

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

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

Научный рецензируемый журнал

№ 1 (1)

Тверь 2019

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2019. № 1 (1). 100 с.

Включает научные статьи, подготовленные на основе результатов исследований, экспериментальных разработок в области строительства, электротехники и химических наук, выполненных учеными и специалистами-практиками ведущих вузов и научно-исследовательских учреждений нашей страны и зарубежья. Представлены работы, соответствующие профилю издания по следующим научным отраслям: 05.23.00 Строительство и архитектура; 05.09.00 Электротехника; 05.17.00 Химическая технология.

© Тверской государственный
технический университет, 2019

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

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет»

Адрес редакции

Россия, 170026, Тверь, наб. Афанасия
Никитина, 22

Тел. +7 (4822) 78-89-00

E-mail: common@tstu.tver.ru

Цена свободная

Подписано в печать 05.03.2019

Формат 60x84 1/8

Тираж 500 экз.

ISSN

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доц.

Заместители главного редактора:

Белов В.В. – д.т.н., проф.;

Луцик В.И. – д.х.н., проф.;

Макаров А.Н. – д.т.н., проф.

Ответственный секретарь

Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доц.

Редакционная коллегия:

Качанов А.Н. – д.т.н., проф.;

Коротких Д.Н. – д.т.н., проф.;

Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., проф.;

Лепешкин А.Р. – д.т.н.;

Матар П.Ю. – к.т.н., доц.;

Недосеко И.В. – д.т.н., проф.;

Никольский В.М. – д.х.н., проф.;

Строкова В.В. – проф. РАН., д.т.н., проф.;

Трещев А.А. – д.т.н., проф.;

Фишер Х.-Б. – д-инженер;

Ясинская Н.Н. – к.т.н., доц.

**Vestnik of Tver state technical university.
Series «Building. Electrical engineering
and chemical technology»**

Founder and Publisher

Federal State Budget Educational Institution of
Higher Education «Tver State Technical
University»

Address

22, embankment of Afanasiy Nikitin, 170026,
Tver, Russia

Tel. +7 (4822) 78-89-00

E-mail: common@tstu.tver.ru

Open price

Passed for printing 05.03.2019

Format 60x84 1/8

Printing run 500 copies

ISSN

Editor-in-Chief

Gul'tyaev V.I. – d.t.s., assoc. prof

Vice Editor-in-Chief:

Belov V.V. – d.t.s., prof.;

Lucik V.I. – d.c.s., prof.;

Makarov A.N. – d.t.s., prof.

Executive Secretary

Novichenkova T.B. – k.t.s., assoc. prof.

Editorial team:

Kachanov A.N. – d.t.s., prof.;

Korotkih D.N. – d.t.s., prof.;

Kosivcov YU.YU. – d.t.s., prof.;

Lepeshkin A.R. – d.t.s.;

Matar P.YU. – k.t.s., assoc. prof.;

Nedoseko I.V. – d.t.s., prof.;

Nikol'skij V.M. – d.c.s., prof.;

Strokova V.V. – prof. RAS., d.t.s., prof.;

Treshchev A.A. – d.t.s., prof.;

Fisher H.-B. – d-engineer;

YAsinskaya N.N. – k.t.s., assoc. prof.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- Жерносек С.В., Ольшанский В.И.* Исследование показателей качества композиционных текстильных материалов в условиях воздействия СВЧ-излучения.....7
- Гуревич Т.М., Черепенин Г.В., Рыжов А.С.* Моделирование системы сводов покрытия под воздействием смещений.....15
- Трофимов В.И.* Технология ускоренного строительства автомобильных дорог в Арктических зонах.....26
- Фадеев В.В.* Анализ напряженно-деформированных состояний мерзлого торфяного грунта на основе октаэдрической модели.....32

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Соколов А.Ю.* Номограммы пусковых моментов асинхронных двигателей с фазным ротором.....39
- Окунева В.В., Павлова Ю.М., Макаров А.Н.* Эффективность работы дуговых сталеплавильных печей Consteel.....47
- Макаров А.Н.* Законы теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов.....58

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Виноградова М.Г.* Энергии разрыва связей в кетонах. Численные расчеты и основные закономерности.....70
- Орлов П.М., Аканова Н.И.* Динамика содержания ^{137}Cs в почвах сельскохозяйственных угодий, загрязненных от Чернобыльской аварии.....79
- Сульман А.М., Долуда В.Ю., Лакина Н.В., Матвеева В.Г., Молчанов В.П., Сульман М.Г.* Синтез лактулозы с использованием органических и неорганических катализаторов.....88

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Zhernosek S.V., Ol'shanskii V.I.** Study of quality indicators composite textile materials under influence microwave radiation.....7
- Gurevich T.M., Cherepenin G.V., Ryzhov A.S.** Influence again the building part of the temple on the construction of refectory.....15
- Trofimov V.I.** Technology of accelerated construction of automobile roads in arctic zones.....26
- Fadeev V.V.** The analysis of the intense deformed states frozen peat soil on the basis octahedral model.....32

ELECTRICAL ENGINEERING

- Sokolov A.Yu.** Nomograms of the starting moments asynchronous engines with the phase rotor.....39
- Okuneva V.V., Pavlova Yu.M., Makarov A.N.** Overall performance of arc steel-smelting consteel furnaces.....47
- Makarov A.N.** laws of heat radiation of the ionized and not ionized gas volumes.....58

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Vinogradova M.G.** Energy of breaking ties in ketones. Numerical calculations and basic laws.....70
- Orlov P.M., Akanova N.I.** Dynamics of ^{137}Cs content in soils agricultural land contaminated by the Chernobyl accident.....79
- Sulman A.M., Doluda V.Yu., Lakina N.V., Matveeva V.G., Molchanov V.G., Sulman M.G.** Lactulose synthesis using organic and inorganic catalysts.....88

Уважаемый читатель!



Выходит первый номер журнала «Вестник Тверского государственного технического университета. Серия “Строительные науки, электротехника и химические технологии”». Продолжая лучшие традиции, воплощенные в изданиях «Вестника Тверского государственного технического университета», на страницах журнала мы будем освещать актуальные научные экспериментально-теоретические исследования в области строительства, архитектуры, химии и других смежных областях. Наряду с проблемами совершенствования строительных конструкций, технологий, материалов также будут освещаться вопросы из области химических технологий и электротехники. В каждом номере редакция будет предлагать читателям широкий круг научных вопросов с различными точками зрения, стараясь опубликовать сведения о передовых достижениях в данных областях.

За время своего существования Тверской государственный технический университет (ТвГТУ) сформировал традиции и школы, исследовательские позиции и высокую интеллектуальность. Научные школы ТвГТУ получили мировую известность и существуют многие десятилетия, появляются новые академические направления. Очень важно, что традиции в научных школах не только чтут люди старшего поколения, но и развивают молодые ученые. Мы стремимся расширять читательскую аудиторию и географию наших авторов.

В номерах будут опубликованы разнообразные концепции, что даст возможность увидеть многогранную деятельность исследователей в тех или иных отраслях.

Мы уверены, что журнал «Вестник Тверского государственного технического университета. Серия “Строительные науки, электротехника и химические технологии”» сохранит высокий профессионализм и достойно продолжит историю предшественника. Ждем ваших оригинальных статей, дискуссионных материалов, случаев из практики, которые дадут импульс поиску и развитию науки и практики.

Пользуясь возможностью, хотим поздравить читателей и авторов журнала с выходом первого номера, желаем благополучия и творческих успехов на поприще отечественной науки.

В.И. Гульяев,
главный редактор серии,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автомобильных дорог,
оснований и фундаментов ТвГТУ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 677.017.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

С.В. Жерносек, В.И. Ольшанский

*Витебский государственный технологический университет
(г. Витебск, Республика Беларусь), E-mail: tiomp@vstu.by*

Аннотация. Композиционные текстильные материалы (далее КТМ) декоративно-отделочного назначения в качестве армирующей матричной основы используют текстильные ткани. Структура материала образуется в результате импрегнирования (или пропитывания) текстильной основы с помощью полимерной композиции, которая выступает в роли наполнителя. Известно, что для повышения качества таких материалов необходимо улучшить эффективность взаимодействия компонентов «тканая основа – наполнитель» и обеспечить равномерное распределение полимера в структуре готового материала, что возможно в результате применения ИК и СВЧ-излучения. В работе представлены результаты экспериментальных исследований показателей качества композиционных текстильных материалов, полученных способом импрегнирования текстильной основы полимерной композицией в условиях воздействия СВЧ-излучения; проанализированы зависимости показателей физико-механических свойств полученных материалов от основных режимов СВЧ-обработки. Приведены зависимости показателей качества, позволяющие прогнозировать изменение потребительских свойств композиционных текстильных материалов при использовании различных способов импрегнирования.

Ключевые слова: текстильные композиционные материалы, импрегнирование, структура, электромагнитные волны СВЧ, физико-механические свойства, показатели качества.

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные текстильные материалы (далее КТМ) обладают широким диапазоном функциональных характеристик, благодаря чему нашли применение при изготовлении декоративно-отделочных материалов: настенных покрытий, жалюзи, декоративных панелей и др. [1–3]. Технология формирования таких материалов заключается в импрегнировании (пропитывании) армирующей текстильной основы раствором полимерной композиции (далее ПК), выступающей в роли наполнителя, с последующей термофиксацией и сушкой [1, 2]. Состав и концентрация наполнителя выбираются в зависимости от требуемых характеристик и области применения материала. Эффективность процесса импрегнирования определяет качество готового материала, что

существенно зависит от большого числа внешних факторов: состава и физико-характеристики текстильной основы, состава и концентрации полимерного раствора, температуры, давления, продолжительности процесса и др. [3].

Одним из наиболее эффективных способов повышения эффективности тепломассообменных процессов в текстильной промышленности является организация комбинированного энергетического воздействия с использованием электромагнитных волн [4]. Воздействие электромагнитных волн вызывает изменение надмолекулярной структуры полимера, что обусловлено изменением степени ориентации макроэлементов, поперечные размеры которых могут в зависимости от времени обработки и мощности СВЧ-излучения как увеличиваться, так и уменьшаться. Изменения надмолекулярной структуры элементарных волокон оказывают влияние на показатели качества полученных материалов: протекающие при СВЧ-обработке релаксационные процессы в надмолекулярной структуре волокна могут вызывать значительное изменение физико-механических свойств полученных композитов [5–11].

Целью работы является исследование структуры композиционных текстильных материалов, полученных в результате импрегнирования текстильной основы в условиях воздействия СВЧ-излучения, анализ равномерности распределения полимерного наполнителя в волокнистой структуре, оценка показателей физико-механических свойств полученных материалов.

В качестве объекта исследований рассмотрены структурные и физико-механические показатели качества композиционных текстильных материалов. Высокий уровень показателей качества композиционных текстильных материалов может быть обеспечен равномерным распределением полимерной композиции в структуре тканой основы в результате качественной термофиксации и эффективного удаления влаги в процессе сушки [1].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа показателей физико-механических свойств КТМ исследована технология импрегнирования с применением инфракрасного (ИК) и сверх-высокочастотного (СВЧ) излучения. В работе рассмотрены материалы, полученные способом импрегнирования льнохлопковых тканей арт. 10С–768–ШР (поверхностная плотность 380 г/м²) с применением раствора полимерной композиции – водной дисперсии стирол-акрилата «Appretan № 9616» (фирма «Clariant»), применяемой для обеспечения жесткости и каркасности. С использованием инвертированного микроскопа МИ-1 выполнены экспериментальные исследования микроструктуры материалов после импрегнирования с целью подтверждения полученных выводов и закономерностей об эффективности применения СВЧ-нагрева.

Этапы подготовки образцов описаны в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

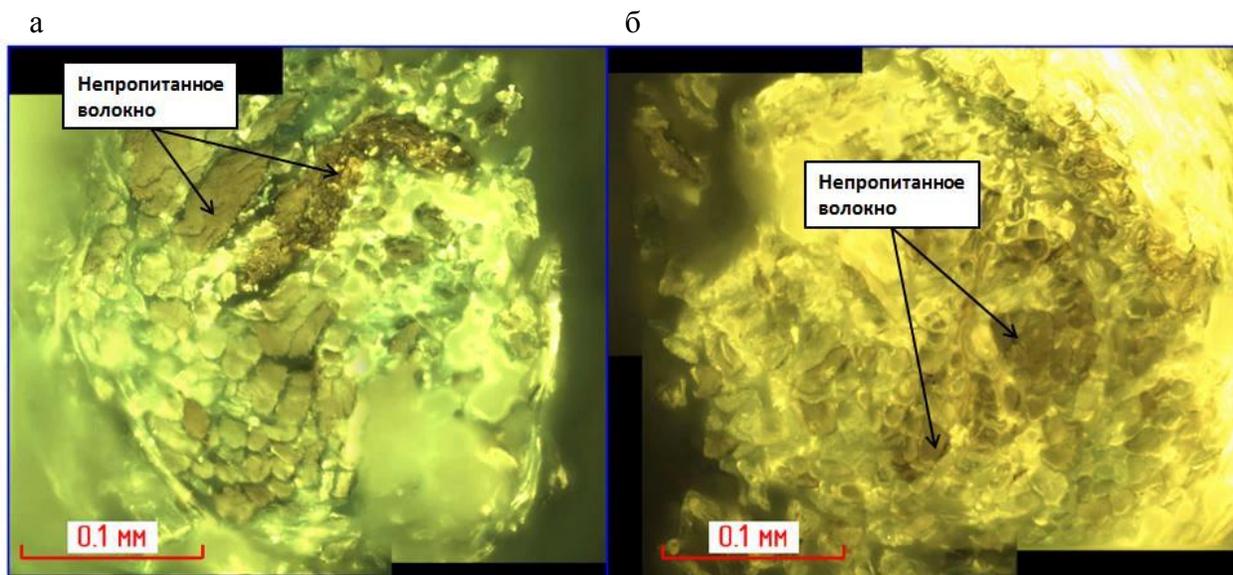
На рисунке представлены снимки срезов материалов, полученных с использованием ИК-обработки и СВЧ-обработки при 50-кратном увеличении.

Таблица 1. Методика подготовки экспериментальных образцов

ИК-метод обработки	СВЧ-метод обработки
Импregnирование: концентрация ПК 300 г/л, начальная температура ПК – 20°C	
Мощность 1 000 Вт; продолжительность 15 мин	Мощность 450 Вт; продолжительность 2 мин
Отжим: влажносодержание 85–90 %	
Термофиксация и сушка	
Термофиксация (температура 160°C; продолжительность 30 с); сушка при температуре 120°C (1 000 Вт); продолжительность 5 мин	Совмещенная термофиксация и сушка (мощность 1 000 Вт; продолжительность 2 мин)

Представленные результаты позволяют визуально оценить и сравнить степень заполнения пористой волокнистой структуры тканой основы после ИК-обработки и СВЧ-обработки [1].

В результате анализа полученных изображений срезов было отмечено, что в условиях ИК-нагрева (рисунок а) ПК фиксируется в виде чешуйчатой структуры на поверхности волокна, неравномерно проникая в структуру материала. При использовании СВЧ-нагрева (рисунок б) происходит более полная и равномерная миграция полимера в волокнистую структуру материала.



Микрофотографии структуры КТМ:
а – импregnирование в условиях ИК-нагрева;
б – импregnирование с использованием СВЧ-излучения

Установленные закономерности можно объяснить рядом сопутствующих явлений и процессов, протекающих в структуре материала. Фиксация ПК целлюлозным волокном в процессе диэлектрического нагрева осуществляется за счет присутствия в волокне полярного соединения, которое лучше поглощает электромагнитную энергию СВЧ-диапазона и обеспечивает более эффективный разогрев материала до температуры кипения полярного вещества, что вызывает значительное снижение вязкости. В нашем случае таким реагентом является органический растворитель (вода), который пластифицирует полимерную композицию и обеспечивает эффективный разогрев волокна и его пропитку при температуре 100°C [1]. Установлено, что при СВЧ-нагреве происходит максимальное снижение давления в порах материала на момент начала процесса пропитывания и значительно увеличивается диффузионная проницаемость целлюлозных материалов [2, 5, 11, 14, 15].

При воздействии на полимерные материалы электромагнитного излучения СВЧ-диапазона происходит поляризация целлюлозных волокон, это приводит к повышению гибкости макромолекулярных цепей [11]. С увеличением подвижности сегментов полимерной цепи происходит разрушение существующих связей между макромолекулами водородных и образование новых в энергетически более выгодном состоянии. Вследствие этого в целлюлозном материале под действием СВЧ-излучения происходит релаксация внутренних напряжений, что сопровождается переходом полимера в более равновесное состояние – в аморфных областях волокна суммарная энергия межмолекулярного взаимодействия возрастает, и устойчивость ткани к физико-механическим воздействиям повышается.

Кроме того, действие электромагнитного поля вызывает в надмолекулярной структуре волокна процесс разукрупнения кристаллических образований, сопровождающийся увеличением подвижности макромолекул. В результате происходит перераспределение нагрузки между отдельными структурными элементами. Упрочнение волокна возможно также за счет изменения его молекулярной структуры и образования некоторого количества прочных ковалентных связей между соседними макромолекулами целлюлозы [1, 5, 8].

Для количественного подтверждения установленных закономерностей выполнен анализ изменения физико-механических свойств КТМ: износостойкости, разрывной нагрузки, разрывного удлинения и жесткости. Испытания материалов на износостойкость (стойкость к истиранию по плоскости) проведены в соответствии с ГОСТ 18976–73 с использованием прибора ДИТ-2М. Разрывная нагрузка и разрывное удлинение материалов исследовались на разрывной машине типа WDW-20E в соответствии с ГОСТ 3813–72 (СТ. СЭВ 2675–80), ГОСТ 16218.5–93, ISO 13934. Жесткость полученных материалов при различных способах формирования определялась методом кольца на приборе ПЖУ–12 М в соответствии с ГОСТ 8977–74, ГОСТ 10550–93 (ГОСТ Р 55826–2013).

В табл. 2 приведены результаты экспериментального исследования показателей физико-механических свойств КТМ, полученных при различных концентрациях ПК. Представленные результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств подтверждают установленные закономерности, описывающие эффективность заполнения капиллярной пористой структуры раствором ПК при обработке в ИК и СВЧ-излучения.

Таблица 2. Изменение физико-механических свойств КТМ при импрегнировании с использованием ИК и СВЧ-излучения

Наименование показателя	Воздействие ИК-излучения	Воздействие СВЧ-излучения
Износостойкость по ГОСТ 18976	$N_{ИК} = 0,271C^2 - 11,1C + 6\,266$	$N_{СВЧ} = 0,638C^2 - 51,8C + 7\,009$
Разрывная нагрузка по ГОСТ 3813	По основе $P_p = 0,0001C + 0,35$. По утку $P_p = 0,0002C + 0,38$	По основе $P_p = 0,0001C + 0,36$. По утку $P_p = 0,0004C + 0,37$
Разрывное удлинение по ГОСТ 3813	По основе $\varepsilon_{ИК} = 0,004C + 10,0$. По утку $\varepsilon_{ИК} = 0,005C + 10,4$	По основе $\varepsilon_{СВЧ} = 0,007C + 10,0$. По утку $\varepsilon_{СВЧ} = 0,009C + 10,8$
Жесткость по ГОСТ 8977	В продольном $J_{ИК} = 0,067C + 7,09$. В поперечном направлении $J_{ИК} = 0,054C + 7,16$	В продольном $J_{СВЧ} = 0,134C + 7,29$. В поперечном направлении $J_{СВЧ} = 0,114C + 7,53$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований показателей качества композиционных текстильных материалов, полученных способом импрегнирования тканой основы раствором полимерной композиции. Установлено, что в результате воздействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона наблюдается более равномерное распределение полимерной композиции в волокнистой структуре, способствующее формированию однородного по составу материала. Применение СВЧ-нагрева оказывает положительное комплексное влияние на изменение качественных и физико-механических характеристик полученных материалов, что способствует повышению износостойкости на 70–78 %; разрывной нагрузки и разрывного удлинения – на 10–14 %; жесткости – на 74–78 %. Приведенные результаты анализа физико-механических свойств композиционных текстильных материалов могут быть использованы для прогнозирования показателей качества композиционных текстильных материалов на этапе проектирования изделий декоративно-отделочного назначения с учетом конкретной области применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерносек С.В. Формирование свойств композиционных текстильных материалов в условиях инфракрасного и сверхвысокочастотного излучения: дис. ... канд. техн. наук. Витебск, 2016. 228 с.
2. Мурычева В.В. Технология композиционных текстильных материалов способом импрегнирования: дис. ... канд. техн. наук. Витебск, 2014. 214 с.
3. Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г. Композиционные текстильные материалы. Витебск: УО «ВГТУ», 2015. 299 с.
4. Марущак А.С., Жерносек С.В., Ольшанский В.И. Перспективы применения акустических колебаний ультразвукового диапазона в процессах сушки текстильных материалов // *Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности:*

Материалы докладов международной научно-технической конференции, посвященной году науки. Витебск: УО «ВГТУ», 2017. С. 63–66.

5. Побединский В.С. Активирование процессов отделки текстильных материалов энергией электромагнитных волн ВЧ, СВЧ и УФ диапазонов. Иваново: ИХР РАН, 2000. 128 с.
6. Ольшанский А.И., Ольшанский В.И., Жерносек С.В. Исследование СВЧ сушки тканей // *Вестник Витебского государственного технологического университета.* 2013. Вып. 24. С. 55–65.
7. Бизюк А.Н., Жерносек С.В., Ольшанский В.И., Ясинская Н.Н. Исследование влияния СВЧ-излучения на показатели качества тканых полотен // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности.* 2014. № 2 (350). С. 17–20.
8. Шубина Е.В. Использование энергии электромагнитных колебаний высокой частоты при придании текстильным материалам эффекта малосминаемости: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2003. 125 с.
9. Бизюк А.Н., Жерносек С.В., Ольшанский В.И., Ясинская Н.Н. Оптимизация технологического процесса формирования текстильных композиционных материалов в условиях воздействия электромагнитных волн СВЧ- и ИК-диапазона // *Химическая технология.* 2015. Т. 16. № 1. С. 6–12.
10. Ольшанский А.И., Ольшанский В.И., Жерносек С.В. Исследование влагообмена при сушке натуральных тканей в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // *Инженерно-физический журнал.* 2014. Т. 86. № 5. С. 1041–1048.
11. Циркина О.Г. Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения эффективности технологий отделки текстиля с использованием поля токов высокой частоты: дис. ... докт. техн. наук. Иваново, 2015. 416 с.
12. Бизюк А.Н., Жерносек С.В., Ольшанский В.И., Ясинская Н.Н. Влияние СВЧ-излучения на физико-механические свойства текстильных материалов // *Известия вузов. Технология легкой промышленности.* 2013. Т. 20. № 2. С. 16–19.
13. Никифоров А.Л. Использование энергии электромагнитных колебаний для интенсификации химико-текстильных процессов и создания на их основе энерго- и ресурсосберегающих технологий: дис. ... докт. техн. наук. Иваново, 2004. 398 с.
14. Бизюк А.Н., Жерносек С.В., Ольшанский В.И., Ясинская Н.Н. Исследование пропитки текстильных материалов в поле СВЧ-излучения // *Вестник Витебского государственного технологического университета.* 2014. Вып. 26. С. 21–28.
15. Бизюк А.Н., Жерносек С.В., Ольшанский В.И., Ясинская Н.Н. Моделирование процесса пропитки текстильных материалов под действием СВЧ-излучения // *Известия вузов. Технология легкой промышленности.* 2014. Т. 23. № 1. С. 16–18.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖЕРНОСЕК Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, УО «Витебский государственный технологический университет» (УО «ВГТУ»), 210035, Республика Беларусь, г. Витебск, Московский пр., 72.

ОЛЬШАНСКИЙ Валерий Иосифович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроительного производства, УО «Витебский государственный технологический университет» (УО «ВГТУ»), 210035, Республика Беларусь, г. Витебск, Московский пр., 72.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Жерносек С.В., Ольшанский В.И. Исследование показателей качества композиционных текстильных материалов в условиях воздействия СВЧ-излучения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 1 (1). С. 7–14.

UDK 677.017.4**STUDY OF QUALITY INDICATORS COMPOSITE TEXTILE MATERIALS
UNDER INFLUENCE MICROWAVE RADIATION****S.V. Zhernosek, V.I. Ol'shanskii**

*Vitebsk State Technological University
(Vitebsk, Belarus), E-mail: tiomp@vstu.by*

Abstract. Composite textile materials, which have a decorative and finishing purpose, use textile fabrics as their reinforcing matrix base. The structure of such a material is formed as a result of the impregnation of a textile base using a polymer composition that is used as a filler. It is known that, in order to improve the quality of such materials, it is necessary to improve the efficiency of interaction between the woven base-filler components and ensure uniform distribution of the polymer in the structure of the finished material. To do this, effectively apply IR and microwave radiation. The paper presents the results of experimental studies of the quality indicators of composite textile materials obtained by impregnating a textile base with a polymer composition under conditions of exposure to microwave radiation. The dependences of the physicomachanical properties of the obtained materials on the main modes of microwave processing are analyzed. The authors presented the dependencies of quality indicators, allowing to predict changes in consumer properties of composite textile materials when using various methods of impregnation.

Keywords: textile composite materials, impregnation, structure, electromagnetic waves, microwave, physical and mechanical properties, quality indicators.

REFERENCES

1. Zhernosek S.V. Formation of properties of composite textile materials under infrared and microwave radiation. Cand. Diss. (Engineering). Vitebsk, 2016. 25 p.
2. Murycheva V.V. Technology of composite textile materials impregnation method. Cand. Diss. (Engineering). Vitebsk. 2014. 214 p. (In Russian).
3. Yasinskaya N.N. The composite textile materials [Kompozicionnye tekstil'nye materialy]. Vitebsk. 2015. 299 p.
4. Marushchak A.S., Zhernosek S.V., Olshansky V.I. Prospects of application of acoustic oscillations of ultrasound range in drying textile materials. *Innovative technologies in textile and light industry*. Vitebsk. 2017. pp. 63–66.
5. Pobedinskij V.S. Activation of textile finishing by energy of high frequency electromagnetic waves, microwave and ultraviolet ranges [Aktivirovanie processov otdelki tekstil'nyh materialov jenergiej jelektromagnitnyh voln VCh, SVCh i UF diapazonov]. Ivanovo. 128 p.

