наряду с реакцией ионизации молекул кислорода и размножения электронов в лавине



Из реакции (R3) следует, что концентрация атомарного кислорода пропорциональна концентрации свободных электронов и, следовательно, удельной мощности барьерного разряда.

При этом нужно также учесть, что константы K_1 , K_2 зависят от температуры, которая меняется со временем и может быть определена из условия баланса тепловой мощности, выделяемой в процессе барьерного разряда, и потерь тепла, уходящего через боковые стенки озонатора или уносимого вместе с газовой смесью, проходящей через озонатор.

Таким образом, для определения концентрации озона необходимо решить систему дифференциальных уравнений, учитывающую удельную мощность барьерного разряда, зависимость от времени концентрации кислорода и температуры озонатора, а также другие параметры:

$$\begin{cases} \frac{d[O_3]}{dt} = K_1'([O_2]_0 - [O_3]) - K_1'[O_3]; \\ \frac{dT}{dt} = \frac{P - \Delta T \alpha S}{mC}, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$K_1' = A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V};$$

$$K_2' = A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V};$$

$[O_3]$ – концентрация озона; t – время, с; $[O_2]_0$ – начальная концентрация кислорода; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль \times К); E_{1a} , E_{2a} , – энергии активации реакций (R1) и (R2), Дж/моль; P – активная мощность барьерного разряда, Вт; A_1 , A_2 – факторы частоты реакций (R1) и (R2), с⁻¹; $\Delta T = T - T_0$ – относительная температура, т.е. разность между температурой диэлектрического блока T (распределение температуры внутри диэлектрического блока принимается равномерным по его объему) и температурой окружающей среды T_0 , К; V – суммарный объем каналов диэлектрического блока, м³; α – коэффициент теплообмена между поверхностью диэлектрического блока и окружающим воздухом, Вт/(м² \times К); m – масса диэлектрического блока, кг; C – теплоемкость диэлектрика, Дж/(кг \times К).

Уравнения системы (2) выполняются при условии

$$\Delta T' \times \rho V C' = P t', \quad (3)$$

где ρ , C' – плотность и удельная теплоемкость газа, проходящего через озонатор, выраженные в единицах системы СИ; t' – время прохождения газа через озонатор, с; $\Delta T'$ – изменение температуры газа за время t' .

2. Результаты численных расчетов и экспериментальных исследований

Для решения системы дифференциальных уравнений (2) могут быть применены численные методы. На рис. 1 представлена структура имитационной модели в программном пакете Scilab для решения данной системы.

Блоки со значками \int , Σ , Π выполняют соответственно интегрирование, суммирование и умножение входящих в них величин; треугольные блоки выполняют умножение входящих величин на те параметры, которые написаны на этих блоках. В схеме также присутствуют два блока-осциллографа, выводящие графики зависимости от времени для температуры озонатора и концентрации озона. На рис. 2 и 3 показаны примеры данных графиков для случая образования озона в кислороде при следующих значениях параметров озонатора, входящих в систему (2): $m = 3$; $S = 0,05$; $V = 0,0007$; $P = 100$; $C = 700$; $\alpha = 50$; $T_0 = 300$.

При строгом решении задачи моделирования требуется также учесть, что мощность барьерного разряда P и коэффициент теплообмена α зависят от температуры, а, следовательно, и от времени. Однако в данном примере для упрощения модели принято, что $P = \text{const}$ и $\alpha = \text{const}$.

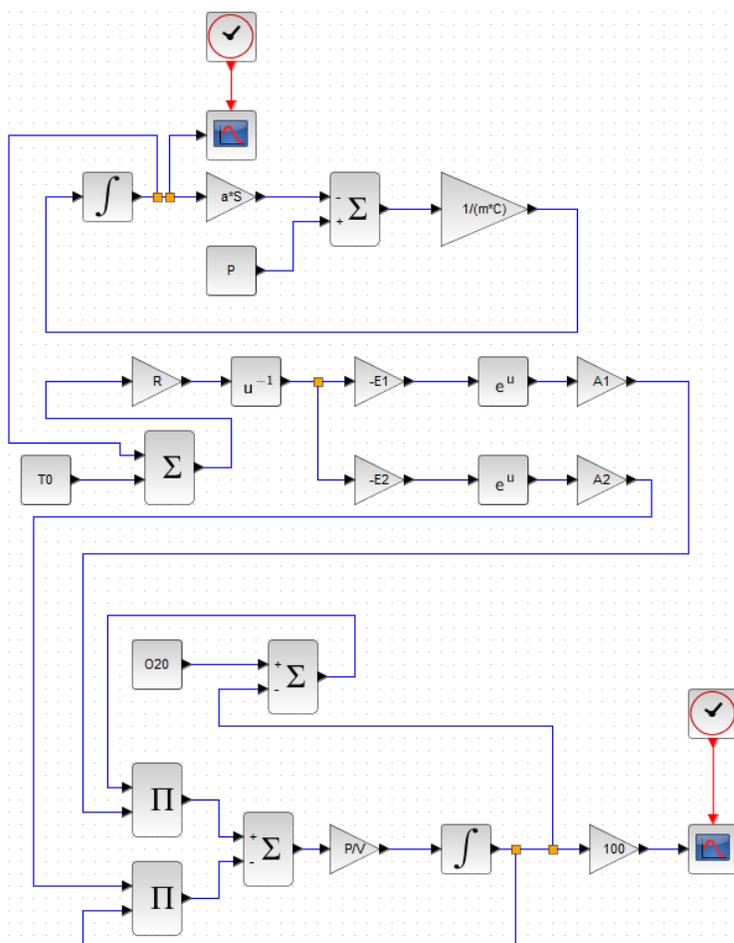


Рис. 1. Структура имитационной модели в программном пакете Scilab для решения системы дифференциальных уравнений (2)

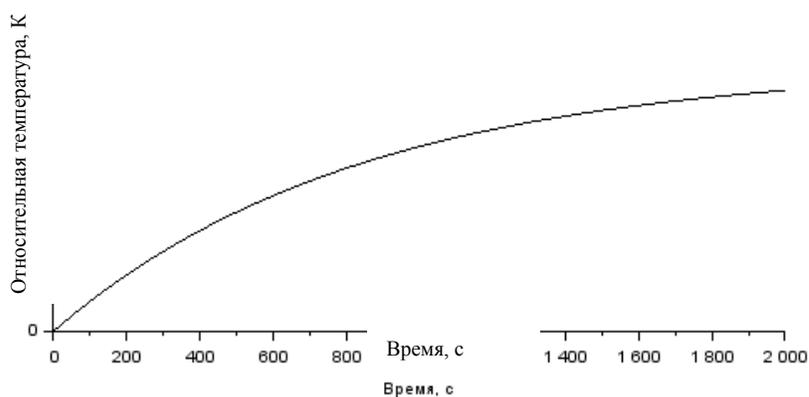


Рис. 2. Зависимость температуры озонатора от времени (показания верхнего осциллографа в схеме на рис. 1)

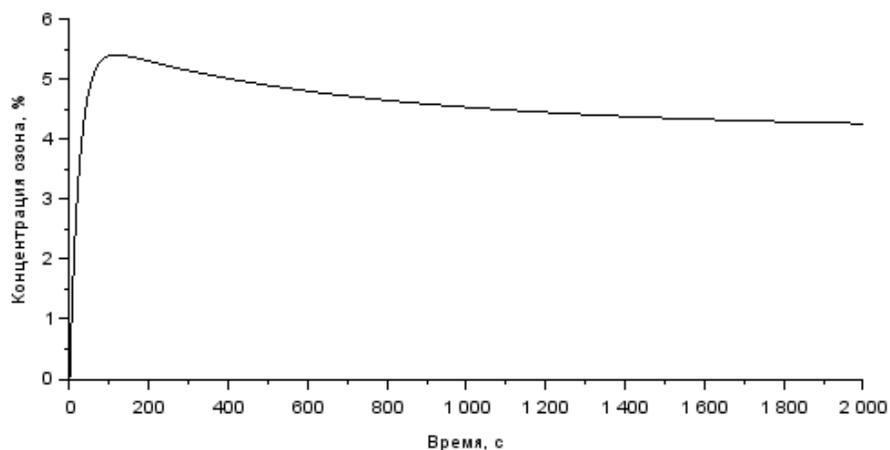


Рис. 3. Зависимость концентрации озона от времени (показания нижнего осциллографа в схеме на рис. 1)

Как видно из рис. 3, после включения озонатора концентрация озона сначала возрастает, затем начинает несколько снижаться (что обусловлено нагревом озонатора) и, наконец, стремится к стабильному значению.

В случае быстрого движения газовой смеси через озонатор, когда условие (3) не выполняется, снижение концентрации озона имеет менее выраженный характер.

Для верификации результатов численных экспериментов были проведены натурные экспериментальные исследования с использованием озонатора, параметры которого совпадают с параметрами для графиков 2 и 3. Сравнение расчетной и экспериментальной кривых для этого случая показано на рис. 4. Относительная величина отклонения между ними (в пределах времени проведения натурального эксперимента) не превышает 3,5 %.

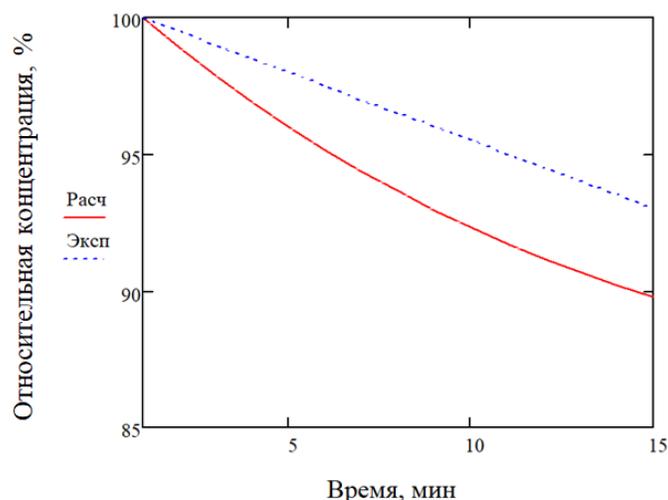


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных (пунктирная кривая) и результатов вычисления (сплошная кривая) концентрации озона относительно пикового значения при объемной скорости движения газовой смеси $\theta = 40$ л/ч

ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель протекающих в озонаторе физических процессов учитывает взаимозависимость некоторых параметров, влияющих на процесс образования озона. Представлены результаты численных расчетов, проведенных при реализации указанной модели при помощи программного пакета Scilab. Установлено, что после включения озонатора концентрация озона сначала возрастает, затем несколько снижается вследствие нагрева озонатора и, наконец, стремится к стабильному значению. Указанный характер зависимости концентрации озона от времени подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований. Следует отметить, что пиковое значение концентрации озона приходится на первые минуты работы озонатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fang Z., Qiu Y., Sun Y., Wang H., Edmund K. Experimental study on discharge characteristics and ozone generation of dielectric barrier discharge in a cylinder–cylinder reactor and a wire–cylinder reactor // *Journal of Electrostatics*. 2008. Vol. 66. Iss. 7–8, pp. 421–426.
2. Jodzis S., Zięba M. Energy efficiency of an ozone generation process in oxygen. Analysis of a pulsed DBD system // *Vacuum*. 2018. Vol. 155, pp. 29–37.
3. Jodzis S., Patkowski W. Macrokinetic study on ozone boundary concentration. Effect of temperature // *Journal of Electrostatics*. 2017. Vol. 85, pp. 43–51.
4. Yuan D., Zhang G., Ling Z., Wu A., He Y., Wang Z. Characteristics of temperature distribution in atmospheric pulsed surface dielectric barrier discharge for ozone production // *Vacuum*. 2020. Vol. 176, pp. 109351.
5. Boonduang S., Limsuwan S., Kongsri W., Limsuwan P. Effect of Oxygen Pressure and Flow Rate on Electrical Characteristic and Ozone Concentration of a Cylinder-Cylinder DBD Ozone Generator // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 32, pp. 936–942.

6. Jodzis S., Baran K. The influence of gas temperature on ozone generation and decomposition in ozone generator. How is ozone decomposed? // *Vacuum*. 2021. Vol.195, pp. 110647.
7. Park S.-L., Moon J.-D., Lee S.-H., Shin S.-Y. Effective ozone generation utilizing a meshed-plate electrode in a dielectric-barrier discharge type ozone generator // *Journal of Electrostatics*. 2006. Vol. 64. Iss. 5, pp. 275–282.
8. Jodpimai S., Boonduang S., Limsuwan P. Dielectric barrier discharge ozone generator using aluminum granules electrodes // *Journal of Electrostatics*. Vol. 74, 2015, pp. 108–114.
9. Hafeez A., Taqvi S.A.A., Fazal T., Javed F., Khan Z., Amjad U.S., Bokhari A., Shehzad N., Rashid N., Rehman S., Rehman F. Optimization on cleaner intensification of ozone production using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Parametric and comparative study // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 252, pp. 119833.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКСУДОВ Денис Вилевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», 450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32. E-mail: maksudov.dv@ugatu.su

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Максудов Д.В. Применение численных методов для моделирования работы озонатора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (21). С. 38–45.

APPLICATION OF NUMERICAL METHODS TO SIMULATE THE OPERATION OF AN OZONATOR

D.V. Maksudov

Ufa State University of Science and Technology (Ufa)

Abstract. A mathematical model of the physical processes occurring in the ozonizer has been developed, and the results of numerical calculations carried out when implementing this model using the Scilab software package are presented. To verify the results of numerical experiments, full-scale experimental studies of the dependence of ozone concentration on time were carried out.

Keywords: ozonator, gas-discharge processes, numerical methods.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKSUDOV Denis Vilevich – Associate Professor, Department of Electromechanics, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia. E-mail: maksudov.dv@ugatu.su

CITATION FOR AN ARTICLE

Maksudov D.V. Application of numerical methods for modeling the operation of an ozonator // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 38–45.

УДК 537.21

ПОЛНЫЙ УЧЕТ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ СФЕР

И.П. Попов

Курганский государственный университет (г. Курган)

© Попов И.П., 2024

Аннотация. Рассмотрено электростатическое поле, созданное системой двух одноименных или разноименных зарядов. Расчеты выполнены для зарядов, расположенных на сферических непроводящих поверхностях, при этом полученные результаты могут обобщаться на любые формы заряженных объектов. Цель исследования – повышение корректности электростатических расчетов, исключающей возможность получения недостоверных результатов в виде бесконечно большой энергии. Применены методы электростатики. Энергия поля определена двумя способами: через плотность энергии и интегрирование по объему, занимаемому полем, и путем вычисления работы при гипотетическом перемещении заряженных объектов. Даны три определения различных видов электростатической энергии. Получены формулы для соответствующих энергий при различных комбинациях зарядов.

Ключевые слова: полная, условная реализуемая, нереализуемая, запасаемая энергия; одноименные, разноименные заряды.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-45-56

ВВЕДЕНИЕ

Потенциальная электростатическая энергия электрических зарядов определяется по формуле [1–3]:

$$U = \pm \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}.$$

При $r \rightarrow 0$ энергия стремится к бесконечности, что неприемлемо. Рассуждения о невозможности достижения $r = 0$ в связи с конечными размерами заряженных объектов непродуктивны, поскольку считается, что, например, электроны и позитроны не имеют размера.

Цель исследования – повышение корректности электростатических расчетов, исключающей возможность получения недостоверных результатов в виде бесконечно большой энергии.

Актуальность работы обусловлена значительным повышением роли электростатической энергии в связи с началом массового производства ионисторов и вытекающей отсюда необходимостью развития теоретического обеспечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Понятие о запасаемой энергии

Определение 1. Полная запасаемая энергия W_e – это энергия системы или объекта, равная максимальной работе, которую система или объект могут совершить.

Замечание 1. Система или объект с нулевой полной запасаемой энергией не могут совершить никакой работы.

Замечание 2. Система из двух разноименно заряженных сфер имеет нулевую полную запасаемую электростатическую энергию при совмещении их центров. Последнее возможно, если сферы являются взаимно проникающими, например несплошными. Кроме того, заряды не должны перемещаться по поверхностям сфер.

Замечание 3. Система из двух одноименно заряженных сфер имеет нулевую полную запасаемую электростатическую энергию при бесконечно большом расстоянии между сферами.

Потенциальная энергия пружины, энергия конденсатора, энергия соленоида, энергия покоя находятся соответственно по формулам:

$$\Pi = \frac{k(\Delta l)^2}{2}, \quad W_C = \frac{CU^2}{2}; \quad W_L = \frac{LI^2}{2}, \quad E_0 = mc^2. \quad (1)$$

Эти и другие виды энергии удовлетворяют определению 1.

Определение 2. Реализуемая запасаемая энергия W_r – это часть полной запасаемой энергии системы или объекта, равная работе, которую система или объект *могут* совершить при наличии непреодолимого препятствия.

Определение 3. Нереализуемая запасаемая энергия W_n – это часть полной запасаемой энергии системы или объекта, равная работе, которую система или объект *не могут* совершить при наличии непреодолимого препятствия.

Из определений 1–3 следует, что

$$W_r + W_n = W_e. \quad (2)$$

Потенциальная гравитационная энергия тела, находящегося на высоте h над поверхностью Земли, находится из выражения

$$\Pi = mgh,$$

удовлетворяет определению 2 [4–7].

Потенциальная электростатическая энергия одноименных зарядов

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\pm}}{r}$$

удовлетворяет определению 1.

Потенциальная электростатическая энергия разноименных зарядов

$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r}$$

не удовлетворяет обоим определениям, поскольку такая работа не может быть совершена самой системой.

Теорема 1. Запасаемая энергия всегда положительна.

Доказательство. Совершаемая системой работа равна уменьшению энергии системы (не обязательно потенциальной).

$$A = W_1 - W_2.$$

$$W_1 > W_2 \Rightarrow W_1 - W_2 > W_2 - W_2 \Rightarrow A = W > 0.$$

Теорема доказана.

Пусть далее $r \geq r_1 + r_2$, $r_2 \geq r_1$.

Разноименные заряды

Теорема 2. Реализуемая запасаемая электростатическая энергия двух взаимно не проникающих разноименно заряженных сфер рассчитывается по формуле

$$W_r = \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{4\pi\epsilon_0} \frac{r - (r_1 + r_2)}{r(r_1 + r_2)},$$

где r – расстояние между центрами сфер; r_1, r_2 – радиусы сфер.

Доказательство. Поскольку сферы взаимно не проникающие, наибольшая работа, которую система может совершить, – это сближение сфер до соприкосновения, т.е. до расстояния между центрами, равного $r_1 + r_2$:

$$\begin{aligned} W_r = A_c = \Pi_1 - \Pi_2 &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r} - \left(-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_1 + r_2} \right) = \\ &= \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1 + r_2} - \frac{1}{r} \right) = \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{4\pi\epsilon_0} \frac{r - (r_1 + r_2)}{r(r_1 + r_2)}. \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Следствие 2.1. При $r = r_1 + r_2$ (т.е. при соприкосновении сфер) реализуемая запасаемая электростатическая энергия равна нулю.

Теорема 3. Полная запасаемая электростатическая энергия двух разноименно заряженных сфер

$$W_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r}. \quad (3)$$

Доказательство. Работа, совершаемая электростатическими силами при соединении бесконечно удаленных одноименно заряженных частиц в однородную сферу радиуса r_1 (и r_2), по абсолютной величине равна энергии электростатического поля сферы:

$$-A_1 = W_1 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r_1}; \quad (4)$$

$$-A_2 = W_2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_2^2}{r_2}. \quad (5)$$

Знак « \rightarrow » указывает на возрастание запасаемой энергии. Иными словами, работу совершают сторонние силы.

Работа, совершаемая электростатическими силами при соединении сфер из бесконечности до расстояния r между ними, вычисляется по формуле

$$A_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm} q_{2\mp}}{r}.$$

Энергия поля системы из двух сфер, центры которых совмещены, состоит из двух частей.

Энергия поля во внешнем пространстве по отношению к сфере радиуса r_2 имеет вид

$$W_{2-\infty} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{(q_2 - q_1)^2}{r_2}. \quad (6)$$

Дифференциал энергии поля в пространстве между сферами определяется как

$$dW_{1-2} = \frac{D^2}{2\epsilon_0} dV = \frac{1}{2\epsilon_0} \left(\frac{1}{4\pi} \frac{q_1}{r^2} \right)^2 4\pi r^2 dr = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r^2} dr,$$

где D – электрическое смещение; dV – элементарный объем.

Энергия в пространстве между сферами

$$W_{1-2} = \int_{r_1}^{r_2} dW_{1-2} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r^2} dr = - \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r} \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{q_1^2}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Энергия поля системы из двух сфер, центры которых совмещены, находится как

$$\begin{aligned} W_0 = -A_0 = W_{1-2} + W_{2-\infty} &= \frac{q_1^2}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{(q_2 - q_1)^2}{r_2} = \\ &= \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} - \frac{q_1^2}{r_2} + \frac{q_2^2}{r_2} - \frac{2q_1q_2}{r_2} + \frac{q_1^2}{r_2} \right) = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} + \frac{q_2^2}{r_2} - \frac{2q_1q_2}{r_2} \right). \end{aligned}$$

Замечание 4. Пусть $r_2 = \alpha r_1$, $q_2 = \beta q_1$, тогда

$$W_0 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} + \frac{\beta^2 q_1^2}{\alpha r_1} - \frac{2\beta q_1^2}{\alpha r_1} \right);$$

$$\frac{q_1^2}{r_1} + \frac{\beta^2 q_1^2}{\alpha r_1} - \frac{2\beta q_1^2}{\alpha r_1} = 0;$$

$$\beta^2 - 2\beta + \alpha = 0;$$

$$\beta = 1 \pm \sqrt{1 - \alpha}.$$

Это решение показывает, что $W_0 \geq 0$, причем $W_0 = 0$ при $\alpha = \beta = 1$.

Замечание 5. При $r_1 = r_2$

$$W_0 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} + \frac{q_2^2}{r_1} - \frac{2q_1 q_2}{r_1} \right) = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{(q_2 - q_1)^2}{r_1},$$

что согласуется с формулами (4)–(6).

Замечание 6. При $r_1 = r_2$, $q_1 = q_2$

$$W_0 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{(q_1 - q_1)^2}{r_1} = 0.$$

Замечание 7. При $q_1 = q_2$

$$W_0 = W_{1-2} = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Замечание 8. При $r_1 = r_2$, $q_1 = q_2$

$$A_{\infty 0} = 2W_1 - W_0 = 2W_1. \quad (7)$$

Очевидно, что искомая полная запасаемая электростатическая энергия определяется как следующая разность:

$$\begin{aligned} W_e = A_e = A_0 - A_1 - A_2 - A_r = \\ = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} + \frac{q_2^2}{r_2} - \frac{2q_1 q_2}{r_2} \right) + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r_1} + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_2^2}{r_2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} = \frac{q_{1\pm} q_{2\mp}}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r} \right). \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Следствие 3.1. При $r = \infty$

$$W_{\infty} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_2}. \quad (8)$$

Следствие 3.2. При $r = r_1 + r_2$ (т.е. при соприкосновении сфер) полная запасаемая электростатическая энергия двух разноименно заряженных сфер равна нереализуемой запасаемой электростатической энергии:

$$W_{e1-2} = W_{n1-2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_1 + r_2}. \quad (9)$$

Следствие 3.3.

$$W_e - W_{e1-2} = W_r.$$

Действительно,

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_1 + r_2} = \\ = \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{4\pi\epsilon_0} \frac{r - (r_1 + r_2)}{r(r_1 + r_2)}. \end{aligned}$$

Следствие 3.4. При $r_1 = r_2$, $r = 2r_1$

$$W_{e1-1} = W_{n1-1} = \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{2r_1} = 0,5 \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0 r_1}. \quad (10)$$

Следствие 3.5. При $r_1 = r_2$, $r = \infty$

$$W_{\infty} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r_1}. \quad (11)$$

Следствие 3.6. При $r_1 = r_2$, $r = \infty$, $q_1 = q_2$

$$W_{\infty} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_1}{r_1} = 2 \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r_1} = 2E_1. \quad (12)$$

Эта энергия равна работе, совершаемой электростатическими силами при сближении двух идентичных разноименно заряженных сфер из бесконечности до нулевого расстояния между их центрами.