6. Ol'shanskii A.I., Ol'shanskii V.I., Zhernosek S.V. Investigation of microwave drying of fabrics. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta*. 2013. pp. 55–65. (In Russian).
7. Bizjuk A.N., Zhernosek S.V., Alshanski V.I., Yasinskaja N.N. Investigation of the effect of microwave radiation on the parameters of quality woven. *Izvestija vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti*. No. 2(350). 2014. pp. 17–20. (In Russian).
8. Shubina E.V. The use of electromagnetic energy of high frequency oscillation imparting textile materials at low wrinkling effect. Cand. Diss. (Engineering). Ivanovo. 2003. 125 p. (In Russian).
9. Biziuk A.N., Zhernosek S.V., Yasinskaya N.N., Alshanski V.I. Optimization of the technological process of formation of textile composite materials under the influence of electromagnetic waves in the microwave and infrared range, *Chemical Technology*. 2015. Vol. 16. No. 1. pp. 6–12 (In Russian).
10. Ol'shanskii A.I., Ol'shanskii V.I., Zhernosek S.V. Moisture exchange in drying natural fabrics in a microwave electromagnetic field. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2014. Vol. 86. pp. 1041–1048 (In Russian).
11. Cirkina O.G. Theoretical and experimental basis technologies improve efficiency finishing textiles using high-frequency currents field. Doct. Diss. (Engineering). Ivanovo. 2015. 416 p. (In Russian).
12. Bizjuk A.N., Zhernosek S.V., Jasinskaja N.N., Ol'shanskij V.I. Effect of microwave radiation on the physical properties of textile materials. *Izvestija vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti*. 2013. No. 2. pp.16–19. (In Russian).
13. Nikiforov A.L. Using the energy of electromagnetic fluctuations for an intensification of chemical and textile processes and creation on their basis of energy- and resource-saving technologies. Doct. Diss. (Engineering). Ivanovo. 2004. 398 p. (In Russian).
14. Biziuk A.N., Zhernosek S.V., Ol'shanskii V.I., Yasinskaya N.N. Study of impregnation of textile materials in the field of microwave radiation [Issledovanie propitki tekstil'nyh materialov v pole SVCh izluchenija], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta*. 2014. pp. 21–28. (In Russian).
15. Biziuk A.N., Zhernosek S.V., Ol'shanskii V.I., Yasinskaya N.N. Modeling of impregnation of textile materials under the influence of microwave radiation. *Izvestija vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti*. 2014. No. 1. pp.16–18. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ZHERNOSEK Sergej Vasil'evich – Ph.D. of engineering sciences, associate professor of the department, Vitebsk State Technological University, 72, Moskovsky avenue, Vitebsk, 210035, Belarus.

OL'SHANSKII Valerii Iosifovich – Ph.D. of engineering sciences, professor of department, head of the department of technology and equipment of machine-building production, Vitebsk State Technological University, 72, Moskovsky avenue, Vitebsk, 210035, Belarus.

CITATION FOR AN ARTICLE

Zhernosek S.V., Ol'shanskii V.I. Study of quality indicators composite textile materials under influence microwave radiation // Vestnik of Tver state technical university. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 1 (1). pp. 7–14.

УДК 76.5:281.93(063)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СВОДОВ ПОКРЫТИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СМЕЩЕНИЙ

Т.М. Гуревич, Г.В. Черепенин, А.С. Рыжов

*Костромская государственная сельскохозяйственная академия
(п. Каравеево, Костромская область), E-mail: char1943@mail.ru*

Аннотация. В данной статье выполнен расчет моделей храма на грунтовом основании на нагрузки от вновь возводимой части (четверика с алтарем). Сформированы две расчетных модели: с деформационным швом и без шва. Определены смещения общей стены и произведена оценка их влияния на систему сводов покрытия трапезной.

Ключевые слова: фундамент, осадки, деформационный шов, растягивающие напряжения, свод, физическая нелинейность, церковь, пространственная модель, ЛИРА САПР, грунтовой массив, проектирование, восстановление, реконструкция, система кирпичных сводов.

Церковь Святого Илии Пророка по улице Советской (бывшей Русиной) является одним из архитектурных памятников Костромы [9]. Церковь располагается в начале улицы, непосредственно за зданием бывшей гостиницы «Старый двор» (рис. 1).

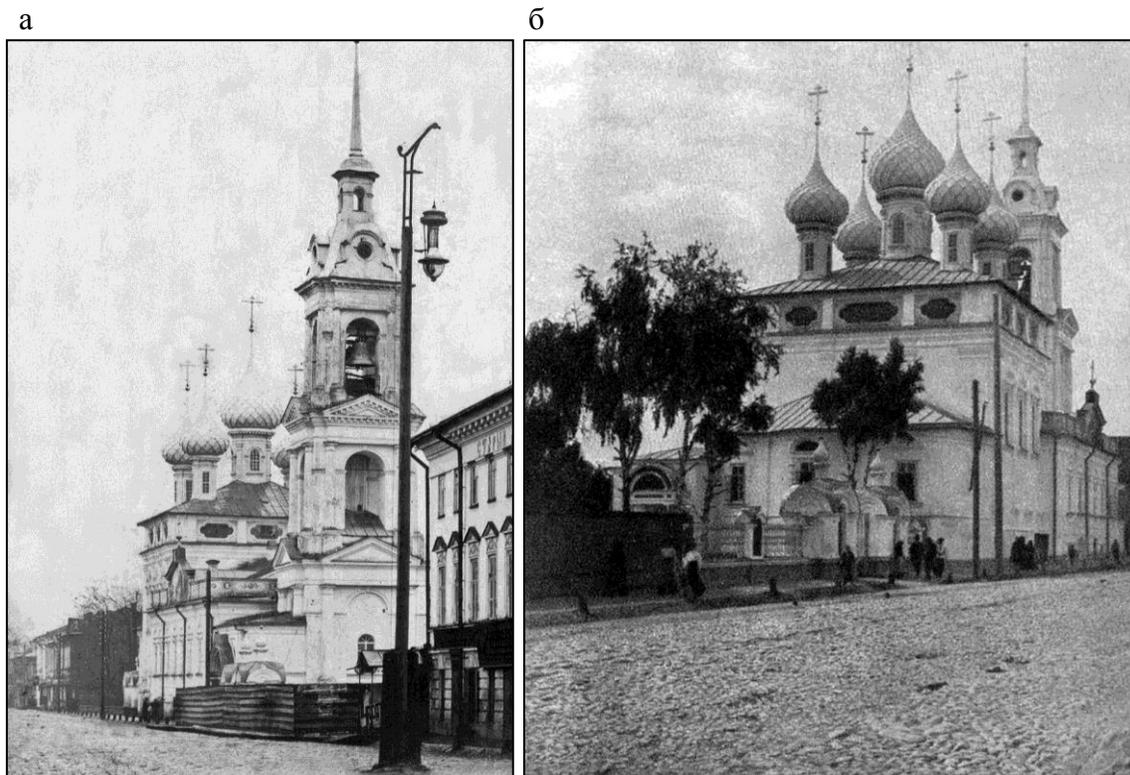


Рис. 1. Храм Святого Илии Пророка. Фото 1911–1912 годов:
а – вид с северо-запада; б – с северо-востока

Здание церкви было частично разрушено в 1930 году – разобраны до фундаментов алтарь и четверик, уничтожены два верхних яруса колокольни. До настоящего времени сохранились трапезная и первый ярус колокольни (рис. 2). В 2016 году начались восстановительные работы. Предстоит восстановить четверик и алтарь, а также два яруса колокольни.

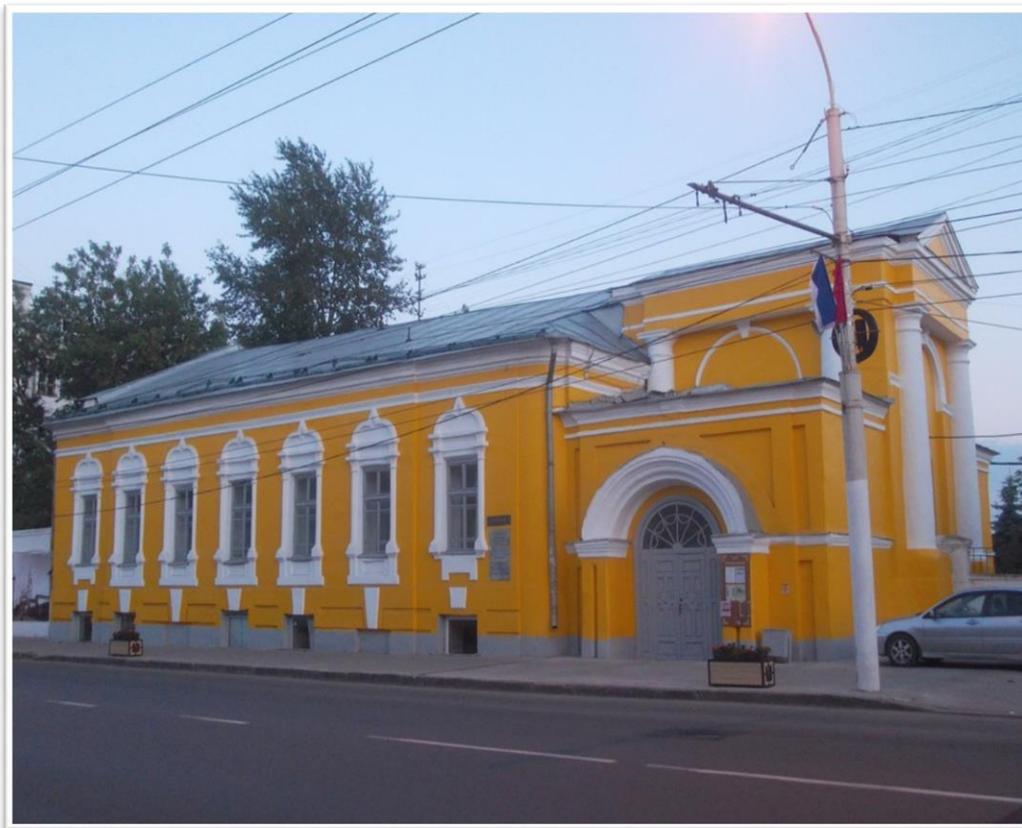


Рис. 2. Сохранившаяся часть церкви св. Илии Пророка по улице Советская в городе Костроме

Осадки фундаментов существующей части давно установились вследствие пригрузки грунта и его уплотнения в течение длительного времени. Если вновь возводимый объем жестко связан с существующим, то начинается неравномерная осадка фундамента вновь возводимого объема и его крен. Со временем этот процесс приведет к образованию трещин в стенах четверика, примыкающих к существующей общей стене старого и нового объемов и, наконец, к отрыву пристраиваемой части. Кроме того, деформации общей стены будут оказывать влияние на напряженно-деформированное состояние системы сводов трапезной, опирающейся на эту стену. Предотвратить это опасное явление можно, устроив между старым и новым объемами деформационный осадочный шов, обеспечивающий беспрепятственную осадку и повороты примыкающих стен относительно друг друга. Однако устройство деформационного шва, как правило, влечет за собой изменение как внутренней планировки здания, так и фасадов, хотя искажения фасадов можно избежать при соответствующей проработке [10].

Для принятия варианта конструктивного решения необходимо предварительно оценить влияние осадок вновь возводимой части здания на напряженно-деформированное состояние сводов трапезной при условии отсутствия деформационного шва и с его устройством. С этой целью были сформированы две пространственные модели восстановленного здания в программном комплексе ЛИРА САПР. Обе модели включают в себя грунтовой массив, сформированный на основании инженерно-геологических характеристик грунтов в модуле ГРУНТ ПК ЛИРА САПР.

Первая модель не предполагает устройства деформационного осадочного шва. В этой модели стена трапезной поднята до верхней отметки четверика и является общей для существующей и вновь возводимой частей. Вторая модель предполагает устройство деформационного шва между стеной трапезной и стеной четверика. Обе модели загружены весом вновь возводимой части с учетом полезной и снеговой нагрузок.

На рис. 3 показана пространственная модель восстановленной церкви без деформационного шва.

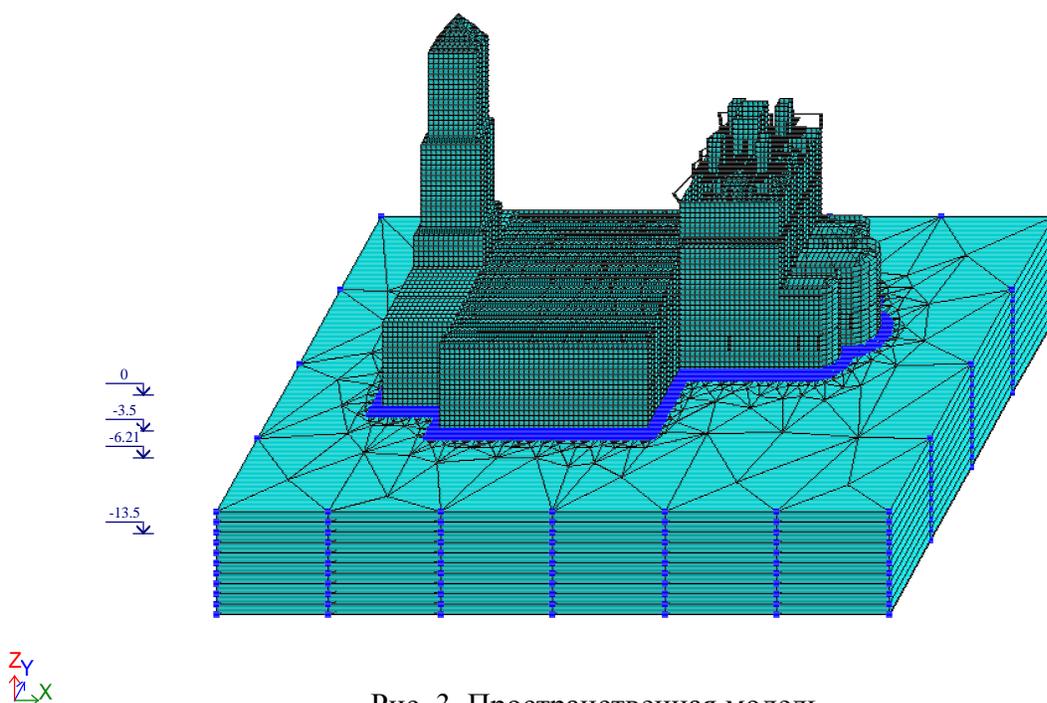


Рис. 3. Пространственная модель восстановленной церкви без деформационного шва

При расчете были определены деформации в стенах трапезной от вновь возводимой части здания. Для расчета системы сводов покрытия трапезной необходимо определить смещения узлов, лежащих на опорной линии сводов, в направлениях глобальных осей X, Y, Z. На рис. 4 показаны эпюры перемещений узлов сводов, опирающихся на общую стену.

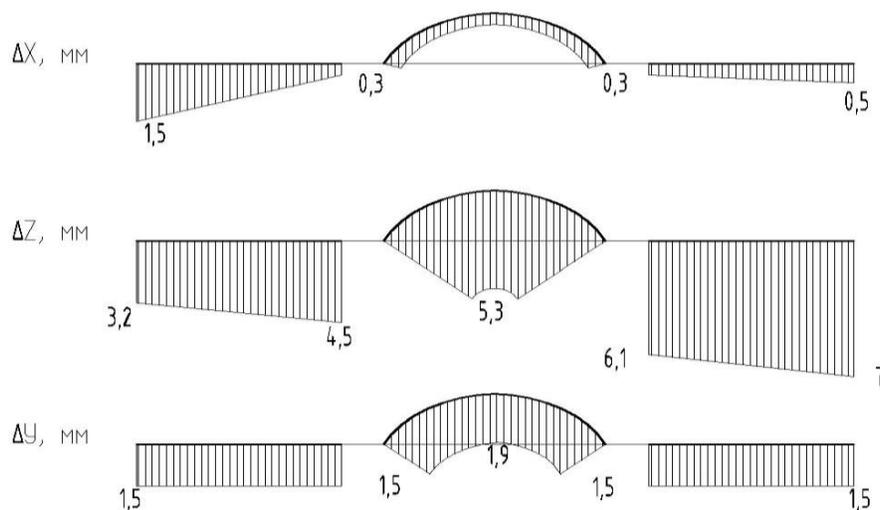


Рис. 4. Перемещения узлов, лежащих на опорной линии сводов общей стены, в направлениях глобальных осей X, Y, Z

В расчете учтены перемещения всех узлов, лежащих на линии опирания системы сводов на стены, в направлении глобальных осей X, Y, Z (рис. 5, 6, 7).

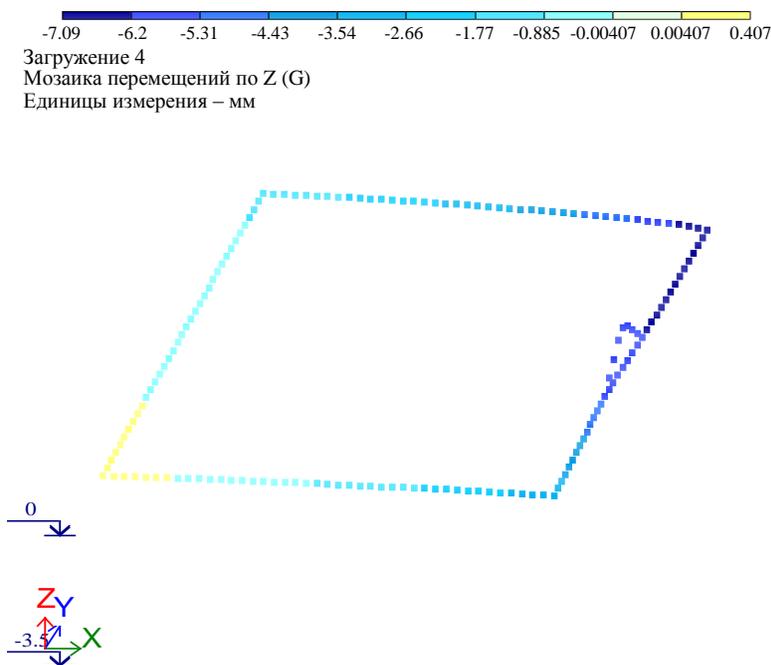


Рис. 5. Перемещения узлов, лежащих на линии опирания системы сводов на стены, в направлении глобальной оси Z

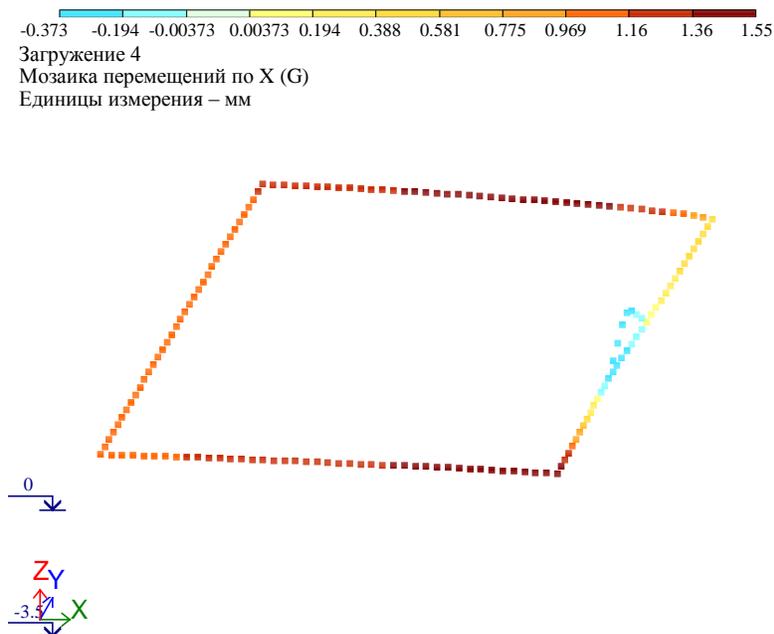


Рис. 6. Перемещения узлов, лежащих на линии опирания системы сводов на стены, в направлении глобальной оси X

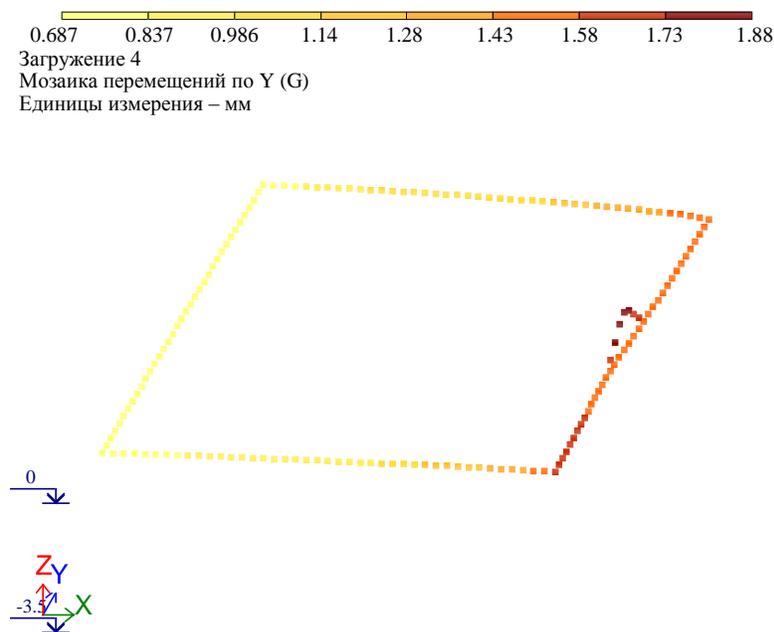


Рис. 7. Перемещения узлов, лежащих на линии опирания системы сводов на стены, в направлении глобальной оси Y

Для анализа напряженно-деформированного состояния системы сводов покрытия трапезной сформирована расчетная модель, показанная на рис. 8. Расчет выполнен на

нагрузку от собственного веса, длительную от утеплителя и на смещения узлов сводов, примыкающих к стенам трапезной по периметру.

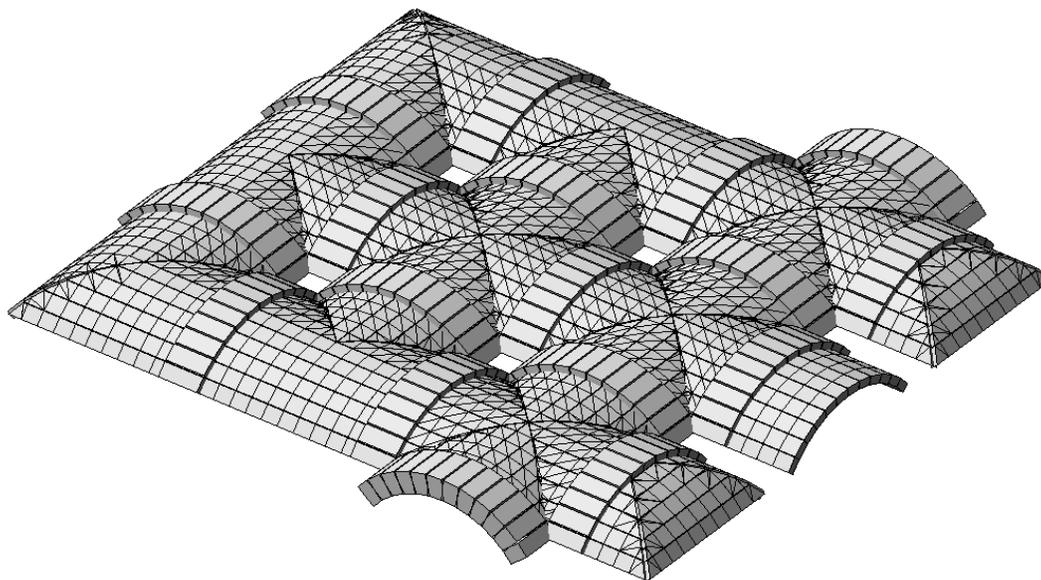


Рис. 8. Пространственная модель системы сводов покрытия трапезной

На рис. 9 показано загрузку смещениями узлов согласно рис. 4, 5, 6, 7.

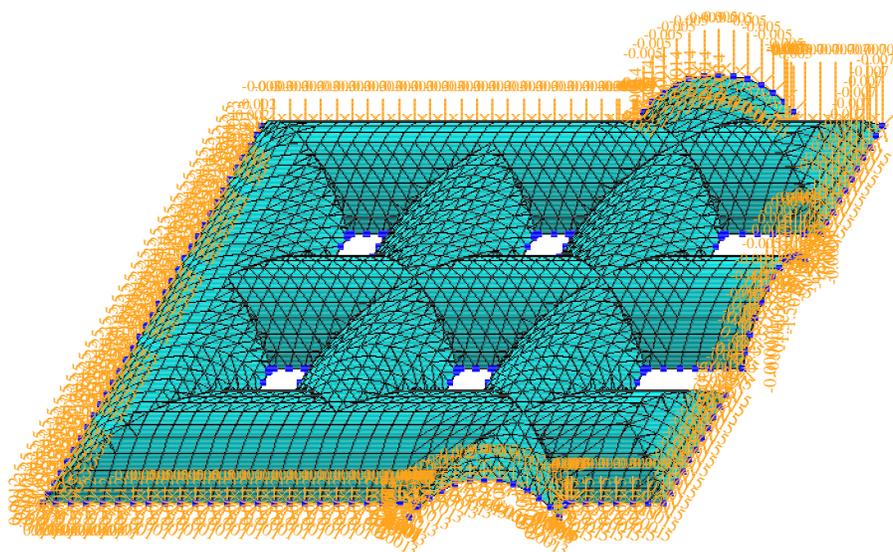


Рис. 9. Загрузка модели смещениями узлов

Ранее выполненные нами исследования [11] позволили сделать вывод о том, что для системы сводов, включающих в себя крестовые, цилиндрические и сомкнутые своды, достаточно выполнить расчет в линейной постановке. В результате расчета получаем деформации (рис. 10) и напряжения в системе кирпичных сводов покрытия трапезной (рис. 11, 12).

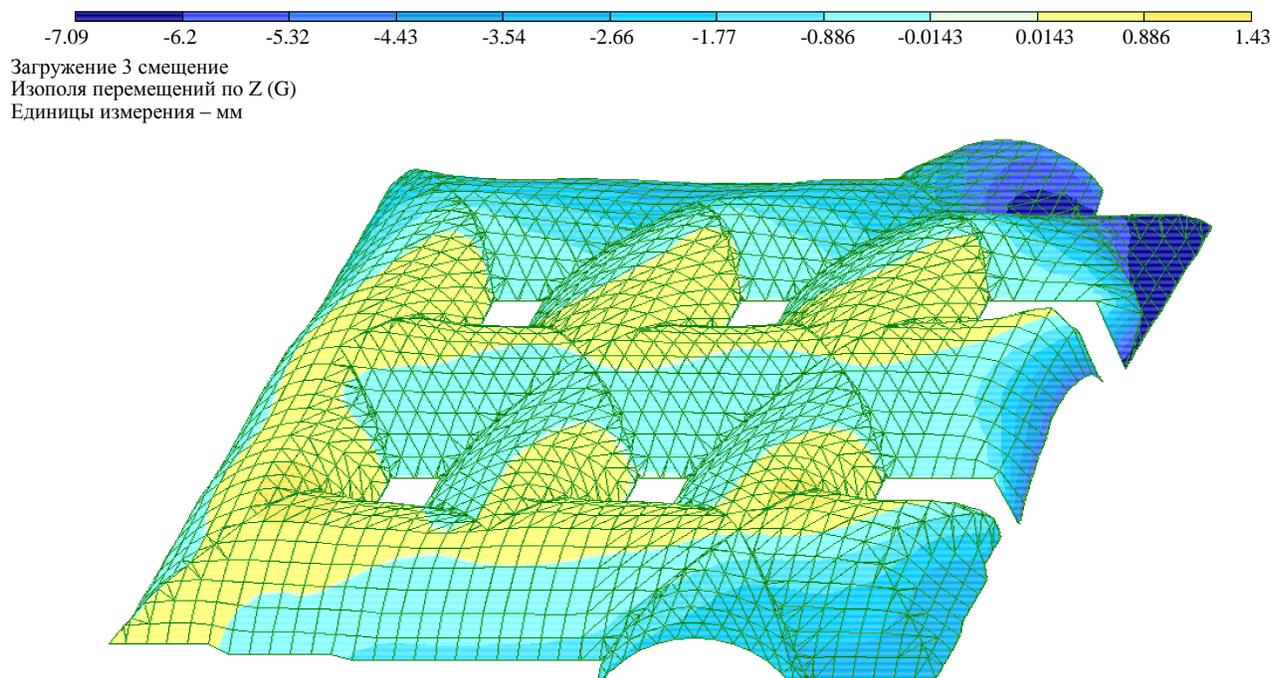


Рис. 10. Вертикальные смещения сводов покрытия трапезной

Результаты расчета покрытия показывают, что даже небольшие смещения (не более 8 мм) вызывают существенные растягивающие напряжения в сводах, особенно в местах примыкания к общей стене.

Рассмотрим конструктивное решение, предусматривающее устройство деформационно-осадочного шва между существующей и вновь возводимой частями здания. В деформационный шов закладывается шпунт из стальных швеллерных профилей на глубину $\frac{1}{4}$ от сжимаемой толщи. В соответствии с данным конструктивным решением была сформирована расчетная модель, фрагмент плана которой показан на рис. 13.

В результате расчета модели с деформационным швом определяем смещения узлов трапезной, лежащих на опорной линии сводов, в направлениях глобальных осей X, Y, Z. Эти смещения малы и находятся в следующих диапазонах: по Z от 0,07 до 0,21 мм, по X от 0,08 до 0,11 мм, по Y от 0,014 до 0,1 мм.

Видим, что наличие деформационного шва практически устраняет влияние вновь возводимой части на состояние существующей, а следовательно, и на напряженно-деформированное состояние системы сводов трапезной.

-2.28 -2.17 -1.81 -1.45 -1.09 -0.725 -0.362 -0.0227 0.0227 0.362 0.725 1.09 1.45 1.81 2.17 2.54 2.9
Загрузка 3 смещение
Изополю перемещений по Nx
Единицы измерения – МПа

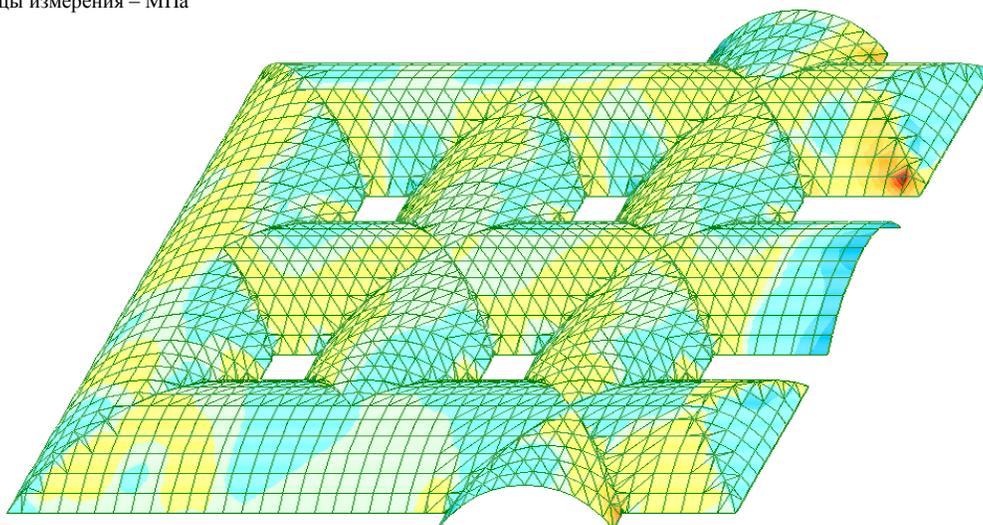


Рис. 11. Напряжения в сводах вдоль оси X

-4.31 -3.77 -3.23 -2.69 -2.16 -1.62 -1.08 -0.539 -0.0293 0.0293 0.539 1.08 1.62 2.16 2.69
Загрузка 3 смещение
Изополю перемещений по Ny
Единицы измерения – МПа

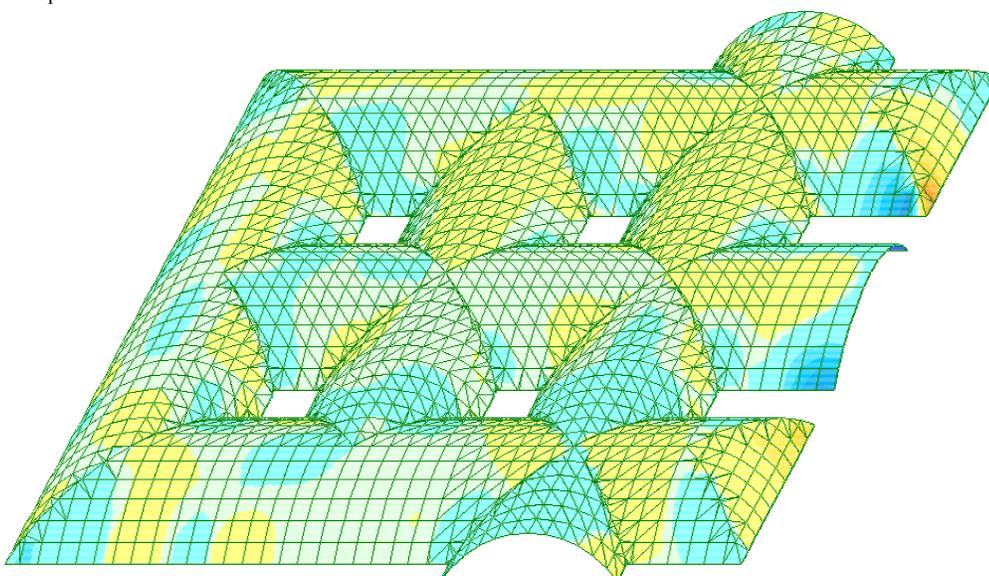


Рис. 12. Напряжения в сводах вдоль оси Y

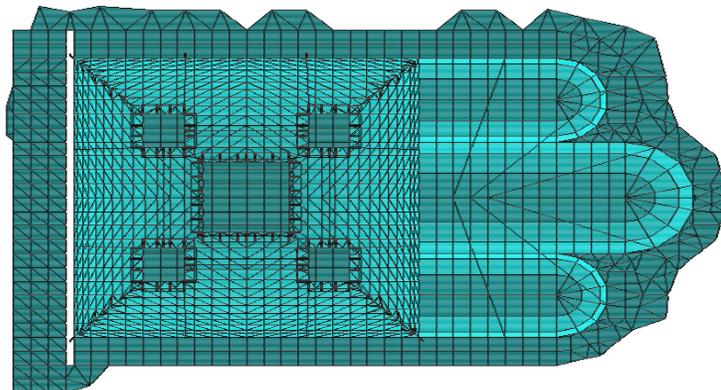


Рис. 13. Фрагмент плана модели с деформационным швом

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Восстановление утраченной части храма (четверика с алтарем) без устройства деформационно-осадочного шва существенно повлияет на напряженно-деформированное состояние системы сводов трапезной, вызывая в них недопустимые растягивающие напряжения. В дальнейшем неизбежно развитие трещин в сводах и их разрушение.

2. Устройство деформационного шва практически устраняет влияние вновь возводимой части на существующую. При этом напряжения в сводах трапезной остаются в допустимых пределах.

3. Для предотвращения негативного влияния вновь возводимой части здания на конструкции существующей части необходимо предусмотреть деформационный шов на глубину $\frac{1}{4}$ сжимаемой толщи грунта (в данном случае на глубину около двух метров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-22-81. Каменные и армокаменные конструкции. М.: ФГУП ЦПП Госстроя России, 2004.
2. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.
3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Минстроя России, 2013. 152 с.
4. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. М.: ГУП ЦПП Госстроя России, 2016. 221 с.
5. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. М.: ФАУ «ФЦС», 2012. 78 с.
6. СП 31-103-99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов. М.: ГУП ЦПП Госстроя России, 1999. 31 с.
7. Бернгард В.Р. Арки и своды // Руководство к устройству и расчету арочных и сводчатых перекрытий. СПб.: Типография Ю.Н. Эрлих, 1901. 362 с.
8. Гуревич Т.М., Салахутдинова П.Ю., Плюснина Н.М. История церкви Святого Ильи Пророка по улице Советской в городе Костроме. Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе. Сборник статей 69-й международной конференции. Т. II. Архитектура и строительство. Караваево: Костромская ГСХА, 2018.
9. Гуревич Т.М., Плюснина Н.М. Варианты конструктивных решений при частичном восстановлении исторических зданий // *Актуальные проблемы науки в*

агропромышленном комплексе: сборник статей 69-й международной конференции.

Т. П. Архитектура и строительство. Караваево: Костромская ГСХА, 2018.

10. Гуревич Т.М., Салахутдинова П.Ю. Особенности расчета каменных сводчатых конструкций // *Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе. Сборник статей 69-й международной конференции.* Т. П. Архитектура и строительство. Караваево: Костромская ГСХА, 2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУРЕВИЧ Татьяна Михайловна – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой строительных конструкций архитектурно-строительного факультета, ФГБОУ ВО «Костромская ГСХА», 156530, Костромская область, Костромской район, пос. Караваево, Караваевская с/а, Учебный городок, дом 34. E-mail: char1943@mail.ru

ЧЕРЕПЕНИН Григорий Валерьевич – студент, обучающийся по программе магистратуры 08.04.01 Теория проектирования зданий и сооружений, 156530, Костромская область, Костромской район, пос. Караваево, Караваевская с/а, Учебный городок, дом 34. E-mail: grihanotpresent@mail.ru

РЫЖОВ Александр Сергеевич – студент, обучающийся по программе магистратуры 08.04.01 Теория проектирования зданий и сооружений, 156530, Костромская область, Костромской район, пос. Караваево, Караваевская с/а, Учебный городок, дом 34. E-mail: fanchelseaman@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Гуревич Т.М., Черепенин Г.В., Рыжов А.С. Моделирование системы сводов покрытия под воздействием смещений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 1 (1). С. 15–25.

UDK 76.5:281.93(063)

INFLUENCE AGAIN THE BUILDING PART OF THE TEMPLE ON THE CONSTRUCTION OF REFECTORY

T.M. Gurevich, G.V. Cherepenin, A.S. Ryzhov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Kostroma State Agricultural Academy»,

(Karavajevo, Kostroma region), E-mail: char1943@mail.ru

Abstract. In this article, the calculation of the models of the temple on a soil basis on the load from the newly erected part. Formed two structure models: with a deformation seam and without a seam. Displacements of the common wall were determined and their influence on system arch the refectory ceiling was assessed.

Keywords: foundation, sediments, deformation seam, tensile stresses, arch, physical nonlinearity, church, spatial model, LIRA CAD, ground mass, design, restoration, reconstruction, brick arch system.

REFERENCES

1. Building code II-22-81. Stone and armored structures. M.: FGUP CPP Gosstroya Russia, 2004.
2. Manual on the design of stone and armored structures. M.: Gosstroya USSR, 1989.
3. Rule book 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. M.: Minstroy Russia, 2013. 152 p.
4. Rule book 22.13330.2016. Foundations of buildings and constructions. M.: FGUP CPP Gosstroya Russia, 2016. 221 p.
5. Rule book 15.13330.2012. Stone and armored structures. M.: FAU «FCS» 2012. 78 p.
6. Rule book 31-103-99. Buildings, constructions and complexes of Orthodox churches. M.: FGUP CPP Gosstroya Russia, 1999. 31 p.
7. Berggard V.R. Arki i svody. *Rukovodstvo k ustroystvu i raschetu arochnykh i svodchatykh perekrytiy* [Arches and vaults. Guide to the device and the calculation of arched and vaulted ceilings]. Saint-Petersburg: Tipografiya Yu.N. Erlikh, 1901. 128 p. (rus)
8. Gurevich T.M., Salahutdinova P.YU., Plyusnina N.M. The history of church of Saint Ilya Prorok on Sovetskaya Street in the city of Kostroma. *Current problems of science in agro-industrial complex. Collection of articles of the 69th international conference. Volume II. Architecture and construction*. Karavayevo: Kostroma GSHA, 2018.
9. Gurevich T.M., Plyusnina N.M. Options for design solutions for the partial restoration of historic buildings. *Current problems of science in agro-industrial complex. Collection of articles of the 69th international conference. Volume II. Architecture and construction*. Karavayevo: Kostroma GSHA, 2018.
10. Gurevich T.M., Salahutdinova P.YU. Features of the calculation of stone vaulted structures. *Current problems of science in agro-industrial complex. Collection of articles of the 69th international conference. Volume II. Architecture and construction*. Karavayevo: Kostroma GSHA, 2018.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

GUREVICH Tatyana Mikhaelovna – Ph.D. of engineering sciences, the associate professor, head of the department of Building construction. Federal state budgetary educational institution of higher education «Kostroma state agricultural academy», 34, Karavajevo, Kostroma region, 156530, Russia.

CHEREPENIN Grigory Valeryevich – undergraduate. Federal state budgetary educational institution of higher education «Kostroma state agricultural academy», 34, Karavajevo, Kostroma region, 156530, Russia.

RYZHOV Alexander Sergeevich – undergraduate. Federal state budgetary educational institution of higher education «Kostroma state agricultural academy», 34, Karavajevo, Kostroma region, 156530, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Gurevich T.M., Cherepenin G.V., Ryzhov A.S. Influence again the building part of the temple on the construction of refectory // Vestnik of Tver state technical university. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 1 (1). pp. 15–25.

УДК 624.131.5

**ТЕХНОЛОГИЯ УСКОРЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В АРКТИЧЕСКИХ ЗОНАХ****В.И. Трофимов***Тверской государственной технической университет
(г. Тверь), E-mail: vitrofa@mail.ru*

Аннотация. Статья касается актуальной проблемы повышения эффективности строительства и эксплуатации автомобильных дорог на мерзлых грунтах. Предлагается комплекс новых оригинальных технических решений по ускоренному и более качественному возведению насыпей из некондиционных грунтов, надежной защите основания насыпи в процессе его подготовки и последующей отсыпки самой насыпи от неконтролируемого оттаивания, а также созданию комфортных условий при выполнении строительных и ремонтных работ в летних и зимних условиях. Новым является то, что дорожную насыпь не отсыпают, а собирают из готовых грунтовых дискретных полос, заготовленных-отсыпанных на геополотнище на технологическом участке и доставленных зимой по снегу на трассу строящейся дороги. При этом предлагается использовать передвижные надувные вагоны-купола, внутри которых можно создавать различные температурные условия для комфортных условий и качественного выполнения работ на трассе строящейся дороги.

Ключевые слова: автомобильные дороги, мерзлые грунты, насыпь, устойчивость, надувной вагон-купол, дискретные полосы.

Обустройство нефтяных и газовых месторождений, а также оборонных объектов, расположенных в Арктических зонах России, в настоящее время связано с привлечением огромных материальных и финансовых ресурсов. Это объясняется суровыми природно-климатическими условиями строительства, повсеместным распространением структурно неустойчивых при оттаивании многолетнемерзлых тонкодисперсных грунтов и отсутствием разветвленной транспортной сети [1].

Таким образом, решение задачи по повышению эффективности строительства дорог в северных районах страны путем разработки и внедрения современных технологий их строительства является актуальной на сегодняшний день.

Известна технология возведения насыпи на мерзлых грунтах путем подготовки основания, последовательной укладки теплоизоляционного слоя и отсыпки слоя высокольдистого грунта пониженной влажности [2].

Недостатком такой технологии является повышенная трудоемкость работ, при этом на ее осуществление влияют погодные условия, что приводит к резкому удлинению сроков строительства и ухудшению качества работ, снижая тем самым эффективность способа в целом.

Известна также технология строительства дорог на болотах, в том числе на промороженных, путем отсыпки насыпи по отдельным полосам [3].

Такая технология позволяет учитывать особенности отсыпки насыпи в зимних и летних условиях, что к тому же повышает ее устойчивость. Однако она отличается сложностью подготовки и укладки различных конструктивных элементов: изоляционных,

армирующих и других в суровых природно-климатических условиях строительства, что снижает эффективность ее использования.

С учетом важности решаемой проблемы (повышения эффективности строительства транспортных сооружений в Арктических зонах) была поставлена задача по разработке технологии ускоренного и более качественного возведения насыпей на мерзлых грунтах.

В основе предлагаемой технологии ускоренного строительства дорог на мерзлых грунтах лежит идея не отсыпки насыпи, а ее сборки из отдельных предварительно подготовленных грунтовых полос [4].

Технология ускоренного строительства дорог на мерзлых грунтах с учетом сохранения мерзлого основания реализуется следующим образом.

Важным этапом в технологической цепочке строительства дорог в северных районах является выполнение работ по сохранению основания в мерзлом состоянии. Как известно, одним из эффективных методов формирования мерзлого основания повышенной несущей способности является увеличение глубины промерзания. С целью ускорения процесса промерзания основания дороги и быстрее освобождения его от снега предлагается соответствующая оригинальная методика. Для этого расстилают отрезки геополотнищ на незамерзшее подготовленное основание трассы дороги, дают выдержку до промерзания основания и покрытия полотнищ снегом, после чего производят освобождение трассы от снега, для этого геополотнище со снегом смещают в сторону от трассы дороги и выполняют отсыпку насыпи дороги или возвращают на прежнее место очищенное геополотнище.

Процесс освобождения основания трассы дороги 1 от снега 2 и процесс промерзания грунта основания трассы дороги 1 можно интенсифицировать, для чего вместо транспортирования геополотнища 3 со снегом выполняют операцию по его загибанию канатом 4 с помощью бульдозера 5 в сторону края трассы дороги до полного его освобождения от снега (рис. 1).

После расчистки трассы 1 запроектированной дороги от снега 2 организуют параллельно ей технологический участок в виде мобильного закрытого помещения, например в виде вагона-купола 6 согласно патенту № 2464372 (рис. 2, 3) [5]. Отсыпают внутри мобильного закрытого помещения вагона-купола 6 дискретную полосу на геополотнище 3 из грунтовой смеси, доставленной автосамосвалом 8 или приготовленной непосредственно на технологическом участке. Далее собирают дорогу из готовых дискретных грунтовых полос 7 путем их транспортирования волоком по снегу с помощью бульдозера 5 на трассу возводимой дорожной насыпи 9.

Образующиеся зазоры между грунтовыми полосами засыпаются песком или фиброгрунтоцементной смесью. Длина и ширина дискретной полосы задаются с учетом прочности полотнища и толщины насыпного слоя грунта.

Структура насыпи может быть дополнительно усилена и при этом повышена ее устойчивость, для чего подготовленные дискретные полосы устанавливают особым образом – в шахматном порядке по ширине дороги относительно оси трассы. В этом случае за счет взаимного перекрыwania стыков дискретных полос повышается сопротивляемость их сдвигу в поперечном направлении.

Эффективность строительства может быть существенно повышена за счет формирования насыпи полной готовности, например с включением теплоизоляционных, водопропускных, вентиляционных и других устройств. Для этого производят сборку полос

с включением этих устройств, после чего подготовленные дискретные полосы транспортируют на трассу строящейся дороги.

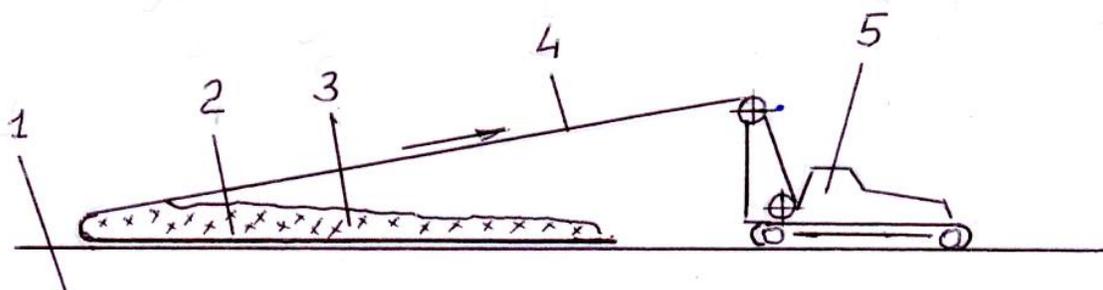


Рис. 1. Схема освобождения трассы дороги от снега

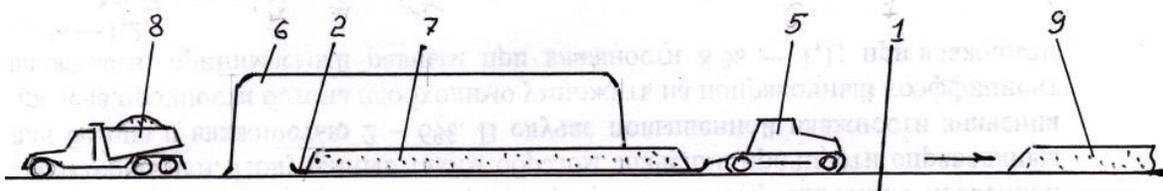


Рис. 2. Технологическая схема подготовки дискретных грунтовых полос и их транспортирования к месту строительства дороги

Учитывая, что дорожную насыпь не отсыпают, а собирают из готовых дискретных полос, заготовленных-отсыпанных на геополотнище на технологическом участке и доставленных зимой по снегу на трассу строящейся дороги, то появляется возможность организации более ускоренного процесса строительства дороги, а также более качественного выполнения работ за счет возможности создания более благоприятных условий при использовании технологического участка.

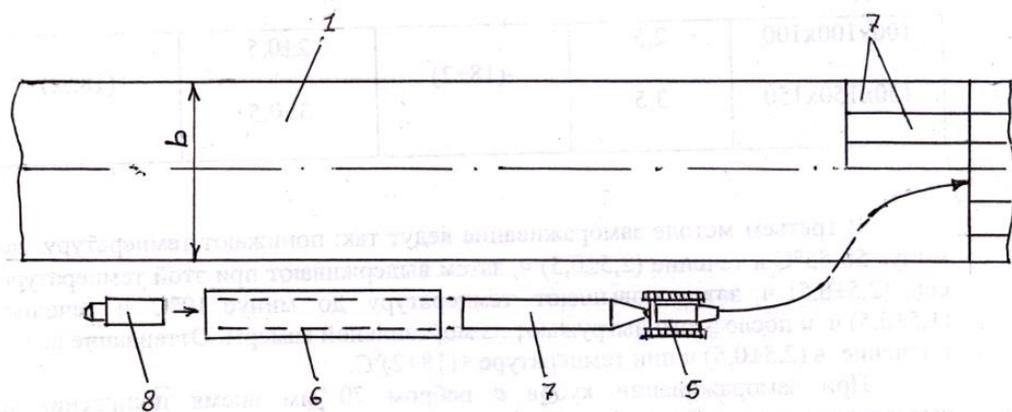


Рис. 3. Технологическая схема сборки насыпи дороги

При этом геополотнище выполняет две функции: как элемент транспортного средства для перемещения дискретной полосы насыпи и как конструктивный элемент, оставаясь в теле будущей насыпи, армирует ее. Кроме этого, первый слой из дискретных полос может служить временной дорогой для отсыпки последующих слоев по общепринятой технологии что повышает эффективность новой технологии.

Формирование – сборка насыпи из отдельных готовых дискретных полос позволяет также целенаправленно формировать структуру насыпи по ее сечению. Например, крайние полосы (как наиболее подверженные разрушению) можно изготавливать из упрочненной грунтовой смеси (например, из фиброгрунтоцементной смеси), а центральные – из обычных или некондиционных грунтов, согласно работе [6].

В случае выполнения технологического участка закрытым в виде мобильного передвижного комплекса с расположением его параллельно основной трассе дороги появляется возможность изготовления отдельных дискретных грунтовых полос в закрытом помещении, т. е. практически в условиях цеха, что позволяет добиться оптимальной структуры насыпи, четко выдержать запроектируемую конструкцию насыпи, упростить технологию укладки различных элементов (геосеток, георешеток и др.). Отпадает необходимость в хранении приготовленного грунта, что особенно важно при работе в сложных природно-климатических условиях Севера.

Кроме этого, если закрыть технологический участок при неблагоприятных условиях, появляется возможность создавать более комфортные условия для рабочих и специалистов для более качественного выполнения различных технологических операций: по приготовлению грунтовой отсыпки; формированию дискретной полосы повышенной устойчивости и др. При расположении технологического участка параллельно основной трассе дороги появляется возможность ее строительства более ускоренными темпами (за счет возможности перемещения готовых дискретных полос в обоих направлениях), что повышает эффективность новой технологии.

Если технологический участок выполняют в виде мобильного передвижного комплекса приготовления и отсыпки грунтовой смеси, то последний может оперативно устанавливаться в необходимых местах по трассе строящейся дороги, что дополнительно повышает эффективность новой технологии ускоренного строительства дорог в сложных природно-климатических условиях.

В заключение можно сказать, что использование в практике строительства на высокольдистых тонкодисперсных грунтах новой технологии ускоренного возведения дорог в комплексе с применением мобильных надувных вагонов-куполов, позволяющих создавать в них необходимые температурные условия для выполнения как строительных, так и ремонтных работ при любых погодных условиях, позволит в конечном счете существенно повысить устойчивость грунтовой насыпи – повысить безопасность работы дороги и сократить сроки строительства, использовать в этом случае круглогодичную технологию, а в целом – повысить эффективность строительства.

Наиболее эффективно предлагаемая технология может быть применена на особо сложных участках строительства дорог в Арктических зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ремнев В.В. Арктическая зона России: перспективы применения новых материалов и технологий для строительства аэродромов и автомобильных дорог // *Транспортная стратегия – XXI век*. 2013. № 23 (4). С. 40–42.

2. СНиП 3.06.03-85. Строительные нормы и правила. Автомобильные дороги. М.: Госстрой СССР, 1985. 89 с.
3. Патент РФ 2293814. *Способ строительства дорог на болотах* / Трофимов В.И.; заявл. 30.08.2005; опубл. 20.02.2007, Бюл. № 2.
4. Патент РФ 2641352 *Способ строительства дорог на мерзлых грунтах* / Трофимов В.И.; заявл. 24.02.2011; опубл. 20.02.2007, Бюл. № 2.
5. Трофимов В.И., Пупенин К.И. Совершенствование технологии строительства автомобильных дорог в Арктических зонах. *Материалы Международной научно-практической конференции: архитектура, строительство, транспорт*. Омск: СиБАДИ, 2015. С. 142–145.
6. Трофимов В.И., Кондратьев В.Г. Геотехнология и строительство на мерзлых органоминеральных грунтах. Тверь: ТвГТУ, 2014. 268 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трофимов В.И. Технология ускоренного строительства автомобильных дорог в Арктических зонах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 1 (1). С. 26–31.

UDK 624.131.5

TECHNOLOGY OF ACCELERATED CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE ROADS IN ARCTIC ZONES

V.I. Trofimov

Tver State Technical University (Tver),

E-mail: vitrofa@mail.ru

Abstract. The article deals with the actual problem of improving the efficiency of construction and operation of roads on frozen soils. A set of new original technical solutions for the accelerated and better construction of embankments from substandard soils, as well as reliable protection of the base of the embankment during its preparation and subsequent dumping of the embankment itself from uncontrolled thawing, as well as creating comfortable conditions during construction and repair works in summer and winter conditions. New is that the road embankment is not poured, but collected from ready-made discrete unpaved lanes, harvested-dumped at a geofoot at a technological site and delivered in winter through the snow to the road under construction. It is proposed to use mobile inflatable dome cars, inside of which it is possible to create different temperature conditions for comfortable conditions and high-quality work on the road under construction.

Keywords: highways, frozen soils, embankment, stability, inflatable dome car, discrete lanes.