При бесконечном расстоянии между зарядами полная запасаемая электростатическая энергия двух разноименно заряженных сфер максимальна, в отличие от потенциальной энергии, которая бездоказательно принимается равной нулю.

Следствие 3.7. При $r = 0$

$$W_{e0} = 0,$$

в отличие от потенциальной энергии, которая принимает бесконечно большое значение, что не имеет смысла и прямо указывает на некорректность формулы.

Следствие 3.8.

$$A_{\infty 1-1} = W_{e\infty} - W_{n1-1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm} q_{2\mp}}{r_1} - 0,5 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm} q_{2\mp}}{r_1} = 0,5 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm} q_{2\mp}}{r_1}. \quad (13)$$

Следствие 3.9. При $r_1 = r_2$, $q_1 = q_2$

$$A_{\infty 1-1} = W_1. \quad (14)$$

Одноименные заряды

Теорема 4. Полная запасаемая электростатическая энергия двух одноименно заряженных разделенных сфер вычисляется как

$$W_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm} q_{2\pm}}{r} \quad (15)$$

и совпадает с потенциальной энергией одноименных зарядов вне пространства шаров.

Доказательство тривиально.

Следствие 4.1. При $r = r_1 + r_2$ (т.е. при соприкосновении сфер) полная запасаемая электростатическая энергия двух одноименно заряженных сфер находится из уравнения

$$W_{e1-2} = W_{r1-2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm} q_{2\pm}}{r_1 + r_2}.$$

Следствие 4.2. При $r_1 = r_2$

$$W_{e1-1} = W_{r1-1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_1 + r_1} = 0,5 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_1}.$$

(Совпадает с формулой (13).)

Следствие 4.3. При $r_1 = r_2$, $q_1 = q_2$

$$W_{e1-1} = W_{r1-1} = W_1.$$

(Совпадает с формулой (14).)

Теорема 5. Полная запасаемая электростатическая энергия двух одноименно заряженных сфер при нулевом расстоянии между их центрами определяется по формуле

$$W_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\pm}}{r_2}. \quad (16)$$

(Совпадает с формулой (8).)

Доказательство. Применительно к рассматриваемому случаю аналоги выражений, полученных при доказательстве теоремы 3, принимают вид:

$$W_{2-\infty} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{(q_2 + q_1)^2}{r_2};$$

$$W_0 = -A_0 = W_{1-2} + W_{2-\infty} = \frac{q_1^2}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{(q_2 + q_1)^2}{r_2} =$$

$$= \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} - \frac{q_1^2}{r_2} + \frac{q_2^2}{r_2} + \frac{2q_1q_2}{r_2} + \frac{q_1^2}{r_2} \right) = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} + \frac{q_2^2}{r_2} + \frac{2q_1q_2}{r_2} \right).$$

Замечание 9. $W_0 > 0$.

Замечание 10. При $r_1 = r_2$

$$W_0 = -A_0 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} + \frac{q_2^2}{r_1} + \frac{2q_1q_2}{r_1} \right) = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{(q_1 + q_2)^2}{r_1},$$

что согласуется с (4)–(6).

Замечание 11. При $r_1 = r_2$, $q_1 = q_2$

$$W_0 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{(q_1 + q_1)^2}{r_1} = 4 \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r_1} = 4W_1.$$

Замечание 12. При $r_1 = r_2$, $q_1 = q_2$

$$A_{0\infty} = W_0 - 2W_1 = 2W_1.$$

(Совпадает с формулой (7).)

Очевидно, что искомая полная запасаемая электростатическая энергия двух одноименно заряженных сфер при нулевом расстоянии между их центрами определяется как разность:

$$W_e = W_0 - W_1 - W_2 =$$

$$= \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1^2}{r_1} + \frac{q_2^2}{r_2} + \frac{2q_1q_2}{r_2} \right) - \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2^2}{r_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r_2}.$$

Теорема доказана.

Следствие 5.1. При $r_1 = r_2$, $q_1 = q_2$

$$W_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r_1} = 2 \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r_1} = 2W_1.$$

(Совпадает с формулой (12).)

Эта энергия равна работе, совершаемой электростатическими силами при удалении двух идентичных одноименно заряженных сфер от нулевого расстояния между их центрами до бесконечности.

При нулевом расстоянии между центрами зарядов полная запасаемая электростатическая энергия двух одноименно заряженных сфер максимальна, но конечна, в отличие от потенциальной энергии, которая принимает бесконечно большое значение.

Следствие 5.2. Нереализуемая запасаемая энергия двух разноименно заряженных сфер вычисляется по формуле

$$W_{n1-2} = W_e - W_{r1-2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r_2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r_1 + r_2}.$$

(Совпадает с формулой (11).)

Следствие 5.3. При $r_1 = r_2$, $r = 2r_1$

$$W_{n1-1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r_1 + r_1} = 0,5 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r_1}.$$

(Совпадает с формулой (10)).

Любая комбинация зарядов

Теорема 6. Энергия поля системы из двух заряженных сфер, одна из которых полностью находится внутри другой, есть величина постоянная (не зависит от местоположения внутренней сферы).

Доказательство. Внутри внешней сферы напряженность поля, созданного ее зарядами, равна нулю. Следовательно, сила взаимодействия между сферами равна нулю. Поэтому работа по любому перемещению внутренней сферы во внутреннем пространстве внешней сферы равна нулю. Соответственно, равно нулю изменение энергии поля системы из двух сфер.

Теорема доказана.

Следствие 6.1. Энергия поля системы из двух заряженных сфер при расстоянии между их центрами, равном $r_2 - r_1$, такая же, как при совмещении центров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергетика разноименных зарядов имеет различие и сходство с энергетикой одноименных зарядов.

Минимальная энергия поля одноименных идентичных зарядов равна максимальной энергии поля разноименных зарядов:

$$W_{\infty\pm\pm} = W_{\infty\pm\mp} = 2W_1.$$

Максимальная энергия поля одноименных идентичных зарядов вдвое превышает максимальную энергию поля разноименных зарядов:

$$W_{0\pm\pm} = 2W_{\infty\pm\mp} = 4W_1.$$

В то же время работа электростатического поля по сближению разноименных идентичных зарядов из бесконечности до совмещения их центров равна работе поля по противоположному разнесению одноименных зарядов:

$$A_{\infty\pm\mp} = A_{0\pm\pm} = 2W_1.$$

Для одноименных зарядов вне их внутреннего пространства полная запасаемая электростатическая энергия совпадает с потенциальной энергией.

Однако полная запасаемая электростатическая энергия при совмещении центров одноименно заряженных сфер вдвое превышает потенциальную энергию соприкасающихся сфер:

$$\frac{W_{0e}}{W_{e1-1}} = \frac{2W_1}{W_1} = 2.$$

Строго говоря, под потенциальной энергией понимают величину

$$\Pi = C - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{r},$$

где C – аддитивная постоянная, которая принята равной нулю, что оправдано для одноименных зарядов и совершенно бездоказательно обобщено на разноименные заряды, что не дает представления о запасенной энергии в системе разноименных зарядов.

Если теперь уже не бездоказательно для разноименных зарядов принять

$$C = \frac{q_{1\pm}q_{2\mp}}{4\pi\epsilon_0 r_2}, \quad (17)$$

то потенциальная энергия разноименных зарядов превратится в полную запасаемую электростатическую энергию (3), что поднимет ее смысловой статус до уровня выражений (1), (15) и (16).

Аддитивная постоянная (17) представляет собой полную запасаемую электростатическую энергию двух одноименно заряженных сфер при нулевом расстоянии между их центрами (16).

Полученное выражение для полной запасаемой электростатической энергии разноименных зарядов может использоваться в качестве формулы для их потенциальной энергии.

Главным недостатком существующей формулы потенциальной энергии является бесконечно большое возрастание энергии при $r \rightarrow 0$. Этому недостатка лишены полученные выражения для запасаемой электростатической энергии.

Представленные результаты могут быть полезны при построении математических моделей электростатических явлений [8–10], роль которых особенно возрастает в связи со стремительным развитием силовых электростатических приборов, в том числе ионисторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Постоянная интегрирования энергии электростатического поля // *Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки*. 2021. Вып. 17. С. 108–120.
2. Попов И.П. О некоторых расчетах энергии электростатического поля // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. 2020. Т. 8. № 1. С. 2–9.
3. Попов И.П. Энергия электростатического поля заряженных непроводящих шаров // *Вестник Таганрогского института им. А.П. Чехова. Физико-математические и естественные науки*. 2021. № 2. С. 27–35.
4. Попов И.П. Полный учет энергии гравитационного поля в космологии и баллистике космических аппаратов // *Инженерная физика*. 2023. № 8. С. 24–28.
5. Попов И.П. Аддитивная постоянная энергии гравитационного взаимодействия // *Труды МАИ*. 2023. № 130.
6. Попов И.П. Аддитивная постоянная энергии гравитационного поля // *Вестник Таганрогского института им. А.П. Чехова. Физико-математические и естественные науки*. 2023. № 2. С. 42–46.
7. Попов И.П. Потенциальная и запасаемая гравитационная энергия // *Вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. Серия: Механика и математика*. 2023. Т. 3. № 1 (9). С. 4–9.
8. Попов И.П. Размер электрона с учетом спина // *Инженерная физика*. 2016. № 9. С. 45–46.
9. Попов И.П. О конечности размера электрона // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Естественные науки*. Вып. 10. 2017. № 4 (47). С. 95–97.
10. Попов И. П. Применение методов классической механики к электрическим зарядам // *Труды МАИ*. 2021. № 119.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Игорь Павлович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: ip.popov@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Полный учет энергии электростатического поля заряженных сфер // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 45–56.

COMPLETE ACCOUNTING OF THE ENERGY OF THE ELECTROSTATIC FIELD OF CHARGED SPHERES

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. We consider an electrostatic field created by a system of two like or unlike charges. Calculations are performed for charges located on spherical non-conducting surfaces, and the results obtained can be generalized to any shape of charged objects. The purpose of the study is to improve the correctness of electrostatic calculations, eliminating the possibility of obtaining unreliable results in the form of infinitely large energy. Electrostatic methods are used. The field energy is determined in two ways – through energy density and integration over the volume occupied by the field, as well as by calculating the work done during the hypothetical movement of charged objects. Three definitions of different types of electrostatic energy are given. Formulas are obtained for the corresponding energies for various combinations of charges.

Keywords: total, conditional realizable, unrealizable, stored energy; like, unlike charges.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – Senior Lecturer of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, Kurgan State University, 63/4, Sovetskaja St., Kurgan, 640020, Russia. E-mail: ip.popov@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Complete accounting of the energy of the electrostatic field of charged spheres // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 45–56.

УДК 621.316.11:621.316.31:004.896:004.415.2

**ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ЭВМ
С УЧЕТОМ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ****С.С. Трунов, А.В. Крупнов***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Трунов С.С., Крупнов А.В., 2024

Аннотация. Рассмотрено создание перспективной математической модели для САПР в области электроснабжения с учетом надежности элементов электропитания технологического процесса, а также самостоятельного планирования программой линий электропитания на основе параметров «экономичность – надежность» и «секторы ограничения».

Ключевые слова: САПР, надежность, экономичность, математическая модель, автоматическое проектирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-57-74**Введение**

В основу современных САПР промышленных цехов положен классический подход к созданию линий электроснабжения:

I. Схема питания заранее задана и определяется отдельно.

II. Используется математическая модель, определяющая токи нагрузки, падение напряжений, потерю напряжения от цехового трансформатора (ЦТ) через распределительный пункт (РП) до электроприемника (ЭП), токи короткого замыкания (КЗ) и т.д.

III. Основная или сопровождающая документация создается по нормам ЕСКД.

IV. Надежность как самих линий электропитания, так всей схемы электроснабжения относительно технологического процесса (ТП) при расчетах не учитывается или рассчитывается отдельно.

Современные возможности ПЭВМ позволяют автоматизировать I и IV пункты или, по крайней мере, рассчитать различные оптимальные варианты схем по данным категориям, что открывает широкие возможности для инженеров-проектировщиков при выборе окончательного варианта схемы электроснабжения. Вычислительная машина по заранее заданному ТП определяет, какие узлы цеха нуждаются в большем значении отказоустойчивости, и на основе этого рассчитывает оптимальную схему питания всей системы за счет прямого перебора всех возможных вариантов или за счет решения задач линейного/нелинейного программирования, а также с применением различных методов итерации.

В «оптимальную схему» входят:

1) возможность самостоятельного расположения кабелей, ЦТ и РП на основе параметра «экономичность – надежность»;

2) выполнение расчетов (потери напряжения, токи КЗ, определение сечения проводов (кабеля, провода и спецкабеля), проверка выбранного сечения на нагрев и экономическую плотность тока, энергопотери и т.д.) согласно нормативно-технической документации

Под «самостоятельным расположением» понимается, что программа сама определит наилучшее размещение элементов питания цеха и проложит линии электропитания на основе определенного параметра «экономичность – надежность», «секторы ограничения» электрооборудования (области, где размещение элементов электроснабжения разрешено).

Критерий «экономичность – надежность» определяется соотношением между капиталовложением в систему и ее устойчивостью к отказам электропитания. Экономическая составляющая рассчитывается исходя из цены на материал, электрических потерь в элементах электроснабжения цеха, потерь от простоя линии производства при отказе электропитания узлов промышленного цикла, стоимости замены поврежденных элементов и т.д.

Надежность системы определяется на основе технологической карты производства цеха, которая является единственной заранее заданной и не проектируется самой математической моделью.

Актуальность темы

На российском рынке к современным САПР в области электроснабжения относятся T-FLEX «Электротехника» [1], КОМПАС-3D «Электрика» [2], ElectriCS [3] и Model Studio CS [3]. Во всех указанных приложениях присутствует пункт III. При этом в T-FLEX «Электротехника» и КОМПАС-3D «Электрика» пункт II не реализован, а пункты I и IV не имеют режима автоматизации, поскольку основное направление данных программ не связано с проектированием электроснабжения напрямую – упор в них делается на чертеж схем, 3D-моделирование и составление документации по нормам ЕСКД. При этом в САПР ElectriCS (и отчасти Model Studio CS), наоборот, полностью реализован II пункт и частично I пункт в автоматизированном режиме. На данный момент на российском рынке САПР ElectriCS в наибольшей степени приближена к цели полной автоматизации размещения линий питания, РП и ЦТ.

В узкоцелевых САПР, направленных на вычисление линий электроснабжения (SetiROV [4], Электрик 9.01 [5], D-Fend [6], EATON xSpider, «Эльф» и др. [7, 8]), в полной мере реализованы только II и III пункты (I и IV пунктов в автоматизированном варианте нет).

За рубежом в сегменте профессиональных САПР, к которым относятся AutoCAD Electrical Toolset [9], CYME 9.0 [10], OpenBuildings Designer [11], Microstation [12], CADprofi Electrical [13], DDSCAD Electrical [14], та же проблема, что и в вышеперечисленных: расчет надежности либо отсутствует вовсе, либо существует в «статическом» варианте, когда схема задана заранее и нужно проанализировать ее надежность. Самостоятельная прокладка линий электропитаний по критерию «экономичность – надежность» отсутствует либо реализована в ограниченном режиме (для соединения кабелей и проводов внутри силовых щитов).

В научных работах, монографиях и учебных пособиях по созданию САПР и математических моделей разделяются темы расчета надежности электроснабжения и проектирования электроснабжения. К примеру, В.И. Чиндяскин и Е.Ф. Кислова

рассматривают только математическую модель без расчета надежности ее узлов [4]. А.Н. Шилин и О.И. Карпенко предлагают программу, которая полностью определяет надежность всей системы, но при этом не автоматизирует проектирование линий электропередач, а работает постфактум, когда схема уже выбрана и необходимо провести ее анализ [15]. В математических моделях для сетей 6–35 кВ И.И. Бандурин, О.А. Чернова реализуют только IV пункт в автоматизированном варианте, используя методы линейного программирования [16]. В диссертационной работе И.Е. Рыдиной по методам компьютерного моделирования для проектирования и анализа режимов систем электроснабжения обосновано отсутствие возможности самостоятельного проектирования на ПЭВМ линий электроснабжения. Упор делается на точность математической модели и возможность автоматической оптимизации схемы за счет режимов энергосистемы, а также интуитивность интерфейса программы [17]. А.П. Карпенко, И.А. Кузьмина рассматривают автоматизацию линий электроснабжений в виде математической модели для САПР с учетом будущего роста, но без расчета надежности системы и ее влияния на расположение элементов электропитания [18].

В зарубежных работах, где исследуется электроснабжение в развивающихся странах, применяются методы автоматизированного соединения узлов питания: авторами [19] использован метод математического моделирования на основе решения линейного программирования со смешанно-целочисленными параметрами, но данная модель не учитывает надежность системы, а также не распространяется на линии электроснабжения цехового уровня, хотя и реализует автоматизацию I пункта. В статье [20] для расчета определения линий сети электроснабжения применяется алгоритм OnSSET, основанный на алгоритме поиска по дереву, итеративно обходит неэлектрифицированные населенные пункты (подмножества узлов дерева графа) с учетом их местоположения для определения ближайшего соседнего пункта, который в свою очередь может быть также выбран для следующего итерационного прохода. Как и в предыдущей работе, здесь не учитывается параметр надежность/экономичность, а также возможность применение данной модели к сетям электроснабжения промышленных цехов.

Авторы указанных статей рассматривают отдельно математические модели для расчета электроснабжения, надежности и самостоятельного расположения программой электрооборудования и линий питания. При этом не учитывается параметр «экономичность – надежность», который может помочь ЭВМ определить оптимальную схему электроснабжения под конкретную задачу с учетом требуемой надежности при выбранном ограничении капиталовложения. Создание такой математической модели в виде плагина оптимизирует САПР (например, ElectricCS) благодаря возможности применения сторонних программ.

Основные параметры математической модели

Критическими параметрами математической модели в данной статье являются:

1. Экономичность – надежность.
2. Сектор ограничения.

Экономичность – надежность

Раскроем идею проектирования с данным параметром подробнее. Любой промышленный цех обладает какой-либо линией производства, определенной технологическим процессом. Карта такого технологического процесса может быть очень

разветвленной и сложной, т.е. обладать большим количеством узлов производства. Под узлами понимается некоторое единичное оборудование или целый комплекс. Аварийная остановка разных узлов по-разному влияет на экономическую стабильность всей линии производства (рис. 1).

К примеру, элемент \mathcal{E}_1 – это 3D-принтер, работающий на основе выплавки деталей из металлического порошка, а \mathcal{E}_2 – печь сопротивления, необходимая для последующей термообработки детали после ее создания на принтере. Выход любого из этих элементов из строя остановит *линейный* технологический процесс, что приведет как минимум к финансовым издержкам за простой – ущерб, который можно оценить по аварийной недополученной электроэнергии во время перерыва электроснабжения. При этом отказ элемента \mathcal{E}_1 по ущербу не равноценен отказу элемента \mathcal{E}_2 : отключение питания на металлическом 3D-принтере во время его работы может привести к полному его повреждению, что повлечет за собой не только потери от простоя, но и необходимость приобретения нового оборудования или долговременный вывод его в ремонт, в отличие от внезапного отключения печи сопротивления, где будут «стандартные» финансовые потери от времени простоя.

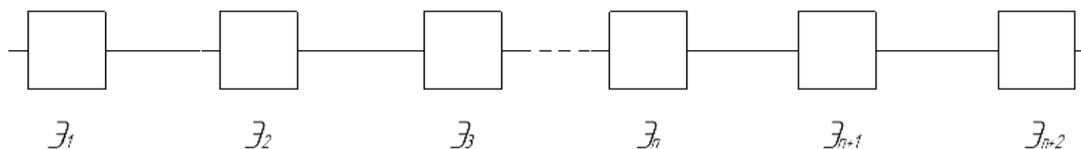


Рис. 1. Однолинейная модель элементов отказов некоторого технологического процесса

Очевидно, что узел \mathcal{E}_1 должен обладать наибольшим или как минимум равным коэффициентом надежности, по сравнению с другими узлами. Однако повышение его надежности всегда ограничено бюджетом проектируемого цеха. Стремление довести вероятность безотказной работы $P_{\mathcal{E}_n}$ всей системы ТП до единицы приведет к огромным капиталовложениям, которые могут превышать бюджет на проект.

Идея данной математической модели с параметром «экономичность – надежность» заключается в том, чтобы при заданном уровне капиталовложения получить максимально высокий уровень надежности из всех возможных вариаций схемы электроснабжения для данного цеха и его ТП. При этом ЭВМ сама перебирает варианты схем, комбинируя различные пути электропитания, самостоятельно располагает ЦТ, РП и (в некоторых случаях) ЭП с учетом их параметра потока отказов в секторе ограничения, рассчитывает экономическую составляющую (цены на кабели, шинопроводы, щиты распределительные, а также энергопотери, рост энергопотребления и т.д.) с ограничениями нормативно-технической документации, к которым относятся потери напряжения, токи КЗ, определение сечения проводников, проверка выбранного сечения на нагрев и экономическую плотность тока и т.д.).

Сектор расположения, ограничения и запрета

Сектор расположения – это та область цеха, в которой размещение элементов нейтрально и никак не влияет на параметры потока отказов или максимальное количество элементов.

Второй ограничивающий основной параметр – сектор ограничения, который указывает САПР, что размещение в данной зоне может повлиять на параметры расположенных в ней или проходящих через нее линий электропитания. На рис. 2 представлена схема производственного помещения с девятью ЭП, двумя РП и одним ЦТ.

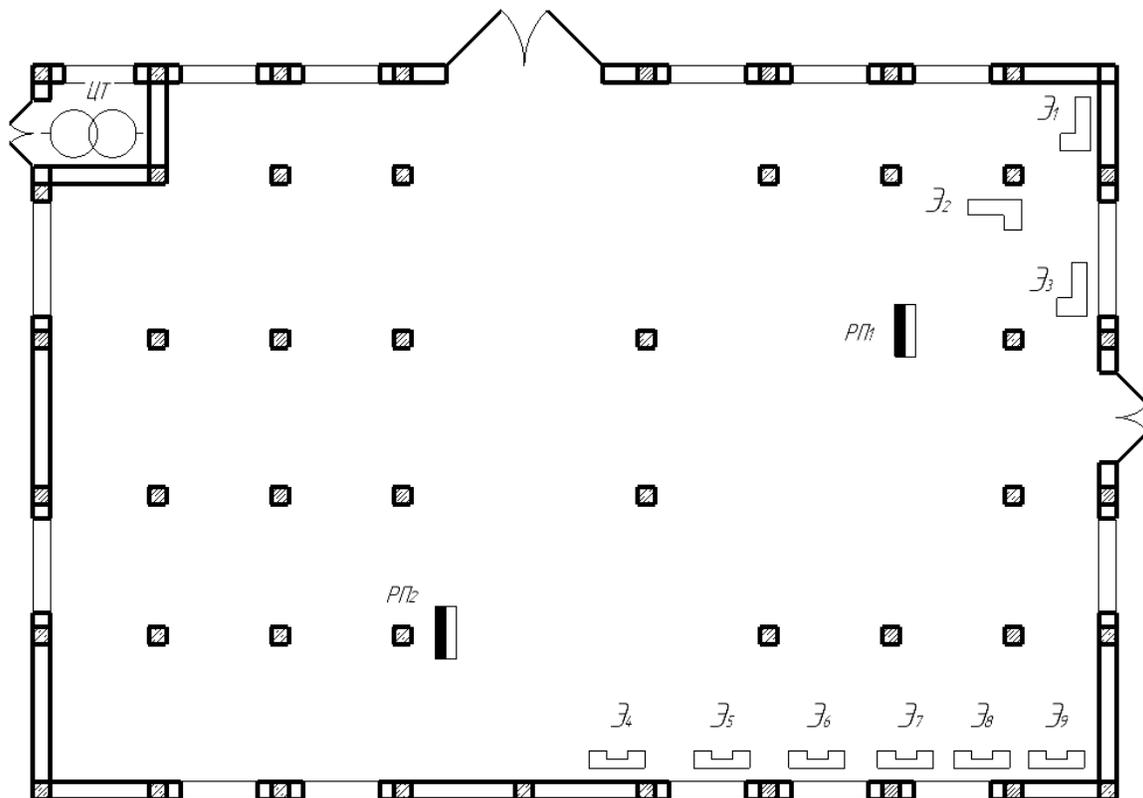


Рис. 2. Схема промышленного цеха с девятью элементами электрооборудования

В некоторых частях данного помещения (например, там, где располагается легковоспламеняющаяся продукция или специальное оборудование) размещение линий электроснабжения запрещено, а в тех частях, где разрешено, есть элементы приоритета (поскольку часть цеха активно используется для работы с кран-балкой при погрузке машин, количество протягивания силовых кабелей может быть ограничено в зависимости от их сечения или же существует вероятность их повреждения).

Сектор ограничения имеет как минимум два параметра:

α_1 – коэффициент влияния на отказоустойчивость, проложенного в данном секторе элементов энергосети;

β_1 – максимальное количество силовых кабелей для данного сектора.

Таких ограничивающих параметров может быть больше – для каждого сектора с разными значениями. На рис. 3 отображено два «сектора ограничения» с параметрами α_1 и β_1 для красной штриховки и α_2 и β_2 для желтой штриховки. Синяя штриховка – сектор запрета, в котором прокладка кабелей и расположение элементов энергосистемы запрещены. Бесштриховая зона соответствует «сектору расположения», размещение энергооборудования здесь ничем не ограничено.

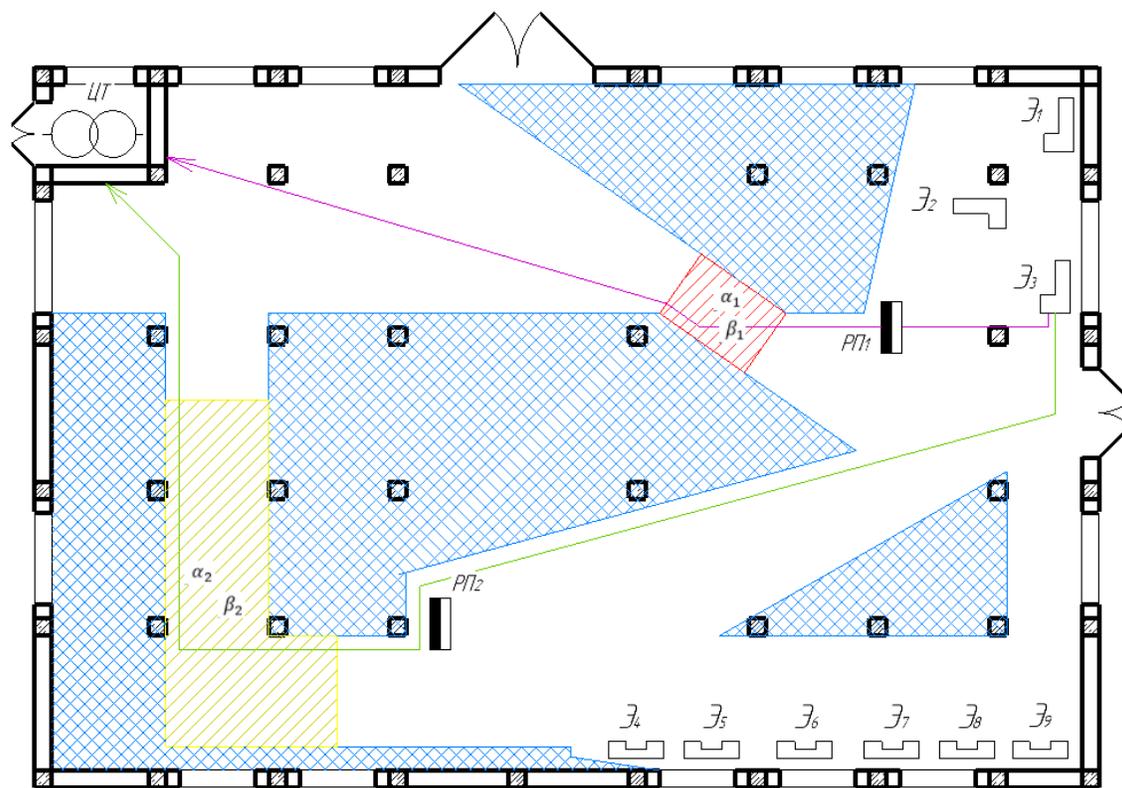


Рис. 3. Секторы на схеме цеха (синяя штриховка – сектор запрета;
желтая и красная – сектор ограничения;
бесштриховая зона – сектор расположения)

Влияние параметров «экономичность – надежность» и «сектор ограничения» на автоматическое проектирование электроснабжения

Параметр α_i влияет на параметр потока отказов элементов, проходящих через ограниченную область. Параметр β_2 влияет на выбор кабелей или токопровода, а также на их расположение. На основе этих ограничений возможно много вариаций прокладки линий электропитания, а также расположения РП, в зависимости от того, какие узлы должны обладать определенным уровнем надежности. К примеру, если узел 2 нуждается в высоком значении отказоустойчивости, а коэффициенты α_1 и β_1 красной зоны оказывают более негативное влияние на отказоустойчивость узла 2, чем α_2 и β_2 , то при определенном заданном отношении параметра «экономичность – надежность» (при перевесе в сторону надежности системы) САПР может, просчитав множество вариантов схемы электроснабжения, остановиться на одной из них, удовлетворяющей требуемому соотношению «экономичность – надежность», и проложить кабель от узла 2 через дальнюю желтую зону в обход РП 2 (см. рис. 3, зеленая стрелка).

Если же перевес должен быть на стороне экономичности, то программа выберет оптимальный вариант, который удовлетворяет выставленной финансовой категории капиталовложения, и при этом рассчитает максимально возможную надежность для данного элемента (см. рис. 3, фиолетовая стрелка) и системы в целом с учетом всех экономических издержек.

Базы математической модели

Для решения задач прямого пересчета ядро движка САПР может быть основано на таких математических подходах, как метод прямого пересчета с ограничивающими параметрами, линейное (нелинейное) программирование и итерационный метод.

Метод прямого пересчета основывается на расчете всех возможных комбинаций соединений и положений электрооборудования. Существует два пути его реализации:

динамический – определение вариаций через построение кратчайшего пути и его последующего усложнения;

статический – определение всех возможных вариаций путей в пространстве и отсеивание ненужных.

Данный метод можно условно назвать современным в том смысле, что современные ПЭВМ и тем более ЭВМ позволяют провести такие вычисления с очень высокой скоростью и точностью без ограничения памяти, в отличие от предыдущего поколения вычислительных машин. Из-за таких ограничений оборудования ранее разрабатывались различные упрощенные вычислительные алгоритмы или использовались методики математического программирования, адаптированные под параметры ЭВМ. Одно из преимуществ метода прямого пересчета – возможность сохранять в базе данных все вариации расчета и, следовательно, быстро просматривать любые выборки, сравнивать их или анализировать эволюцию некоторой серии вычислений, что невыполнимо при остальных подходах. К недостаткам метода относятся продолжительное время расчетов по сравнению с другими методами и высокие требования к мощности ЭВМ.

При этом динамический метод менее изучен, чем статический, и требует научных изысканий в области программирования, численных методов для решения ряда проблем, связанных с открытыми пространствами (множествами), о которых будет сказано далее.

Проблемы динамической математической модели прямого пересчета с ограничениями

Рассмотрим некоторые трудности, связанные с использованием динамической математической модели для двухмерного пространства, обусловленные свойством открытых пространств и соединений элементов энергосистемы. Это бесконечные вариации, топология пространства, генерация путей и генерация схем.

1-я проблема – бесконечные вариации. В данном методе любая схема электроснабжения в общем виде представляет собой сильно связанный (сильный) гиперграф (с бесконечным числом ребер), если его вершины взаимно достижимы (рис. 4а):

$$\uparrow \Gamma(\varepsilon, \wedge p),$$

где $\uparrow \Gamma$ – сильный гиперграф; ε – количество вершин; $\wedge p$ – количество мультиребер.

Вершинами здесь являются элементы электрооборудования (ЭП, РП, ЦТ, шинопровод и т.д.), а мультиребрами – все варианты пути прохождения линий электропитания от одной вершины к другой. К примеру, для вершины 3 (см. рис. 3, Э₃) существует как минимум два пути прохождения к вершине ЦТ – через красную и зеленую области, но в реальности для такого мультиребра существует бесконечная вариативность прохода, так как оно представляет собой неограниченное множество линий – соединений между двумя вершинами на рис. 4б (ниже этот момент раскрыт подробнее). Каждая линия имеет собственные параметры.

Расчет такой модели представляет собой сложную задачу в виде бесконечного поиска решений, неосуществимого как из-за конечного времени расчетов, так и в силу технических ограничений ЭВМ.

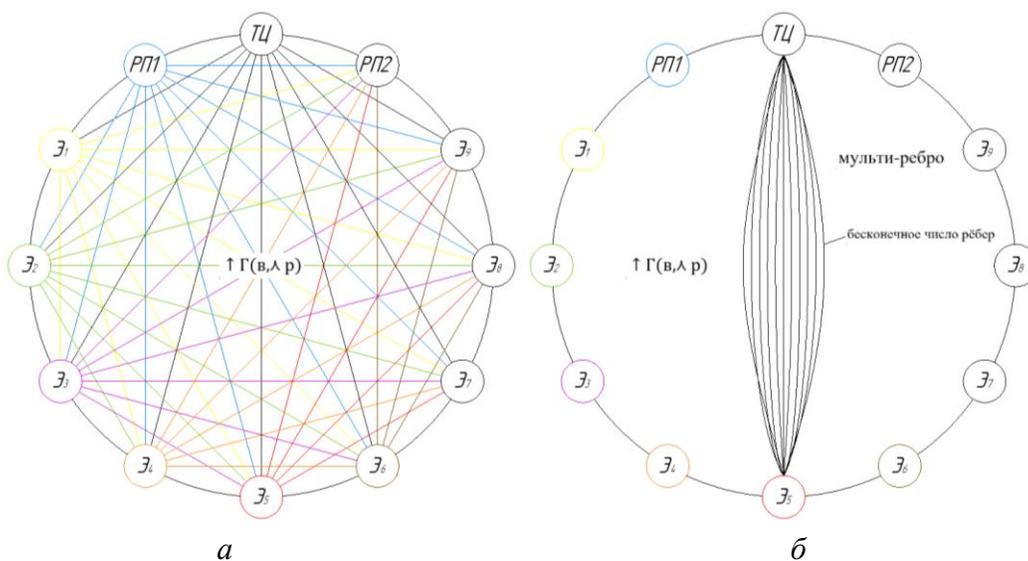


Рис. 4. Схематическое отображение сильно связанного гиперграфа (а); внутреннего содержания мультиребра в виде пучка бесконечного числа ребер (б)

На рис. 5а показан один из вариантов соединений вершин мультиребрами, возможный при «обходе» гиперграфа. Хотя в таких вариантах количество соединений между вершинами не превышает λp , каждое такое мультиребро само в себе несет неограниченное множество вариаций путей между двумя вершинами. Например, мультиребро λp_4 между \mathcal{E}_4 и ЦТ содержит три разновидности маршрута из бесконечного числа возможных, которые изображены на рис. 5б. Отметим, что расчет схемы на рис. 5а не имеет никакой практической ценности. Таких вариантов электроснабжения в гиперграфе может быть много.

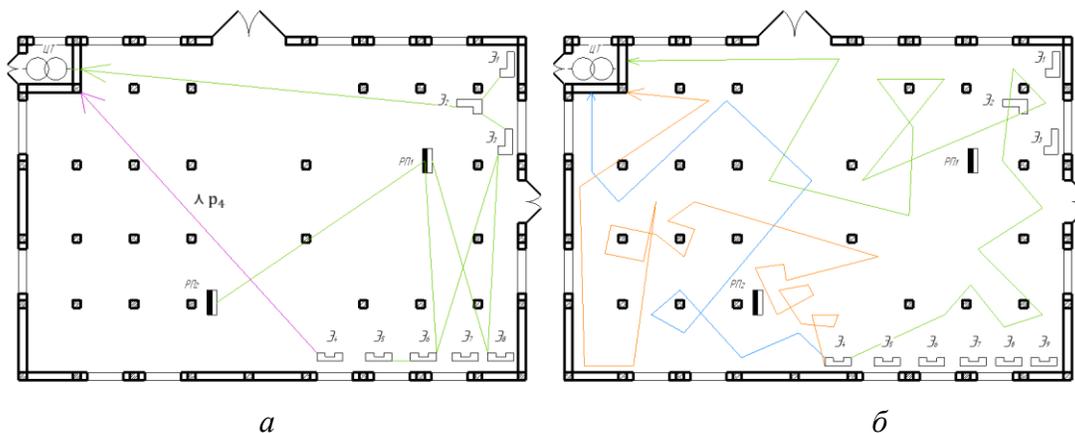


Рис. 5. Примеры соединения мультиребер между вершинами графа (а); узлов внутри мультиребра λp_4 (б)

Решение 1-й проблемы. Несмотря на то, что сильный гиперграф является основой для всех возможных вариантов коммутаций, в реальности его можно упростить, наложив ограничения, которые преобразуют его в обычный граф без утраты полезных комбинаций элементов схемы:

1. Важное стремление к наименьшему расстоянию ρ между двумя вершинами (s_i, s_j) в каждом варианте n из множества путей N^n :

$$\forall n \in N^n: \inf \rho_n(s_i, s_j). \quad (1)$$

2. Ограничение шага пространства. Под шагом понимается минимальное расстояние между двумя точками абсциссы или ординаты:

$$\begin{aligned} & A_0(x_0; y_0); \\ & A_1(x_1; y_1) = A_0(x_0 \pm \ell \cdot 1; y_0 \pm \ell \cdot 1); \\ & A_2(x_0; y_1) = A_0(x_0 \pm \ell \cdot 0; y_0 \pm \ell \cdot 1); \\ & A_3(x_1; y_0) = A_0(x_0 \pm \ell \cdot 1; y_0 \pm \ell \cdot 0); \\ & \dots \\ & A(x_m; y_k) = A_0(x_0 \pm \ell \cdot m; y_0 \pm \ell \cdot k), \quad m, k \in Z^+. \end{aligned}$$

Все значения координат $A(x_m; y_k)$ представляют собой элементы некоторого множества R^ℓ :

$$\forall m, k \in Z^+: A(x_m; y_k) \in R^\ell.$$

3. Ограничение общего пространства проектирования. Существует некоторая область точек $M(a, b)$ (к примеру, территория промышленного цеха на рис. 6), такая, что любая точка, взятая за центр координат $A_0(x_0; y_0)$ в ней, имеет ограничение построения относительно $A_0(x_0; y_0)$ любого ряда точек $A(x_m; y_k)$. Другими словами, множество R^ℓ является подмножеством ограниченного множества M :

$$R^\ell \subset M: [A(x_m; y_k) \in M] \wedge [A(x_m; y_k) \in R^\ell]. \quad (2)$$

4. Правило обхода вершин, или технологичность соединений по правилам электроснабжения. Например, будет некорректно присоединить $PP_1 \rightarrow \mathcal{E}_1 \rightarrow ЦТ$, если должно быть так: $\mathcal{E}_1 \rightarrow PP_1 \rightarrow ЦТ$. Сюда же относится ограничение на зацикленность соединений, или неполнота используемых элементов (можно также запретить или, наоборот, разрешить последовательное соединение элементов $\mathcal{E}_1 \rightarrow \mathcal{E}_2 \rightarrow \dots \rightarrow \mathcal{E}_m$). Это в свою очередь ограничит количество мультиребер за счет направленности прохождения p^τ при расчете всех возможных вариантов соединения, а также исключит возможность появления бессмысленных схем, подобных показанным на рис. 4а):

$$\wedge p^\tau < \wedge p. \quad (3)$$

На основе данных пунктов получаем преобразование сильно связанного гиперграфа $\uparrow \Gamma(\varepsilon, \lambda p)$ в обыкновенный граф $\Gamma(\varepsilon, p)$:

$$\begin{aligned} & [\forall n \in N^n: \inf \rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_j)] \wedge [\forall m, k \in Z^+: A(x_m; y_k) \in R^\ell] \wedge [R^\ell \subset M] \wedge \\ & \wedge [\lambda p^\tau < \lambda p]: \uparrow \Gamma(\varepsilon, \lambda p) \rightarrow \Gamma(\varepsilon, p). \end{aligned}$$

Рассмотрим подробнее преобразование связанного гиперграфа в обыкновенный: пункт 1 (стремление к наименьшему расстоянию) избавит от расчета вариаций с точками, излишне удлиняющими путь (благодаря этому устраняются маршруты по типу «броуновского движения», как на рис. 5б). За счет пункта 2 пространство представляется не как бесконечное множество точек относительно начальной точки $A_0(x_0; y_0)$, а в виде сетки с шагом ℓ и ограничивающим множеством М (пункт 3), что позволяет получить конечное число ребер вместо мультиребра. Рассмотрим это на примере построения пути между вершинами ε_1 и ε_2 с сектором запрета в виде многоугольника abcdefa на рис. 6. Синей пунктирной линией $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ изображен абсолютный наикратчайший путь между вершинами ε_1 и ε_2 через запрещенную зону, при этом маршрут обходных путей строится строго по точкам $A(x_m; y_k)$ сетки относительно начала координат $A_0(x_0; y_0)$. Перебрав разные точки вокруг сектора запрета и за счет стремления к наименьшему расстоянию и удовлетворив условие (1), ЭВМ построит серию кратчайших линий $\rho_0, \rho_1, \rho_2, \rho_3$ (отмечены оранжевыми цветом).

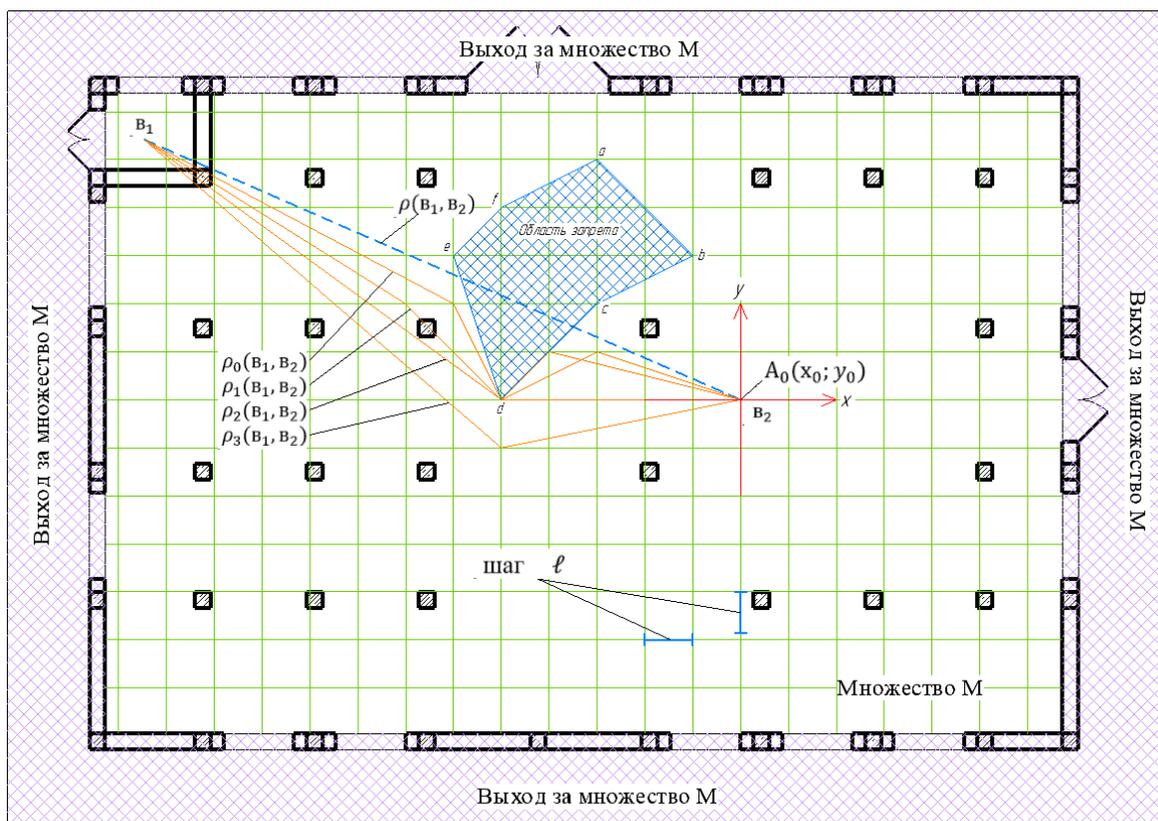


Рис. 6. Сетка с шагом ℓ с началом координат в $A_0(x_0; y_0)$, ограниченная множеством М

Заметим, что ЭВМ может перебрать любое количество точек $A(x_m; y_k)$, так как их число конечно на ограниченном множестве M . Построив их, программа выберет наиболее близкое значение к $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$. При таком подходе невозможно построение «хаотических» путей с многократным самопересечением или необоснованных «скитаний» вдоль всего цеха.

Составим таблицу с относительными длинами построенных вариантов ребер, изображенных на рис. 6.

Длина ребер между вершинами ε_1 и ε_2 и их значение, стремящееся к абсолютному значению $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$

$\rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_k)$	о.е.	Удовлетворение условию $\forall n \in N: \inf \rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$	Длина, о.е.
$\rho_0(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	224	$\rho_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	213
$\rho_1(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	222		
$\rho_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	213		
$\rho_3(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	224		
Абсолютная длина ρ		о.е.	
$\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$		204	

Из таблицы видно, что оптимальный путь обхода будет при значении $\rho_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, наиболее близком к $\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, тем самым выполняется условие (1).

Уменьшение значения шага ℓ приведет к возрастанию количества вариации $\rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$, а значит, и к повышению точности модели, но это число должно быть подобрано оптимально, так как «скрупулезность» математической модели бессмысленна, если входные данные не обладают такой же точностью, что и внутренние. Это приведет лишь к дополнительной загрузке ЭВМ.

Пункт 4 переводит граф из «сильно связанного» в «простой» с ограниченным количеством ребер, в котором в зависимости от направления прохождения ребро может входить или не входить в граф. Это зависит от правил электроснабжения.

2-я проблема. Топология пространства. Зададимся вопросом: как алгоритмически задать множество M или любое другое множество (сектор запрета, выход за границы проектируемой области)? Если область представляет собой прямоугольник (рис. 7), короткая сторона которого параллельна абсциссе или ординате, то ограничение задается стандартно:

Если $A(x_m; y_k) \in [x_1, x_2] \wedge [y_1, y_2]$, **то** ...
Иначе ... ;
Все;

Однако если фигура более сложная – невыпуклый многогранник abcdefghijka (рис. 7), имеющий 11 точек, то задать его таким методом проблематично.