REFERENCES

1. Remnev V.V. The Arctic zone of Russia: prospects for the use of new materials and technologies for the construction of airfields and highways. *Transportnaya strategiya – XXI vek*. 2013. No. 23 (4). pp. 40–42. (In Russian).
2. СНиП 3.06.03-85. Строительные нормы и правила. Автомобильные дороги. М.: Госстрой СССР, 1985. 89 p. (In Russian).
3. Patent RF 2293814. Sposob stroitel'stva dorog na bolotah [The method of building roads in the marshes]. Trofimov V.I. Declared 30.08.2005. Published 20.02.2007. Bulletin No. 2 (In Russian).
4. Patent RF 2641352. Sposob stroitel'stva dorog na merzlyh gruntah [The method of building roads on frozen soils]. Trofimov V.I. Declared 24.02.2011. Published 20.02.2007. Bulletin No. 2 (In Russian).
5. Trofimov V.I., Pupenin K.I. Improving the technology of construction of roads in the Arctic zones. *Materials of the International scientific and practical conference: Architecture, construction, transport*. Omsk, 2015. pp. 142–145. (In Russian).
6. Trofimov V.I., Kondrat'ev V.G. Geotekhnologiya i stroitel'stvo na merzlyh organomineral'nyh gruntah [Geotechnology and construction on frozen organic mineral soils]. Tver: TvSTU, 2014. 268 p. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

TROFIMOV Valery Ivanovich – Ph.D. of engineering sciences, associate professor of building products and constructions, Federal state educational institution of the higher education «Tver state technical university» (TvSTU), 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Trofimov V.I. Technology of accelerated construction of automobile roads in arctic zones // *Vestnik of Tver state technical university. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2019. No. 1 (1). pp. 26–31.

УДК 539.3:624.131

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ
МЕРЗЛОГО ТОРФЯНОГО ГРУНТА НА ОСНОВЕ
ОКТАЭДРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ****В.В. Фадеев***Тверской государственной технической университет
(г. Тверь), E-mail: roadstroï@mail.ru*

Аннотация. В работе выполнено детальное моделирование процессов деформирования мерзлого торфяного грунта на основе октаэдрической модели пространственного взаимодействия структурных элементов. Предложенная модель, использующая потенциал межатомного взаимодействия, позволила наглядно проиллюстрировать поведение элементарного объема мерзлого торфа при изменении его напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: октаэдрическая модель, механика деформируемых сред, мерзлые торфяные грунты.

В последние годы появились сложные модели композиционных сред, однако их поведение описывается сложными зависимостями, не отображающими реальных свойств грунта. Отсюда следует, что нужны новые физико-механические модели грунта, позволяющие точнее отобразить процессы его деформирования. Перспективным представляется построение моделей, в основу которых положено то общее, что присуще всем рассматриваемым системам, – их корпускулярное строение. При таком подходе наибольшего внимания заслуживает октаэдрическая модель [1, 2], учитывающая пространственное взаимодействие минимального числа частиц (рис. 1).

Для численного компьютерного моделирования деформации октаэдрической модели был принят потенциал

$$\varphi(r) = Ar^{-m} - Br^{-n} + 4 \cos 45^\circ \left(A \left(r / \sqrt{2} \right)^{-m} - B \left(r / \sqrt{2} \right)^{-n} \right), \quad (1)$$

где A, B, n, m – коэффициенты, которые подбираются по результатам макроэксперимента; r – расстояние между частицами, лежащими на диагонали октаэдра.

Продифференцировав по r и приняв $r_0 = 1$ и $Am = 1$ подгонкой экспериментальных данных, определили показатели степени $n = 5$ и $m = 0,9$ для моделирования потенциала взаимодействия торфяного грунта. Длина диагонали октаэдра в равновесном состоянии данных n и m составила $r_p = 1,366$. В ненагруженном состоянии октаэдрическая модель из шести частиц представляет собой предварительно напряженную конструкцию, у которой три диагонали 1-1, 2-2 и 3-3 растянуты до $r_p = 1,366$ (рис. 2а) с возникающими в них усилиями $N_{11} = 0,3426$, а восемь граней 1-2, 1-3 и 2-3 сжаты до расстояния 0,966 с усилиями $N_{12} = -0,1211$, и система находится в статическом равновесии. Компьютерный эксперимент одноосного сжатия октаэдрической модели показал, что ее жесткость в основном определяется диагоналями 2-2 и 3-3, которые испытывают дополнительное растяжение. Если бы ее не было, то октаэдр сложился бы до положения, в котором

возникнут силы отталкивания между частицами 1-1. Путем компьютерного моделирования удалось представить работу диагоналей 2-2 и 3-3. До начала момента нагружения видно, что они предварительно растянуты до некоторой точки b (рис. 2а), соответствующей начальному равновесному состоянию при $r_p=1,366$.

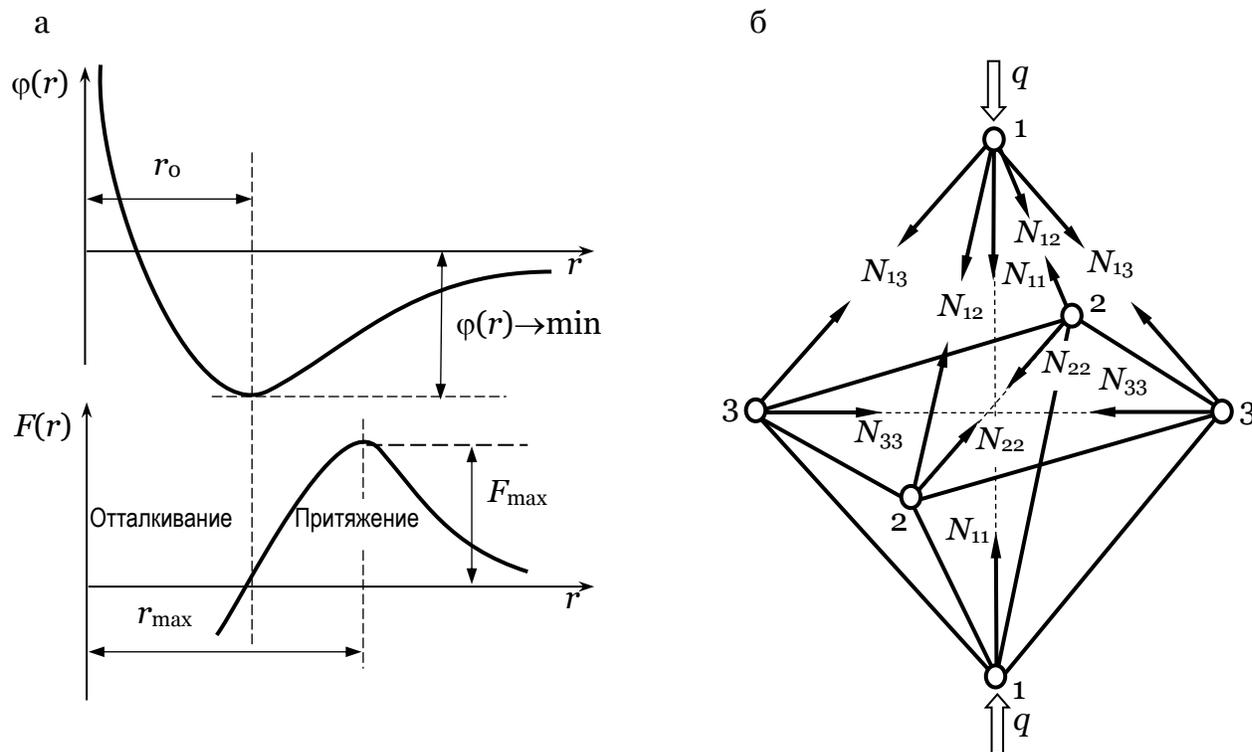


Рис. 1. Октаэдрическая модель торфяного грунта:
 а – потенциальная кривая и сила взаимодействия связи;
 б – стержневая октаэдрическая модель

С увеличением нагрузки зависимость q от продольной деформации ϵ_1 носит линейный характер до момента, когда усилия в диагоналях 2-2 и 3-3 быстро достигают предельного значения $N_{22} = N_{33} = 0,3426$ (рис. 2б), при котором наступает текучесть материала и с дальнейшим увеличением q происходит рост деформаций. При растяжении с ростом q диагональ 1-1 начнет догружаться, а остальные элементы – разгружаться. Зависимость q от ϵ_1 так же, как и при сжатии, линейна до момента, когда усилие N_{11} достигнет максимума. Затем с ростом деформации усилие N_{11} начинает убывать, в результате чего наступают нелинейные деформации.

В результате компьютерного эксперимента на одноосное сжатие (растяжение) были получены следующие критические параметры наступления нелинейных деформаций (табл. 1).

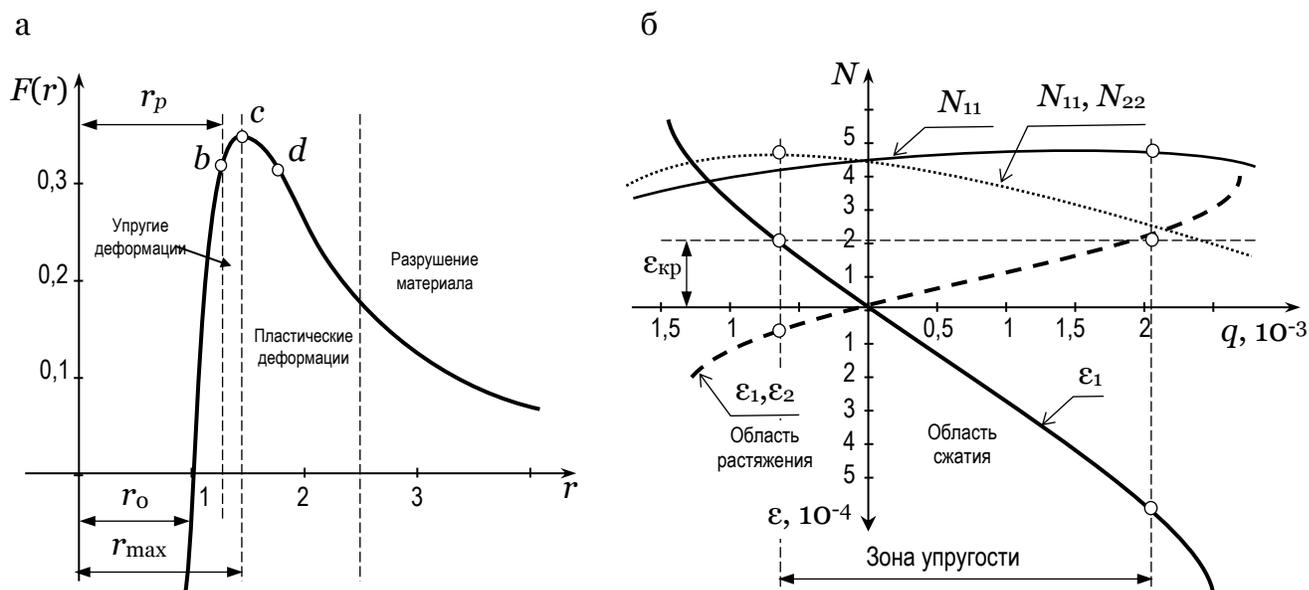


Рис. 2. Компьютерное моделирование деформирования октаэдрической модели:
а – сила взаимодействия между частицами в диагоналях октаэдра;
б – одноосное растяжение (сжатие)

Таблица 1. Критические параметры

Вид нагружения	Относительная деформация		Приложенная нагрузка q	Кoeff. Пуассона μ	Модуль упругости E
	Продольная ε_{11}	Поперечная ε_{22}			
Сжатие	$6,002 \cdot 10^{-4}$	$-2,05 \cdot 10^{-4}$	$2,024 \cdot 10^{-3}$	0,349	0,337
Растяжение	$-2,05 \cdot 10^{-4}$	$7,057 \cdot 10^{-4}$	$6,974 \cdot 10^{-3}$	0,344	0,340

Видно, что полученные значения для упругих деформаций при растяжении (сжатии) имеют хорошее согласие с аналогичными данными на мерзлом торфе [3]. Предел упругости на сжатие приблизительно в три раза больше, чем на растяжение. Модули упругости и коэффициент Пуассона при сжатии и растяжении равны между собой.

Таким образом, моделирование сжатия и растяжения с помощью октаэдрической модели подтвердило, что при малых ε_{11} справедлив закон Гука.

Анализ напряженных состояний при растяжении и сжатии позволил установить, что текучесть материала наступает тогда, когда любая из отрицательных относительных деформаций диагонали октаэдрической модели достигает максимального значения $\varepsilon_{кр} = 2,05 \cdot 10^{-4}$ (см. рис. 2б). При увеличении сжимающей нагрузки продольная деформация резко возрастает, сила сопротивления поперечной диагонали уменьшается и почти не оказывает влияния на процесс деформирования. Отсюда можно сделать вывод, что разрушение пластичного материала не происходит, а хрупкого – только путем отрыва по нормальным сечениям. Для проверки соответствия поведения модели при сложном напряженном состоянии было проведено сопоставление численного эксперимента с испытаниями мерзлого торфа в условиях трехосного сжатия с независимым управлением

главными напряжениями [3]. Испытания проводились по следующей методике. Сначала мерзлый торф подвергался гидростатическому обжатию ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$). Далее боковое обжатие оставалось неизменным $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$, а с помощью вертикального главного напряжения сжатия σ_1 образец доводился до разуплотнения (предельного состояния). В результате опытов было отмечено резкое нарастание вертикальной деформации ε_1 при приближении к предельному состоянию. Одновременно с этим происходило уменьшение относительных поперечных деформаций ε_2 и ε_3 с ростом вертикального напряжения σ_1 (рис. 3а). Проведенное компьютерное моделирование трехосного напряженно-деформированного состояния октаэдрической модели по данной схеме нагружения дало те же зависимости ε - q (рис. 3б).

Из рис. 3 видно, что предельное состояние октаэдра наступает, когда деформация ε_3 достигает предельного значения $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,07$. Аналогичный результат получил и В.А. Миронов $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,055$ [3]. Данное обстоятельство вполне может служить критерием достижения предельного состояния торфяного грунта. Это предположение подтверждается и опытами Л.С. Амаряна [4], проведенными им на низинном торфе при различном всестороннем давлении и скоростях нагружения (табл. 2).

Из таблицы видно, что разрушение образцов также наступает при среднем значении $\varepsilon_3 = 0,064$. Численное моделирование показало, что при достижении поперечной деформации предельного значения $\varepsilon_{\text{пр}}$ усилие в диагонали октаэдра $N_{11} \rightarrow 0$, а отношение $N_{11}/N_{33} \rightarrow \infty$. Это говорит о том, что в предельном состоянии октаэдрическая модель находится в неустойчивом положении равновесия. В данном состоянии, когда главная диагональ октаэдра 1-1 перестает участвовать в работе октаэдра, вся нагрузка перераспределяется на диагоналях 2-2 и 3-3, растянутых до предельного значения. Любое дополнительное вертикальное воздействие приведет к ослаблению оставшихся связей 2-2 и 3-3 и возрастанию вертикальных деформаций.

Таблица 2. Предельные значения основных параметров низинного торфа при дренированных трехосных испытаниях

V мм/мин	σ_3 , МПа	q , МПа	ε_1	$\varepsilon_2, \varepsilon_3$	μ	$E_{\text{об}}$, МПа
0,17	0,15	0,61	0,27	0,059	0,22	2,0
0,17	0,30	0,73	0,31	0,068	0,22	1,0
0,17	0,50	0,84	0,27	0,059	0,22	2,9
0,67	0,30	0,81	0,24	0,064	0,27	2,7

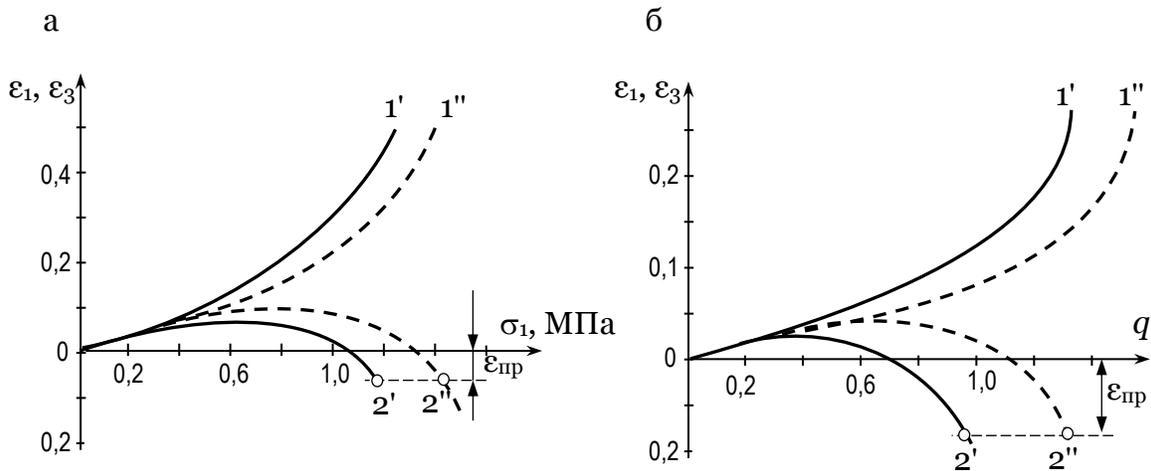


Рис. 3. Зависимость относительных деформаций ε_1 и ε_3 от σ_1 :

а – опыты проф. В.А. Миронова на мерзлом торфе $\sigma_0 = 0,4$ МПа и $\sigma_0 = 0,6$ МПа;
соответственно кривые 1'; 1'' – $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$; 2'; 2'' – $\varepsilon_3 = f(\sigma_1)$;
б – компьютерное моделирование при $\sigma_0 = 0,4$ и $\sigma_0 = 0,6$

На октаэдрической модели были изучены объемные деформации. В опытах фиксировалась объемная деформация октаэдра при гидростатическом обжатии $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. В результате получена однозначная связь между ε_0 - σ_0 , данная зависимость имеет вогнутый характер по отношению к σ_0 , что указывает на стремление объемной деформации к некоторому пределу с ростом всестороннего давления на октаэдрическую модель (рис. 4).

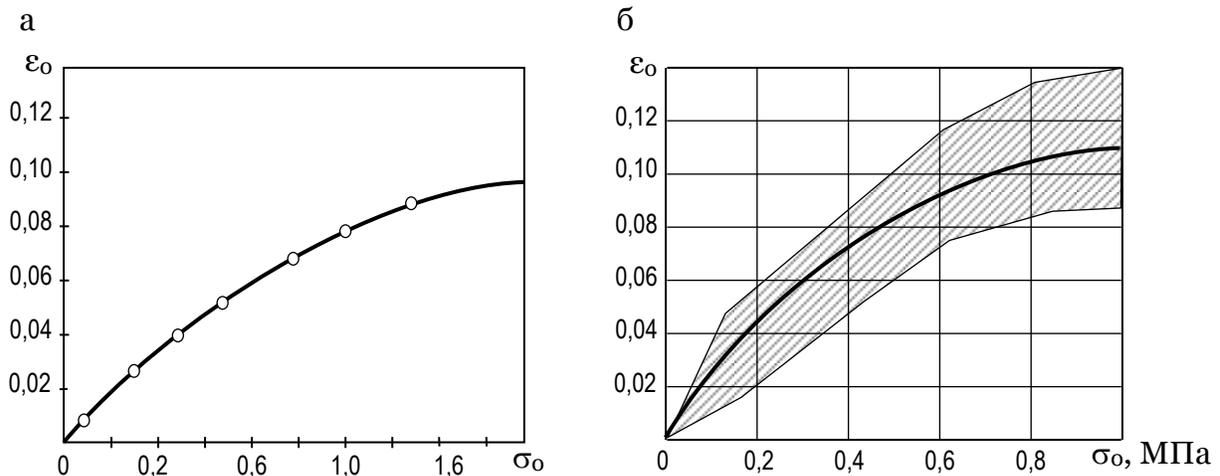


Рис. 4. Зависимость между объемной деформацией ε_0 и всесторонним давлением σ_0 :
а – компьютерное моделирование; б – опыты В.А. Миронова с мерзлым торфом $t = -3^0\text{C}$

Полученная зависимость ε_0 - σ_0 подобна аналогичным опытам В.А. Миронова [3], проведенным на мерзлом торфе $t = -3^{\circ}\text{C}$. В результате моделирования установлено, что отношение усилий в диагонали октаэдра к проекции суммы всех усилий в ребрах на эту диагональ при увеличении σ_0 от 0 до 2 изменяется от 1 до 9. Это говорит, что на процесс объемного деформирования оказывают влияние только усилия в гранях октаэдрической модели и модуль объемной деформации зависит только от величины нарастания усилий в гранях октаэдра.

Таким образом, доказана возможность применения октаэдрической модели для изучения механических процессов в мерзлых торфяных грунтах. На основании модели показано, что разрушение любых сплошных сред происходит путем отрыва по нормальным (для хрупкого) или наклонным (для пластичного материала) сечениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фадеев В.В. Моделирование процессов деформирования торфяных грунтов под жесткими штампами: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 1999. 20 с.
2. Миронов В.А., Лотов В.Н., Фадеев В.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния мерзлых торфяных грунтов с помощью октаэдрической модели // *Материалы научно-практической конференции ученых и производственников с международным участием «Торфяная отрасль России на рубеже XXI: проблемы и перспективы»*. Тверь: ТГТУ, 1999. С. 76–79.
3. Миронов В.А. Теоретические и экспериментальные исследования деформационных процессов в мерзлом и талом торфе: дис. ... докт. техн. наук. Тверь, 1990. 545 с.
4. Амарян Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. М.: Недра, 1969.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ФАДЕЕВ Вадим Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» (ТвГТУ), 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Фадеев В.В. Анализ напряженно-деформированных состояний мерзлого торфяного грунта на основе октаэдрической модели // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 1 (1). С. 32–38.

UDK 539.3:624.131

**THE ANALYSIS OF THE INTENSE DEFORMED STATES
FROZEN PEAT SOIL ON THE BASIS
OCTAHEDRAL MODEL****V.V. Fadeev***Tver State Technical University (Tver),
E-mail: roadstroi@mail.ru*

Abstract. In work detailed modeling of processes of deformation of frozen peat soil on the basis of octahedral model of spatial interaction of structural elements is executed. The offered model using the potential of interatomic interaction allowed to illustrate visually behavior of elementary volume of frozen peat at change of its intense deformed state.

Keywords: octahedral model, mechanics of deformable environments, frozen peat soil.

REFERENCES

1. Fadeev V.V. Modeling of processes of deformation of peat soil under rigid stamps. Cand. Diss. (Engineering). Tver. 1999. 20 p. (In Russian).
2. Mironov V.A., Lotov V.N., Fadeev V.V. Simulation of the stress-strain state of frozen peat soils using an octahedral model // *Materials of the scientific-practical conference of scientists and production workers with international participation "Peat industry of Russia at the turn of XXI: problems and prospects"*. Tver: TvSTU, 1999. pp. 76–79 (In Russian).
3. Mironov V.A. Theoretical and experimental studies of deformation processes in frozen and thawed peat. Doct. Diss. (Engineering). Tver., 1990. 545 p. (In Russian).
4. Amaryan L.S. Prochnost' i deformiruemost' torfyanyh gruntov. [Durability and deformability of peat soil]. M.: Nedra, 1969 (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

FADEEV Vadim Valentinovich – Ph.D. of engineering sciences, the associate professor of the department of roads, foundations and foundations, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Fadeev V.V. The analysis of the intense deformed states frozen peat soil on the basis octahedral model // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2019. No. 1 (1). pp. 32–38.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313.333

НОМОГРАММЫ ПУСКОВЫХ МОМЕНТОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

А.Ю. Соколов

*Тверской государственной технической университет
(г. Тверь), E-mail: Sokolov_A.Yu@mail.ru*

Аннотация. Получены графические зависимости (номограммы) для выбора пусковых моментов при реостатном пуске асинхронных двигателей с фазным ротором. Приведен пример использования номограмм для расчета параметров пусковой диаграммы и пускового реостата конкретного электродвигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, реостатный пуск, пусковая диаграмма, пусковой реостат.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет пускового реостата для асинхронных двигателей с фазным ротором (АД ФР) при значительном начальном пусковом моменте (более 0,70 от максимального момента двигателя M_{MAX}) традиционно принято выполнять графическим методом. Для этого необходимо построить пусковую диаграмму АД ФР, на которой нелинейные механические характеристики двигателя линеаризуются на участке разгона. При этом величины пусковых моментов – начального момента M_1 и момента переключения M_2 – подбираются графически путем последовательных приближений, а сопротивления пускового реостата рассчитываются по методу отрезков. В результате расчет получается трудоемким и неточным [1, 2].

В работах [3, 4] получено математическое описание графического метода, выведены выражения для аналитического расчета пусковой диаграммы АД ФР. Однако применение этих выражений предполагает проведение циклического расчета: задание величины одного из пусковых моментов с последующей проверкой попадания другого в требуемый интервал. В работе [5] предложен аналитический метод расчета пускового реостата АД ФР, в котором реостатные характеристики, так же как и естественная, описываются упрощенной формулой Клосса, то есть учитывается их нелинейность на участке разгона двигателя. Данный метод также требует некоторого числа итераций.

Оптимизация расчета пускового реостата АД ФР может быть достигнута путем использования графических зависимостей, связывающих пусковые моменты M_1 и M_2 и определяющих таким образом возможные варианты реостатного пуска двигателя. В данной работе получены указанные зависимости и приведен пример их использования для расчета пусковой диаграммы и пускового реостата конкретного электродвигателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для построения графических зависимостей, связывающих пусковые моменты АД ФР, использованы известные формулы электромеханики и обобщенное аналитическое выражение, полученное в работе [4]:

$$s_A = s_K \left[\frac{1}{M_1^*} - \sqrt{\left(\frac{1}{M_1^*} \right)^2 - 1} \right], \quad (1)$$

$$s_B = \sqrt[m]{s_A^{m+1}}, \quad (2)$$

$$M_2^* = \frac{2}{\frac{s_B}{s_K} + \frac{s_K}{s_B}}, \quad (3)$$

где s_A и s_B – скольжения АД ФР в точках естественной механической характеристики при моментах M_1 и M_2 соответственно; M_1^* и M_2^* – кратности пусковых моментов M_1 и M_2 , то есть их отношения к максимальному моменту двигателя M_{MAX} ; s_K – критическое скольжение АД ФР; m – число ступеней пускового реостата.

Как видно из выражений (1)–(3), пусковые моменты M_1 и M_2 связаны через параметры запускаемого электродвигателя (максимальный момент M_{MAX} , критическое скольжение s_K) и пускового реостата (число ступеней m). Для исключения M_{MAX} из дальнейшего расчета в формулах (1) и (3) использованы не абсолютные значения пусковых моментов M_1 и M_2 , а их кратности $M_1^* = M_1 / M_{MAX}$ и $M_2^* = M_2 / M_{MAX}$. При этом $M_1^* = 0,70 \dots 0,85$, так как расчет пусковой диаграммы и реостата рассматривается для нелинейных участков механических характеристик АД ФР. Учитывая, что скольжение s_K лежит в диапазоне $0,1 \dots 0,4$, а число ступеней m составляет обычно от 2 до 4, по выражениям (1)–(3) можно рассчитать и построить семейство кривых (номограммы) для кратностей пусковых моментов M_1^* и M_2^* при различных значениях s_K и m .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1–3 приведены номограммы пусковых моментов АД ФР, которые являются двумерным отображением функции нескольких переменных $M_2^* = f(s_K, m, M_1^*)$. Каждая точка на кривых этих номограмм соответствует определенному возможному варианту реостатного пуска двигателя. Номограммы построены для применяемого на практике диапазона $M_1^* = 0,70 \dots 0,90$ при значениях критического скольжения АД ФР $s_K = 0,10 \dots 0,40$ с шагом $0,03$. Если рассматриваемый двигатель имеет другое значение s_K , то есть «не попадает» на кривые номограмм, то задача решается интерполяцией между соседними кривыми.