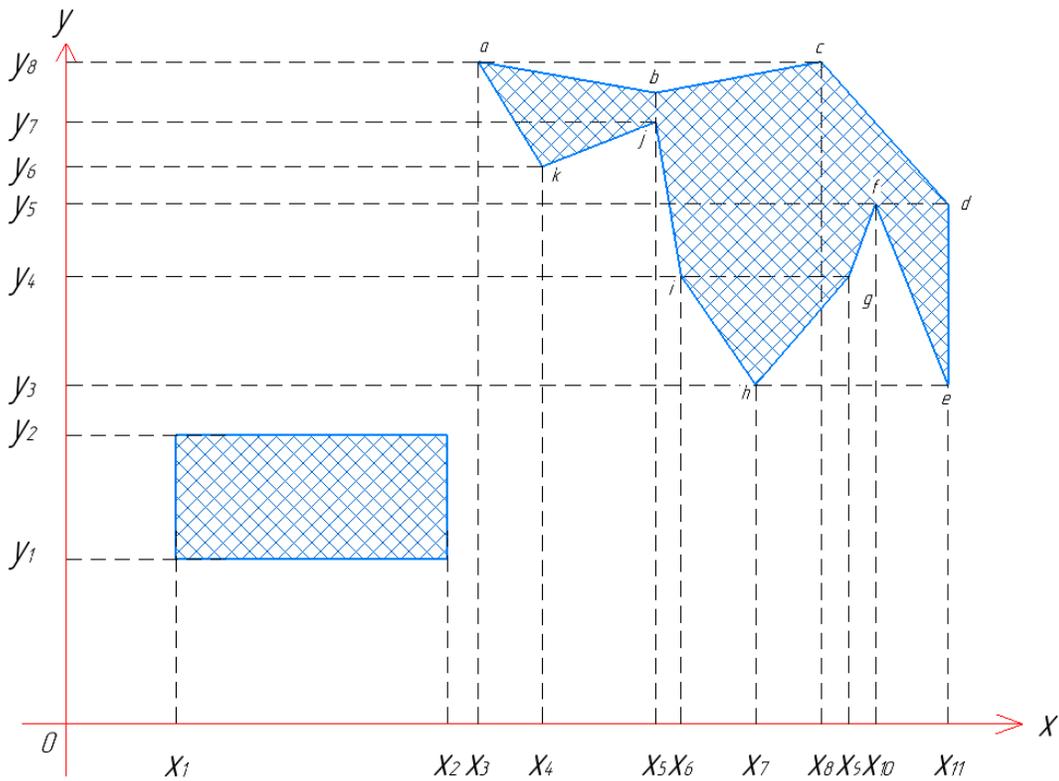


Рис. 7. Прямоугольник и невыпуклый многоугольник abcdefghijka

Кроме того, существенную роль играет топология пространства M при ведении сектора ограничений. Определение ее способствует сокращению количества вычислений, благодаря чему увеличивается скорость выполнения задач программой, а также защищает ЭВМ от перегрузки. На рис. 8 изображена некоторая ограниченная область, топология которой нам первоначально неизвестна. Допустим, нужно провести путь от вершины ε_1 до вершины ε_3 . Проведя прямую линию $\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_3)$, программа столкнется с препятствием в виде многогранника $ijklmnpqr$. Если топология пространства M нам неизвестна, то алгоритмически задаем проверку возможности проложения пути в обход сектора запрета с левой (стрелка Π_1 на рис. 8) и с правой стороны (стрелка Π_2) до вершины ε_3 . Это приведет к необходимости выполнения не только дополнительных, но и повторных расчетов каждый раз, когда будет прокладываться $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ от других вершин с проверкой на обход (так как прежде, чем строить различные варианты путей $\rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$, нужно определить, возможны ли они в принципе).

При построении пути $\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ от вершины ε_1 до вершины ε_2 будет пересечение с многогранником $abcdefgh$, прилегающим к области выхода за множество M . Воспользуемся тем же методом, т.е. проверим возможность обхода слева (зеленая стрелка Π_1) и справа (зеленая стрелка Π_2). В отличие от многогранника $ijklmnpqr$, проверка пути Π_1 у $abcdefgh$ может привести к безостановочной рекурсии, и в лучшем случае количество лишних операций станет многократно больше, чем в предыдущем моменте, в худшем случае ЭВМ просто войдет в режим перегрузки («зависнет»).

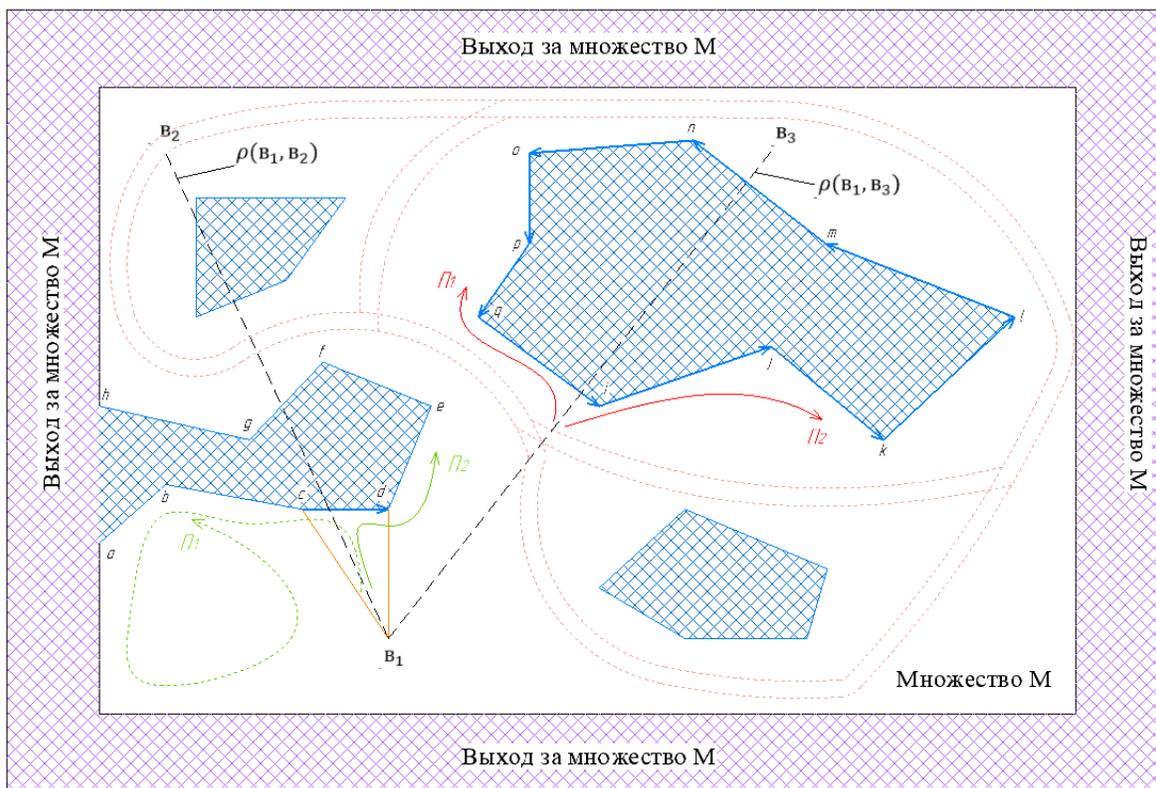


Рис. 8. Отображение топологии множества M .
Двойной красной пунктирной линией изображена топологическая карта данной области

Решение 2-й проблемы. Введенные нами ранее ограничения (2) и (3) способствуют точному определению точек множества R^f в любой заданной области. Приведем определения некоторых понятий [21, с. 144]:

1. Ориентированный многогранник – это фигура, контур которой состоит из векторов, направленных против часовой стрелки (или наоборот) вдоль обхода этого же контура. На рис. 8 таким способом изображен многогранника $ijklmnpqr$.

2. Дека – метод последовательной записи некоторого множества.

3. Освещение ребра многогранника – это позиционирование любого одного ребра фигуры относительно любой заданной точки. На рис. 8 изображено освещение ребра cd из точки ε_1 в виде двух оранжевых линий, образующих Δcde_1 . Такой подход обладает важным свойством: если точка ε_1 находится внутри области ориентированного выпуклого многогранника $abcdefgh$, то любое освещение любого ребра будет всегда против часовой стрелки. Если точка ε_1 расположена вне области данной многоугольной фигуры, то ближайшее освещаемое ребро поменяет направление. Математически это легко определяется по площади Δcde_1 через векторы $\vec{\varepsilon_1 c}$, $\vec{\varepsilon_1 d}$ и \vec{cd} : если \vec{cd} поменяет направление, то площадь Δcde_1 сменит знак. В данном случае величина площади Δcde_1 представляет собой коэффициент ориентации, обозначим его как Δ_{op} .

Если представить ориентированный многогранник в виде деки, а именно:

$$\langle F_1, F_2, F_3, \dots, F_d, F_1 \rangle,$$

где $F_1, F_2, F_3, \dots, F_d, F_1$ – запись координат точек начала и конца векторов в той последовательности, в которой они складываются, то можно определить область ограничения. Для этого достаточно представить выход за множество M как некоторый выпуклый ориентированный многогранник $Z_1 Z_2 \dots Z_8 Z_1$ (а значит, тоже в виде деки), внутри которого расположено само множество M (рис. 9). Тогда относительно некоторой любой начальной точки $A_0(x_0; y_0)$, принятой за начало координат $Z_1 Z_2 \dots Z_8 Z_1$, можно точно подсчитать все точки подмножества R_ℓ множества M , задав цикл расчета точек $A(x_m; y_k)$ с проверкой выхода их за границу сменой коэффициента Δ_{op} ближайшего освещенного ребра. Определим такой минимальный четырехугольник из начала координат $A_0(x_0; y_0)$ со сторонами M_x^{zp} и M_y^{zp} , чтобы ориентированный многогранник $Z_1 Z_2 \dots Z_8 Z_1$ мог полностью расположиться в нем. Тогда алгоритм будет таким:

Дано: $\ell = const, k = 0, m = 0$;

Цикл <перечислить точки ординаты>

$$k = k + 1;$$

Цикл <перечислить точки абсциссы>

$$A(x_m; y_k) = A_0(x_0 + \ell \cdot m; y_0 + \ell \cdot k);$$

Если $\Delta_{op} > 0$ **То** записывать $A(x_m; y_k)$ в базу данных;

$$m = m + 1;$$

Условие выхода: $x_0 + \ell \cdot m > M_x^{zp}$;

Конец цикла.

Условие выхода: $y_0 + \ell \cdot k > M_y^{zp}$;

Конец цикла.

На рис. 9 выход точки A_{m3} за область M (выполнение условия $\Delta_{op} < 0$) не дает возможности программе записать ее в базу данных топологии пространства M . Видно, что сумма все точек сетки внутри области M имеет конечное число, что и дает основу для создания топологии данной области. **Если после подсчета и внесения в базу данных координат всех точек подмножества R^ℓ обозначить на схеме секторы запрета** (рис. 9, многогранник $a_1 a_2 \dots a_7 a_1$), **то для определения точек, попадающих в эти секторы, достаточно просто последовательно брать каждую точку $A(x_m; y_k)$ из базы данных и проверять освещенность ближайшего ребра для каждого многогранника в отдельности.** Если ближайшим является ребро сектора запрета с $\Delta_{op} > 0$, то это значит, что точка расположена внутри данной области (например, точка A_{d12} на рис. 9), тогда ее вычеркивают из основного списка и перезаписывают в отдельный лист. Таким образом будут вычеркнуты все точки, не принадлежащие пространству M :

$$M = [(R^\ell \setminus Z^1) \cup \dots \cup (R^\ell \setminus Z^t)] \setminus M^0,$$

где Z^t – различные множества секторов запрета; M^0 – множество вне области M . В результате в основном списке останется полная топология области проектирования, что нам и требовалось.

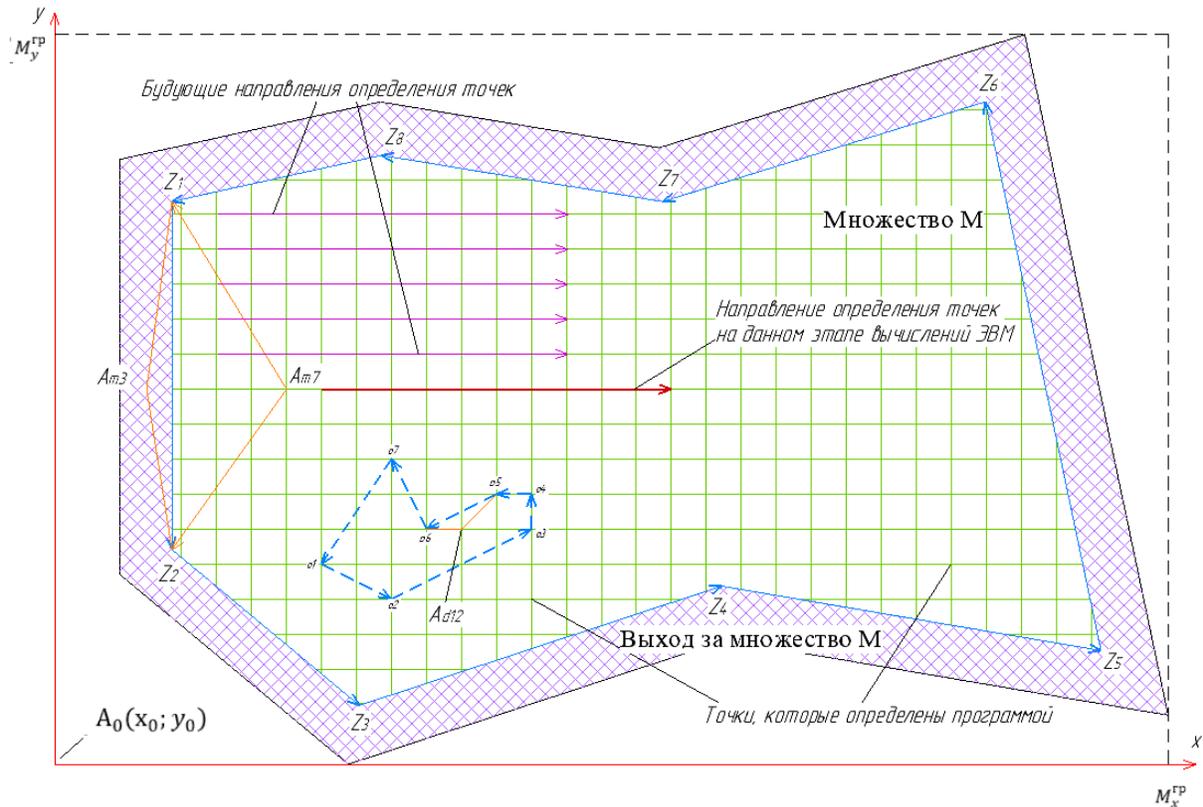


Рис. 9. Определение всех точек R_i в области M .
Пунктирной синей линией обозначен сектор запрета,
веденный после определения всех точек внутри $Z_1Z_2 \dots Z_8Z_1$

Теперь рассмотрим проблему попадания в рекурсию при проверке пути обхода области запрета. Лучшее решение – не делать эту попытку вообще. Так как мы теперь знаем топологию пространства M , то многогранник $abcdefgh$ (см. рис. 8) можно записать в деку со специальным оператором \blacksquare в той части, где есть соприкосновение с M^0 :

$$\langle F_1, F_2, F_3, \dots, F_d, \blacksquare \rangle$$

$$\langle a, b, c, d, e, f, g, h, \blacksquare \rangle$$

Данный оператор только указывает программе на то, что эта область запрета является не многогранником, а разрывной ломаной линией и к ней нужно применить другой алгоритм, который рассмотрим далее.

Для такой линии возможен обход только в одну сторону. Чтобы определить эту сторону, достаточно отметить два первых ребра $abcdefgh$, которые пересекает путь $\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, и сравнить их последовательность в деке (рис. 10). Сторона, в которую нужно повернуть, будет та же, что и последовательность пересеченных векторов в деке:

$$\langle a, b, c, d, e, f, g, h, \blacksquare \rangle$$

$$\langle \overrightarrow{ab}, \overrightarrow{bc}, \overrightarrow{cd}, \overrightarrow{de}, \overrightarrow{ef}, \overrightarrow{fg}, \overrightarrow{gh}, \blacksquare \rangle$$

(от \overrightarrow{cd} к \overrightarrow{fg} – против часовой стрелки)

На рис. 10 это изображено схематически. Если будет наоборот, т.е. на некотором пути $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ первым вектором станет \vec{fg} , а следующим \vec{cd} , то направление будет от \vec{fg} к \vec{cd} по часовой стрелке. Основным условием является заполнение дек всех многогранников в одном направлении (в нашем случае против часовой стрелки).

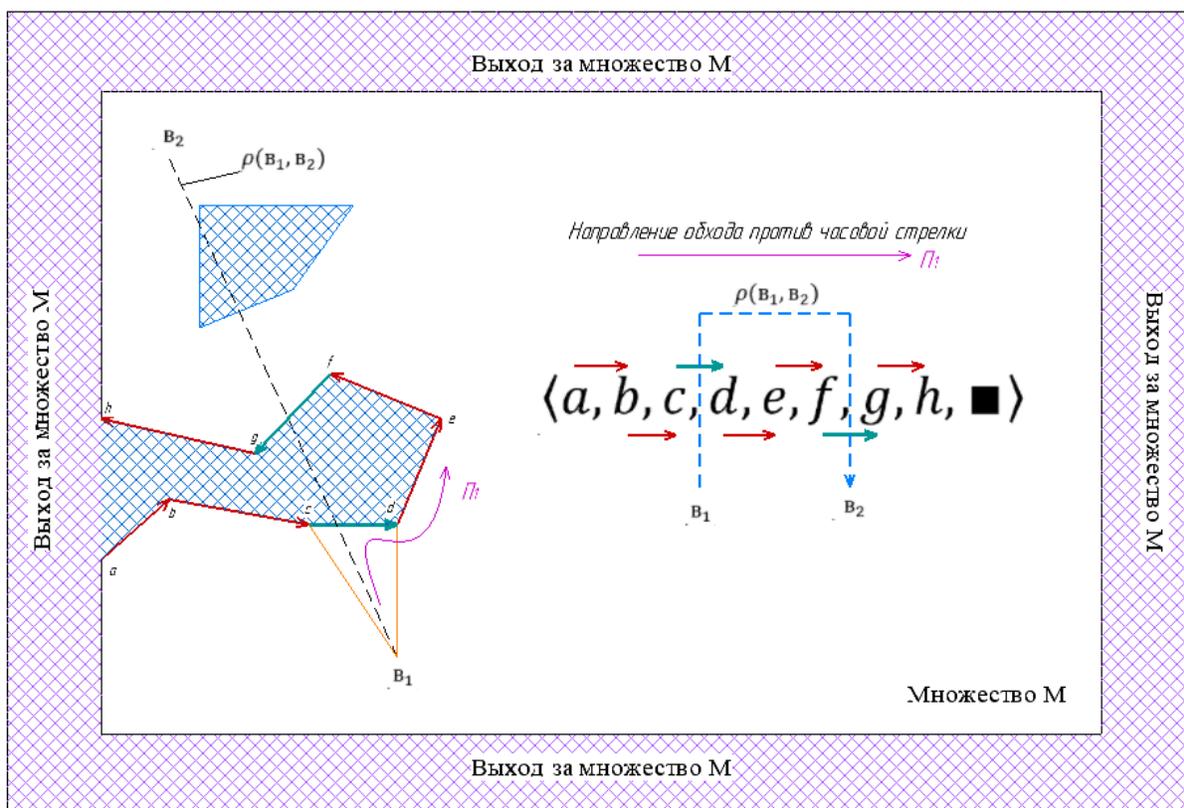


Рис. 10. Определение обхода сектора запрета по оператору \blacksquare в деке.
Векторы зеленого цвета – два ближайших на прямом пути
из вершины ε_1 в ε_2

Таким образом, рассмотрены и решены две указанные выше основные проблемы: бесконечных вариаций и топологии пространства.

Математическая модель с параметрами «экономичность – надежность» и «сектор ограничения» способствует более гибкому и точному определению различных вариантов схемы под различные ограничения технического задания для инженеров-проектировщиков. Она может быть выполнена в виде плагина, встроенного в профессиональный САПР как дополнительная опция для улучшения возможности проектирования электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T-flex: официальный сайт. URL: <https://www.tflex.ru/> (дата обращения: 20.12.2023).
2. КОМПАС-3D: официальный сайт. URL: <https://kompas.ru/> (дата обращения: 20.12.2023).

3. CSoftDevelopment: официальный сайт. URL: <https://csdev.ru/soft.html> (дата обращения: 20.12.2023).
4. Чиндяскин В.И., Кислова Е.Ф. Разработка компьютерной модели для расчета эффективной локальной системы электроснабжения сельских поселений // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2009. № 4 (24). С. 88
5. САПР Электрик 9.01. URL: <https://electronics-workbench.ru/electric-9-01-na-russkom-yazyke> (дата обращения: 20.12.2023).
6. Система автоматизированного проектирования внутризаводского электроснабжения: методические указания / сост. Е.В. Бондаренко. Ульяновск: УЛГТУ, 2014. 8 с.
7. Программа для создания схемы электрощита: программа для проектирования и последующей сборки электрощита. URL: <https://readmehouse.ru/populyarnoe/programma-dlya-sozdaniya-shemy-elektroshhita-programma-dlya-proektirovaniya-i-posleduyushhij-sborki-elektroshhita.html> (дата обращения: 20.12.2023).
8. Лучшие программы для электриков – бесплатные и платные. URL: https://elektrikipro.ru/ustrojstva/programma-dlya-proektirovaniya-elektroshchitov.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 20.12.2023).
9. The 2024 Electrical toolset is included with AutoCAD. URL: <https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets/autocad-electrical> (дата обращения: 20.12.2023).
10. Latest Headlines from CYME International URL: <https://www.cyme.com/> (дата обращения: 20.12.2023).
11. CAD Software for Modeling&Visualization | Bentley Systems | openbuildings designer. URL: <https://www.bentley.com/software/openbuildings-designer/> (дата обращения: 20.12.2023).
12. CAD Software for Modeling&Visualization | Bentley Systems | microstation. URL: <https://www.bentley.com/software/microstation/> (дата обращения: 20.12.2023).
13. CADprofiElectrical. URL: <https://www.cadprofi.com/main/ru/products/cadprofi/cadprofi-electrical> (дата обращения: 20.12.2023).
14. 2D-CAD and 3D-BIM for Electrical. URL: <https://www.dds-cad.net/products/dds-cad-electrical/> (дата обращения: 20.12.2023).
15. Шилин А.Н., Карпенко О.И. Автоматизированная система анализ надежности работы системы электроснабжения потребителей // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2011. № 8 (81). С. 99–103.
16. Бандурин И.И., Чернова О.А. Математическая модель для городских электрических сетей 6–35 кВ, позволяющая создать рациональную систему электроснабжения с заданной надежностью // *Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономические и технические науки*. 2013. № 3. С. 109–123.
17. Рындина И.Е. Методы компьютерного моделирования для проектирования и анализа режимов систем электроснабжения. Дисс. ... канд. техн. наук. СПб. 2000. 170 с.
18. Карпенко А.П., Кузьмина И.А. Математическая модель распределительной городской сети электроснабжения с учетом ее перспективного развития // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 5. С. 162–180.
19. Nocka D., Levinb T., Bakerc E. Changing the policy paradigm: A benefit maximization approach to electricity planning in developing countries // *Applied Energy*. 2020. № 264 (7), pp. 114583.

20. Isihak S., Akpan U., Bhattacharyya S. Evolution of GIS-based rural electrification planning models and an application of OnSSET in Nigeria // *Renewable and Sustainable Energy Transition*. 2022. № 2(9), pp. 100019.
21. Кушниренко А.Г., Лебедев Г.В. Программирование для математиков: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1988. 384 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТРУНОВ Сергей Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: 89607182380@mail.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трунов С.С., Крупнов А.В. Оптимальное проектирование систем электроснабжения на ЭВМ с учетом критериев надежности и экономичности // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 57–74.

CAD WITH INDEPENDENT DESIGN OF POWER SUPPLY SYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT THE CRITERIA OF RELIABILITY AND EFFICIENCY

S.S. Trunov, A.V. Krupnov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The creation of a promising mathematical model for CAD in the field of power supply is considered, taking into account the reliability of the power supply elements of the technological process, as well as the independent planning of power transmission lines by the program based on the parameter «efficiency – reliability» and «sectors of restriction».

Keywords: CAD, reliability and efficiency of power supply, mathematical model, independent calculation of the location of power lines and electrical receivers.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TRUNOV Sergey Sergeevich – Graduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: 89607182380@mail.ru

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Trunov S.S., Krupnov A.V. Cad with independent design of power supply systems, taking into account the criteria of reliability and efficiency // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 57–74.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 547

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ СПИРТОВ В УГЛЕВОДОРОДЫ

*Р.В. Бровка**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Бровка Р.В., 2024

Аннотация. Непрерывающееся истощение природных ресурсов как основного сырья для получения углеводов привело к широкому изучению биовозобновляемого сырья, особенно биоспиртов. Использование альтернативного вида сырья на основе биомассы позволит существенно улучшить как экологическую ситуацию в мире, в связи со снижением выбросов от сжигания легких газов, так и экономическую. Стоит отметить, что переработка спиртов, полученных из растительного сырья, может являться наиболее перспективной, поскольку для получения биоспиртов используются различные зерновые культуры, отходы лесопереработки, биомасса и т.д. Приведены некоторые особенности получения синтетических углеводов из этанола, бутанола и изопропанола в качестве биовозобновляемого сырья. Представлена методика проведения трансформации спиртов в углеводороды.