Полученные номограммы позволяют выбрать число ступеней пускового реостата m и определить ориентировочные значения пусковых моментов АД ФР при заданном количестве ступеней m . Далее пусковые моменты уточняются, рассчитываются остальные параметры пусковой диаграммы на основе аналитических выражений, полученных в [3, 4]. При этом отпадает необходимость в проведении итерационных вычислений.

Для расчета конечных скольжений на всех i -х реостатных характеристиках пусковой диаграммы в работе [4] выведено следующее выражение:

$$s_i = \left(\frac{s_B}{s_A} \right)^i. \quad (4)$$

Сопротивления роторной цепи АД ФР на реостатных характеристиках пусковой диаграммы можно определить через найденные конечные скольжения s_i по методу отрезков (например, при моменте $M = M_2$):

$$R_{2i} = \frac{s_i}{s_B} r_2, \quad (5)$$

где r_2 – сопротивление обмотки ротора АД ФР, которое рассчитывается по паспортным данным электродвигателя, $r_2 = E_{2НОМ} \cdot s_{НОМ} / (I_{2НОМ} \cdot \sqrt{3})$.

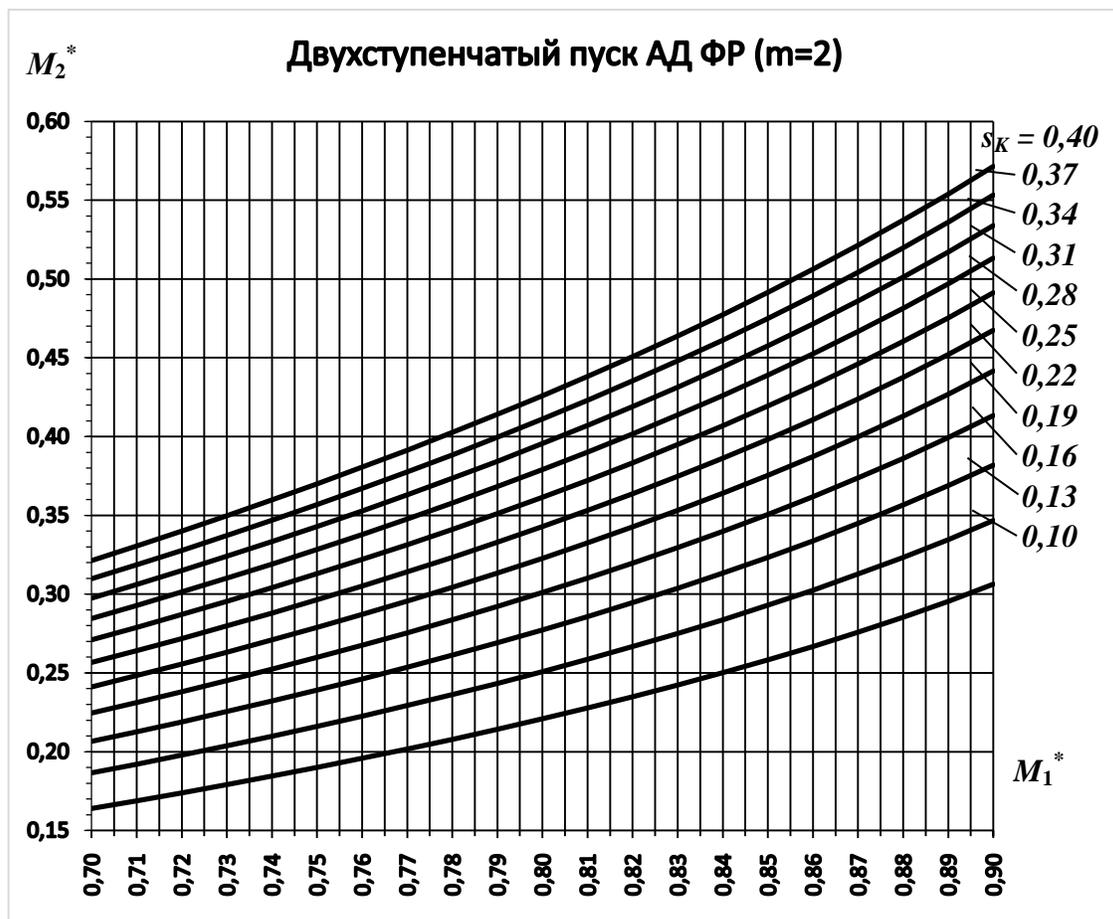


Рис. 1. Номограммы пусковых моментов для двухступенчатого пуска АД ФР

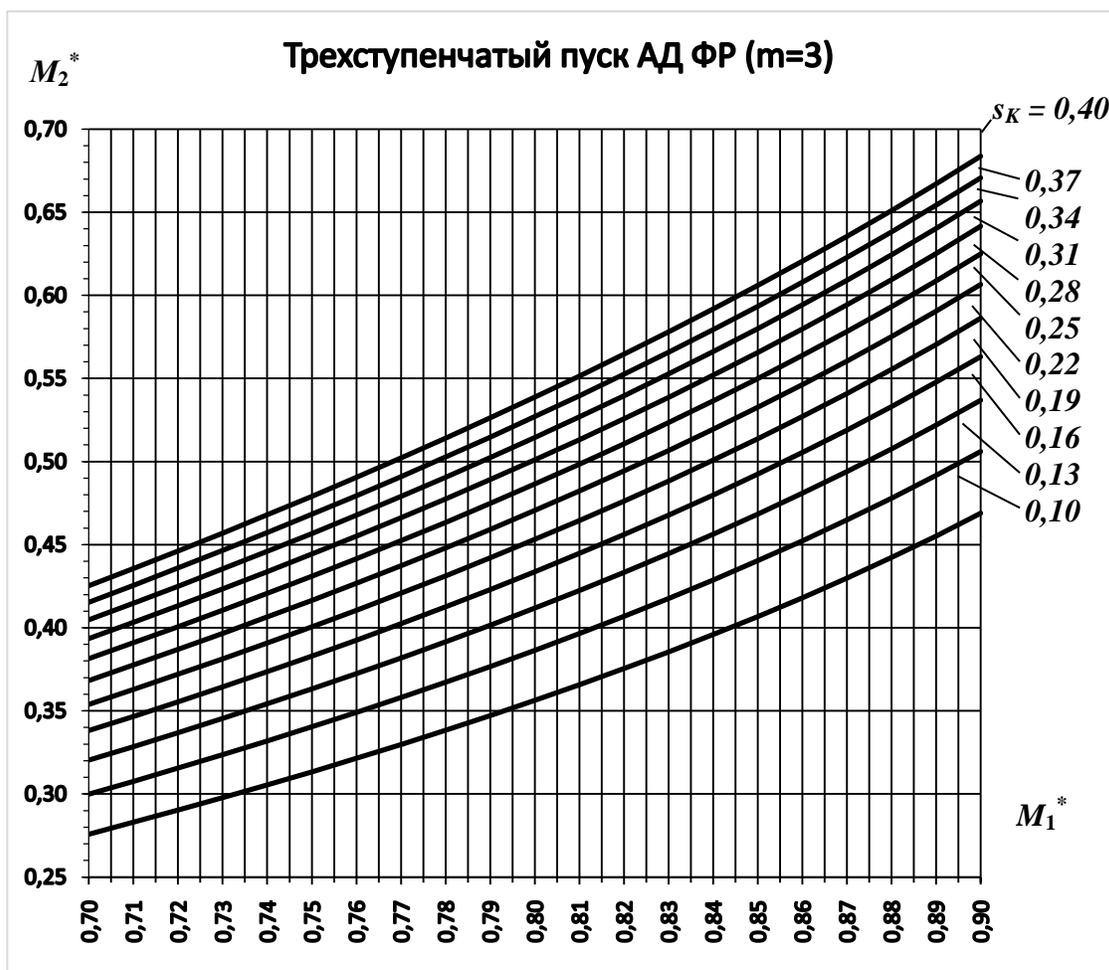


Рис. 2. Номограммы пусковых моментов для трехступенчатого пуска АД ФР

Рассмотрим применение приведенных номограмм на конкретном примере. Пусть требуется рассчитать параметры пусковой диаграммы и пускового реостата для АД ФР типа АК-82-4 с паспортными данными: $P_{НОМ} = 56$ кВт; $\omega_{НОМ} = 1440$ об/мин; $\lambda = 2,6$; $E_{2НОМ} = 480$ В; $I_{2НОМ} = 72$ А. Пуск двигателя происходит при номинальной нагрузке. По известным формулам электромеханики рассчитываем: $M_{НОМ} = 371$ Н·м; $M_{МАХ} = 966$ Н·м; $s_{НОМ} = 0,040$; $s_K = 0,200$; $r_2 = 0,154$ Ом. Величина момента переключения при реостатном пуске должна лежать в рекомендованном диапазоне $M_2 = (1,1 \dots 1,2)M_C$, поэтому кратность момента M_2 в нашем примере составит $M_2^* = (1,1 \dots 1,2) \cdot (M_C / M_{МАХ}) = 0,42 \dots 0,46$. По номограммам рис. 1 видно, что при двухступенчатом пуске двигателя $M_1^* > 0,90$, что недопустимо, поэтому следует рассматривать варианты реостатного пуска в три или четыре ступени. Так, в случае трехступенчатого пуска при $M_2^* = 0,44$ по номограммам (см. рис. 2) приблизительно определяем $M_1^* = 0,80$. Это значение лежит в требуемом диапазоне $M_1^* = 0,70 \dots 0,85$, поэтому окончательно принимаем $M_1^* = 0,80$ и рассчитываем по формулам (1)–(4) остальные параметры пусковой диаграммы: $s_A = 0,100$; $s_B = 0,0464$;

$M_2^* = 0,440$; $M_1 = 773 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_2 = 425 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $s_1 = 0,464$; $s_2 = 0,215$; $s_3 = 0,100$. Далее по выражению (5) вычисляем: $R_{21} = 1,540 \text{ Ом}$; $R_{22} = 0,714 \text{ Ом}$; $R_{23} = 0,332 \text{ Ом}$. При этом сопротивления ступеней пускового реостата АД ФР составят (в порядке их отключения): $r_{2\partial\partial\partial 1} = R_{21} - R_{22} = 0,826 \text{ Ом}$; $r_{2\partial\partial\partial 2} = R_{22} - R_{23} = 0,382 \text{ Ом}$; $r_{2\partial\partial\partial 3} = R_{23} - r_2 = 0,178 \text{ Ом}$. В случае четырехступенчатого пуска двигателя при $M_2^* = 0,44$ по номограммам (рис. 3) принимаем $M_1^* = 0,725$ (700 Н·м). Тогда параметры пусковой диаграммы и сопротивления ступеней пускового реостата АД ФР получаются следующими: $s_A = 0,08586$; $s_B = 0,04648$; $M_2^* = 0,441$ (426 Н·м); $s_1 = 0,541$; $s_2 = 0,293$; $s_3 = 0,159$; $s_4 = 0,086$; $R_{21} = 1,792 \text{ Ом}$; $R_{22} = 0,971 \text{ Ом}$; $R_{23} = 0,527 \text{ Ом}$; $R_{24} = 0,285 \text{ Ом}$; $r_{2\partial\partial\partial 1} = 0,821 \text{ Ом}$; $r_{2\partial\partial\partial 2} = 0,444 \text{ Ом}$; $r_{2\partial\partial\partial 3} = 0,242 \text{ Ом}$; $r_{2\partial\partial\partial 4} = 0,131 \text{ Ом}$.

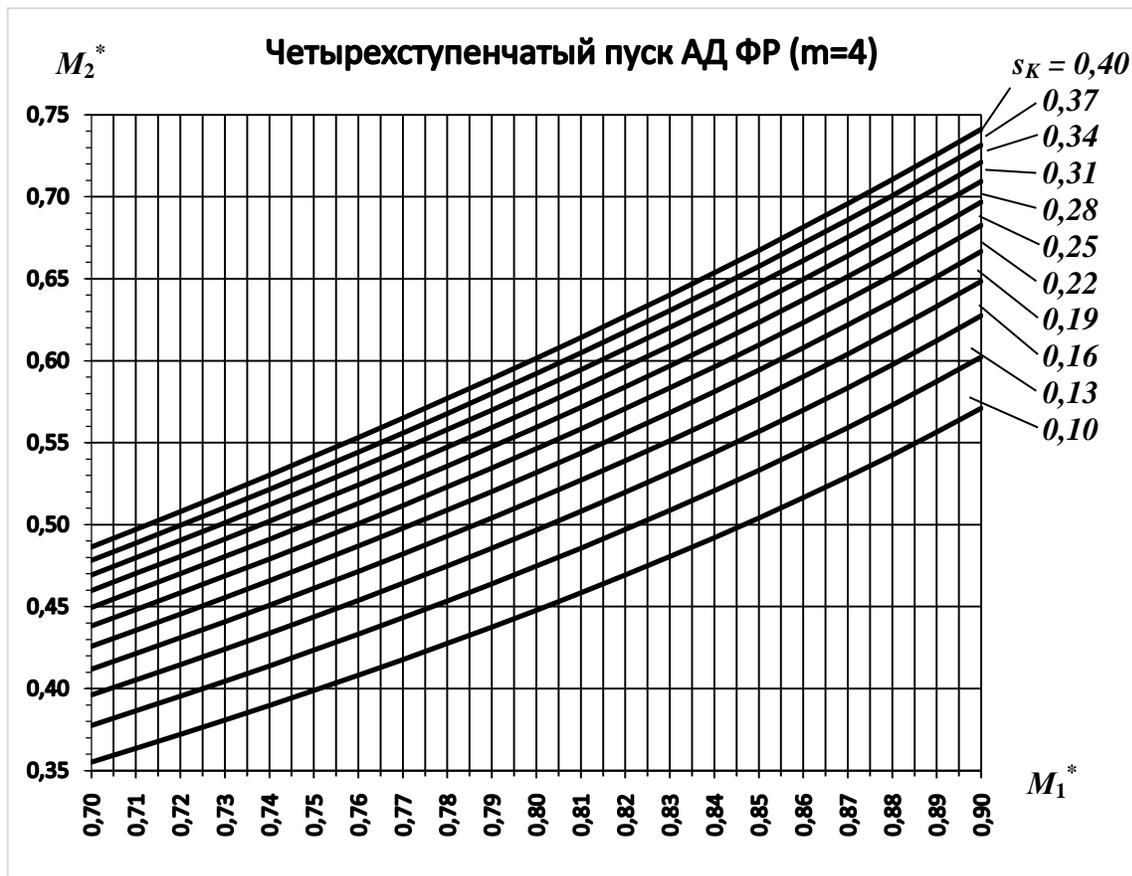


Рис. 3. Номограммы пусковых моментов для четырехступенчатого пуска АД ФР

Высокая точность при использовании полученных номограмм и аналитических выражений подтверждается совпадением результатов расчета при решении аналогичных задач на основе других методов. Так, в таблице представлены результаты решения рассмотренной выше задачи по методу [5]. Сопоставление результатов указывает на достоверность приведенных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные номограммы пусковых моментов совместно с аналитическими выражениями, полученными в [3, 4], позволяют рассчитать пусковой реостат для АД ФР быстро и просто, причем исключаются погрешности графического метода, связанные с неточностями при построении пусковой диаграммы и измерении на ней отрезков.

Результаты расчета пусковой диаграммы и пускового реостата по методу [5]

	Трехступенчатый пуск ($m = 3$)					Четырехступенчатый пуск ($m = 4$)				
Расчетные коэффициенты	$\beta_1 = 0,800; A = 2,000;$ $B = 0,232; \beta_2 = 0,440$					$\beta_1 = 0,725; A = 2,329;$ $B = 0,232; \beta_2 = 0,441$				
Механич. хар-ки:	$S_{нач.i}$	$S_{к.i}$	$S_{кон.i}$	$R_{2.i}$	$r_{2доб.i}$	$S_{нач.i}$	$S_{к.i}$	$S_{кон.i}$	$R_{2.i}$	$r_{2доб.i}$
	-	-	-	Ом	Ом	-	-	-	Ом	Ом
1-я реост.	1,000	2,000	0,464	1,540	0,825	1,000	2,329	0,541	1,793	0,822
2-я реост.	0,464	0,928	0,215	0,715	0,383	0,541	1,261	0,293	0,971	0,445
3-я реост.	0,215	0,431	0,100	0,332	0,178	0,293	0,683	0,159	0,525	0,241
4-я реост.	-	-	-	-	-	0,159	0,369	0,086	0,284	0,130
Естеств.	0,100	0,200	-	0,154	-	0,086	0,200	-	0,154	-

Использование приведенных номограмм и выражений предполагает следующий алгоритм расчета пусковой диаграммы и пускового реостата АД ФР:

1) выбор по номограммам значений пусковых моментов M_1 и M_2 согласно рекомендованным диапазонам $M_1 = (0,70...0,85)M_{MAX}$, $M_2 = (1,1...1,2)M_C$ с учетом параметров электродвигателя, статического момента сопротивления рабочего механизма M_C и числа ступеней пускового реостата m ;

2) расчет параметров пусковой диаграммы по выражениям (1)–(4);

3) расчет сопротивлений пускового реостата на основе выражения (5).

Предложенную методику расчета можно применять при значениях начального пускового момента $M_1 = (0,70...0,85)M_{MAX}$. При меньших значениях момента M_I расчет пускового реостата выполняется в предположении о прямолинейности механических характеристик АД ФР. При этом рекомендуется использовать аналитический метод, аналогичный расчету для двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977. 432 с.
2. Кацман М.М. Электрический привод. М.: Академия, 2005. 384 с.
3. Соколов А.Ю. Аналитический способ расчета пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором с учетом нелинейности его механических характеристик // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. № 2 (30). С. 151–157.
4. Соколов А.Ю. Обобщенные аналитические выражения для расчета пусковой диаграммы асинхронного двигателя с фазным ротором // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. № 2 (32). С. 21–24.
5. Савин А.Г. Аналитический метод расчета пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.* Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 215–218.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СОКОЛОВ Андрей Юрьевич – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Соколов А.Ю. Номограммы пусковых моментов асинхронных двигателей с фазным ротором // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2019. № 1 (1). С. 39–46.

UDK 621.313.333

**NOMOGRAMS OF THE STARTING MOMENTS
ASYNCHRONOUS ENGINES WITH THE PHASE ROTOR****A.Yu. Sokolov***Tver State Technical University (Tver),**E-mail: Sokolov_A.Yu@mail.ru*

Abstract. Graphic dependences (nomograms) for the choice of the starting moments at rheostatic launch of asynchronous engines with a phase rotor are received. The example of use of nomograms for calculation of parameters of the starting chart and a starting rheostat of the specific electric motor is given.

Keywords: the asynchronous engine with a phase rotor, rheostatic start-up, the starting chart, a starting rheostat.

REFERENCES

1. Veshenevskij S.N. Harakteristiki dvigatelej v ehlektroprivode. [Characteristics of engines in the electric drive]. M.: Energiya, 1977. 432 p. (In Russian).
2. Kacman M.M. Elektricheskiy privod [Electric drive]. M.: Akademiya, 2005. 384 p. (In Russian).
3. Sokolov A.Yu. Analytical way of calculation of a starting rheostat for the asynchronous engine with a phase rotor taking into account nonlinearity of its mechanical characteristics // *Vestnik of Tver State Technical University*. 2016. No. 2 (30). pp. 151–157 (In Russian).
4. Sokolov A.Yu. The generalized analytical expressions for calculation of the starting chart of the asynchronous engine with a phase rotor // *Vestnik of Tver state technical university*. 2017. No. 2 (32). pp. 21–24 (In Russian).
5. Savin A.G. Analytical method of calculation of a starting rheostat for the asynchronous engine with a phase rotor // *The mechanics and physics of processes on a surface also is in contact solid bodies, details of the processing and power equipment*. Tver: TvGTU, 2014. pp. 215–218 (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

SOKOLOV Andrey Yuryevich – senior lecturer of department of power supply and electrical equipment, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Sokolov A.Yu. Nomograms of the starting moments asynchronous engines with the phase rotor // *Vestnik of Tver state technical university. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2019. No. 1 (1). pp. 39–46.

УДК 699.187:621:186

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ CONSTEEL

В.В. Окунева, Ю.М. Павлова, А.Н. Макаров

*Тверской государственной технической университет
(г. Тверь), E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru*

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы использования дуговых сталеплавильных печей Consteel в производстве стали. Как показывает мировой опыт использования системы Consteel, данные печи являются альтернативой для высокопроизводительных сталеплавильных производств. Наибольшее влияние на технико-экономические результаты работы данной печи оказывают правильная подготовка шихты, изменение конструкции печи и наличие вспомогательного оборудования, а также усовершенствование технологии производства стали.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, Consteel, плавка стали, ДСП, принцип работы ДСП, эффективность работы ДСП.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире для выплавки стали в основном используют кислородные конвертеры и дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Мартеновский способ производства стали в нынешних условиях неконкурентоспособен, что подтверждается практически полным выводом из эксплуатации мартеновских печей.

Большую часть стали в ДСП выплавляют по одношлаковой технологии, по которой из железоуглеродистого окисленного полупродукта ДСП методами ковшовой обработки получают сталь заданного химического состава и температуры. Наиболее распространенными методами внепечной обработки являются обработка на установке ковш-печь (УКП) и вакуумирование.

Основными задачами, которые стоят перед производителями стали в ДСП, являются повышение производительности и/или снижение производственных затрат, а также обеспечение заданного качества продукции.

Ответственные производители указанные задачи вынуждены решать на фоне постоянно ужесточающихся ограничений в сфере охраны окружающей среды, требований по обеспечению безопасных условий труда и удорожания энергетических и материальных ресурсов [1].

МИРОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕЧЕЙ CONSTEEL

Система Consteel явилась эффективным ответом на возросшие требования, с которыми столкнулись металлурги во всем мире. Эффективное использование доступных видов энергии, удовлетворение жестких требований нормативной документации, связанной с охраной окружающей среды, повышение производительности – таковы некоторые особенности этой промышленной технологии. Для процесса Consteel характерна постоянная загрузка в электродуговую печь (ЭДП) металлосодержащей шихты (тяжеловесного и легковесного лома, чушкового и жидкого чугуна, горячебрикетированного железа и др.), которая предварительно нагревается, и контролируемый

выброс газов. В технологической линии Consteel скрап с помощью кранов загружают на горизонтальные импульсные транспортеры, которые его подают в ванну ЭДП (рис. 1) [2].

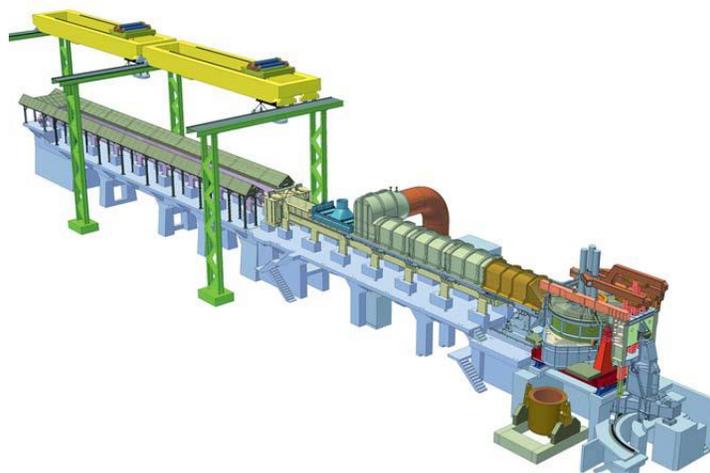


Рис. 1. Схема системы Consteel

Перед поступлением в печь скрап проходит через участок предварительного подогрева с туннельной печью, где нагревается потоком отходящих газов, движущихся во встречном направлении. В ходе непрерывной загрузки ванна с жидким металлом в ЭДП защищена слоем вспененного шлака, и ее температура – или удельный расход энергии – контролируется. Скрап, поступающий в печь, погружается в жидкий металл (оставшийся от предыдущей плавки), который всегда имеет достаточный объем. Электрическая дуга горит под слоем вспененного шлака (рис. 2).

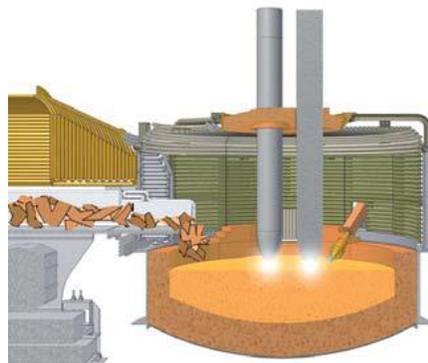


Рис. 2. Загрузка и расплавление предварительно нагретого скрапа

Энергия передается ванне с жидким металлом и шлаку с большей эффективностью, при этом уменьшается излучение в направлении стеновых панелей и огнеупоров. Так как ванна с расплавленным металлом покрыта вспененным шлаком на протяжении всего периода работы печи под током, то электрическая дуга работает в более стабильных условиях, чем в случаях, когда она горит в атмосфере и при работе с более высоким коэффициентом мощности, то есть при максимизации активной мощности по отношению к реактивной.

Основным преимуществом процесса Consteel является экономия электроэнергии, достигаемая благодаря действию следующих факторов:

- предварительному нагреву скрапа;
- отсутствию необходимости открывать крышку печи для загрузки скрапа;
- высокому соотношению времени работы печи под током и длительности плавки от выпуска до выпуска;
- влиянию консистентного вспененного шлака.

Основным преимуществом процесса Consteel является экономия электроэнергии, достигаемая благодаря действию следующих факторов:

- предварительному нагреву скрапа;
- отсутствию необходимости открывать крышку печи для загрузки скрапа;
- высокому соотношению времени работы печи под током и длительности плавки от выпуска до выпуска;
- влиянию консистентного вспененного шлака.

Предварительный подогрев скрапа важен с точки зрения экономии электроэнергии, но за последние 20 лет промышленного применения процесса Consteel с непрерывной загрузкой он продемонстрировал и такие преимущества, как безопасность, сокращение производственных расходов, снижение нагрузки на окружающую среду, комфортные и эргономичные условия работы персонала. Для смежных подразделений предприятия процесс Consteel создает меньше шума и запыленности.

В водоохлаждаемых стеновых панелях, крышке и фурмах печи не возникает утечек, вызываемых горением дуги или ударами скрапа при загрузке, что сводит к минимуму опасность попадания воды в печь. Все это повышает безопасность условий работы по сравнению с типовыми электродуговыми печами. Кроме того, уменьшение фликкер-эффекта (воздействия на питающую электрическую сеть) является важным преимуществом систем Consteel. В процессе Consteel не предъявляются особых требований к металлосодержащей шихте. Потребитель может приобретать скрап низкой плотности, так как отсутствуют ограничения по объему, присущие загрузке коробами. Другим важным и подтвержденным преимуществом является повышенный выход годного, достигаемый в результате более эффективного равновесия металлургических реакций в расплавленном металле благодаря снижению образований FeO. В результате значительно уменьшается стоимость металлошихты. Непрерывная загрузка обеспечивает высокую гибкость процесса, позволяя использовать железо прямого восстановления, горячебрикетированное железо, жидкий и чушковый чугун [3].

Равномерный процесс плавки в ванне печи оказывает меньшее воздействие на такое оборудование, как водоохлаждаемые стеновые панели, крышка, водоохлаждаемые фурмы, а также завалочные краны, которые уже не используются, за исключением редких случаев завалки коробами, например в начале кампании печи. Кроме того, сокращаются объемы ремонтов футеровки и горелок. Новейшие системы Consteel спроектированы с высокой надежностью, высоким уровнем работоспособности (более 99 %), требуют небольшого и несложного ремонтного обслуживания.

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЕ ЦЕХА

Основные причины возросшего в последние годы интереса к технологии Consteel связаны с природоохранными аспектами этой технологии, а также с большим потенциалом повышения производительности ЭДП [2]. Установка печей большой емкости позволяет достигнуть максимальной производительности при оптимизированном расходе энергии, а также обладает рядом преимуществ с точки зрения охраны окружающей среды и технологических параметров. Тем не менее успех таких печей связан в первую очередь с их высокой производительностью.

Система Consteel хорошо известна своими возможностями повышения производительности ЭДП при неизменной мощности трансформаторов. Полученные в ходе наблюдений фактические технико-экономические показатели свидетельствуют, что при традиционном процессе плавки в ЭДП удельная производительность (отнесенная к 1 МВт энергии) составляет 1,5 т/ч на 1 МВт электроэнергии и может быть повышена до 1,8 т/ч при большом потреблении химической энергии. Для ЭДП, работающих по технологии Consteel, эти показатели составляют, соответственно, 2,3 и 2,5 т/ч на 1 МВт; последний показатель достигается при интенсивном и оптимизированном вдувании кислорода. Применение печей большой емкости позволяет повысить эти показатели и достигнуть еще более высокой производительности. Цеха с такими печами имеются на заводах компаний «GJ Steel» (Таиланд), «Dongbu» (Южная Корея), «Tokyo Steel» (Япония).

Например, компания «Tokyo Steel» (Япония) имеет в своем составе крупнейшую в Японии ЭДП (масса плавки 300 т, потребляемая мощность 170 МВт), созданную в 2010 г., и крупнейшую в мире систему Consteel. Производительность сталеплавильного цеха завода Курашики достигает 360 т/ч. Транспортёр для подачи скрапа в печь имеет номинальную производительность (отнесенную к одной плавке) 300 т, а суммарная емкость печи составляет 420 т, т. е. эта печь работает с массой жидкого остатка примерно 120 т [2, 4].

АНАЛИЗ РАБОТЫ КРУПНЕЙШЕЙ ПЕЧИ CONSTEEL

На заводе компании «GJ Steel» (Таиланд) уже более 10 лет эксплуатируется крупная печь Consteel, что позволило накопить надежные показатели ее работы, хорошо поддающиеся сопоставлению. Эти показатели свидетельствуют о преимуществах крупнотоннажных печей Consteel, прежде всего о высокой производительности при производстве непрерывнолитых слябов. Основные параметры и технико-экономические показатели этого агрегата представлены в табл. 1 [2].

Таблица 1. Техничко-экономические показатели печи Consteel ЭДП-300 на заводе «GJ Steel» (Таиланд)

Основные параметры	Значение
1	2
Масса плавки, т	187
Общая емкость ЭДП, т	300
Фактическая масса жидкого остатка, т	95–100
Диаметр печи, мм	8 500

Окончание табл. 1

1	2
Диаметр электродов, мм	610
Длина завалочного транспортера, м	75
Длина транспортера печи предварительного нагрева, м	40
Ширина транспортера, мм	2 200
Состав шихты	
Чушковый чугун, %	35–40
Пакетированный легковесный лом, %	30
Тяжеловесный лом № 2, %	20–25
Горячебрикетированное железо, %	10
Производственные показатели	
Время работы печи под током, мин	50
Время работы с отключенным током, мин	15
Производительность, тгс*/ч	173
Расход электроэнергии, кВт.ч/тгс*	363
Расход кислорода, м ³ /тгс* (при н. у.)	36
Расход природного газа	0
Расход вдуваемого углерода, кг/тгс*	14
Температура разливки, °С	1 630

* Тонн годных слэбов.

На заводе «GJ Steel» выплавляют углеродистую низколегированную сталь в 187-тонной печи. Общая емкость печи равна 300 т, т. е. печь работает с остатком жидкой стали массой примерно 100 т, что составляет около 53,5 % массы разливаемой плавки. Скрап подается транспортером шириной 2 200 мм, имеющим общую длину примерно 115 м. Оперативная практика загрузки шихты имеет следующие особенности:

верхним слоем загружают чушковый чугун, чтобы обеспечить максимальную эффективность предварительного нагрева;

тяжеловесный лом загружают на транспортер нижним слоем, чтобы не замедлять скорость транспортера;

средняя скорость подачи скрапа 4,5–5,5 м/мин, что примерно соответствует частоте вибрации 49 Гц.

Инжекционная система печи состоит из двух подвижных фурм, расположенных на боковой стенке со стороны шлакового окна. Через каждую фурму в печь вдувают 5 000 м³/ч кислорода и до 100 кг/мин порошкообразного угля. Фурмы наклонены под углом 33° к горизонтальной плоскости и под углом 15° к оси печи. Половина шлакообразующих добавок вносится через четвертое отверстие в крышке, расположенное между транспортером и эксцентричным выпускным отверстием в поде печи, а вторая половина – загрузочным транспортером. Общее количество вносимого известняка

составляет примерно 35–50 кг, а доломита – 15 кг на 1 т годных слябов. Индекс основности шлака IB2 поддерживают в пределах 2–2,5. Печь Consteel обеспечивает производительность на уровне 173 т/ч годных слябов, причем при пониженном расходе электрической и химической энергии по сравнению с традиционной электродуговой печью с верхней загрузкой и без потребления природного газа. Средняя фактически потребляемая активная мощность во время работы печи под током равна 81,5 МВт, что соответствует удельной производительности 2,12 т/ч на 1 МВт. Такие высокие показатели в большой степени достигаются благодаря работе печи с жидким остатком.

В последнее время наметилась тенденция к увеличению болота в ДСП. В табл. 2 приведены данные по массе болота для печей, введенных в эксплуатацию в разные годы [2].

Таблица 2. Доля болота в ДСП, введенных в эксплуатацию в разные годы и в печах Consteel

ДСП с верхней загрузкой, годы				Consteel
1970–1980	1980–1990	1990–2000	2000–н. в.	
13,6	17,7	23,9	22,0	53,0

Из табл. 2 видно, что на протяжении последних 20 лет большинство производителей стали работают по технологии, предусматривающей долю болота 22–24 %. На печах Consteel вне зависимости от года ввода в эксплуатацию этот показатель составляет около 53 %, что обусловлено особенностями технологии. Однако в последнее время все чаще появляются публикации о благоприятных последствиях от увеличения жидкого остатка на традиционных печах.

Как видно, основные тенденции развития конструкции традиционных ДСП заключаются в увеличении высоты стен для загрузки всей шихты в один прием, максимизации параметров ЭПУ для ускорения процессов нагрева и обезуглероживания, увеличении объема ванны для работы с большим болотом [5].

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПЕЧИ С ЖИДКИМ ОСТАТКОМ

Чтобы понять роль жидкого остатка («болота»), в частности в процессе Consteel, следует рассмотреть основы механизма теплопередачи в этом процессе. Как уже упоминалось, скрап предварительно нагревается в туннельной печи и, достигнув ЭДП, падает в ванну с расплавленным металлом, температуру которого поддерживают на уровне 1 560–1 580°С [6].

Производительность действующих печей Consteel, работающих на шихте, составленной из скрапа, ниже, чем у сверхмощных ЭДП нового поколения. Это утверждение основано на весьма упрощенных допущениях и по существу противоречит, например, результатам практической эксплуатации большинства систем Consteel в США, удельная производительность которых превышает 2 т/ч на 1 МВт электроэнергии. Еще более общая оценка дана в обзоре, подготовленном фирмой Tenova по показателям работы 20 систем Consteel с ЭДП переменного тока; из этого обзора следует, что в 100 % случаев работы с «болотом», превышающим 46,5 % массы разливаемой плавки, удельная производительность печи – более 2 т/ч на 1 МВт электроэнергии. Стоит отметить, что в этом случае не расходуется химическая энергия. Хорошо известно, что использование природного газа и других горючих газов весьма ограничено в современных системах

Consteel, хотя такая практика является общепринятой на современных высокопроизводительных ЭДП с загрузкой шихты коробами [2].

Сопоставление этих двух технологических вариантов по общему потреблению энергии в МВт (не только электроэнергии) указывает на еще большие преимущества процесса Consteel по такому показателю, как удельная производительность (т/ч/МВт). Руководствуясь только теоретическими принципами теплопередачи, можно сделать заключение, что передача энергии излучением более эффективна при расплавлении скрапа, чем конвекция. В процессе Consteel происходит поддержание постоянного удельного расхода энергии на протяжении всего периода расплавления, из чего можно сделать вывод – масса скрапа в «болоте» – или, в более общем случае, жидкая фракция – является функцией плотности скрапа [7].

Возвращаясь к табл. 1, можно отметить, что 70 % загрузки составляет металлосодержащая шихта сравнительно высокой плотности (чушковый чугун, тяжеловесный скрап, горячбрикетированное железо) и только 30 % – легковесный скрап. Кроме того, хорошие характеристики огнеупорной футеровки зоны жидкого остатка и энергичное перемещение металла в ванне печи указывают на высокие значения коэффициента теплопередачи. Удельная производительность печи составляет около 2,12 т/ч на 1 МВт, но не достигает более высокого уровня вследствие того, что в металлошихте используют горячбрикетированное железо, которое является очень энергоемким компонентом шихты.

В печи ЭДП-300, по сравнению с работающей в России на Ашинском металлургическом заводе печью Consteel ДСП-120со, дуги полностью погружены в шлак и металл. В печи ЭДП-300 дуги передают тепловую мощность излучением близлежащим объемным зонам металла и шлака, нагревая их до температуры 2 500–3 000°С. Перегретые зоны ванны металла и шлака теплопроводностью передают тепловую энергию шихте, находящейся в ванне металла, до ее полного расплавления. При полностью погруженных в металл и шлак в печи ЭДП-300 дугах КПД дуг может повышаться до 0,78, а удельный расход электроэнергии снижаться до 360 кВт·ч/т, что соответствует показателям ЭДП обычной конструкции ДСП-120об [3,6,7].

ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА

Одним из современных направлений совершенствования процесса Consteel является предварительный нагрев шихты. В настоящее время преимущества предварительного нагрева реализованы лишь на 30 %, и в этом направлении имеются большие потенциальные возможности. Исследования, выполненные на различных туннельных печах предварительного нагрева, показали, что туннели с уменьшенной высотой предпочтительны благодаря повышенной передаче энергии излучения скрапу в процессе предварительного нагрева и соответствующему снижению расхода энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы Consteel работают в крупнейших сталеплавильных цехах с электродуговыми печами в Европе, Китае, Японии, Бразилии, Южной Корее, Юго-Восточной Азии и Вьетнаме. Это доказывает, что такая технология является альтернативой для высокопроизводительных сталеплавильных цехов. Использование практики плавки с жидким остатком очень важно для достижения хороших производственных результатов. Жидкий остаток металла размером около 55–60 % массы

выпускаемой из печи плавки представляется оптимальным с точки зрения максимизации производительности и повышения энергетической эффективности. Таким образом, для наиболее эффективного использования ЭПУ в конкретных условиях необходимо специализировать конструкцию ДСП и соотношение основных параметров установки – мощности трансформатора и наибольшей интенсивности кислородной продувки.

Наибольшее влияние на технико-экономические результаты эксплуатации ДСП, как было показано, оказывает тип преимущественно используемой шихты и способ ее загрузки. Появление ДСП с высокими стенами для однократной загрузки шихты, представленные модификациями действующих ДСП с увеличенным рабочим пространством или объемом ванны, позволяет увеличить долю болота, конструировать ДСП, специально предназначенные для работы с жидким чугуном [8].

Обзор и анализ современного состояния электрометаллургического производства, приведенный выше, позволяет выделить наиболее перспективные, на взгляд авторов, направления развития по группам.

1. Подготовка шихты:

сортировка лома по химическому составу и насыпной плотности позволяет полностью автоматизировать процесс выплавки полупродукта в печи, оптимизировать грузопотоки в цехе, сократить расход энергии;

очистка лома от неметаллических загрязнений способствует сокращению расхода энергетических и материальных ресурсов;

шредерная обработка легковесного лома позволяет повысить насыпную плотность и предотвратить попадание цветных и прочих примесей в печь.

2. Конструкция агрегатов:

изменение геометрических размеров ванны. Увеличение глубины ванны ДСП позволит снизить тепловые потери, увеличить мощность перемешивания ванны в период углеродного кипения;

изменение конструкции корпуса печи. Увеличение высоты стен на традиционных ДСП позволяет загружать шихту в один прием. Уменьшение высоты стен на печах с непрерывной загрузкой шихты позволит сократить тепловые потери;

применение ДСП постоянного тока позволяет снизить негативное влияние на питающую сеть, улучшить перемешивание металла. Однако это оправдано только при уравнивании капитальных затрат с ДСП переменного тока, которое может произойти при повышении требований к ЭПУ как потребителю, оказывающему значительное влияние на питающую сеть;

специализация ЭПУ по шихте и способу ее загрузки.

3. Вспомогательное оборудование:

непрерывная загрузка шихты позволяет сократить продолжительность бестоковых операций, повысить равномерность энерготехнологического режима плавки, снизить негативное влияние на питающую сеть;

стационарные комбинированные продувочные устройства позволяют вводить в ДСП большое количество энергии, стоимость которой зачастую ниже, чем электрической, обеспечивать высокую управляемую скорость обезуглероживания металла, вспенивать шлак для повышения теплового КПД электродугового нагрева;

оборудование для предварительного нагрева лома обеспечивает сокращение расхода энергии на плавку, возможность частичной утилизации энергии отходящих газов;

вынос газовых горелок из рабочего пространства печи позволяет повысить температуру предварительного нагрева лома, исключить образование вредных веществ в устройствах предварительного подогрева, повысить эффективность использования тепла продуктов горения;

устройства для принудительного перемешивания ванны. Учитывая наметившуюся тенденцию к увеличению болота, позволят повысить скорость расплавления лома, компенсировать недостаток углерода в шихте при выплавке полупродукта из лома;

непрерывное измерение параметров ЭПУ обеспечит систему автоматизированного управления необходимыми входными данными, повысит «прозрачность» процесса.

4. Технология производства стали:

полная автоматизация процесса выплавки полупродукта. Возможна только при наличии достоверной математической модели процесса, стандартизации шихты и непрерывного измерения параметров ЭПУ. Позволит значительно повысить производительность процесса за счет оптимизации основных параметров плавки – скоростей нагрева и обезуглероживания металла;

большое болото позволяет снизить негативное влияние на питающую сеть, выровнять энерготехнологический режим плавки;

применение жидкого чугуна позволяет повысить чистоту стали по остаточным примесям, снизить расход электроэнергии, при наличии мощной системы кислородной продувки – увеличить производительность печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белковский А.Г., Кац Я.М., Краснянский М.В. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций // *Черная металлургия*. 2013. № 3. С. 72–88.
2. Маркоцци М., Гацзон М. Совершенствование предварительного нагрева и важность работы электродуговых печей большой емкости с жидким остатком // *Металлургическое производство и технология*. 2011. № 2. С. 8–20.
3. Макаров А.Н., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Исследование теплообмена и КПД дуг в дуговых сталеплавильных печах с обычной и конвейерной загрузкой шихты // *«Энергетические системы» III Международная научно-техническая конференция*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. С. 39–43.
4. Вайт А. Система Consteel завоевывает признание // *Новости рынка металлов*. 2011. № 5.
5. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора. Новосибирск: НГУ, 2010. 346 с.
6. Макаров А.Н., Павлова Ю.М., Кузнецов А.В. Расчет КПД дуг в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel. *Энергоресурсосбережение в промышленности. Сборник научно-практических трудов*. Тверь: ТвГТУ. Вып. 6. С. 44–51.
7. Макаров А.Н., Павлова Ю.М., Окунева В.В. Плавка стали в дуговой печи Consteel и методы ее улучшения. *Энергоресурсосбережение в промышленности. Сборник научно-практических трудов*. Тверь: ТвГТУ. Вып. 6. С. 56–64.
8. Макаров А.Н., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Способ плавки стали в дуговой сталеплавильной печи Consteel. *Энергоресурсосбережение в промышленности. Сборник научно-практических трудов*. Тверь: ТвГТУ. Вып. 6. С. 64–70.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – аспирант кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Окунева В.В., Павлова Ю.М., Макаров А.Н. Эффективность работы дуговых сталеплавильных печей Consteel // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 1 (1). С. 47–57.

UDK 699.187:621:186**OVERALL PERFORMANCE OF ARC STEEL-SMELTING
CONSTEEL FURNACES****V.V. Okuneva, Yu.M. Pavlova, A.N. Makarov***Tver State Technical University (Tver),**E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru*

Abstract. In this article questions of use of arc steel-smelting Consteel furnaces in production of steel are considered. As shows international experience of use of the Consteel system – these furnaces are an alternative for high-performance steel-smelting productions. The greatest influence on technical and economic results of operation of this furnace the correct preparation of furnace charge, change of a design of the furnace and existence of the service equipment are, and also improvement of the production technology became.

Keywords: the arc steel-smelting furnace, Consteel, melting became, the principle of operation of the arc steel-smelting furnace, overall performance of the arc steel-smelting furnace.

REFERENCES

1. Belkovsky A.G., Katz Ya.M., Krasnyansky M.V. The current state and trends of development of the production technology became in chipboard and their designs // *Chernaya metallurgiya*. 2013. No. 3. pp. 72-88 (In Russian).
2. Markozzi M., Gazzon M. Improvement of preliminary heating and importance of operation of high-capacity arc furnaces with the liquid rest // *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya*. 2011. No. 2. pp. 8–20. (In Russian).
3. Makarov A.N., Okuneva V.V., Pavlova Yu.M. A research of heat exchange and efficiency of arches in arc steel-smelting furnaces with usual and conveyor loading of furnace charge.

"Power systems" the III International scientific and technical conference. Belgorod: BGTU of V.G. Shukhov. 2018. pp. 39–43 (In Russian).

4. White A. The Consteel system wins recognition // *Novosti rynka metallov*. 2011. No. 5.
5. Tuluyevsky Yu.N., Zinurov I.Yu. Innovacii dlya dugovyh staleplavil'nyh pechej. Nauchnye osnovy vybora [Innovations for arc steel-smelting furnaces. Scientific bases of the choice]. Novosibirsk: NSU, 2010. 346 p. (In Russian).
6. Makarov A.N., Pavlova Yu.M., Kuznetsov A.V. Calculation of efficiency of arches in arc steel-smelting furnaces of a usual design and Consteel. *Energoresursosberezheniye in the industry. Collection of scientific and practical works*. Tver: TvSTU. Issue 6. pp. 44–51 (In Russian).
7. Makarov A.N., Pavlova Yu.M., Okuneva V.V. Melting of steel in the arc Consteel furnace and methods of her improvement. *Energoresursosberezheniye in the industry. Collection of scientific and practical works*. Tver: TvSTU. Issue 6. pp. 56–64 (In Russian).
8. Makarov A.N., Okuneva of V.V. Pavlova Yu.M. The method of melting became in the arc steel-smelting Consteel furnace. *Energoresursosberezheniye in the industry. Collection of scientific and practical works*. Tver: TvSTU. Issue 6. pp. 64–70 (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

OKUNEVA Victoria Valeryevna – Ph.D. of engineering sciences, the associate professor of power supply and electrical equipment, Federal state educational institution of the higher education «Tver state technical university» (TvSTU), 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

PAVLOVA Yulia Mikhaelovna – the graduate student of department of power supply and electrical equipment, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of engineering sciences, professor, the head of the department of power supply and electrical equipment, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Okuneva V.V., Pavlova Yu.M., Makarov A.N. Overall performance of arc steel-smelting consteel furnaces // *Vestnik of Tver state technical university. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2019. No. 1 (1). pp. 47–57.

УДК 44.31.03:53.07.00:45.43.00

**ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИОНИЗИРОВАННЫХ
И НЕИОНИЗИРОВАННЫХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ****А.Н. Макаров***Тверской государственной технической университет
(г. Тверь), E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru*

Аннотация. Осуществлен анализ методов расчета теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных металлургических печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок электростанций. Все существующие методы расчета теплообмена в электродуговых, факельных печах, топках, камерах сгорания основаны на законе теплового излучения твердых тел Стефана – Больцмана. Однако излучение ионизированных и неионизированных газовых объемов не подчиняется закону Стефана – Больцмана и погрешность расчетов составляет 70–90 % и более. Изложены открытые автором законы теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов и их практическое использование для расчета и совершенствования теплообмена и конструкций электродуговых и факельных металлургических печей, топок, паровых котлов электростанций, камер сгорания газотурбинных установок электростанций.

Ключевые слова: теплообмен, тепловое излучение, газовые объемы, факел, печи, топки, камеры сгорания.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении XX века российские и зарубежные исследователи, конструкторы использовали в основном зональный, численный методы и метод сферических гармоник для расчета теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ), газотурбинных двигателей (ГТД), жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) [1–3].

Сущность зонального и численного метода, используемого российскими и зарубежными учеными, заключается в делении излучающих поверхностей и газовых объемов на 1 млн – 1,5 млн ячеек, элементарных объемов dv_i (рис. 1) излучающих поверхностей и замене непрерывного распределения температур и физических параметров кусочно-непрерывным.

На рис. 1 изображен объем камеры топки парового котла в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $axbxc=20x10x50$ м энергоблока мощностью 800 МВт. Расход топлива, мазута в топке парового котла 180 т/ч при номинальной нагрузке энергоблока. В результате замены интегро-дифференциальные уравнения лучистого теплообмена заменяются аппроксимирующей системой алгебраических уравнений, из решения которых на компьютере определяются искомые температуры зон и тепловые потоки между зонами:

$$\sum_{i=1}^{m+n} a_{ij} T_i^4 + \sum_{i=1}^m V_{ij} c_i t_i - c_j t_j \sum_{i=1}^m V_{ji} + \sum_{i=1}^n \alpha_{kij} F_{ij} (t_i - t_j) + \sum_r V_{ojr} c_{or} t_{or} = 0; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} a_{ij} T_{ij}^4 + \sum_{i=1}^n \alpha_{kij} F_{ij} (t_i - t_j) + k_i F_j (t_n - t_j) = 0,$$

где a_{ij} – коэффициент радиационного теплообмена; V_{ij} – расход топочной среды из i -й в j -ю зону; c – теплоемкость; α_{kij} – коэффициент теплоотдачи конвекцией; F_{ij} – площадь соприкосновения объемной и поверхностной зон; T_i, t_n – температура.

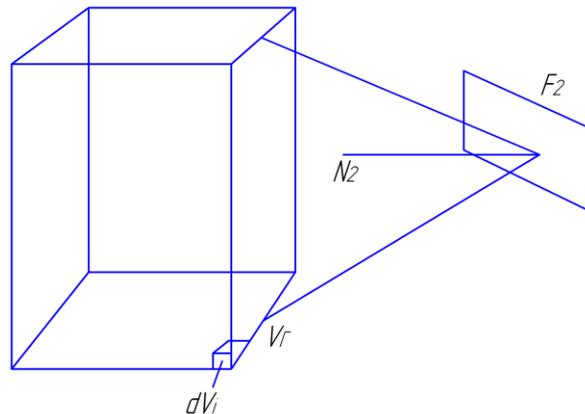


Рис. 1. Излучение элементарных газовых объемов на расчетную площадку F_2

Метод сферических гармоник заключается в решении уравнения P1 аппроксимации теплового излучения [4, 5]:

$$\nabla(\Gamma \nabla G) + 4\pi n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p (a + a_p) G = 0, \quad \Gamma = \frac{1}{3(a + a_p + \sigma_p)}, \quad (2)$$

где ∇ – оператор набла; a, a_p – соответственно коэффициент поглощения газа, частиц; σ – коэффициент рассеяния частиц; n – показатель преломления среды; G – падающее излучение; T – температура; E_p – излучение частиц.

В существующих методах расчета зональным, численным, P1 аппроксимации, Монте-Карло, Шварцшильда-Шустера, Эддингтона, Чандасекара, сферических гармоник используется закон теплового излучения абсолютно черного тела (АЧТ), твердых тел Стефана – Больцмана и большой массив приближенных значений температур и оптических коэффициентов зон, погрешность расчетов составляет 70–90 % и более, так как излучение газовых объемов не подчиняется закону Стефана – Больцмана [4, 5]. Таким образом, на протяжении XX века факел оставался «черным ящиком». Решение проблемы зашло в тупик. Погрешность расчетов компенсировалась результатами многочисленных дорогостоящих трудоемких многолетних экспериментальных исследований теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания и корректировкой расчетных данных опытными данными. Например, на разработку, экспериментальные исследования, испытания ГТД АЛ-31Ф для самолета СУ-27 ушло 10 лет. Большую часть времени ввиду отсутствия надежных расчетных методик занимали испытания ГТД и отдельных его составляющих (компрессора, газовой турбины, камеры сгорания) до полного разрушения с

последующей корректировкой расчетных данных и заменой отдельных деталей и узлов и материала для их изготовления (рис. 2).



Рис. 2. Газотурбинный двигатель

При испытаниях было создано и разрушено 50 полноразмерных опытных экземпляров АЛ-31Ф. Затраты на создание двигателя составили 3,5 млрд долларов.

Например, разработка и изготовление силовых трансформаторов, генераторов, мощностью 300–1 000 МВт составляет 1–1,5 года, так как методики расчета, основанные на фундаментальных законах физики, законах Ома, Кирхгофа, Джоуля – Ленца, обладают высокой точностью и после конструирования и изготовления нет необходимости проводить многочисленные многолетние экспериментальные испытания, а необходимо проводить одно испытание, после которого отправлять изделие потребителю. Аналогично – открытие фундаментальных законов физики, законов теплового излучения газовых объемов топок, печей, камер сгорания позволит значительно сократить финансовые и материальные ресурсы, трудоемкость и сроки создания КС ГТД, ГТУ и ЖРД.

ПРОБЛЕМА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА

В ФАКЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ, ТОПКАХ, КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

На протяжении всего XX века до открытия автором законов теплового излучения газовых объемов отсутствовала информация о следующих процессах, происходящих в факельных топках паровых котлов, печах, камерах сгорания ГТУ, ГТД, ЖРД:

- о величине потоков излучения факела на периферии и по высоте топок;
- способах выравнивания тепловых потоков по периметру и по высоте топок;
- влиянии горизонтальной части факела на прогорание узлов горелок;
- причинах неравномерности отложений внутри труб по периметру и высоте топок;
- распределении мощности факела по высоте топок;

распределении потоков излучений по высоте, ширине, длине нагреваемых изделий;

способах выравнивания тепловых потоков по поверхностям нагрева;

влиянии параметров факела – длина, угол наклона к поверхности нагрева, угол раскрытия, расположение изотерм – на скорость и равномерность нагрева изделий в печах;

необходимости воздействия на параметры факела для повышения производительности печей;

величине и распределении тепловых потоков излучения факела по поверхности нагрева КС ГТУ, ГТД, ЖРД;

месторасположении в КС максимальных тепловых потоков излучения факела для организации эффективного охлаждения данной поверхности;

способах организации максимального срока службы пламенной трубы и о влиянии на срок службы распределения мощности по длине и ширине факела;

распределении мощности излучения факела по объему КС ГТУ, ГТД, ЖРД;

величине тепловых потоков излучения факела на поверхности нагрева летательных аппаратов космического и оборонного значения.