Ключевые слова: этанол, бутанол, изопропанол, углеводороды, трансформация, катализ, цеолит, HZSM-5, биовозобновляемые спирты.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-75-84

Введение

Каталитическая трансформация спиртов в углеводороды – одно из наиболее важных и перспективных направлений переработки биовозобновляемого сырья [1]. Биомасса, используемая для получения биовозобновляемых спиртов в процессе биорефайнинга, делится на основные категории (в зависимости от химической природы): 1) триглицериды, 2) сахарную и крахмалистую биомасса и 3) лигноцеллюлозную биомассу. Триглицериды в основном содержатся в животном жире, растительном масле и т.д. Сахарную биомассу получают из сахарного тростника и сахарной свеклы, а крахмал – из кукурузы, ячменя, пшеницы и других сельскохозяйственных культур. Лигноцеллюлозная биомасса состоит из стебля, хвои, соломы, черешков и листьев растений. Основными источниками этой биомассы являются сельское хозяйство и лес.

Для получения биовозобновляемых спиртов наиболее ценны биорефайнинг крахмала и сахара, а также биорефайнинг лигноцеллюлозы [2, 3]. Из сырья для биорефайнинга также можно получать широкий спектр биотоплив: биодизель, биоэтанол,

биобутанол, биометанол, диметиловый эфир и т.д. Этанол – один из наиболее важных и перспективных возобновляемых энергоносителей, предпочтительных с экологической и экономической точек зрения [4]. Среди способов превращения этанола значительное внимание было уделено каталитическому превращению этанола в бензин или высокоценные углеводороды. В зависимости от структуры катализаторов и условий реакции этанол может быть преобразован в несколько ценных продуктов, таких как парафин, олефин и ароматические соединения. Изопропанол можно получить как классическим путем химического превращения, так и с помощью ферментации глюкозосодержащих субстратов с использованием биовозобновляемого сырья [5]. В свою очередь изопропиловый спирт может быть трансформирован в высокоценные продукты, в том числе углеводороды. Как и этанол, бутанол рассматривают прежде всего как альтернативный источник получения синтетических углеводородов [6–7], при этом каталитическому превращению этанола посвящено больше исследований. Известно, что дегидратация бутанола и этанола является одним из начальных этапов получения газолена при использовании твердых катализаторов [8]. Цеолиты различной природы широко применяются при проведении конверсии спиртов в углеводороды, но наибольшую популярность получил цеолитный катализатор HZSM-5. Это связано с таким преимуществом мезопористых цеолитов, как медленное коксование, а следовательно, и сниженная скорость падения активности, чего нельзя сказать о мелко- и крупнопористых, скорость коксования которых достаточно велика. В то же время мелкопористым цеолитам, к которым относятся эрионит, шабазит, цеолит T, sapo-17 и sapo-34, присуща высокая селективность в отношении низкомолекулярных углеводородов с углеродным скелетом C₁-C₄. Крупнопористые цеолиты (модернит ZSM-4), наоборот, отличаются высокой селективностью к высокомолекулярным углеводородам. На мезопористых цеолитах типа HZSM-5 в процессе синтеза наблюдается высокий выход углеводородов с углеродным скелетом C₅-C₁₁.

Материалы и методы

Эксперименты проводились на специальной установке для каталитической трансформации спиртов в углеводороды (рис. 1).

Испаритель, наполненный катализатором, нагревают до требуемой температуры. Затем подается спирт с необходимым расходом 0,1–0,4 мл/мин при помощи насоса, при этом образуется паровая смесь. Далее газовая смесь этанола и/или азота подается в нагретый реактор 8, заполненный цеолитом (6,4 г), где происходит синтез диэтилового эфира, также нагретого до необходимой температуры. Затем полученный диэтиловый эфир, отделенный от смеси воды и этанола в холодильнике, подается в заполненный цеолитом (6,4 г) реактор 10, нагретый до необходимой реакционной температуры.

Газовые пробы отбирались раз в час автоматическим дозатором хроматографа. Для определения массы, доли жидкой фракции и состава углеводородной фракции жидкие пробы отбирались в соответствии с методикой эксперимента. Анализ жидких углеводородов (ЖУВ) проводился с использованием газового хромато-масс-спектрометра Shimadzu HPMS2010, хроматографов «Кристаллюкс-4000М» и «Кристалл 2000М» в соответствии с ГОСТ Р 52714-2007.

Необходимая для анализа проба газовой фазы реакционной смеси отбиралась при помощи газового крана, подключенного к автоматическому газовому хроматографу «Кристалл 2000М», оснащенный детектором по теплопроводности и пламенно-

ионизационным детектором. Для анализа газов использовалась насадочная колонка Hayesep Q80/100, $l = 3$ м, $d = 2$ мм, $T_{\max} = 275$ °С. Температура транспортной линии составляла 80 °С, а крана дозатора – 150 °С, температура испарителя – 230 °С, температура пламенно-ионизационного детектора и детектора по теплопроводности – 250 °С. В течение первых 5 мин после ввода пробы в колонку температура колонки поддерживалась на уровне 40 °С, далее производился нагрев до 245 °С со скоростью 10 °С/мин. Данная температура сохранялась на протяжении всего времени проведения анализа. Параметр расхода газа носителя составил 20 мл/мин, расхода водорода – 25 мл/мин, расхода воздуха – 250 мл/мин. Продолжительность проведения анализа составила 3 ч. Для качественного определения компонентов применялись стандартные индексы удерживания Ковача, а для количественного определения концентрации компонентов смеси – стандартные коэффициенты чувствительности, указанные в ГОСТ Р 52714-2007.

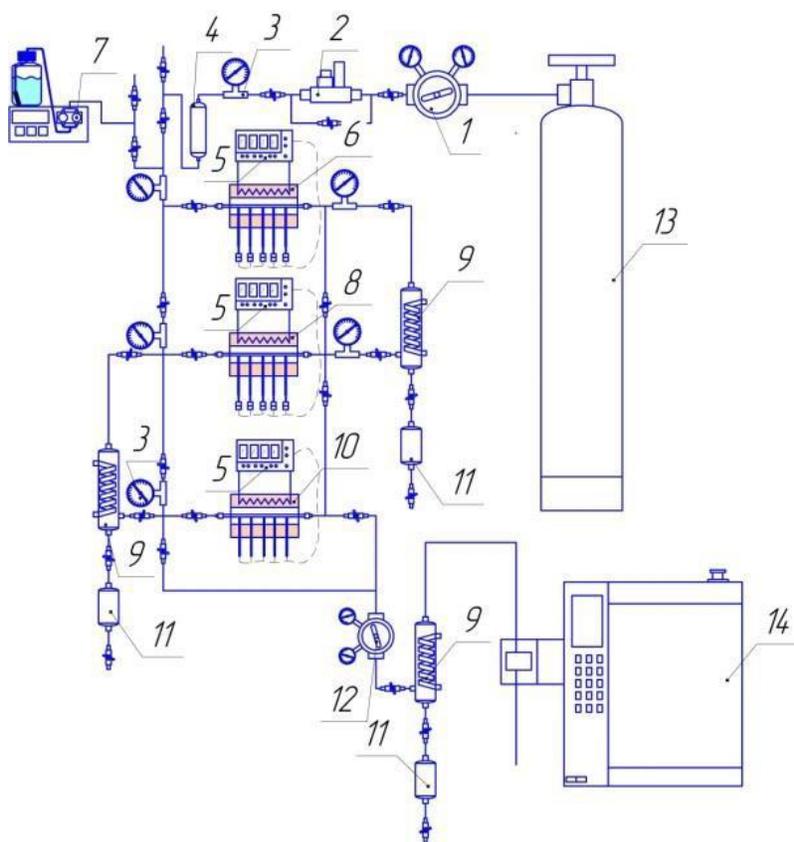


Рис. 1. Установка для каталитической трансформации спиртов: 1 – редуктор давления азота; 2 – дозатор массового расхода азота; 3 – манометр; 4 – буферная емкость; 5 – контроллер температуры; 6 – испаритель; 7 – насос для подачи спирта; 8 – реактор синтеза диметилового эфира; 9 – холодильник; 10 – реактор синтеза углеводов; 11 – коллектор фракций; 12 – регулятор давления в системе; 13 – баллон с азотом; 14 – хроматограф

Анализ жидкой органической фазы производился с помощью метода газовой хромато-масс-спектрометрии на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu HPMSQP2010 (Япония). В установке для анализа проб использовалась капиллярная

колонка со следующими параметрами: MS-1, $l = 100$ м, $d = 0,32$ мм, $T_{\max} = 310$ °С. Температурный режим термостата хроматографа 50 °С, температура испарителя 300 °С, давление 182,9 кПа, общий поток гелия через колонку 81,5 мл/мин, поток газа через колонку 1 мл/мин, линейная скорость газов 19,9 см/с, продувочный поток 5 мл/мин, коэффициент деления потока 1, давление в испарителе 200 кПа, время введения пробы 5,00 с. Температурная программа: 10 мин температура выдерживалась на уровне 50 °С, нагрев до 310 °С производился со скоростью 10 °С/мин, выдержка в течение 15 мин. Время подготовки хроматографа 1 мин. Температура источников ионов 260 °С, температура интерфейса 280 °С, продолжительность анализа 51 мин, начальная измеряемая масса 10 а. е. м., конечная измеряемая масса 400 а. е. м. Для качественного определения состава смеси применялись библиотеки масс-спектров.

Результаты исследования

В рамках настоящего исследования была проведена серия экспериментов по изучению влияния температуры на трансформацию этанола, бутанола-1 и изопропанола. В опытах применялись цеолит ZSM-5, НКС Corp Hong (Китай), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 25$. Были получены зависимости конверсии и скорости образования углеводородов от времени при варьировании температуры. На рис. 2 приведен график зависимости конверсии этанола от времени протекания реакции. Видно, что конверсия постоянна и полностью достигнута.

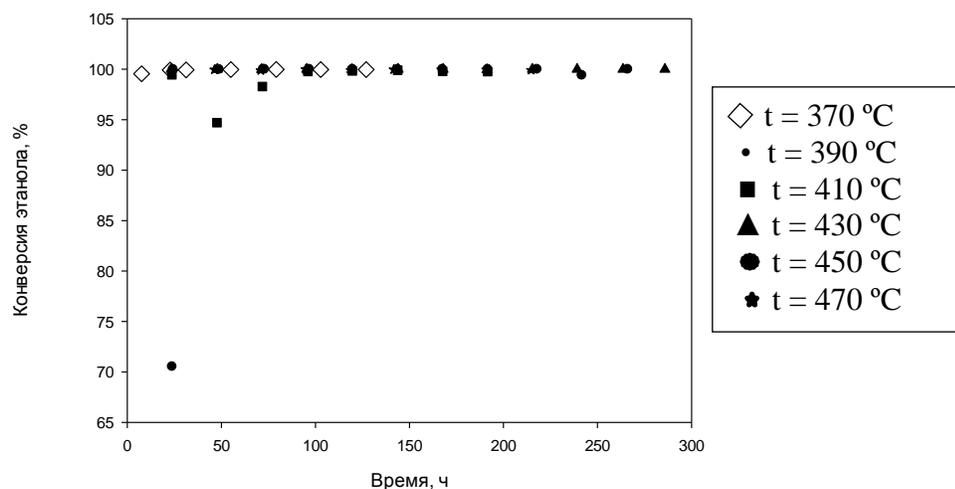


Рис. 2. Зависимость конверсии этанола от времени протекания реакции при варьировании температуры реакции (условия реакции: $t = 370$ – 470 °С; скорость подачи этанола 0,05 мл/мин; $m(\text{cat}) = 6,38$ г)

На рис. 3 представлен график зависимости скорости образования ЖУВ от времени протекания реакции при различной температуре реакции. При температурах 390 и 450 °С наблюдается увеличение скорости образования ЖУВ, тогда как при температурах 370 и 430 °С скорость постоянна. При температурах 410 и 470 °С наблюдается снижение скорости образования ЖУВ.

На рис. 4 показана зависимость скорости образования газообразных углеводородов (ГУВ) от времени протекания реакции при варьировании температуры. Видно, что при температурах 370, 390 и 430 °С скорость образования ГУВ увеличивается, в то время как

при температурах 410 и 470 °С скорость постоянна. При температуре 450 °С отмечается снижение скорости образования ГУВ.

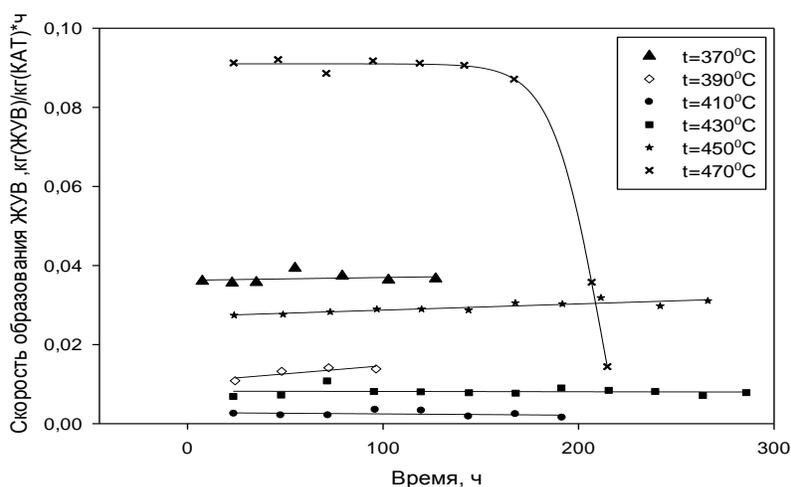


Рис. 3. Зависимость скорости образования ЖУВ от времени протекания реакции при варьировании температуры реакции (условия реакции: $t = 370\text{--}470\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость подачи этанола 0,05 мл/мин; $m(\text{cat}) = 6,38\text{ г}$)

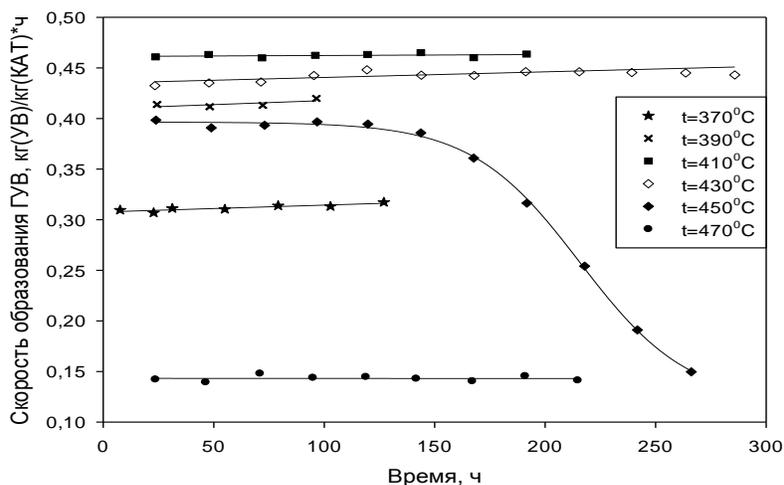


Рис. 4. Зависимость скорости образования ГУВ от времени протекания реакции при варьировании температуры реакции (условия реакции: $t = 370\text{--}470\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость подачи этанола 0,05 мл/мин; $m(\text{cat}) = 6,38\text{ г}$)

Из полученных данных можно заключить, что на всем диапазоне варьирования температуры конверсия изопропанола находится на уровне 100 %.

На рис. 5 изображен график зависимости скорости образования ЖУВ от времени при трансформации изопропилового спирта. При температурах 390, 430 и 450 °С наблюдается увеличение скорости образования ЖУВ. При температуре 410 °С значение этого показателя несколько увеличивается, а при 370 °С остается неизменным.

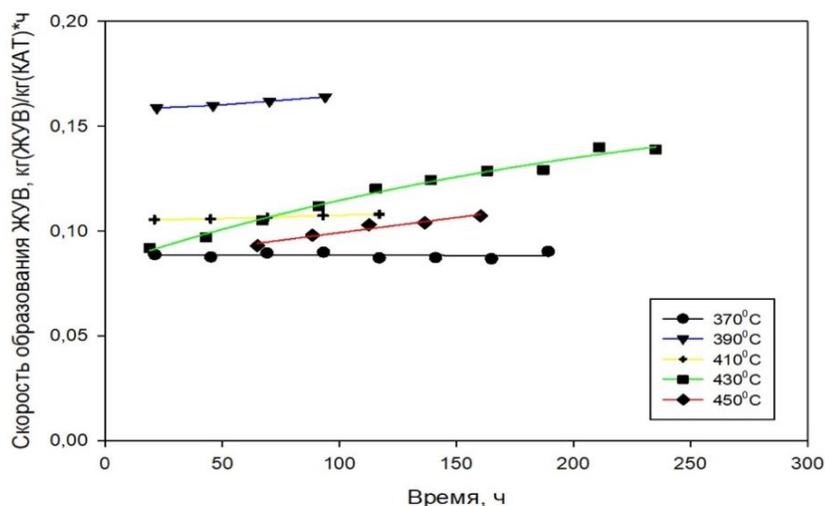


Рис. 5. Зависимость скорости образования ЖУВ от времени при варьировании температуры (условия реакции: $t = 370\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость подачи изопропанола – 0,05 мл/мин)

Зависимость скорости образования ГУВ от времени показана на рис. 6. При температуре 430 °С скорость образования ГУВ остается неизменной. При температуре 370 °С наблюдается увеличение этого показателя с последующим снижением, имеющим нелинейную зависимость. При температуре 450 °С, наоборот, происходит снижение скорости образования ГУВ с последующим ее увеличением, тогда как при 390 °С отмечается постоянное увеличение скорости образования, а при 410 °С – постоянное снижение.

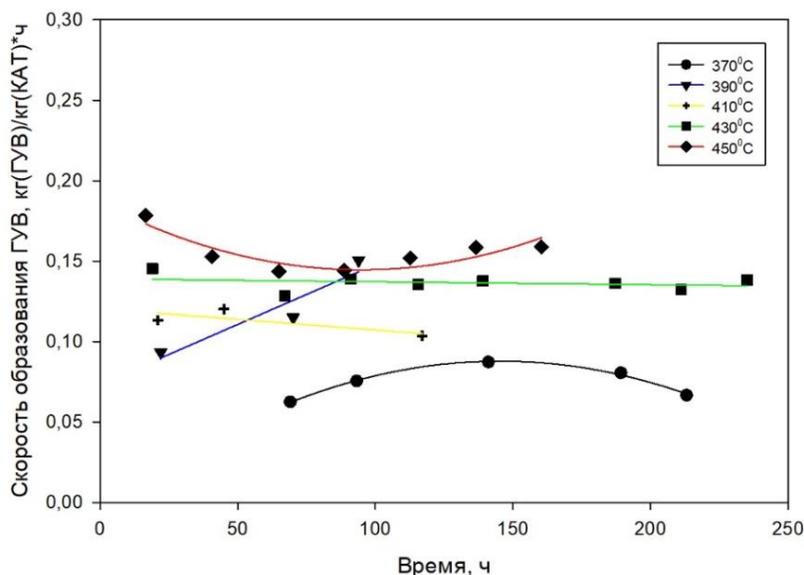


Рис. 6. Зависимость скорости образования ГУВ от времени при варьировании температуры (условия реакции: $t = 370\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость подачи изопропанола 0,05 мл/мин)

Такие же зависимости были получены для бутанола-1. На рис. 7 приведен график зависимости конверсии бутанола-1 от времени протекания реакции. Конверсия бутанола-1 возрастает с увеличением реакционного времени, что справедливо для каждой температуры.

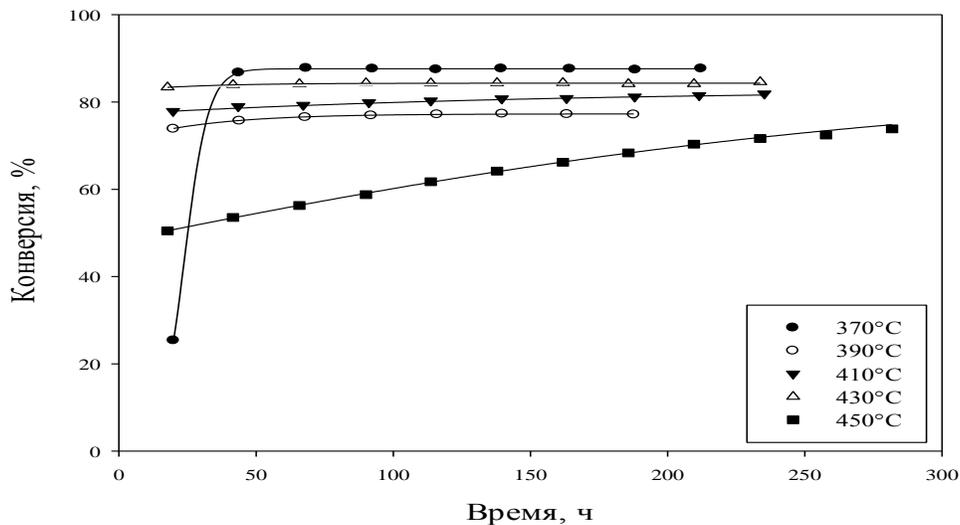


Рис. 7. Зависимость конверсии бутанола-1 от времени протекания реакции при варьировании температуры реакции (условия реакции: $t = 370\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость подачи бутанола-1 0,05 мл/мин; $m(\text{cat}) = 6,4\text{ г}$)

На рис. 8 приведен график зависимости селективности бутанола-1 к ЖУВ от времени протекания процесса при различных температурах. Видно, что при температурах 390, 410 и 430 °C селективность к углеводородам со временем увеличивается и выходит на постоянную планку. При температуре 450 °C селективность остается на неизменном уровне, тогда как при температуре 370 °C происходит резкий скачок и выход на стационарный режим.

На рис. 9 продемонстрирована селективность к ГУВ от времени протекания реакции при варьировании температуры реакции. На графике видно, что для температур 390, 410 и 430 °C происходит постепенное, а в случае температуры 370 °C – резкое снижение селективности к ГУВ и выход на постоянное значение, тогда как температура 450 °C характеризуется небольшим спадом к селективности ГУВ вначале и выходом на стационарный режим.