Ни один из существующих в России и промышленно-развитых странах численных и других методов расчета не давал ответы на эти вопросы. Данные о локальном теплообмене получали многолетними трудоемкими опытно-экспериментальными исследованиями теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания ГТУ, ГТД, ЖРД.

ОТКРЫТИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В конце XX века, в 1996–2001 годах, автором открыты законы теплового излучения газовых объемов факелов. В дипломе на научное открытие с целью соблюдения многовековых научных традиций и авторского права законы излучения газовых объемов факелов названы законами Макарова [5–11].

Рассмотрим излучение части факела (рис. 3), одного из его цилиндрических газовых объемов. Цилиндрический изотермический газовый объем F излучает на расчетную площадку $F2$. Размер площадки $0,5 \times 0,5$ м.

Диаметр цилиндрического объема $D = 3$ м, высота $h = 3$ м. Допустим, в газовом объеме факела одновременно излучают $15 \cdot 10^{15}$ атомов, равномерно заполняющих объем. Атомы, заполняющие объем, моделируются шарами (рис. 3). Перпендикуляр N_2 в центр A площадки $F2$ проходит через центр симметрии объема точку O и делит ось O_1O_2 пополам между верхними и нижними основаниями цилиндрического объема. Расстояние $AO = r = 3$ м. Мощность, выделяющаяся в цилиндрическом газовом объеме факела P_F при сгорании топлива, $P_F = 42$ МВт, коэффициент поглощения газовой среды $k = 0,162$ [5].

Разделим изотермический цилиндрический газовый объем на три равных по объему цилиндрических тела 1, 2, 3 (рис. 3, вид сверху). В каждом из коаксиальных изохорных изотермических цилиндрических газовых объемов $F1$, $F2$, $F3$ расположено $15 \cdot 10^{15} / 3 = 5 \cdot 10^{15}$ излучающих атомов и выделяется мощность $42/3 = 14$ МВт. Ось цилиндрических газовых объемов 1–3 O_1O_2 представляет собой цилиндрический газовый объем $F4$ бесконечно малого диаметра. Законы теплового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов представлены ниже [5–11].

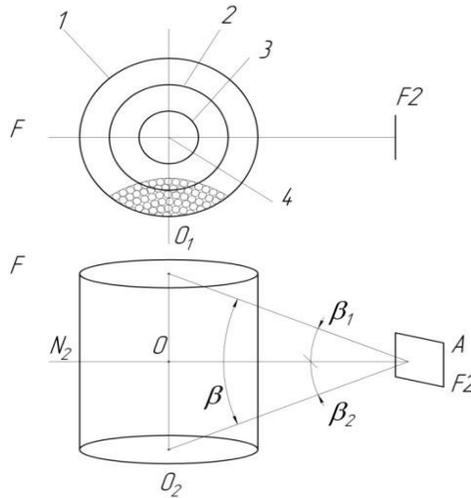


Рис. 3. Излучение цилиндрического газового объема на расчетную площадку $F2$

1-й закон: (открыт автором в 1982 году) плотность потока теплового излучения, падающего от цилиндрического газового объема на расчетную площадку q_{FF2} , прямо пропорциональна мощности P_F и локальному угловому коэффициенту излучения газового объема на расчетную площадку q_{FF2} и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения газовой среды k , средней длине пути лучей от излучающих атомов газового объема l и площади расчетной площадки $F2$:

$$q_{FF2} = \frac{\phi_{FF2} P_F}{F2 \cdot e^{kl}} \quad (3)$$

В выражении (3) сложность представляет расчет углового коэффициента ϕ_{FF2} и средней длины пути l лучей. В зональном и численном методах газовые объемы факелов разбивают на 1 млн – 1,5 млн ячеек, прямоугольных параллелепипедов бесконечно малых размеров. Угловой коэффициент излучения j -го параллелепипеда, заполненного газом, на площадку dF находится с помощью трехкратного интегрирования по ширине a_j , глубине b_j , высоте h_j j -го параллелепипеда:

$$\phi_{jdF} = \iiint_{a_j b_j h_j} \frac{\cos \alpha_i \cos \beta_i}{2\pi r_j^2} \quad (4)$$

где α_i – угол между перпендикуляром к грани параллелепипеда и кратчайшей прямой r_j до площадки dF ; β_j – угол между перпендикуляром к площадке dF и прямой r_j .

Решение трехкратного интеграла (4) представляет собой сложную математическую задачу, которая в XX веке не решена. Для расчета средней длины пути лучей от ячеек до расчетной площадки необходимо решение трехкратного интегрального уравнения, аналогичного (4). Решение в XX веке не найдено. Позволяют рассчитать теплообмен в факельных печах, топках, камерах сгорания следующие законы коаксиальных цилиндрических газовых объемов, открытые автором в 1996–2001 годах.

2-й закон: средняя длина пути лучей l_1, l_2, l_3 от множества излучающих атомов каждого из n изохорных изотермических коаксиальных цилиндрических газовых объемов до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию l от оси симметрии объемов до расчетной площадки:

$$l_1 = l_2 = l_3 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \right) = l. \quad (5)$$

Для цилиндрических газовых объемов 1–3 (см. рис. 3) средняя длина пути лучей l_1 , l_2 , l_3 от $5 \cdot 10^{15}$ атомов каждого из цилиндрических объемов 1–3 до расчетной площадки $F2$ равна среднеарифметическому расстоянию от $5 \cdot 10^{15}$ атомов каждого из объемов 1–3 до расчетной площадки $F2$ и она же равна среднеарифметическому расстоянию l от оси симметрии O_1O_2 до расчетной площадки $F2$:

$$l_1 = l_2 = l_3 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{5 \cdot 10^{15}} l_i}{5 \cdot 10^{15}} \right) = l = 3,12 \text{ м}. \quad (6)$$

Любой исследователь может проверить истинность второго закона теплового излучения цилиндрических газовых объемов, вписав в каждый из цилиндрических газовых объемов 1–3, например, по 100 или более изохорных сфер и определив с помощью простой компьютерной программы «Компас» на компьютере среднеарифметическое расстояние от центров сфер каждого из трех цилиндрических газовых объемов до расчетной площадки $F2$ – оно равно для всех трех случаев 3,12 м.

3-й закон: локальные угловые коэффициенты, плотности потоков излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов F , $F1$, $F2$, $F3$, $F4$ на расчетную площадку $F2$ равны:

$$\varphi_{F1F2} = \varphi_{F2F2} = \varphi_{F3F2} = \varphi_{F4F2}; \quad (7)$$

$$q_{F1F2} = q_{F2F2} = q_{F3F2} = q_{F4F2}. \quad (8)$$

Результат (8) получили, выполняя расчеты по формуле (3) и принимая, что в коаксиальном цилиндрическом газовом объеме малого диаметра 4 расположено $5 \cdot 10^{15}$ атомов.

Рассчитаем локальные угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов 1–3 φ_{F1F2} – φ_{F3F2} на расчетную площадку $F2$ (см. рис. 3), а также локальные угловые коэффициенты излучения цилиндрического газового объема 4 φ_{F4F2} бесконечно малого диаметра на расчетную площадку $F2$ по выведенным аналитическим путем расчетным формулам [5]:

$$\begin{aligned} \varphi_{F1F2} = \varphi_{F2F2} = \varphi_{F3F2} = \varphi_{F4F2} &= \frac{F_2}{2 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot h} [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)] = \\ &= \frac{0,25}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 3 \cdot 3} \left[\frac{52}{57} + \sin 52^\circ \cos 0^\circ \right] = 0,00215. \end{aligned} \quad (9)$$

Любой исследователь, инженер может проверить истинность второго закона теплового излучения цилиндрических газовых объемов, используя формулы для расчета угловых коэффициентов излучения полых цилиндров на расчетную площадку,

изложенные в справочниках А.Г. Блоха [1], Р. Зигеля, Дж. Хауэлла [2], и получить по этим формулам для четырех цилиндров 1–4 результат:

$$\phi_{F_1F_2} = \phi_{F_2F_2} = \phi_{F_3F_2} = \phi_{F_4F_2} = 0,00215. \quad (10)$$

Следовательно, угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны.

Рассчитаем плотность потоков теплового излучения, падающих от цилиндрических газовых объемов 1–4, на расчетную площадку F_2 по формуле (3):

$$\begin{aligned} q_{F_1F_2} = q_{F_2F_2} = q_{F_3F_2} = q_{F_4F_2} &= \frac{\phi_{F_1F_2} \cdot P_{F_1}}{F_2 \cdot e^{kl}} = \frac{\phi_{F_2F_2} \cdot P_{F_2}}{F_2 \cdot e^{kl}} = \\ &= \frac{\phi_{F_3F_3} \cdot P_{F_2}}{F_2 \cdot e^{kl}} = \frac{\phi_{F_4F_3} \cdot P_{F_2}}{F_2 \cdot e^{kl}} = \frac{0,00215 \cdot 14 \cdot 10^3}{0,25 \cdot e^{0,162 \cdot 3,12}} = 73,4 \text{ кВт} / \text{м}^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Так как для цилиндрических газовых объемов 1–4 равны их средние длины, пути лучей от излучающих атомов до расчетной площадки F_2 , коэффициенты поглощения газовой среды, выделяющиеся в объемах 1–4 мощности излучения, локальные угловые коэффициенты излучения объемов 1–4 на площадку F_2 , следовательно, равны плотности потоков теплового излучения объемов 1–4 на расчетную площадку F_2 .

4-й закон: плотность потока излучения центрального цилиндрического газового объема малого диаметра на расчетную площадку $q_{F_4F_2}$ равна сумме плотностей потоков излучений всех коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку при мощности излучения, выделяющейся в объеме малого диаметра, равной сумме мощностей излучений, выделяющихся во всех коаксиальных цилиндрических газовых объемах, излучающих на расчетную площадку:

$$q_{F_4F_2} = \sum_{i=1}^3 q_{F_iF_2}. \quad (12)$$

Действительно, подставив в формулу (3) параметры излучающих коаксиальных цилиндрических газовых объемов 1–4 и рассчитав их плотности потоков излучений на расчетную площадку, получим:

$$q_{F_1F_2} = q_{F_2F_2} = q_{F_3F_2} = 73,4 + 73,4 + 73,4 + \frac{0,00215 \cdot 42 \cdot 10^3}{0,25 \cdot e^{0,162 \cdot 3,12}} = 220,2 \text{ кВт} / \text{м}^2. \quad (13)$$

Из четвертого закона теплового излучения газовых объемов следует, что тепловое излучение цилиндрического газового объема большого диаметра можно в расчетах заменить излучением его оси симметрии. Физическая природа данного явления (данного закона) следующая. Допустим, радиальными усилиями, направленными по всей высоте цилиндрического газового объема большого диаметра от периферии объема к центру, к оси симметрии, сосредоточим все $15 \cdot 10^{15}$ атомов, составляющих большой газовый объем, на оси симметрии объема, в этом случае мощность излучения цилиндрического газового объема сосредоточится на оси симметрии и ее излучение будет эквивалентно излучению всех атомов цилиндрического газового объема большого диаметра. При расчете плотности теплового излучения оси симметрии газового объема на расчетную площадку принимается, что коэффициент поглощения газовой среды, через которую проходит тепловое излучение оси симметрии газового объема, равен коэффициенту поглощения газовой среды цилиндрического газового объема большого диаметра.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ ДЛЯ РАСЧЕТА, ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ, ФАКЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ, ТОПКАХ, КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Из законов теплового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов следует, что излучение любого цилиндрического газового объема большой мощности и большого диаметра может быть эквивалентно заменено равным по мощности излучением коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра. Законы теплового излучения цилиндрических газовых объемов освобождают исследователей от трех- и четырехкратного интегрирования при расчетах теплообмена излучением и позволяют определять параметры излучения путем однократного интегрирования тригонометрических зависимостей (4) коаксиального цилиндрического объема малого диаметра. В [5] приведены результаты однократного интегрирования по высоте выражения (4) при любом пространственном положении цилиндрического объема малого диаметра и поверхности нагрева F_2 , результаты расчета помещены в таблицу.

Открытые законы теплового излучения цилиндрических газовых объемов являются основой разработанной автором теории теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания. При расчетах теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания в факелы вписываются цилиндрические газовые объемы. По пропорции, в зависимости от температур и объемов зон факела, определяются мощности излучения цилиндрических газовых объемов. Далее по законам-формулам (3), (5), а также по формулам для расчета угловых коэффициентов излучения цилиндрических газовых объемов при любом произвольном пространственном расположении факела и расчетной площадки, выведенным и изложенным в [5], определяются потоки теплового излучения на поверхности нагрева в факельных печах, топках, камерах сгорания.

Все фундаментальные законы физики, законы Ньютона, Гука, Фурье, Ома и другие имеют относительно простое написание, в них мало расчетных параметров, но именно в этом их фундаментальность, всеобщность и всеохватность, мультидисциплинарность, точность описания явлений природы. Как и во всех фундаментальных законах физики, законах Архимеда, Ньютона, Гука, Фурье, Ома и других, в законах теплового излучения газовых объемов есть все необходимое для расчета, а расчет относительно прост. Законы теплового излучения газовых объемов компактны, несложны, используются для обучения студентов университетов, сотрудниками металлургических компаний для расчета рациональных энергетических режимов дуговых сталеплавильных печей. На открытие законов теплового излучения газовых объемов, разработку теории теплообмена излучением автор потратил более 30 лет интенсивного творческого научного труда. Диплом о научном открытии законов теплового излучения газовых объемов автор получил в 2011 году, то есть после 35 лет научного труда и подтверждения законов и всех теоретических данных экспериментальными исследованиями на печах, топках, камерах сгорания. Фундаментальные законы физики, в том числе законы теплового излучения газовых объемов, подтверждают известную истину: «Все необходимое – просто, все сложное не нужно». Российская металлургия сократила за последние 20 лет электропотребление в дуговых сталеплавильных печах на 28–30 %, определенная заслуга в этом принадлежит автору научного открытия.

По формулам (3), (5), используя помещенные в таблицы [5] аналитические выражения для расчета угловых коэффициентов излучения факела и компьютер, можно рассчитать потоки теплового излучения газового объема любого факела или множества

факелов на поверхности нагрева в печах, топках, камерах сгорания. На основе открытых законов теплового излучения цилиндрических газовых объемов разработана новая концепция расчета теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. По новой концепции выполнены десятки расчетов теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания, результаты которых изложены в [5–14]. Экспериментальные исследования подтвердили, что погрешность таких расчетов не превышает 10 %. Эта новая концепция расчета теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания подтверждена экспериментальными исследованиями и утверждена Учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии Минобрнауки РФ в качестве учебного пособия и используется для обучения студентов и аспирантов. Законы теплового излучения газовых объемов (3), (5), (7), (8) совместно с законами теплового излучения АЧТ вошли в учебник [5].

Впервые появилась возможность рассчитать теплообмен в факельных печах, топках, камерах сгорания с высокой точностью, совершенствовать вначале в России и в последующие десятилетия по всему миру теплообмен и конструкции факельных печей промышленных предприятий, топков, камер сгорания газотурбинных установок электрических станций, сэкономить миллионы тонн жидкого, газообразного, пылевидного топлива, снизить выбросы загрязняющих веществ, уменьшить техногенную нагрузку на окружающую среду в России и во многих городах мира.

Открытие законов теплового излучения газовых объемов факелов является вкладом в фундамент современной физики. Фундаментальные законы физики являются основой получения новых знаний, разработки теорий и расчетных процедур для создания нового высокоэффективного оборудования во всех областях техники. Открытые законы теплового излучения газовых объемов факелов и разработанная на их основе методика расчета позволяют ученым, конструкторам создавать новые и совершенствовать действующие энергетические установки гражданского и оборонного назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытые законы теплового излучения газовых объемов (как и все фундаментальные законы физики) обладают мультидисциплинарностью и универсальностью, так как могут быть использованы для расчетов конструирования в различных отраслях науки и техники. Законы теплового излучения газовых объемов используются для расчета и совершенствования теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных печах в металлургии, в факельных нагревательных печах в различных отраслях промышленности, в топках паровых котлов и камерах сгорания газотурбинных установок, в энергетике могут быть использованы для расчета теплообмена, при конструировании камер сгорания газотурбинных двигателей в авиации, КС ЖРД в оборонной и космической промышленности.

Открытые законы теплового излучения газовых объемов относятся к фундаментальным законам физики, что подтверждают следующие факты:

так как законы теплового излучения абсолютно черного тела, твердого тела, законы Стефана – Больцмана, Планка, Вина относятся к фундаментальным законам физики, к ее разделу «Квантовая природа излучения» и составляют основу этого раздела, то и законы теплового излучения газовых объемов факелов относятся к фундаментальным законам физики, к разделу «Квантовая природа излучения»;

до открытия законов теплового излучения газовых объемов факелов раздел физики «Квантовая природа излучения» представлял собой «наполовину построенное здание», так

как законы теплового излучения твердых тел позволяли рассчитать теплообмен в печах, топках, работающих на твердом кусковом топливе, и рассчитать с неприемлемой погрешностью 80–90 % теплообмен в печах, топках, камерах сгорания, работающих с факельным сжиганием пылевидного, жидкого, газообразного топлива;

с открытием законов теплового излучения газовых объемов факелов раздел физики «Квантовая природа излучения» приобрел вид «достроенного здания», так как его законы позволяют рассчитать с высокой точностью теплообмен в печах, топках, камерах сгорания, работающих как на кусковом твердом топливе, так и на пылевидном, жидком, газообразном топливе при его факельном сжигании;

раздел «Квантовая природа излучения» относится к фундаментальной физике, так как жизнь на Земле возможна только при передаче квантов тепловой энергии Солнцем на Землю, фотосинтезе квантов энергии Солнца растениями, поглощении ими углерода и выделении кислорода, многотысячелетнем накоплении квантов энергии Солнца полезными горючими ископаемыми, находящимися в недрах Земли и широко используемыми в настоящее время человечеством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рожков А.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
3. Телегин А.С. Теплотехнические расчеты металлургических печей: учебник. М.: Металлургия, 1993. 368 с.
4. Макаров А.Н., Свенчанский А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
6. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 1. Геометрическая и физическая модель факела как источника теплового излучения // *Теплоэнергетика*. 2014. № 9. С. 26–32.
7. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 2. Законы излучения газовых слоев и разработанная на их основе методика расчета теплообмена в печах, топках, камерах сгорания // *Теплоэнергетика*. 2014. № 10. С. 24–33.
8. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 3. Примеры расчета теплообмена в факельных печах и топках паровых котлов // *Теплоэнергетика*. 2014. № 11. С. 46–54.
9. Makarov A.N. Theory of radioactive heat exchange in fire box, fireboxes, combustion chambers is replenished by four new laws // *Science Discovery*. 2014. № 2. P. 34–42.
10. Makarov A.N. Radiation from Large Gas Volumes and Heat Exchange in Steam Boiler Furnaces // *Power Technology and Engineering*. 2015. № 3 (49). P. 196–201.
11. Makarov A.N. Flare Temperature and Nitrogen Oxide Emission Reduction and Heat Transfer in the TGMP-314I Steam Boiler Firebox // *Power Technology and Engineering*. 2016. № 2 (50). P. 200–203.
12. Makarov A.N., Okuneva V.V., M.K. Galicheva. Influence of the Length of a Torch Tongue on Heat Flow in a Burner Device // *Power Technology and Engineering*. 2017. № 4 (51). P. 445–450.

13. Makarov A.N. Laws of Heat Radiation from Surfaces and Gas Volumes // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 3. P. 260–270.
14. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in Torch Furnaces by Gas Volume Radiation Laws // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2016. № 4. P. 488–503.
15. Makarov A.N. Fundamental Laws of Physics and Calculation of Heat Transfer in Combustion Chambers of Gas-Turbine Plants // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2017. № 5. P. 358–375.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» (ТвГТУ), 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Законы теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 1 (1). С. 58–69.

UDK 44.31.03:53.07.00:45.43.00

LAWS OF HEAT RADIATION OF THE IONIZED AND NOT IONIZED GAS VOLUMES

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver),

E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

Abstract. The analysis of methods of calculation of heat exchange in arc steel-smelting and torch metallurgical furnaces, fire chambers of boilers, combustion chambers of gas turbine units of power plants is carried out. All existing methods of calculation of heat exchange in arc, torch furnaces, fire chambers, combustion chambers are based on the law of heat radiation of solid bodies of Stefan-Boltzman. However, the radiation of the ionized and not ionized gas volumes does not submit to the Stefan-Boltzmann law and the error of calculations makes 70–90 % and more. The laws of heat radiation opened by the author of the ionized and not ionized gas volumes and their practical use for calculation and improvement of heat exchange and constructions of arc and torch metallurgical furnaces, fire chambers, boilers of power plants, combustion chambers of gas turbine units of power plants are stated.

Keywords: heat exchange, heat radiation, gas volumes, torch, furnaces, fire chambers, combustion chambers.

REFERENCES

1. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Rozhkov A.N. Heat exchange by radiation: reference book. M.: Energoatomizdat, 1991. 432 p.
2. Ziegel R., Howell J. Heat exchange by radiation. M.: World, 1975. 934 p.

3. Telegin A.S. Heattechnical calculations of metallurgical furnaces: textbook. M.: Metallurgy, 1993. 368 p.
4. Makarov A.N., Svenchansky A.D. Optimum thermal modes of arc steel-smelting furnaces. M.: Energoatomizdat, 1992. 96 p.
5. Makarov A.N. Heat exchange in arc and torch metallurgical furnaces and power stations. SPb.: Fallow deer, 2014. 384 p.
6. Makarov A.N. Patterns of heat exchange of gas layers of a torch and screens of fire chambers of boilers. Ch. 1. Geometrical and physical model of a torch as source of heat radiation // Heat-and-power engineering. 2014. No. 9. P. 26–32.
7. Makarov A.N. Patterns of heat exchange of gas layers of a torch and screens of fire chambers of boilers. Ch. 2. Laws of radiation of gas layers and the method of calculation of heat exchange developed on their basis in furnaces, fire chambers, combustion chambers // Heat-and-power engineering. 2014. No. 10. P. 24–33.
8. Makarov A.N. Patterns of heat exchange of gas layers of a torch and screens of fire chambers of boilers. Ch. 3. Examples of calculation of heat exchange in torch furnaces and fire chambers of boilers // Heat-and-power engineering. 2014. No. 11. P. 46–54.
9. Makarov A.N. Theory of radioactive heat exchange in fire boxe, fireboxes, combustion chambers is replenished by four new laws // *Science Discovery*. 2014. № 2. P. 34–42.
10. Makarov A.N. Radiation from Large Gas Volumes and Heat Exchange in Steam Boiler Furnaces // *Power Technology and Engineering*. 2015. №3(49). P. 196-201.
11. Makarov A.N. Flare Temperature and Nitrogen Oxide Emission Reduction and Heat Transfer in the TGMP-314I Steam Boiler Firebox // *Power Technology and Engineering*. 2016. № 2 (50). P. 200–203.
12. Makarov A.N., Okuneva V.V., M.K. Galicheva. Influence of the Length of a Torch Tongue on Heat Flow in a Burner Device // *Power Technology and Engineering*. 2017. № 4 (51). P. 445–450.
13. Makarov A.N. Laws of Heat Radiation from Surfaces and Gas Volumes // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 3. P. 260–270.
14. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in Torch Furnaces by Gas Volume Radiation Laws // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2016. № 4. P. 488–503.
15. Makarov A.N. Fundamental Laws of Physics and Calculation of Heat Transfer in Combustion Chambers of Gas-Turbine Plants // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2017. № 5. P. 358–375.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of engineering sciences, professor, the head of the department of power supply and electrical equipment, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Laws of heat radiation of the ionized and not ionized gas volumes // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2019. No. 1 (1). pp. 58–69.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 541.6

ЭНЕРГИИ РАЗРЫВА СВЯЗЕЙ В КЕТОНАХ. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ И ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

М.Г. Виноградова

*Тверской государственной университет (г. Тверь),
E-mail: Vinogradova.MG@tversu.ru*

Аннотация. Обсуждаются энергии разрыва связей D (тепловые эффекты распада) в кетонах. Приведены численные расчеты. Получены новые данные (ранее неизвестные значения). Сделаны предсказания. Результаты расчетов согласуются с экспериментом. Выявлены закономерности, связывающие энергии разрыва связей со строением кетонов.

Ключевые слова: структура и свойства, энергия разрыва связи, расчетные методы.

ВВЕДЕНИЕ

Энергия разрыва связи – одна из энергетических характеристик, обуславливающая стабильность молекул и вещества в целом, необходимая для решения ряда задач теоретической и прикладной химии.

Экспериментальных сведений по энергиям разрыва связей немного, в том числе и для кетонов. Поэтому актуальной задачей современной химии является развитие расчетных методов их определения и предсказания.

Цель работы – оценка закономерностей в энергиях разрыва связей в кетонах, проведение расчетов.

Объект исследования: кетоны с общей формулой $R-C(O)-R'$. Они широко используются в качестве промышленных растворителей красок, каучуков, лака и смазок, являются промежуточным химическим соединением при химическом синтезе.

Энергетические свойства можно вывести из положений физической статистики. Но полные неэмпирические расчеты (*ab initio*) в квантовой механике весьма трудоемки. Поэтому их применение ограничено.

Для методов молекулярной механики необходимы атомные потенциалы, а методы статистической термодинамики требуют знания уровней энергии молекул. Определение их возможно только для молекул с небольшим числом атомов [1].

В работе используются феноменологические методы, основывающиеся на атом-атомном представлении. Они более просты в обращении и основываются на исходных данных, применяются для массового расчета.

Данные методы реализуются в виде аддитивных схем расчета и прогнозирования. С их помощью рассчитывается энтальпия образования молекул [2–4], энергии разрыва связей [2, 5–9] и др. [10–12].

Также были использованы методы линейной алгебры, методы регрессионного анализа, метод наименьших квадратов (МНК), позволяющий находить наилучшие значения параметров.

По теме исследования есть литература обзорного и/или справочного характера [13, 14], монографии и учебные пособия [15–17] и др.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В феноменологическом методе молекула рассматривается как система взаимодействующих атомов. Свойство P молекулы может быть представлено как сумма свойств, приходящихся на атом-атомные взаимодействия: отдельных атомов (p_α), пары атомов ($p_{\alpha\beta}$), трех атомов ($p_{\alpha\beta\gamma}$) и т. д. [1, 2].

Как и в других органических веществах, в кетонах внутримолекулярные взаимодействия атомов подразделяют:

на валентные взаимодействия (ξ). Это взаимодействия непосредственно связанных атомов. Они указывают на существование молекулы как одного целого;

невалентные взаимодействия. Это взаимодействия непосредственно несвязанных атомов. Они отвечают за более мелкие различия в молекуле [1, 2].

Часто рассматривают взаимодействия атомов, удаленные через один скелетный атом по цепи молекулы (η), через два таких атома (ζ), через три (ϑ), четыре (κ) и т. д.

Неизвестные параметры в таком методе находятся через экспериментальные данные. Для каждого соединения рассматриваемого класса с известными экспериментальными значениями свойства P составляется рабочее уравнение. В итоге получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных постоянных $Ax = b$.

Если число уравнений равно числу неизвестных, система в большинстве случаев решается методом последовательного исключения Гаусса.

Когда число уравнений больше числа неизвестных, используем метод наименьших квадратов (МНК), который позволяет находить наиболее вероятные значения параметров [1, 2].