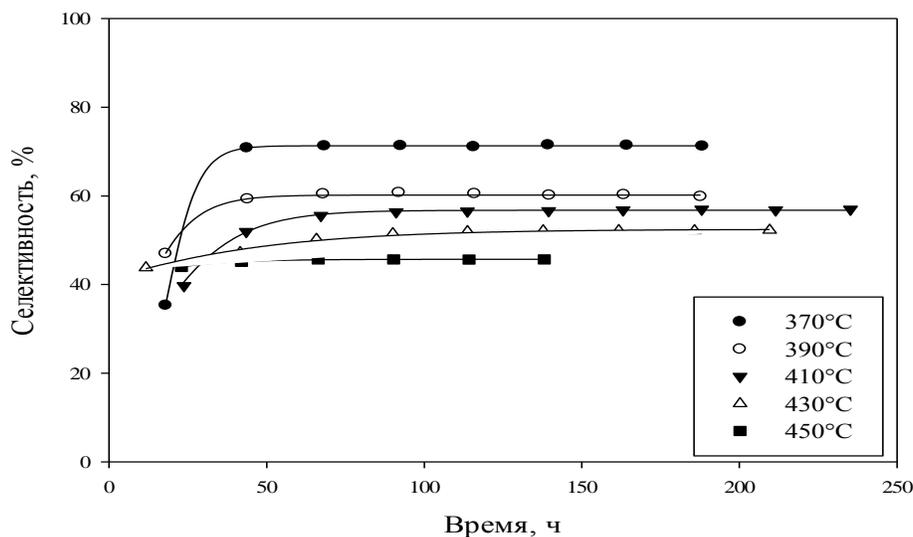


Рис. 8. Селективность к ЖУВ от времени реакции при варьировании температуры реакции (условия реакции: $t = 370\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость подачи бутанола-1 0,05 мл/мин; $m(\text{cat}) = 6,4\text{ г}$)

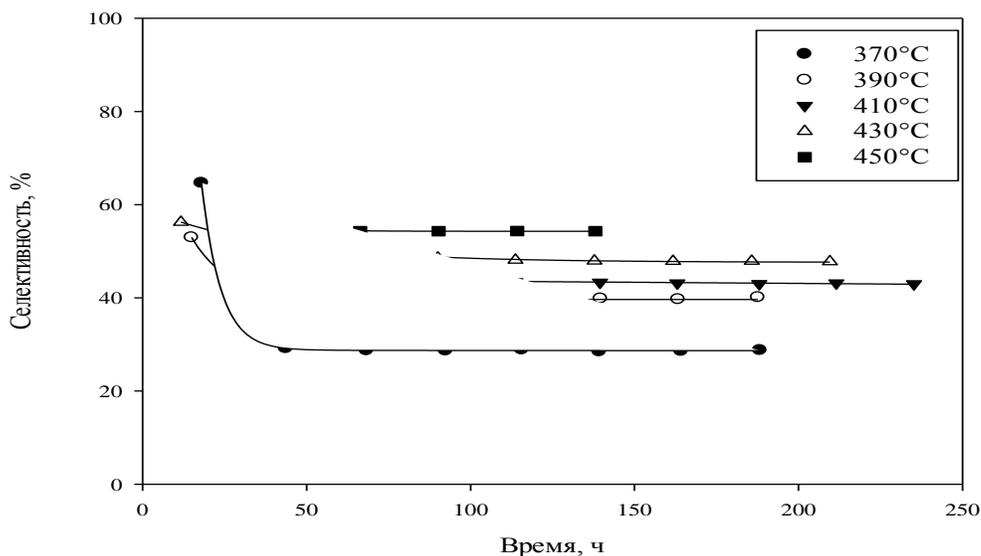


Рис. 9. Селективность к ГУВ от времени реакции при варьировании температуры реакции (условия реакции: $t = 370\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$; скорость подачи бутанола-1 = 0,05 мл/мин; $m(\text{cat}) = 6,4\text{ г}$)

Заключение

В рамках проведенного исследования получены данные по влиянию температуры на трансформацию этанола, бутанола-1 и изопропилового спирта. Построены зависимости конверсии и скорости образования жидких и газообразных углеводородов от времени при

варьировании температуры. Из данных по конверсии этанола и изопропанола можно сделать вывод о том, что на всем диапазоне варьирования температуры конверсия постоянна и полностью достигнута. При этом для каждой температуры конверсия бутанола-1 увеличивается в течение всего реакционного времени. На основании полученных зависимостей скорости образования жидких и газообразных углеводородов оптимальной температурой трансформации этанола следует считать 410 °С, а изопропанола и бутанола-1 – 450 °С. При данной температуре достигается высокое значение скорости образования углеводородов, а также наблюдается стабильный уровень селективности к ЖУВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Faba L., Díaz E., Ordóñez S. Recent developments on the catalytic technologies for the transformation of biomass into biofuels: A patent survey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 51, pp. 273–287. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.020
2. Maity S.K. Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 43, pp. 1427–1445.
3. Maity S.K. Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part II // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 43, pp. 1446–1466.
4. Tan K.T., Lee K.T., Mohamed A.R. Role of energy policy in renewable energy accomplishment: The case of second-generation bioethanol // *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, pp. 3360–3365.
5. Subagyo D.C.H. et al. Isopropanol production with reutilization of glucose-derived CO₂ by engineered *Ralstonia eutropha* // *Journal of bioscience and bioengineering*. 2021. Vol. 132. № 5, pp. 479–486. DOI:10.1016/j.jbiosc.2021.08.004
6. Abdulrazaq H.T., Schwartz T.J. Catalytic Conversion of Ethanol to Commodity and Specialty Chemicals // *Elsevier*. 2019, pp. 3–24.
7. Palla V.C.S., Shee D., Maity S.K. Production of aromatics from n-butanol over H-ZSM-5, H-Beta, and γ -Al₂O₃: Role of silica-alumina mole ratio and effect of pressure // *ACS Sustainable Chem. & Eng.* 2020. Vol. 8 (40), pp. 15230–15242.
8. Gayubo A.G., Aguayo A.T., Atutxa A., Aguado R. Transformation of Oxygenate Components of Biomass Pyrolysis Oil on a HZSM-5 Zeolite. I. Alcohols and phenols // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2004. V. 43, pp. 2610–2618.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БРОВКО Роман Викторович – аспирант кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: RomanVictorovich69@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Бровко Р.В. Теоретические и практические особенности трансформации спиртов в углеводороды // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 14 (21). С. 75–84.

**THEORETICAL AND PRACTICAL FEATURES OF THE TRANSFORMATION
OF ALCOHOLS INTO HYDROCARBONS****R. V. Brovko***Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The continuous depletion of natural resources as the main raw material for the production of hydrocarbons has led to widespread research into biorenewable raw materials, especially bioalcohols. The use of an alternative type of raw material based on biomass will significantly improve both the environmental situation in the world, due to the reduction of emissions from the combustion of light gases, and the economic one. It is worth noting that the processing of alcohols obtained from plant raw materials may be the most promising, since various grain crops, forest waste, biomass, etc. are used in the process of obtaining bioalcohols. The presented article presents some features of the production of synthetic hydrocarbons from ethanol, butanol and isopropanol as biorenewable raw materials. A method for transforming alcohols into hydrocarbons is also presented.

Keywords: ethanol, butanol, isopropanol, hydrocarbons, transformation, catalysis, zeolite, HZSM-5, biorenewable alcohols.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

BROVKO Roman Viktorovich – Postgraduate Student of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: RomanVictorovich69@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Brovko R.V. Theoretical and practical features of the transformation of alcohols into hydrocarbons // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 75–84.

УДК 544.773.2**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕН****Г.А. Туманов, В.Ю. Долуда, А.А. Мальков***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Туманов Г.А., Долуда В.Ю.,
Мальков А.А., 2024

Аннотация. В статье приведены теоретические аспекты строения, формирования и деградации пен, а также основные характеристики пен, влияющие на их стабильность. Пены различного состава и строения привлекают внимание ученых и исследователей из

различных областей в связи с большой площадью поверхности и динамическим характером ее изменения. Пена играет важную роль в самых разных отраслях промышленности: от производства повседневных продуктов, таких как крем для бритья и стиральный порошок, до сложных технологических процессов. Многие свойства пен являются прямым следствием их геометрической структуры.

Ключевые слова: сухая пена, жидкая пена, дисперсность, поверхностное натяжение, уравнение состояния.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-84-96

Введение

Пены относятся к дисперсным системам с жидкой или твердой дисперсионной средой и высокой (более 70 % по объему) концентрацией газовой дисперсной фазы. На сегодняшний день пены нашли широкое применение в различных отраслях экономики, включая пищевую, химическую промышленность, производство строительных материалов и средств пожаротушения. Так, например, в сфере пожарной безопасности применение пен является наиболее распространенным методом борьбы с пожарами классов А (пожары твердых горючих веществ и материалов) и В (пожары горючих жидкостей или плавящихся твердых веществ и материалов). Ввиду вышесказанного, исследование особенностей формирования пен относится к важным научно-техническим задачам, требующим всестороннего рассмотрения.

Структура пены

Многие свойства жидких пен являются прямым следствием их геометрической структуры. Так, например, непрозрачность образцов пены обусловлена диффузным рассеянием света как от пленок жидкости, так и от их пересечений (границ Плато). Дренаж пены под действием силы тяжести распространяется в основном за счет протекания жидкости через сеть границ Плато. Этой сетью обусловлена и электропроводность пены. Сложное поведение пены при сдвиге объясняется необходимостью структурных перестроек [1].

В равновесном состоянии структура пены определяется минимизацией поверхностной энергии для доли заданного объема. При рассмотрении поведения пены под действием силы тяжести, что соответствует случаю, когда только что сформированной пене дают стечь, устанавливается равновесный профиль содержания жидкости (рис. 1). Кроме того, временной масштаб наблюдений должен быть достаточно коротким, чтобы эффекты старения пены, такие как изменение объема за счет диффузии газа между соседними пузырьками или разрушение пленок (коалесценция), были пренебрежимо малы. В этом случае поверхностное натяжение γ можно считать постоянным во всем объеме пены.

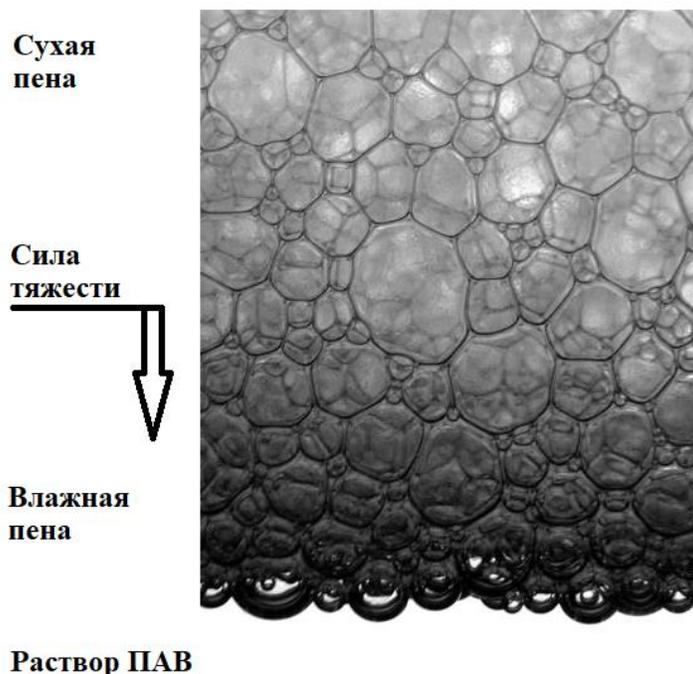


Рис. 1. Пример жидкой пены,
плавающей поверх вспенивающего ее раствора

Избыточное давление пузырька внутри жидкости с поверхностным натяжением γ и радиусом R определяется по закону Юнга – Лапласа как

$$\Delta P = 2 \gamma / R. \quad (1)$$

Согласно уравнению, избыточное давление типичного пузырька с $R \approx 100$ мм и $\gamma \approx 0,03$ Н/м будет составлять порядка 1 000 Па [1]. Это достаточно мало по сравнению с атмосферным давлением (101 325 Па), следовательно, пузырьки в пенах можно считать несжимаемыми.

Тогда энергия E пены с n пузырьками имеет вид

$$E = \gamma \sum_{i=1}^n S_i = \gamma S_{tot}, \quad (2)$$

где S_i – площадь поверхности пузырька i ; S_{tot} – общая площадь поверхности пены.

Таким образом, поверхностная энергия рассмотренного выше пузырька размером 100 мм составляет порядка 10^{-8} Дж, т.е. примерно в 10^{13} раз больше тепловой энергии $kT \sim 10^{-21}$ Дж. Стоит заметить, что и потенциальная энергия пузырька $\Delta p g R$, обусловленная его плавучестью, примерно в 10^{21} раз больше kT . Таким образом, тепловая энергия не играет никакой роли в образовании упаковок пузырьков газа.

Типичная жидкая пена, находящаяся в равновесии под действием силы тяжести, показана на рис. 1. Видно, что форма пузырьков зависит от величины локальной доли

жидкости ϕ в пене, т.е. определяется отношением объема жидкости к рассматриваемому объему пены. Вблизи границы раздела «пена – жидкость» (в нижней части пенного столба) пузырьки хорошо аппроксимируются контактирующими деформированными сферами. Это часто называют влажным пределом. Для пен с умеренной полидисперсностью (т.е. содержащих пузырьки разного размера) максимальное значение доли жидкости, или критическая доля жидкости ϕ_c , составляет $\approx 0,36$, как это получено для случайной упаковки (монодисперсных) твердых сфер. Пены с жидкой фракцией более 0,15 называются мокрыми пенами. При уменьшении значения доли жидкости по мере удаления от границы раздела фаз, пузырьки все сильнее деформируются, образуя между собой изогнутые пленки. Пены с долей жидкости 0,05 и менее называются сухими, их пузырьки имеют форму, близкую к полиэдрической. Установка этих значений достаточно условна (первоначально они были выбраны Вейром и Хатцлером [2]). Однако это позволяет отличить сухие пены, ячеистая структура которых еще хорошо описывается правилами Плато, от влажных пен, напоминающих скопления пузырьков, форма которых близка к сферической.

Если рассматривать такой столб пены в равновесном состоянии, плавающий на поверхности нижележащей жидкости, то высота слоя влажной пены может быть оценена как I_c^2 / D для пузырьков диаметром D . Здесь I_c – длина капилляра, определяемая по формуле

$$I_c^2 = \gamma / (\Delta \rho g), \quad (3)$$

где $\Delta \rho$ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения. Таким образом, влажная пена содержит примерно

$$P_{ri} = \left(\frac{I_c}{D} \right)^2 \quad (4)$$

слоев пузырьков, где P_{ri} – безразмерное число Принсена [3]. В типичном пенообразующем растворе с $I_c \approx 1,6$ мм средний диаметр пузырьков не должен превышать 500 мкм, если требуется получить влажную пену, состоящую более чем из десяти слоев пузырьков.

На рис. 1 показан вид полидисперсной неупорядоченной пены, характерный для пен, встречающихся в природе и промышленности. Пены, которые в настоящее время используются в исследовательских лабораториях, являются монодисперсными, т.е. содержат одинаковые по объему пузырьки с полидисперсностью менее 5 % по радиусу. На рис. 2 показан пример такой пены, плавающей на пенообразующем растворе. Подобные пены имеют тенденцию к упорядочению [4–7], особенно в присутствии границы шаблонирования или при заключении в узкие трубки. В достаточно влажных монодисперсных пенах упорядочение может происходить и спонтанно в объеме.

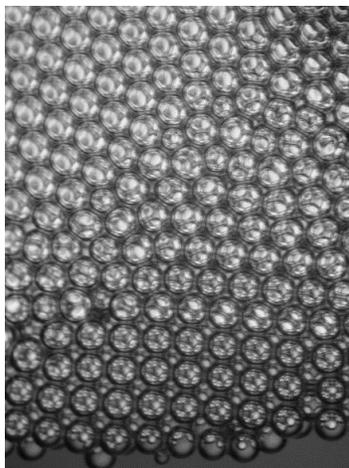


Рис. 2. Пример монодисперсной пены

Поверхностная энергия пены зависит от размера пузырьков, структуры пены и доли жидкости. Зависимость от размера пузырьков можно устранить, введя масштабируемую энергию \hat{E} в виде

$$\hat{E} = \frac{\langle S \rangle}{\langle V \rangle^{2/3}} = \frac{1}{(36\pi)^{1/3}} \frac{\langle S \rangle}{\langle S_0 \rangle} \quad (5)$$

где $\langle V \rangle$ и $\langle S \rangle$ – средний объем и площадь поверхности пузырьков в пене соответственно; $\langle S_0 \rangle$ – площадь поверхности недеформированных (сферических) пузырьков. Таким образом, \hat{E} является мерой того, насколько сильно пузырек деформирован по сравнению с его идеальной сферической формой. Для конечных значений более удобно ввести относительное превышение поверхности $\varepsilon(\varphi)$:

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\langle S(\varphi) \rangle - \langle S_0 \rangle}{\langle S_0 \rangle} \quad (6)$$

Поскольку тепловая энергия пренебрежимо мала, макроскопические пузырьки, как правило, оказываются запертыми в локальных минимумах очень сложного энергетического ландшафта пены. Топологические изменения, которые могут привести к уменьшению глобальной энергии за счет перестановки соседних пузырьков, энергетически настолько затратны, что не происходят спонтанно. Однако пены можно отжигать путем механического сдвига [8, 9], огрубления [10–12] или введения пенообразующего раствора (т.е. принудительного дренажа), чтобы привести общую структуру пены к меньшей энергии. Таким образом, существует сильная зависимость между способом получения пены и получаемой упаковкой пузырьков.

Тем не менее структура пены может успешно прогнозироваться для простейших случаев монодисперсных периодических пен [3, 4] или небольших кластеров пузырьков [13, 14]. Однако даже если глобальная упаковка неоптимальна, микроскопическая структура пены, по крайней мере для сухих пен, хорошо определена.

На рис. 3 показаны наиболее часто встречающиеся типы пен, а также роль жидкой фракции φ и полидисперсности пузырьков в структуре пены. Полидисперсность можно

определить с помощью нормированного стандартного отклонения эквивалентных радиусов пузырьков $R_i = (3 / (4\pi)V_i)^{1/3}$, т.е. радиусов, соответствующих сферам одинакового объема V_i :

$$p_\sigma = \frac{\sigma}{\langle R \rangle} = \left[\frac{\langle R^3 \rangle}{\langle R \rangle^3} - 1 \right], \tag{7}$$

где $\sigma = (\langle R^2 \rangle - \langle R \rangle^2)^{1/2}$.

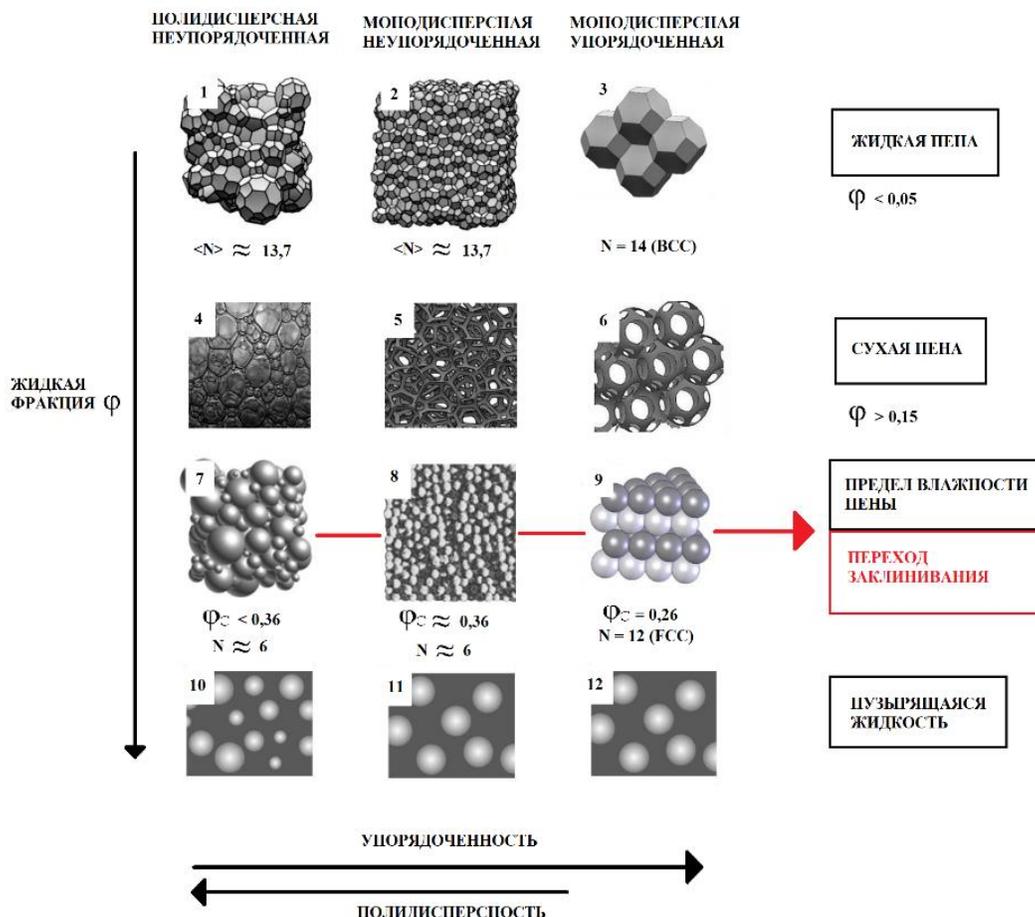


Рис. 3. Представление различных структур пены в зависимости от ключевых параметров жидкой фракции ϕ , полидисперсности и упорядоченности

Обычно полидисперсность не превышает 50 % [15], а характерные распределения близки к гауссовым или логнормальным. Пены с полидисперсностью менее 5 % принято называть монодисперсными. В некоторых случаях вместо среднего радиуса $\langle R \rangle$ целесообразнее использовать средний радиус Заутера R_{32} :

$$R_{32} = \frac{\langle R^3 \rangle}{\langle R^2 \rangle}. \tag{8}$$

Тогда параметр полидисперсности p_{32} [16] определяется как

$$p_{32} = \frac{R_{32}}{(R^3)^{1/3}} - 1 = \frac{\langle v \rangle^{2/3}}{\langle v^2 \rangle^{1/3}} - 1. \quad (9)$$

Оба параметра полидисперсности связаны между собой соотношением

$$(p_{32} + 1)(p_{\sigma}^2 + 1) = \left(\frac{\langle v \rangle^{2/3}}{\langle v^2 \rangle^{1/3}} \right)^2. \quad (10)$$

Уравнение состояния пены

Обычно в механике пены исходят из того, что газ в пузырьках несжимаем и, следовательно, объемы отдельных пузырьков в пене постоянны во времени, за исключением перераспределения газа путем диффузии между пузырьками или разрыва поверхностей пузырьков. Иначе говоря, обычно предполагается, что в пене объемная работа, необходимая для изменения размеров отдельных пузырьков, очень велика по сравнению с энергией поверхностного натяжения, необходимой для растяжения граничных жидкостных границ между пузырьками. Однако если впустить внутрь пузырьков сжимаемый газ, в простейшем случае полагая, что этот газ подчиняется уравнению состояния идеального газа, и рассмотреть весь диапазон параметров, чтобы работа поверхностного натяжения, совершаемая при растяжении отдельных поверхностей пузырьков в пене, стала сравнимой с работой, необходимой для сжатия или расширения пузырька, то возникает целый ряд новых явлений. Основное из них – переход при увеличении поверхностного натяжения от состояния пены, в котором все пузырьки имеют сопоставимый объем, к состоянию, в котором скопления мелких пузырьков находятся на «фоне» гораздо более крупных пузырьков. Данный переход к дифференциации пузырьков был зафиксирован в численных экспериментах, проведенных Гердтлем [17] на двумерной сухой пене.

Характер перехода показан на рис. 4. Получена пена, находящаяся в механическом равновесии. Предполагается, что газ в каждом пузырьке удовлетворяет уравнению состояния идеального газа, а вся пена находится при постоянной температуре. На разных панелях рис. 4 продемонстрирован эффект постепенного увеличения поверхностного натяжения при постоянном количестве газа в каждом пузырьке, т.е. диффузия газа между пузырьками не допускается. На каждой панели изображена пена, находящаяся в равновесии при определенном значении поверхностного натяжения. Таким образом, набор панелей представляет собой параметрическую вариацию, а не последовательность эволюции во времени. Изменение поверхностного натяжения при постоянном объеме (площади в 2D) удобно с точки зрения вычислений. В лабораторных условиях аналогичного перехода можно добиться, изменяя объем пены при постоянном поверхностном натяжении.

По-видимому, при некотором вполне определенном значении поверхностного натяжения общая структура пены меняется. Наблюдаются две фазы пены. В одной фазе видно большое количество мелких пузырьков, сгруппированных вместе. В другой фазе имеется небольшое количество гораздо более крупных пузырьков, занимающих большую часть пространства в емкости. Моделирование на рис. 4 относится к идеализированному случаю сухой пены, но аналогичный переход ожидается и в случае реальной пены с некоторым содержанием жидкости в пленках и вдоль границ плато. Можно предположить, что это явление служит моделью нежелательного образования крупных пустот в

застывающих пенах. Такая модель основана исключительно на равновесии механических сил и не затрагивает никаких аспектов химии материалов, входящих в состав пены.

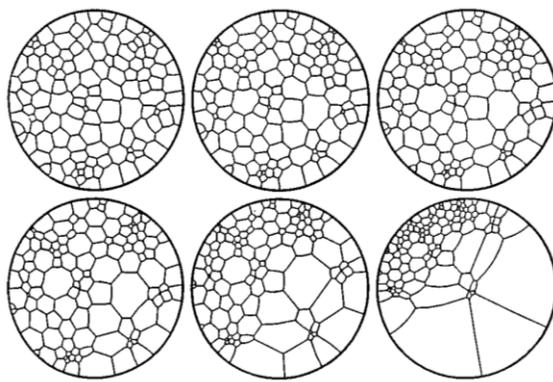


Рис. 4. Численное моделирование перехода, наблюдаемого в двумерной сухой пене с идеальным газом в пузырьках при постепенном увеличении поверхностного натяжения [17]

Наблюдаемая феноменология наводит на мысль об аналогии с фазовым переходом. Таким образом, первым шагом к количественному пониманию является уравнение состояния пены. Эта проблема была рассмотрена Россом [18], который утверждал, что если идеальный газ разделить на пузырьки в трехмерной пене, то уравнение состояния пены будет иметь вид

$$p_{\text{ext}}V + \frac{2}{3}\gamma A = NT, \quad (11)$$

где p_{ext} – однородное давление окружающего пену воздуха; V – общий объем пены; N – общее число молекул газа в пенопласте; T – температура, предполагаемая однородной во всем объеме. В уравнении (11) и последующих уравнениях будет использоваться условие [19], согласно которому температура измеряется в единицах энергии, что соответствует принятию постоянной Больцмана, равной единице. Важным дополнением к закону идеального газа является второй член левой части уравнения (11), который содержит произведение поверхностного натяжения γ (также исходя из предположения, что оно однородно по всей пене) и общей площади границ раздела между пузырьками в пене A . Как обычно, площадь межфазных границ как внутри пены, так и между внешними пузырьками и окружающим воздухом учитывается дважды, по одному разу для каждой стороны, обращенной к одному из двух смежных газовых объемов. Причина использования в уравнении (11) величины p_{ext} , а не некоторого давления внутри пены, как в законе идеального газа, заключается в том, что давление в пене изменяется от пузырька к пузырьку. Росс [18] относит происхождение уравнения (11) к работе Тейта, выполненной в 1860-х годах. Крайник и Рейнелт [20] получили соответствующий результат для простой геометрии монодисперсной пены, не предполагая идеального газа.

Справедливость вывода уравнения (11), приведенного Россом [18], вызывала сомнения у исследователей [21]. Гердтль в своей диссертации [17] проверил двумерную версию уравнения

$$p_{\text{ext}}V + \frac{1}{2}\gamma A = NT, \quad (12)$$

непосредственно с помощью численного эксперимента. В уравнении (12) V – общая площадь пены, а A – общая длина пленки в пене (или удвоенная общая длина геометрических границ раздела). Гердтль установил, что уравнение (12) справедливо с высокой точностью [17], а также проверил использованное Россом [18] ключевое масштабное допущение и обнаружил, что оно не выполняется [17].

Производные уравнения состояния

Рассмотрим пену общего объема V . Внутри пены имеется M отдельных пузырьков с объемами V_α , $\alpha = 1, \dots, M$. Каждый пузырек содержит идеальный газ с уравнением состояния $p_\alpha V_\alpha = N_\alpha T$, где p_α – давление; N_α – число молекул газа в пузырьке. Вся пена находится при постоянной температуре T .

Теперь представим себе вторую пену, которая возникает из первой путем геометрического расширения в λ раз. Длины, площади и объемы при расширении имеют очевидные геометрические масштабы. Предполагается, что расширенная пена имеет ту же температуру T , что и исходная, а число молекул газа в каждом пузырьке N_α одинаково в обеих пенах. Другие физические величины, такие как давление и поверхностное натяжение, должны быть определенным образом масштабированы для достижения желаемого геометрического подобия и соблюдения указанных выше ограничений на T и N_α . Теперь следует обсудить эти масштабы, рассматривая случаи $D = 2$ и $D = 3$ совместно.

Поскольку объемы (для $D = 3$) и площади (для $D = 2$) отдельных пузырьков умножаются на λ^D , а температура и число молекул в пузырьке остаются неизменными, то по закону идеального газа давление в отдельных пузырьках должно быть умножено на λ^{-D} . На каждой границе раздела между соседними пузырьками, согласно закону Юнга – Лапласа, разность давлений определяется произведением поверхностного натяжения и средней кривизны:

$$p_\alpha - p_\beta = 2\gamma \left(\frac{1}{R_{\alpha\beta}^{(1)}} + \frac{1}{R_{\alpha\beta}^{(2)}} \right). \quad (13)$$

Уравнение (13), составленное для $D = 3$, включает два главных радиуса кривизны конкретной поверхностной пленки пузырька, $R_{\alpha\beta}^{(1)}$ и $R_{\alpha\beta}^{(2)}$, и поверхностное натяжение γ на границе раздела «воздух – жидкость». Для каждой пленки пены существует две такие границы, поэтому указан коэффициент 2. Для $D = 2$ существует только один конечный радиус кривизны. Формально этот случай входит в уравнение (13), если принять радиус $R_{\alpha\beta}^{(2)}$ за бесконечный. Радиусы $R_{\alpha\beta}^{(1)}$ и $R_{\alpha\beta}^{(2)}$ подвержены простому геометрическому масштабированию, т.е. умножаются на λ . Таким образом, поскольку величина давления умножается на λ^{-D} , то для получения геометрически подобной пены следует изменить масштаб поверхностного натяжения на λ^{-D+1} .

На внешней границе пены все пузырьки находятся под действием однородного внешнего давления p_{ext} . Для того чтобы внешняя граница оставалась геометрически однородной, это внешнее давление должно быть также масштабировано как $\lambda^{-D} p_{\text{ext}}$.

В первом выводе уравнения состояния мы используется результат, полученный Ландау и Лифшицем [19], согласно которому свободная энергия Гиббса пены (Φ_{foam}) равна сумме свободной энергии Гиббса идеального газа в пузырьках (Φ_{gas}) и поверхностной энергии (γA) пленок между пузырьками:

$$\Phi_{\text{foam}} = \Phi_{\text{gas}} + \gamma A. \quad (14)$$

Из статистической термодинамики идеального газа [19] получаем:

$$\Phi_{\text{gas}} = T \sum_{\alpha=1}^M N_{\alpha} \log p_{\alpha}, \quad (15)$$

за исключением слагаемых, которые зависят только от T и общего числа N молекул газа во всех пузырьках. Следует обратить внимание на то, что, поскольку каждая пленка в пузырьке имеет две стороны, общая геометрическая площадь поверхности A (в 3D; длина пленки в 2D) умножается на 2. Для сухой пены, где отдельные пленки имеют нулевую толщину и нет жидкости на границах Плато с пленками и краями, значение A будет умножено на λ^{D-1} при расширении.

Когда пена находится в равновесии с окружающим давлением p_{ext} , можно считать, что Φ_{foam} является функцией температуры T , давления окружающей среды p_{ext} и поверхностного натяжения γ . Из первого закона термодинамики следует, что для изотермического изменения

$$d\Phi_{\text{foam}} = V dp_{\text{ext}} + A d\gamma. \quad (16)$$

Из уравнения (16) имеем:

$$\left(\frac{d\Phi_{\text{foam}}}{dp_{\text{ext}}} \right)_{T, \gamma} = V; \quad (17)$$

$$\left(\frac{d\Phi_{\text{foam}}}{d\gamma} \right)_{T, p_{\text{ext}}} = A. \quad (18)$$

При дилатации пены видно, что $\lambda^{-D+1} \gamma \lambda^{D-1} A = \sigma A$ является инвариантом. Умножение всех давлений пузырьков p_{α} в уравнении (15) на λ^{-D} дает разность вида « $\Phi_{\text{gas}} - NT D \log \lambda$ ». Отсюда следует, что величина Φ_{foam} должна удовлетворять соотношению однородности

$$\Phi_{\text{foam}}(T, \lambda^{-D} p_{\text{ext}}, \lambda^{-D+1} \gamma) = \Phi_{\text{foam}}(T, p_{\text{ext}}, \gamma) - DNT \log \lambda. \quad (19)$$

Продифференцируем уравнение (18) относительно λ и зададим $\lambda = 1$. Получим:

$$-D p_{\text{ext}} \left(\frac{d\Phi_{\text{foam}}}{dp_{\text{ext}}} \right)_{T, \gamma} - (D-1) \gamma \left(\frac{d\Phi_{\text{foam}}}{d\gamma} \right)_{T, p_{\text{ext}}} = -DNT, \quad (20)$$

или, подставив правые части уравнений (16) и (17) в уравнение (20) и поделив его на D , получим:

$$p_{\text{ext}} V + \frac{D-1}{D} \gamma A = NT. \quad (21)$$

Заключение

В исследовании представлены основные теоретические особенности формирования пен. Приведено общее уравнение состояния пены. Установлено, что форма пузырьков зависит от величины локальной доли жидкости ϕ в пене, т.е. отношения объема жидкости к рассматриваемому объему пены. Это позволяет отличить сухие пены, ячеистая структура которых хорошо описывается правилами Плато, от влажных пен, напоминающих скопления пузырьков почти сферической формы. Определено, что в случае нахождения пены в равновесии с окружающим давлением можно считать свободную энергию функцией температуры, давления окружающей среды и поверхностного натяжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drenckhan W., Hutzler S. Structure and energy of liquid foams // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015. № 224, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.cis.2015.05.004
2. Weaire D., Hutzler S. *The Physics of Foams*. Oxford: Clarendon Press, 1999. 246 p. URL: <https://searchworks.stanford.edu/view/4338509> (дата обращения: 15.04.2024).
3. Aste T., Di Matteo T., Tordesillas A. *Granular and Complex Materials*. 2007. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 268 p. DOI: 10.1142/6616
4. Drenckhan W., Langevin D. Monodisperse foams in one to three dimensions // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2010. № 15 (5), pp. 341–358. DOI: 10.1016/j.cocis.2010.06.002
5. Meagher A.J., Mukherjee M., Weaire D., Hutzler S., Banhart J., Garcia-Moreno F. Analysis of the internal structure of monodisperse liquid foams by X-ray tomography // *Soft Matter*. 2011. № 7(21), pp. 9881–9885. DOI:10.1039/C1SM05495C
6. Van der Net A., Drenckhan W., Weaire D., Hutzler S. The crystal structure of bubbles in the wet foam limit // *Soft Matter*. 2006. № 2 (2), pp. 129–134. DOI: 10.1039/b515537a
7. Höhler R., Sang Y.Y.C., Lorenceau E., Cohen-Addad S. Osmotic pressure and structures of monodisperse ordered foam // *Langmuir*. 2007. № 24(2), pp. 418–425. DOI: 10.1021/la702309h
8. Quilliet, C., Talebi S.A., Rabaud D., Kafer J., Cox S.J., and Graner F. Topological and geometrical disorders correlate robustly in two-dimensional foams // *Philosophical Magazine Letters*. 2008. № 88 (9-10), pp. 651–660. DOI: 10.1080/09500830802334249
9. Durand M., Kraynik A.M., Swol F., Kafer J., Quilliet C., Cox S., Talebi S.A., Graner F. Statistical mechanics of two-dimensional shuffled foams: Geometry-topology correlation in small or large disorder limits // *Physical Review E*. 2014. № 89 (6-1), pp. 062309. DOI:10.1103/PHYSREVE.89.062309
10. Lambert J., Mokso R., Cantat I., Cloetens P., Glazier J.A., Graner F., Delannay R. coarsening foams robustly reach a self-similar growth regime // *Physical Review Letters*. 2010. 104 (24), pp. 248304. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.248304
11. Fortuna I., Thomas G.L., Almeida R.M.C., Graner F. Growth laws and self-similar growth regimes of coarsening two-dimensional foams: transition from dry to wet limits // *Physical Review Letters*. 2012. № 108 (24), pp. 248301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.248301
12. Almeida R.M.C., Thomas G.L., Graner F. Universal, statistically scale-invariant regime in 3D cellular systems // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2006. № 371 (1), pp. 67–70. DOI: 10.1103/PhysRevE.74.021407
13. Meagher A.J., McAteer D., Hutzler S., and Weaire D. Building the pyramids: perfect bubble crystals // *Philosophical Magazine*. 2013. № 93 (31-33), pp. 4138–4150. DOI:10.1080/14786435.2013.820383

14. Cox S.J., Graner F. Three-dimensional bubble clusters: Shape, packing, and growth rate // *Physical Review E*. 2004. № 69 (3), pp. 031409. DOI:10.1103/PhysRevE.69.031409
15. Drenckhan W., Saint-Jalmes A. The science of foaming // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015. Vol. 222, pp. 228–259. DOI:10.1016/j.cis.2015.04.001
16. Kraynik A.M., Reinelt D.A., Swol F. Structure of random foam // *Physical Review Letters*. 2004. 93 (20), pp. 208301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.208301
17. Herdtle T., Aref H. On the geometry of composite bubbles // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*. 1991. Vol. 434, pp. 441–447. URL: <https://www.jstor.org/stable/51841> (дата обращения: 23.05.2024).
18. Ross S. Bubbles and foams – new general law // *Industrial & Engineering Chemistry*. 1969. № 61 (10), pp. 48. DOI:10.1021/ie50718a006
19. Landau L.D., Lifschitz E.M. Statistical Physics. URL: https://www.academia.edu/8209051/Landau_L_D_and_Lifschitz_E_M_Vol_5_Statistical_Physics_part_1 (дата обращения: 23.05.2024).
20. Kraynik A.M., Reinelt D.A. Linear elastic behavior of dry soap foams // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1996. №181, pp. 511–523. DOI: 10.1006/jcis.1996.0408
21. Aref H., Vainchtein D.L. The equation of state of a foam // *Physics of Fluids*. 2000. № 12 (1), pp. 23–28. DOI:10.1063/1.870281

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТУМАНОВ Григорий Алексеевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: grishatumanoff@yandex.ru

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

МАЛЬКОВ Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kja227@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Туманов Г.А., Долуда В.Ю., Мальков А.А. Теоретические особенности формирования пен // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 84–96.

THEORETICAL FEATURES OF FOAM FORMATION

G.A. Tumanov, V.Yu. Doluda, A.A. Malkov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents the theoretical aspects of the structure, formation and degradation of foams, as well as the main characteristics of foams that affect their stability. Foams of various compositions and structures attract the attention of scientists and researchers from various fields due to the large surface area and the dynamic nature of its change. Foam plays an important role in a wide variety of industries, from the

production of everyday products such as shaving cream and washing powder to complex technological processes. Many properties of foams are a direct consequence of their geometric structure.

Keywords: dry foam, liquid foam, dispersibility, surface tension, equation of state.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

TUMANOV Grigory Alekseevich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: grishatumanoff@yandex.ru

DOLUDA Valentin Yuryevich – Doctor of Science (Chemistry), Associate Professor, Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

MALKOV Alexander Anatolievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Software Department, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kja227@list.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Tumanov G.A., Doluda V.Yu., Malkov A.A. Theoretical features of foam formation // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 84–96.

УДК 004.42, 502.504

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТЕОДАНЫХ С ИНТЕРНЕТ-САЙТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Е.Б. Сергеев, Э.С. Цховребов

*Всероссийский научно-исследовательский институт
по проблемам гражданской обороны
и чрезвычайных ситуаций МЧС России (г. Москва)*

© Сергеев Е.Б., Цховребов Э.С., 2024

Аннотация. В статье описана технология по извлечению из интернет-сайта метеоданных для большого числа населенных пунктов. Метод основан на анализе строк файлов, представляющих отдельные страницы сайта. Технология использует как стандартную методику парсинга, так и принципиально иной подход для извлечения данных, рассмотрению которого и посвящена данная статья. Планируемым результатом внедрения этой технологии, находящейся в стадии апробации, будет повышение уровня полноты и обоснованности экологической информации о состоянии окружающей среды в населенных пунктах и, как следствие, расширение возможности заблаговременного прогнозирования экологически неблагоприятных, природных и техногенных чрезвычайных ситуаций, планирование комплекса мер по защите населения, природной среды и объектов экономики от угроз возникновения чрезвычайных ситуаций и их негативных последствий.

Ключевые слова: прогнозирование, экологическая безопасность, информационная технология, метеорологические данные, населенные пункты.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-96-110

ВВЕДЕНИЕ

Для прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций природного характера (на уровне субъекта Российской Федерации и выше) необходимо обладать большим объемом подробных метеорологических данных для отдельных населенных пунктов (или метеостанций). Это необходимо для мониторинга и прогнозирования природных пожаров, наводнений, вызванных дождевыми паводками, и опасных метеорологических явлений. В интернете предлагается множество готовых программ [1], дающих метеорологическую информацию в отношении ограниченного перечня населенных пунктов. Получить данные для всей территории России или ее крупных образований (федеральных округов, субъектов) при помощи этих программ невозможно. Сайт <https://gp5.ru> позволяет получить метеоданные для всей Российской Федерации, включая новые территории. Проблема состоит в извлечении большого массива информации и записи его непосредственно в базу данных или в файл (например, в Excel-файл) для последующей обработки и анализа.

В рамках решения этой проблемы разработана технология извлечения комплекса необходимых для оперативного прогнозирования чрезвычайных ситуаций (ЧС) метеоданных с сайта <https://gp5.ru> для охвата большого числа населенных пунктов Российской Федерации. Указанная технология реализована в созданной автором для этой цели программе WebMeteo [2]. Настоящая работа в структурированном виде иллюстрирует результаты проведенных научных исследований авторов в части разработки нового методического подхода в информационных технологиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами для проведения настоящего исследования послужили результаты в области информационных технологий поиска электронной информации, полученные отечественными [3, 5–9] и зарубежными авторами [4, 10–12, 17].

В статье использована как стандартная методика парсинга [13–16, 18, 19], так и принципиально новый подход для извлечения данных с сайта. Он заключается в последовательном (по блокам) извлечении каждого типа метеоданных. Предложенный подход апробируется в комплексных системах обеспечения экологической безопасности населенных пунктов [20, 21].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследования описана конфигурация искомого сайта, являющегося источником получения метеоданных для прогнозирования ЧС природного и техногенного характера, а также их последствий.

Сайт <https://gp5.ru> представляет собой иерархическую структуру. Загрузочная страница показана на рис. 1. Далее выбирается страна и переход на новую страницу. От нее следует переход на страницы отдельных регионов России. Затем осуществляется переход на страницы отдельных районов (городских округов), только затем переход на

страницы отдельных населенных пунктов, где расположены необходимые для прогнозирования подробные метеорологические данные.

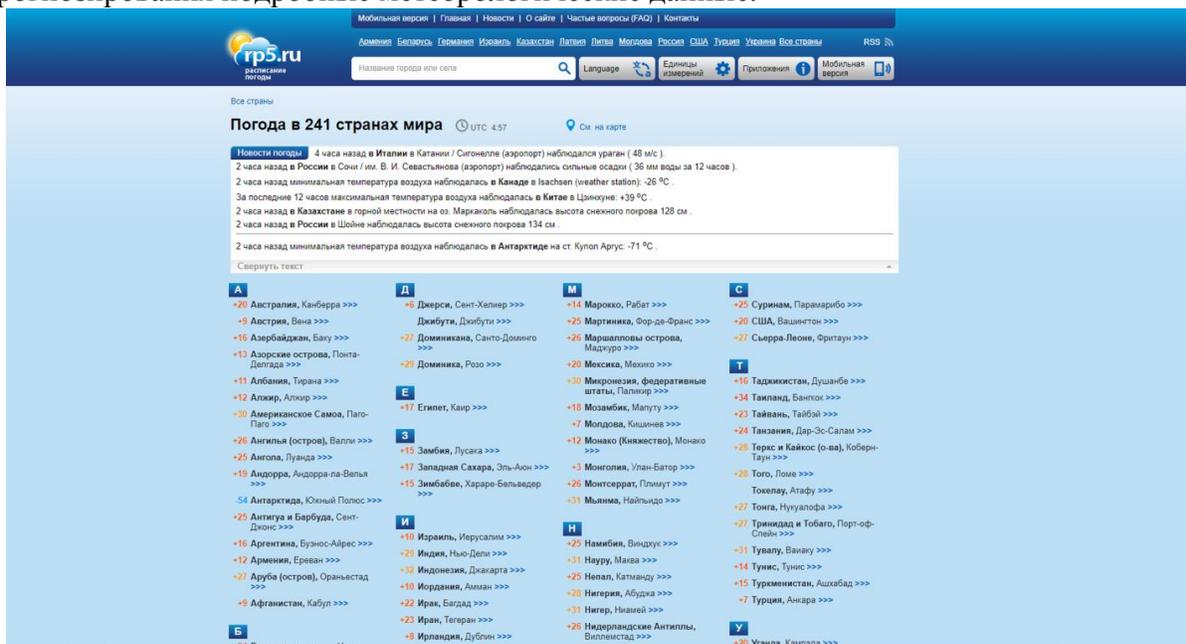


Рис. 1. Вид загрузочной страницы сайта <https://rp5.ru>

Таким образом, сайт <https://rp5.ru> представляет собой каталог, в котором содержатся страницы для стран, субъектов (провинций), районов и отдельных населенных пунктов. Общая формула обращения к этим страницам: <https://rp5.ru/+ссылка>. Во избежание значительных затрат времени в процессе оперативной работы органов МЧС России (и других заинтересованных ведомств) предлагается новый подход. Он состоит в следующем. Если известна ссылка на страницу какого-либо населенного пункта, то можно напрямую обратиться к данной странице (рассматриваемый сайт позволяет это делать) и в короткие сроки получить весь объем полноценной информации.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Первоначально программа **WebMeteo** обращалась к странице https://rp5.ru/Погода_в_России как к некоторому текстовому файлу и извлекала из нее данные о текущей температуре в главных городах субъектов и ссылки на страницы субъектов. Затем на основе этих ссылок обращались к файлам субъектов, где получали данные о текущей температуре районов и ссылки на страницы районов. Файлы страниц районов позволяли определять список отдельных населенных пунктов, текущую температуру и ссылки на страницы погоды в них. Наконец, на основе последних ссылок обращались именно к тем страницам, которые представляли для нас особый интерес.

На основе полученной информации в базе данных был сформирован справочник населенных пунктов Российской Федерации, каждая запись которого включала название населенного пункта, его код на сайте, географические координаты населенного пункта, код субъекта России, название района (городского округа) и ссылку на конкретный населенный пункт на сайте. В настоящее время на базе предлагаемого метода в рамках работы с новым справочником составляют список ссылок, после чего последовательно

просматривают файлы из каталога сайта, минуя ненужные и затратные по времени этапы просмотра файлов информации по стране в целом, субъектам и районам (рис. 2).

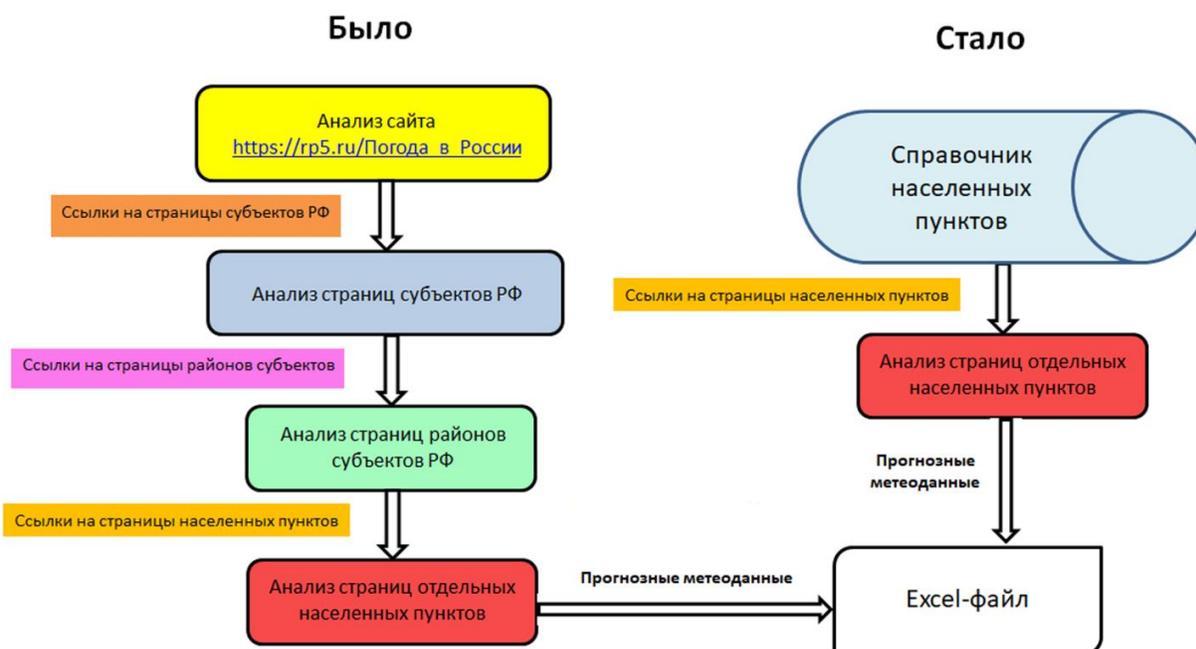


Рис. 2. Схемы извлечения метеоданных с сайта

В рамках предлагаемого автором нового подхода к получению требуемой для пользователя информации в короткие сроки была разработана инновационная технология извлечения специфического набора необходимых для оперативной работы данных с определенного сайта.

В программе **WebMeteo** использовалась единая технология загрузки файла из каталога сайта (код в Visual Basic):

```
Rep=getHTML(Url)
Private Function getHTML(ByVal Address As System.Uri) As String
'Загрузка файла сайта
Dim rt As String=""
Dim SR As StreamReader
Dim myHttpRequest As HttpRequest
Dim myHttpWebResponse As HttpWebResponse
myHttpRequest=HttpRequest.Create(requestUri:=Address)
myHttpRequest.Headers.Add("Accept-Language","ru")
myHttpWebResponse=myHttpRequest.GetResponse
SR=New StreamReader(myHttpWebResponse.GetResponseStream,True)
rt=SR.ReadToEnd
SR.Close()
getHTML=rt
End Function
```

Здесь Url – полный адрес страницы сайта (<https://rp5.ru/>+ссылка).

После загрузки файла страницы как текстового файла производились расщепление файла на отдельные строки и их анализ:

```

nLength=Rep.Length
If nLength>0 Then
'В качестве расщепления строк используется "<div>", а не Chr(10)
Dim masStr()=Rep.Split("<div>")
'Общее число строк
maxL=masStr.Length
For L=0 To (maxL - 1)
strF=masStr(L).Trim
'Вызов функции для анализа строки
    Ok = AnalisStr(strF,0)
.....
    Next L
.....
End If

```

Поиск данных о текущих температурах и ссылках из файлов, касающихся России в целом, субъектов и районов, осуществлялся с помощью методики парсинга [11, 12]. Не останавливаясь подробно на этой методике, сообщим необходимую информацию для осуществления поиска для каждого вида страницы. В табл. 1 и 2 приведены строковые переменные для поиска данных на страницах сайта, относящихся соответственно ко всей России и к ее субъектам. Для страниц, касающихся районов, значения строковых переменных аналогичны значениям таких переменных для субъектов. В табл. 3 приведены строковые переменные для поиска данных на страницах сайта о погоде в населенных пунктах.

Таблица 1

Строковые переменные для поиска на странице всей России

Переменная	Значение	Комментарий
aStr(0, 0)	"span class=" &Chr(34) &"Ajax-PointID" &Chr(34)	Начало цикла поиска температуры
aStr(1, 0)	"span class=" &Chr(34) &"t_0" &Chr(34)	Указание на использование шкалы Цельсия
aStr(2, 0)	"span class=" &Chr(34) &"red" &Chr(34)	Определение положительного значения температуры по Цельсию
aStr(3, 0)	"span class=" &Chr(34) &"blue" &Chr(34)	Определение отрицательного значения температуры по Цельсию
aStr(4, 0)	"style=" &Chr(34) &"color:#000" &Chr(34) &"href="	Определение ссылки на субъект
aStr(5, 0)	"title="	Определение названия субъекта
aStr(6, 0)	"class=" &Chr(34) &"windclose" &Chr(34)	Завершение процедуры поиска (выход)

Таблица 2

Строковые переменные для поиска на странице субъекта

Переменная	Значение	Комментарий
aStr(1, 1)	"span class="&Chr(34)&"Ajax-PointID"&Chr(34)	Начало цикла поиска температуры
aStr(2, 1)	"span class="&Chr(34)&"t_0"&Chr(34)	Указание на использование шкалы Цельсия
aStr(3, 1)	"span class="&Chr(34)&"red"&Chr(34)	Определение положительного значения температуры по Цельсию
aStr(4, 1)	"span class="& Chr(34)&"blue"&Chr(34)	Определение отрицательного значения температуры по Цельсию
aStr(5, 1)	"class="& Chr(34)&"href12"&Chr(34)&" href="	Определение ссылки на район
aStr(6, 1)	"title="	Определение названия района
aStr(7, 1)	"class="& Chr(34)&"windclose"&Chr(34)	Завершение процедуры поиска (выход)

Таблица 3

Строковые переменные для поиска на странице погоды в населенном пункте

Переменная	Значение	Комментарий
aStr(1, 3)	"onclick="& Chr(34)&"show_map"	Определение координат населенного пункта
aStr(2, 3)	"Время в данном населенном пункте. Учитывается летнее/ зимнее время"	Начало блока определения списка времен замера
aStr(3, 3)	"class="& Chr(34)&"d underlineRow"&Chr(34)	Определение дневного часа
aStr(4, 3)	"class="&Chr(34)&"d2 underlineRow"&Chr(34)	Определение дневного часа
aStr(5, 3)	"class="& Chr(34)&"n underlineRow"&Chr(34)	Определение ночного часа
aStr(6, 3)	"class="&Chr(34)&"n2 underlineRow"&Chr(34)	Определение ночного часа
aStr(7, 3)	"class="&Chr(34)&"t_cloud_cover"&Chr(34)	Начало блока определения облачности
aStr(8, 3)	"Осадки, мм"	Начало блока определения осадков
aStr(9, 3)	"Туман, %"	Начало блока определения тумана

Продолжение табл. 3

Переменная	Значение	Комментарий
aStr(10, 3)	"title="&Chr(34)&"Температура воздуха на высоте 1,5 метра (градусы Цельсия)"&Chr(34)&">Температура"	Начало блока определения температуры воздуха
aStr(11, 3)	"underlineRow toplineRow red"	Определение значения положительной температуры
aStr(12, 3)	"underlineRow toplineRow blue"	Определение значения отрицательной температуры
aStr(13, 3)	"div class="&Chr(34)&"t_0"&Chr(34)	Указание на использование шкалы Цельсия
aStr(14, 3)	""	Определение значения температуры в градусах Цельсия
aStr(15, 3)	"a class="&Chr(34)&"f_temperature"&Chr(34)	Начало блока определения температуры по ощущениям
aStr(16, 3)	"title="&Chr(34)&"Атмосферное давление у поверхности земли (миллиметры ртутного столба)"&Chr(34)	Начало блока определения давления воздуха
aStr(17, 3)	"div class="&Chr(34)&"p_0"&Chr(34)	Указание на использование шкалы давления в миллиметрах ртутного столба
aStr(18, 3)	"title="&Chr(34)&"Ветер на высоте 10 метров (метры в секунду)"&Chr(34)&">Ветер: скорость"	Начало блока определения скорости ветра
aStr(19, 3)	"div class="&Chr(34)&"wv_0 "&Chr(34)	Указание на использование шкалы скорости в метрах в секунду
aStr(20, 3)	"style="&Chr(34)&"padding-left: 5px;"&Chr(34)&">порывы,"	Начало блока определения порывов ветра
aStr(21, 3)	"Направление"	Начало блока определения направления ветра
aStr(22, 3)	"Ветер, дующий с "	Определение направления ветра
aStr(23, 3)	"Влажность"	Начало блока определения влажности
aStr(24, 3)	"class="&Chr(34)&"d underlineRow"&Chr(34)	Определение времени замера влажности (днем)

Окончание табл. 3

Переменная	Значение	Комментарий
aStr(25, 3)	"class="&Chr(34)&"d2 underlineRow"&Chr(34)	Определение времени замера влажности (днем)
aStr(26, 3)	"class="&Chr(34)&"n underlineRow"&Chr(34)	Определение времени замера влажности (ночью)
aStr(27, 3)	"class="&Chr(34)&"n2 underlineRow"&Chr(34)	Определение времени замера влажности (ночью)
aStr(28, 3)	"Солнце"	Завершение процедуры поиска (выход)

Перейдем к технологии поиска метеоданных для страниц поиска погоды в населенных пунктах. Как отмечено выше, расположение информации для этого типа страниц отличается от размещения информации на страницах других типов указанного сайта. Расположение данных в файле страницы блоковое для каждого вида данных, т.е. в каждом блоке находятся данные конкретного типа за весь период наблюдений. Таким образом, предлагаемая технология извлечения данных учитывает означенную выше специфику в целях осуществления поставленной задачи.

На первом этапе осуществляется поиск строки с содержанием aStr(1, 3) (см. табл. 3). В ней находятся географические координаты населенного пункта, которые вносятся в соответствующую переменную. Затем со строки, содержащей aStr(2, 3), начинается блоковое извлечение метеоданных. Обработывается в общей сложности одиннадцать блоков:

- 1) времен наблюдений;
- 2) облачности;
- 3) осадков;
- 4) тумана;
- 5) температуры воздуха;
- 6) ощущаемой температуры воздуха (с учетом влажности и ветра);
- 7) давления;
- 8) скорости ветра;
- 9) порывов ветра;
- 10) направления ветра;
- 11) влажности воздуха.

Факт обработки конкретного блока определяется соответствующей булевой переменной okData(i), где i изменяется от 0 до 10. Начало каждого из следующих блоков свидетельствует о завершении предыдущего блока. Вместо вызова функции для анализа строки выполняется блок обработки данных. Общий вид программного кода для каждого блока представлен ниже:

```
'Обработка блока времени наблюдения
If okData(0) Then
ok=DefTime(strF, 3)
If okData(0) Then
'переход на новую строку файла
GoTo Line20
```

```
Else  
'переход к обработке следующего блока  
GoTo Line...  
End If  
End If
```

Первый блок предоставляет список часов наблюдения метеоданных. Ниже показан программный код для извлечения этих часов (вместе с отдельной функцией поиска строки) и записи их в массив:

```
Private Function DefTime(ByVal Stroka As String, ByVal iL As Integer) As Boolean
```

```
'Анализ строки для определения часов наблюдения в населенных пунктах
```

```
DefTime=False
```

```
str1=""
```

```
npos=MyInStr(1, Stroka, aStr(7, iL))
```

```
If npos>0 Then
```

```
okData(0)=False
```

```
okData(1)=True
```

```
'Максимальное число наблюдений
```

```
iChasMax = iChas
```

```
GoTo Line1
```

```
End If
```

```
npos=MyInStr(1, Stroka, aStr(3, iL))
```

```
If npos>0 Then
```

```
GoTo Line2
```

```
End If
```

```
npos=MyInStr(1, Stroka, aStr(4, iL))
```

```
If npos>0 Then
```

```
GoTo Line2
```

```
End If
```

```
npos=MyInStr(1, Stroka, aStr(5, iL))
```

```
If npos>0 Then
```

```
GoTo Line2
```

```
End If
```

```
npos=InStr(1, Stroka, aStr(6, iL))
```

```
If npos>0 Then
```

```
GoTo Line2
```

```
End If
```

```
GoTo Line1
```

```
Line2:
```

```
npos1=InStr(1, Stroka, ">")
```

```
If npos1>0 Then
```

```
str1=Mid(Stroka, npos1+1).Trim
```

```
iChas=iChas+1
```

```
aTime(iChas)=str1
```

```
GoTo Line1
```

```
End If
```

```
Line1:
```

```
DefTime=True
```

```
End Function
```

```
.....
```

```
Public Function MyInStr(ByVal iBeg As Integer, ByVal Stroka As String, ByVal Stroka1 As
String) As Integer
'Поиск позиции вложения подстроки в строку
Dim iPos, iMax, iFirst, ni(10), ln2, ln2, npos, npos1 As Integer
Dim str1, nStr(10) As String
iPos=0
iMax=0
iFirst=0
If Stroka <> "" Then
Stroka=Stroka.Trim
ln2=Len(Stroka)
Else
GoTo Line4
End If
If Stroka1<>"" Then
Stroka1=Stroka1.Trim
ln1=Len(Stroka1)
Else
GoTo Line4
End If
If ln2<ln1 Then
GoTo Line4
End If
str1=Stroka1
Line1:
npos=InStr(1, str1, Chr(34))
If npos>0 Then
nStr(iMax)=Mid(str1, 1, npos - 1)
str1 = Mid(str1, npos + 1)
iMax = iMax+1
GoTo Line1
Else
If str1<>"" Then
nStr(iMax)=str1
iMax=iMax+1
End If
End If
If iMax>0 Then
str2=Stroka
For i=0 To (iMax-1)
npos1=0
If str2<>""Then
npos1=InStr(1, str2, nStr(i))
ln3=Len(nStr(i))
If i=0 Then
iFirst=npos1
End If
End If
If npos1>0 Then
str2=Mid(str2, npos1+ln3+1)
```

```
GoTo Line2
Else
GoTo Line4
End If
Line2:
Next i
Line3:
iPos=iFirst
Else
iPos=InStr(1, Stroka, Stroka1)
End If
Line4:
MyInStr=iPos
Exit Function
End Function
```

Массив `aTime(iChas)` сопоставлялся с датами наблюдений. Первая дата соответствует дате загрузки данных. В дальнейшем, если значение `aTime(iChas+1)` было меньше значения `aTime(iChas)`, дата для `aTime(iChas+1)` автоматически сдвигалась на один день вперед. Цикл повторялся всякий раз при `aTime(iChas+1) < aTime(iChas)`.

Следующий блок предоставлял данные об облачности в населенном пункте. Затем шла обработка блока осадков. Полученные данные об осадках записывались в соответствующий массив. Через номер `iChas` массив `aOsadki` ставился в соответствие массиву `aTime`, т.е. массив `aOsadki(0)` соответствовал времени `aTime(0)`, `aOsadki(1)` – времени `aTime(1)` и т.д. Программный код обработки этого блока выглядит следующим образом:

```
Private Function ObrabOsadki(ByVal Stroka As String, ByVal iL As Integer) As Boolean
```

```
'Анализ строки для обработки осадков в населенных пунктах
```

```
npos=MyInStr(1,Stroka,aStr(9,iL))
If npos>0 Then
okData(2)=False
okData(3)=True
iChas=0
Go To Line1
End If
npos=MyInStr(1,Stroka,aStr(10,iL))
If npos>0 Then
okData(2)=False
okData(4)=True
iChas=0
GoTo Line1
End If
strP="class=" & Chr(34) & "pr_0" & Chr(34) & " onmouseover"
npos=MyInStr(1,Stroka,strP)
If npos>0 Then
OsadkiTime = 0
npos1=InStr(1,Stroka,"Явления погоды отсутствуют")
If npos1>0 Then
aOsadki(iChas)=OsadkiTime
iChas=iChas+1
GoTo Line1
End If
```

```
npos2=InStr(1,Stroka,"Без осадков")
If npos2>0 Then
aOsadki(iChas)=OsadkiTime
iChas=iChas+1
GoTo Line1
End If
npos3=InStr(1, Stroka, "в среднем")
ln1=Len("в среднем")
If npos3>0 Then
npos4=InStr(npos3,Stroka,"мм воды за 1 час")
If npos4>0 Then
str1=Mid(Stroka,npos3+ln1,npos4-1-(npos3+ln1)).Trim
'Проверка строки на число
ok=NumData(str1)
If ok Then
'Замена точки на запятую в качестве разделителя дробной части
str1=Zamena_Point(str1)
OsadkiTime=CSng(str1)
aOsadki(iChas)=OsadkiTime*6
iChas=iChas+1
End If
End If
GoTo Line1
End If
End If
Line1:
ObrabOsadki=True
End Function
```

Полученный массив `aPress(iChas)` также ставился в соответствие массиву `aTime(iChas)`. Все остальные блоки (тумана, температуры воздуха, ощущаемой температуры воздуха, давления, скорости ветра, порывов ветра, направлений ветра и влажности) имели программный код, подобный вышеприведенному. Поэтому в целях сокращения размеров статьи их тексты не приводятся. После обработки последнего блока (с данными по влажности воздуха), о чем извещает строка с содержанием `aStr(28, 3)`, происходит завершение просмотра файла и переход к следующему файлу. Процесс повторяется до завершения просмотра всех необходимых файлов и получения полного объема требуемой информации.

Следует отметить, что программа **WebMeteo** загружает не более 30 % размещенной на сайте информации (иная информация не применяется в текущих прогнозах ЧС).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в статье технология извлечения информации (в данном случае – метеорологических данных) принципиально отличается от применяемых в настоящее время технологий извлечения данных из Web-сайтов. Это обусловлено разработанным авторами сайта блоковым способом размещения данных. Предложенная инновационная технология основывается на последовательной обработке отдельных блоков сайта, соответствующих каждому виду данных.

При необходимости широкого использования специфической информации на конкретном сайте разработанная методика предоставляет возможность распространения предложенного авторами методического подхода на другие блоки данных на сайте. Рассмотренная технология может быть применена и на других сайтах, если структура размещения данных имеет схожий по соответствующим признакам блоковый характер.

Актуальность и практическая значимость предлагаемого метода и новой информационной технологии подтверждены их успешной апробацией и внедрением во Всероссийском научно-исследовательском институте по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России в процессе оперативного составления прогнозов неблагоприятных событий, опасных природных явлений и техногенных процессов по полученной в кратчайшие сроки полноценной адресной информации. В результате апробации нового подхода и информационной технологии при оперативном прогнозировании в системе с оптимизацией организационно-управленческих решений удалось добиться повышения показателя оправдываемости формируемых прогнозов возможных ЧС [20, 21]. Это позволило предупредить ряд негативных последствий опасных процессов и явлений в регионах РФ. Такой подход и алгоритм действий по его реализации предоставляет возможность заблаговременно предупредить или существенно смягчить риски, угрозы возникновения, а также опасные последствия чрезвычайных ситуаций, техногенных аварий для населения, территорий и окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метео и связанные с ним приложения. URL: <https://www.softpedia.com/download/Tag/meteo> (дата обращения: 20.04.2023).
2. Патент РФ 2022613341. *Программа для ЭВМ WebMeteo* / Сергеев Е.Б.; Заявл. 02.03.2022. Оpubл. 14.03.2022.
3. Гуменюк Е. 10 лучших инструментов для сбора данных в Интернете // *Freelance.Today*. URL: <https://freelance.today/poleznoe/10-luchshih-instrumentov-dlya-sbora-dannyh-v-internete.html?ysclid=1h638g5cbp362477738> (дата обращения: 02.05.2023).
4. Да Х. Алгоритмы извлечения информации из текстов, парсинг веб-страниц с использованием языка программирования Python // *Актуальные исследования*. 2022. № 30 (109). С. 21–24.
5. Трушкова М. Как парсить сайт: 20+ инструментов на все случаи жизни. URL: <https://www.cossa.ru/imarketing/261951/?ysclid=1h644z5fvb507478044> (дата обращения: 02.05.2023).
6. Кармалев Д.А., Коршев Е.П., Сулейманова Е.А., Трофимов И.В. Технология извлечения текстов, основанная на знаниях // *Программные продукты и системы*. 2009. № 2. С. 62–66.
7. Брюхов Д.О., Скворцов Н.А. Извлечение информации из больших коллекций русскоязычных текстовых документов в среде Hadoop // *Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции RCDL-2014: Труды 16-й Всероссийской научной конференции*. С. 391–398. URL: http://rcdl.ru/doc/2014/paper/RCDL2014_391-398.pdf (дата обращения: 26.04.2024).
8. Большакова Е.И., Воронцов К.В., Ефремова Н.Э., Клышинский Э.С., Лукашевич Н.В., Сапин А.С. Автоматическая обработка текста на естественном языке и анализ данных. М.: НИУ ВШЭ, 2017. 269 с.
9. Федюшкин Н.А., Федосин С.А. Понятие, проблемы и разновидности интеллектуального анализа текста // *Проблемы и достижения в науке и технике: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции*. 2016. Вып. III. С. 39–41. URL: <https://izron.ru/articles/problemy-i-dostizheniya-v-nauke-i-tekhnikе-sbornik-nauchnykh-trudov->

po-itogam-mezhdunarodnoy-nauchno/sektsiya-2-informatika-vychislitel'naya-tehnika-i-upravlenie-spetsialnost-05-13-00/po-nyatie-problemy-i-raznovidnosti-intellektual'nogo-analiza-teksta/ (дата обращения: 26.04.2024).

10. Gaikwad S.V., Chaugule A., Patil P. Text Mining Methods and Techniques // *International Journal of Computer Applications*. 2014. Vol. 85. № 17, pp. 42–45. DOI:10.5120/14937-3507

11. Использование HtmlAgilityPack и CSS Selectors. URL: <https://itvdn.com/ru/blog/article/using-html-agility-and-css-selectors> (дата обращения 25.04.2023).

12. Парсинг на C# с HtmlAgilityPack. URL: <https://vc.ru/dev/148017-parsing-na-c-s-htmlagilitypack> (дата обращения: 25.04.2020).

13. Парсинг сайтов, html-страниц и файлов. URL: https://vremya-ne-zhdet.ru/vba-excel/parsing-saytov/?ysclid=lh91dc86mv801207683#Parsing_html-stranic_msxml2xmlhttp (дата обращения: 02.05.2023).

14. Scraping a website HTML in VBA. URL: <https://www.wiseowl.co.uk/blog/s393/scrape-website-html> (дата обращения: 02.05.2023).

15. How to Import&Parse JSON Data with VBA. URL: <https://myexcelgenius.com/getting-data-from-a-website-in-json-format-using-vba> (дата обращения: 02.05.2023).

16. Парсинг текста с сайта. URL: https://www.cyberforum.ru/vb-net/thread_1063826.html?ysclid=lh923gqkp2314550261 (дата обращения: 02.05.2023).

17. Санчес Э. Скрапинг веб-сайтов с помощью Excel. URL: <https://baguzin.ru/wp/eduardo-sanches-skraping-veb-sajtov-s-pomoshhyu-excel> (дата обращения: 02.05.2023).

18. Импорт данных с web-страниц в Excel средствами VBA. URL: <https://ytikhonov.wordpress.com/2015/10/06/импорт-данных-с-web-страниц-в-excel-средствам> (дата обращения: 02.05.2023).

19. Анализ текстовых файлов с помощью объекта TextFieldParser (Visual Basic) // Learn. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/visual-basic/developing-apps/programming/drives-directories-files/parsing-text-files-with-the-textfieldparser-object> (дата обращения: 03.05.2023).

20. Гаврилов Е.В., Исаков В.М., Цховребов Э.С. Проблемы обеспечения экологической безопасности на территории муниципального образования // *Экосинформ*. 2005. № 1. С. 17–21.

21. Исаков В.М., Цховребов Э.С. Правовые основы охраны окружающей среды. М.: МОФ МосУ МВД России, 2004. 100 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕРГЕЕВ Евгений Борисович – научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России», 121352, Россия, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7. E-mail: alikh574@mail.ru

ЦХОВРЕБОВ Эдуард Станиславович – кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России», 121352, Россия, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7. E-mail: rebrovstanislav@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Сергеев Е.Б., Цховребов Э.С. Технология извлечения метаданных из интернет-сайта для оценки экологической безопасности населенных пунктов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 96–110.

TECHNOLOGY FOR EXTRACTING METEOROLOGICAL DATA FROM AN INTERNET SITE TO ASSESS THE ECOLOGICAL CONDITION OF SETTLEMENTS

E.B. Sergeev, E.S. Tshovrebov

*All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations
of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Moscow)*

Abstract. The article describes a technology for extracting weather data from an Internet site for a large number of localities. The method is based on the analysis of strings of files representing individual pages of the site. The technology uses both a standard parsing technique and a fundamentally different approach to data extraction, which this article is devoted to. The planned result of the introduction of this technology, which is being tested, will be to increase the level of completeness and validity of environmental information on the state of the environment in human settlements and, as a result, expand the possibility of early forecasting of environmentally unfavorable, natural and man-made emergencies, planning a set of measures to protect the population, the natural environment and economic facilities from threats of emergency situations and their negative consequences.

Keywords: forecasting, environmental safety, information technology, meteorological data, settlements.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SERGEEV Evgeniy Borisovich – Researcher of All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 7, Davydkovskaya str., Moscow, 121352, Russia. E-mail: alik574@mail.ru

TSKHOVREBOV Edward Stanislavovich – Candidate of Economic Sciences in Economics, Associate Professor, Senior Researcher of All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 7, Davydkovskaya str., Moscow, 121352, Russia. E-mail: rebrovstanislav@rambler.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Sergeev E.B., Tskhovrebov E.S. Technology for extracting meteorological data from an internet site to assess the ecological condition of settlements // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 96–110.

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

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

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

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

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Ответственный секретарь

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

Члены редакционной коллегии:

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

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Березовский Н.И. – д.т.н., профессор Белорусского национального технического
университета, г. Минск, Республика Беларусь

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

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

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

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

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

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

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

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

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

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 1 (21), 2024

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 12.08.2024

Дата выхода в свет 02.12.2024

Формат 60 x 84 1/8

Физ. печ. л. 14

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 13,02

Заказ № 274

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 12,18

С – 112

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