Важно брать достоверные экспериментальные данные. А уравнения, где эти данные сомнительны, откидывать.

Результаты полученных расчетов по найденным значениям параметров чаще всего оцениваются такими показателями, как средняя абсолютная ошибка расчета (ϵ), максимальное отклонение (ϵ_{\max}) и др.

Энергия разрыва связи – тепловой эффект реакции гомолитического/гетеролитического распада по данной связи.

Энергии разрыва связей можно рассчитать с помощью параметров, определяемых через опорные величины энергий связей и через попарные валентные и невалентные взаимодействия. Методика расчета энергии разрыва связи разработана ранее [1, 2, 9–12]. По данной методике проведем численные расчеты энергий разрыва связей С-Н и С-С в кетонах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ экспериментальных данных по энергиям разрыва связей кетонов позволил обнаружить следующие закономерности:

1. Энергии разрыва связей D_{298} в выбранных соединениях изменяются в широких пределах.

Например (в кДж/моль [16]):

	$\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{-H}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{-H}$
D_{298}	401,7±9,2	403,8
	$(\text{CH}_3)_3\text{C-C}(\text{O})\text{CH}_3$	$\text{CH}_2\text{Br-C}(\text{O})\text{CH}_3$
D_{298}	329,7±4,2	359,4±6,3

2. В гомологических рядах с увеличением длины цепи энергия разрыва связей колеблется в некоторых пределах.

Например (в кДж/моль [16]):

	$\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{-H}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{-H}$
D_{298}	401,7±9,2	403,8
	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{CH}_3$	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{CH}_2\text{CH}_3$
D_{298}	351,9±2,1	348,5±2,9

3. Энергия разрыва связей D_{298} в кетонах уменьшается при разветвлении радикала.

Например (в кДж/моль [16]):

	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{H})\text{C}(\text{O})\text{C}_3\text{H}_7$	$(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{H})\text{C}(\text{O})\text{CH}(\text{CH}_3)_2$
D_{298}	394,6±3,3	387,5
	$\text{C}_3\text{H}_7\text{-C}(\text{O})\text{CH}_3$	$(\text{CH}_3)_2\text{CH-C}(\text{O})\text{CH}_3$
D_{298}	352,3±3,3	340,2±3,8

4. Энергии разрыва связей D_{298} в исследуемых соединениях зависят от положения кетогруппы в цепи молекулы.

Например (в кДж/моль [16]):

	$(\text{CH}_3)_2\text{CH-C}(\text{O})\text{CH}_3$	$(\text{CH}_3)_2\text{CH-C}(\text{O})\text{CH}_2\text{CH}_3$
D_{298}	340,2±3,8	341,4±6,3
	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{H})\text{C}(\text{O})\text{CH}_3$	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{H})\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{CH}_3$
D_{298}	386,2±7,1	396,5±2,8

5. Энергии разрыва С-С связей в кетонах уменьшается при появлении двойной связи в цепи молекулы.

Например (в кДж/моль [16]):

	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{C}_2\text{H}_5$	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{C}_2\text{H}_3$
D_{298}	354,1±3,5	342,3±12,6

6. Энергия разрыва связей D_{298} в кетонах увеличивается при появлении атома галогена.

Например (в кДж/моль [16]):

	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{O})\text{CH}_3$	$\text{CH}_2\text{Br-C}(\text{O})\text{CH}_3$
D_{298}	351,9±2,1	359,4±6,3

В табл. 1 приведены параметры схем расчета энергии разрыва связи в квадратичном приближении.

Таблица 1. Параметры схем расчета энергии разрыва связи в квадратичном приближении

Молекула	Параметры		
	d_0	d_1	d_2
$\text{CH}_3\text{-C(O)CH}_3$	1	0	0
$\text{CH}_2\text{X-C(O)CH}_3$	1	1	1
$\text{CHX}_2\text{-C(O)CH}_3$	1	2	4
$\text{CX}_3\text{-C(O)CH}_3$	1	3	9

В табл. 2 и 3 показаны результаты расчета энергии разрыва связей С-Н в молекулах вида $\text{CH}_{3-l}\text{X}_l\text{C(O)CH}_2\text{-H}$ и $\text{CH}_3\text{C(O)CH}_{2-l}\text{X}_l\text{-H}$ для $\text{X} = \text{CH}_3$ в квадратичном приближении.

В табл. 4 и 5 показаны результаты расчета энергии разрыва связей С-Н в молекулах вида $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C(O)CH}_{2-l}\text{X}_l\text{-H}$ и $\text{C}_6\text{H}_5\text{C(O)CH}_{2-l}\text{X}_l\text{-H}$ для $\text{X} = \text{CH}_3$ в линейном приближении.

В табл. 6 и 7 показаны результаты расчета энергии разрыва С-С связей в молекулах вида $\text{CH}_3\text{C(O)-CH}_{3-l}\text{X}_l$ и $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C(O)-CH}_{3-l}\text{X}_l$ для $\text{X} = \text{CH}_3$ в квадратичном приближении.

Представлены параметры для расчета соответствующих энергий разрыва связи. Приведены показатели расчета – средняя абсолютная ошибка (ϵ) и максимальное отклонение (ϵ_{max}).

Из-за недостатка исходных данных [16] ряд вычислений проведен с использованием линейной зависимости.

Таблица 2. Энергии разрыва С-Н связей в молекулах вида $\text{CH}_{3-l}\text{X}_l\text{C(O)CH}_2\text{-H}$ (в кДж/моль)

Молекула	D_{298} (к Дж/моль)	
	Опыт [16]	Расчет
$\text{CH}_3\text{C(O)CH}_2\text{-H}$	401,7±9,2	401,7
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C(O)CH}_2\text{-H}$	403,8	403,8
$(\text{CH}_3)_2\text{CHC(O)CH}_2\text{-H}$	---	401,0
$(\text{CH}_3)_3\text{CC(O)CH}_2\text{-H}$	393,3	393,3

Таблица 3. Энергии разрыва С-Н связей в молекулах вида $\text{CH}_3\text{C(O)CH}_{2-l}\text{X}_l\text{-H}$ (в кДж/моль)

Молекула	D_{298} (к Дж/моль)	
	Опыт [16]	Расчет
$\text{CH}_3\text{C(O)CH}_2\text{-H}$	401,7±9,2	401,7
$\text{CH}_3\text{C(O)CH}(\text{CH}_3)\text{-H}$	386,2±7,1	386,2
$\text{CH}_3\text{C(O)C}(\text{CH}_3)_2\text{-H}$	383,8	383,8

Таблица 4. Энергии разрыва С-Н связей в молекулах вида
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{-}l\text{X}_l\text{-H}$ (в кДж/моль)

Молекула	D_{298} (кДж/моль)	
	Опыт [16]	Расчет
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{-H}$	403,8	403,8
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{CH}(\text{CH}_3)\text{-H}$	$396,5 \pm 2,8$	396,5
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{-H}$	---	389,2

Таблица 5. Энергии разрыва С-Н связей в молекулах вида
 $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{-}l\text{X}_l\text{-H}$ (в кДж/моль)

Молекула	D_{298} (кДж/моль)	
	Опыт [16]	Расчет
$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}(\text{O})\text{CH}_2\text{-H}$	---	403,8
$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}(\text{O})\text{CH}(\text{CH}_3)\text{-H}$	388,7	388,7
$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}(\text{O})\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{-H}$	376,1	376,1

Таблица 6. Энергии разрыва С-С связей в молекулах вида
 $\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{-CH}_3\text{-}l\text{X}_l$ (в кДж/моль)

Молекула	D_{298} (кДж/моль)	
	Опыт [16]	Расчет
$\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{-CH}_3$	$351,9 \pm 2,1$	351,9
$\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{-CH}_2\text{CH}_3$	$347,3 \pm 2,9$	347,4
$\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{-CH}(\text{CH}_3)_2$	$340,2 \pm 3,8$	340,1
$\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{-C}(\text{CH}_3)_3$	$329,7 \pm 4,2$	329,7
ε	0,1	
ε_{max}	$\pm 0,1$	

Таблица 7. Энергии разрыва С-С связей в молекулах вида
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{-CH}_3\text{-}l\text{X}_l$ (в кДж/моль)

Молекула	D_{298} (кДж/моль)	
	Опыт [16]	Расчет
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{-CH}_3$	$354,1 \pm 3,5$	354,1
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{-CH}_2\text{CH}_3$	---	349,5
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{-CH}(\text{CH}_3)_2$	$341,4 \pm 6,3$	341,4
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{-C}(\text{CH}_3)_3$	$329,7 \pm 4,2$	329,7

Необходимые параметры (в кДж/моль) найдены МНК следующими:

d_0	d_1	d_2
401,700	4,550	-2,450
401,700	-22,050	6,550
403,800	-7,300	
401,300	-12,600	
351,855	-2,945	-1,475
354,100	-2,783	-1,783

Видно, что рассчитанные энергии разрыва связей в кетонах хорошо согласуются с экспериментальными.

Величины, рассчитанные в линейном приближении, нужно рассматривать как ориентировочные, необходимые для предварительной оценки свойств веществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Феноменологические методы являются эффективным инструментом исследования закономерностей, связывающих свойства веществ со строением молекул. Они дополняют методы квантовой химии, статистической термодинамики и так далее и пригодны для массового расчета и прогнозирования физико-химических свойств веществ.

В работе выявлены закономерности, связывающие энергии разрыва связей со строением кетонов. Определено, что энергии разрыва связей D_{298} в выбранных соединениях с увеличением длины цепи связей колеблются в некоторых пределах, зависят от положения кетогруппы в цепи молекулы, уменьшаются при разветвлении радикала и увеличиваются при появлении атома галогена.

Проведены численные расчеты, согласующиеся с экспериментом. В работе получены новые данные (ранее неизвестные значения). Оценена точность схем, даны рекомендации для их использования.

В работе проведено обширное систематическое расчетно-теоретическое исследование. Расчетным путем получена новая числовая информация об энергиях разрыва связей. Выявлены определенные закономерности.

Результаты работы могут быть использованы: при проведении термокинетических (и иных) расчетов исследуемых веществ; при подготовке справочных изданий по термодинамическим свойствам веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова М.Г. Расчетные методы исследования взаимосвязи «структура-свойство» в атом-атомном представлении: дис. ... докт. хим. наук. Тверь, 2004. 440 с.
2. Папулов Ю.Г., Виноградова М.Г. Расчетные методы в атом-атомном представлении. Тверь: ТвГУ, 2002. 232 с.
3. Степанов Н.Ф., Ерлыкина М.Е., Филиппов Г.Г. Методы линейной алгебры в физической химии. М.: Изд-во МГУ, 1976. 360 с.
4. Яровой С.С. Методы расчета физико-химических свойств углеводов. М.: Химия, 1978. 256 с.
5. Орлов Ю.Д., Лебедев Ю.А., Сайфуллин И.Ш. Термохимия органических свободных радикалов. М.: Наука, 2001. 304 с.

6. Виноградова М.Г., Папулов Ю.Г., Смоляков В.М. Количественные корреляции «структура–свойство» алканов. Аддитивные схемы расчета: учебное пособие. Тверь: ТвГУ, 1999. 96 с.
7. Папулов Ю.Г., Левин В.П., Виноградова М.Г. Строение вещества в естественно-научной картине мира. Молекулярные аспекты. 2-е изд. Тверь: ТвГУ, 2005. 208 с.
8. Орлов Ю.Д., Лебедев Ю.А. Взаимосвязь феноменологических методов расчета энтальпий образования свободных радикалов (энергий диссоциации химических связей) // *Журн. физ. химии*. 1993. Т. 67. № 5. С. 925–932.
9. Папулов Ю.Г., Виноградова М.Г. Энергия химических связей: основные закономерности и методы расчета: обзор // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия»*. 2006. № 8 [25]. Вып. 3. С. 5–39.
10. Крылов П.И., Виноградова М.Г., Папулов Ю.Г. Энергетические характеристики кремнийорганических соединений // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия»*. 2015. № 3. С. 81–89.
11. Виноградова М.Г., Жерихова А.М. Энергия Гиббса алкинов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 2 (3). С. 292–293.
12. Виноградова М.Г., Белова А.А. Энтальпия образования тиоспиртов. Численные расчеты и основные закономерности // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия»*. 2016. № 4. С. 82–87.
13. Pedley I.B., Naylor R.D., Kirly S.P. Thermochemical data of organic compounds. L.; N.-Y.: *Cherpan and Hall*. 1986. P. 87–232.
14. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / под ред. В.П. Глушко. М.: Наука, 1978. Т. 1. 495 с.; 1979. Т. 2. 431 с.
15. Сталл Д., Вестрам Э., Зинке Г. Химическая термодинамика органических соединений. М.: Мир, 1971. 944 с.
16. Yu-Ran Luo. Handbook of bond dissociation energies in organic com-pounds. Florida: CRC Press. 2003. 380 p.
17. Lange's Handbook of Chemistry / Editor: J.A. Dean. (15th Edition), McGraw-Hill. 1999. URL: <http://fptl.ru/biblioteka/spravo4niki/dean.pdf> (дата обращения: 10.12.18).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ВИНОГРАДОВА Марина Геннадьевна – доктор химических наук, профессор кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» (ТвГУ), 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Виноградова М.Г. Энергии разрыва связей в кетонах. Численные расчеты и основные закономерности // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2019. № 1 (1). С. 70–78.

UDK 541.6

**ENERGY OF BREAKING TIES IN KETONES.
NUMERICAL CALCULATIONS AND BASIC LAWS****M.G. Vinogradova***Tver State University (Tver),**E-mail: Vinogradova.MG@tversu.ru*

Abstract. The bond breaking energies D (thermal effects of decay) in ketones are discussed. Numerical calculations are given. New data received (previously unknown values). Made predictions. The calculation results are consistent with the experiment. Revealed are the laws relating the breaking energy of bonds to the structure of ketones.

Keywords: structure and properties, bond dissociation energy, computational methods.

REFERENCES

1. Vinogradova M.G. Computational methods for the study of the relationship «structure-property» in the atom-atom representation. Diss. Doctor. (chemical sciences). Tver. 2004. 440 p. (In Russian).
2. Papulov Y.G., Vinogradova M.G. Calculation modi Atom, Atom in representationem [Calculation methods in atom-atom representation]. Tver: TSU, 2002. 232 p. (In Russian).
3. Stepanov N.F., Erlykina M.E., Filippov G.O. Linear algebra physica elit in elit [Methods of linear algebra in physical chemistry]. M.: MGU, 1976. 360 p. (In Russian).
4. Yarovoy S.S. Quia modi proprietatibus computandi triangulorum & Physico Chymicam hydrocarbonum [Methods for calculating the physicochemical properties of hydrocarbons]. M.: Quaestiones, 1978. 256 p. (In Russian).
5. Orlov Y.D., Lebedev Y.A., Saifullin I.Sh. Thermochemistry organicum liberum radicalis [Thermochemistry of organic free radicals]. M.: Nauka, 2001. 304 p. (In Russian).
6. Vinogradova M.G., Papulov Y.G., Smolyakov V.M. Dóminum Ratione quantitatis «fabricam rerum», alkanes. ELOGIUM calculation propositum [Quantitative correlations «structure – property» of alkanes. Additive calculation schemes.]. Textbook. Tver: TSU. 1999. 96 p. (In Russian).
7. Papulov Yu.G., Levin V.P., Vinogradova M.G. In structuram naturalem materiae ad imaginem mundi, scientific [Строение вещества в естественно-научной картине мира. Молекулярные аспекты]. Nd M. facies -2 izd. Tver: TSU, 2005. 208 p. (In Russian).
8. Orlov Y.D., Lebedev Y.A. The relationship of phenomenological methods for calculating the enthalpies of formation of free radicals (dissociation energies of chemical bonds) // *Zh. Nat. Chemia*. V. 67. 1993. № 5. pp. 925–932. (In Russian).
9. Papulov Y.G., Vinogradova M.G. Energy of chemical bonds: basic laws and methods of calculation: Overview // *Vestnik Tver de re publica University. «Chemia» series*. 2006. № 8 [25]. Vol. 3. pp. 5–39. (In Russian).

10. Krylov P.I., Vinogradova M.G., Papulov Y.G. Habet de industria agentibus silicone suis Revolutionibus componit // *Vestnik Tver de re publica University. «Chemia» series.* 2015. № 3. pp. 81–89. (In Russian).
11. Vinogradova M.G., Zherikhova A.M. Gibbs energy of alkynes // *Acta De International Research and Latin.* 2016. № 2 (3). pp. 292–293. (In Russian).
12. Vinogradova M.G., Belova A.A. Enthalpy of formation of tiospirt. Numerical calculations and basic laws // *Vestnik Tver de re publica University. «Chemia» series.* 2016. № 4. pp. 82–87 (In Russian).
13. Redley I.B., Wichita R.D., Danubius S.P. Thermochemical data of organic compounds. L.; N.-N., *Cherman et Aula.* 1986. pp. 87–232.
14. Termodinamicheskie individuae sunt substantiae proprietatibus [Thermodynamic properties of individual substances] / Ed. Glushko. M.: Science, 1978. T. 1. pp. 495; CDXXXI 1979. T. 2. pp. 431.
15. Stall D., Vastra L., Zinke H. Donec Termodinámica de Organic Composita [Chemical thermodynamics of organic compounds]. M.: Undique, 1971. P. 944.
16. Yu-Ran Luo. De vinculum parentum provocant dissociationem per organicum industria com-libras [Handbook of bond dissociation energies in organic com-pounds]. Florida: Nabu Press, 2003. P. 380.
17. De Historiae Lange [Lange's Handbook of Chemistry] / Editor: J.A. Dean (15 Edition). Nabu, 1999. URL: <http://fptl.ru/biblioteka/spravo4niki/dean.pdf> (date of access: 12.10.18).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

VINOGRADOVA Marina Gennadievna – doctor of chemical sciences, Professor of physical chemistry, Federal State educational institution of higher education budget «Tver State University» (TvGU), 33, ul. Zhelyabov, Tver, 170100, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Vinogradova M.G. Energy of breaking ties in ketones. numerical calculations and basic laws // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology».* 2019. No. 1 (1). pp. 70–78.

УДК 631.4:502.76

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ^{137}Cs В ПОЧВАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ОТ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

П.М. Орлов¹, Н.И. Аканова²

*Всероссийский научно-исследовательский
институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова (г. Москва),
E-mail: ¹alex.orlov1988@gmail.com, ²N_Akanova@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты радиационного мониторинга почв сельскохозяйственных угодий на загрязненных от Чернобыльской аварии территориях. Анализ пространственно-временных изменений показывает, что в течение первых 30 лет после аварии существенно снизились уровни загрязнения почв сельскохозяйственных угодий и сократилась их площадь, на которой плотность загрязнения почвы превышает уровень в 1 Ки/км². При этом уменьшилось число субъектов РФ, имеющих сельскохозяйственные угодья с уровнем загрязнения более 1 Ки/км², с 18 (1993 г.) до 9 (2014 г.). При рассмотрении общей радиационной ситуации на сельскохозяйственных угодьях России целесообразно выделить почвы с плотностью загрязнения по ^{137}Cs в интервале 0,3–1,0 Ки/км² в отдельную группу.

Ключевые слова: почвы, радиационный мониторинг, уровни загрязнения ^{137}Cs , коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr , калийные удобрения, известкование, качество продукции.

ВВЕДЕНИЕ

После Чернобыльской аварии прошло 30 лет. В результате радиоактивного распада содержание радионуклидов в почве сельскохозяйственных угодий, в том числе ^{90}Sr и ^{137}Cs , снизилось и на значительной площади уровень загрязнения ^{137}Cs стал ниже 1 Ки/км². В настоящее время оценка современного содержания радионуклидов в почве земель сельскохозяйственного назначения, загрязненных чернобыльскими выпадениями, по-прежнему является актуальной. Определенный научный и практический интерес представляет сопоставление данных по содержанию ^{90}Sr и ^{137}Cs в почве в Российской Федерации в целом. Целесообразно также оценить период снижения содержания ^{137}Cs в почве до 1 Ки/км² в отдельных районах загрязненных территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе используются результаты по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации [1] и радиационного мониторинга почв сельскохозяйственных угодий [2, 3]. Для каждого района субъекта РФ, загрязненного радиоактивными выпадениями от Чернобыльской аварии, сформированы множества данных, из этих множеств оценены средние значения, стандартные отклонения и верхние границы типичных уровней загрязнения почв.

Как показало радиологическое обследование почв сельхозугодий, в 1992–1993 гг. 18 субъектов РФ имели в своем составе территории, на которых уровень загрязнения ^{137}Cs почвы превышал 1 Ки/км² [4]. В настоящее время их осталось только 9.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 представлены субъекты РФ, имеющие в своем составе районы с верхней границей уровня загрязнения почв ^{137}Cs более 1 Ки/км². Для каждого района рассчитано время достижения значения уровней загрязнения почвы в 1 Ки/км². В столбце 4 таблицы оценено время достижения уровня в 1 Ки/км² с учетом радиоактивного распада. Однако снижение концентрации ^{137}Cs в почве также происходит в результате миграционных процессов. На основе результатов локального радиологического мониторинга на реперных участках сельскохозяйственных угодий загрязненных областей рассчитан период полувыведения ^{137}Cs из почв, который равен $24 \pm 1,5$ года [2]. С учетом этой величины в столбце 5 приведено расчетное время спада верхних границ загрязнения уровня 1 Ки/км².

Таблица 1. Время снижения верхних границ уровней загрязнения почв ^{137}Cs до уровня 1 Ки/км² на загрязненной территории для районов

Район области	Среднее	Верхняя граница	Время снижения до уровня 1 Ки/км ²	
	Ки/км ²		по периоду полураспада $T_{1/2} = 30$ лет	по периоду полувыведения $X_{1/2} = 24$ года
1	2	3	4	5
Брянская, площадь загрязнения с/х угодий 6 980 км ² , запас $^{137}\text{Cs} = (25 \pm 8) \cdot 10^3$ Ки				
Гордеевский	7,4	11,5	106	84
Дятьковский	0,9	1,4	15	12
Злыковский	9,6	15,8	120	95
Климовский	3,2	5,1	71	56
Клинцовский	4,4	7,6	88	70
Красногорский	6,9	16,9	123	98
Новозыбковский	10,6	14,7	117	93
Стародубский	1,0	1,7	23	18
Калужская область, площадь загрязнения с/х угодий 1 620 км ² , запас $^{137}\text{Cs} = (1,8 \pm 0,5) \cdot 10^3$ Ки				
Жиздринский	1,7	3,0	48	38
Людиновский	0,9	1,3	11	9
Ульяновский	2,7	4,1	61	49
Хвастовичский	2,1	3,7	57	45
Орловская область, площадь загрязнения с/х угодий 4 190 км ² , запас $^{137}\text{Cs} = (3,2 \pm 0,3) \cdot 10^3$ Ки				
Болховский	1,6	2,5	40	32
Глазуновский	0,91	1,5	18	14
Дмитровский	0,91	1,4	15	12
Залегощевский	0,67	1,4	15	12
Знаменский	0,65	1,2	8	6
Мценский	0,85	1,3	11	9
Свердловский	0,76	1,4	15	12
Троснянский	0,91	1,5	18	14

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Урицкий	0,84	1,2	8	6
Тульская, площадь загрязнения с/х угодий 7 790 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (10,1±1,6)·10 ³ Ки				
Арсеньевский	2,7	3,5	54	43
Белевский	1,2	2,0	30	24
Богородицкий	1,4	2,3	36	31
Воловский	0,74	1,07	3	2
Каменский	0,57	1,2	8	6
Кимовский	0,80	1,3	11	9
Киреевский	1,3	2,3	36	29
Плавский	3,0	5,1	71	56
Теплоогаревский	0,96	1,6	20	16
Узловской	1,7	2,6	42	33
Чернский	1,4	2,4	38	30
Щекинский	0,98	2,2	34	27
Рязанская, площадь загрязнения с/х угодий 5 320 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (3,8±0,3)·10 ³ Ки				
Корабликовский	1,1	1,7	23	18
Милославский	0,99	1,6	20	16
Михайловский	0,77	1,1	4	3
Ряжский	0,95	1,5	18	14
Скопинский	1,0	1,6	20	16
Старожиловский	0,78	1,1	4	3
Белгородская, площадь загрязнения с/х угодий 1 620 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (1,8±0,5)·10 ³ Ки				
Красненский	0,87	1,08	3	2,5
Липецкая, площадь загрязнения с/х угодий 1 619 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (1,0±0,1)·10 ³ Ки				
Краснинский	0,85	1,22	8	6
Воронежская, площадь загрязнения с/х угодий 1 320 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (0,79±0,05)·10 ³ Ки				
Репьевский	0,81	1,1	4	3
Курская, площадь загрязнения с/х угодий 1 220 км ² , запас ¹³⁷ Cs = (1,1±0,2)·10 ³ Ки				
Железногорский	1,1	2,2	34	27
Повыревский	1,1	2,5	40	32

Серьезные проблемы радиоактивного загрязнения почв остаются в Брянской области. В Гордеевском (7,4 Ки/км²), Злыковском (9,6 Ки/км²), Красногорском (6,9 Ки/км²) и Новозыбковском (10,6 Ки/км²) районах среднее содержание ¹³⁷Cs в почвах превышает уровень 5 Ки/км². Это указывает на то, что на радиоактивно загрязненных территориях в этих районах Брянской области останутся сложности получения нормативно безопасной по качеству сельскохозяйственной продукции в течение 2,5–4 периодов полураспада ¹³⁷Cs (80–120 лет). В Климовском (3,2 Ки/км²) и Клинцовском (4,4 Ки/км²) районах эти проблемы останутся в течение 1,5–2,0 периодов полураспада (45–60 лет).

В Плавском районе Тульской области снижение содержания ¹³⁷Cs до 1 Ки/км² произойдет в течение 70 лет. Основным типом почв Тульской области являются черноземы. Переход ¹³⁷Cs из черноземов в сельскохозяйственные растения менее значителен по сравнению с другими типами почв. Поэтому содержание ¹³⁷Cs в

сельскохозяйственной продукции, которое удовлетворяет нормативам, может быть достигнуто и в более короткие сроки. В Жиздринском, Ульяновском, Хвастовичском районах Калужской области и Арсеньевском районе Тульской области снижение содержания ^{137}Cs в почве до уровня 1 Ки/км^2 можно ожидать через 1,5–2 периода полураспада (через 45–60 лет).

В Болховском районе Орловской области, Белевском, Богородицком, Киреевском, Узловском, Чернском и Щекинском районах Тульской области, Железногорском и Повырьевском районах Курской области снижение содержания ^{137}Cs в почве до уровня 1 Ки/км^2 наступит приблизительно через 1 период полураспада. С учетом того, что эти загрязненные территории принадлежат к черноземной зоне, снижение до норматива уровней загрязнения сельскохозяйственной продукции, полученной в этих районах, может наступить раньше.

Для загрязненных районов Рязанской, Белгородской, Липецкой, Воронежской и также неотмеченных ранее районов Брянской, Тульской, Калужской и Орловской областей требуется менее 1 периода полураспада. Начало отсчета – 1 января 2015 г.

На остальной территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению от Чернобыльской аварии, верхняя граница содержания ^{137}Cs в почвах сельскохозяйственных угодий стала ниже (или достигла уровня) 1 Ки/км^2 . Результаты мониторинга почв ряда областей Европейской части России, содержание ^{137}Cs в которых $< 1 \text{ Ки/км}^2$, представлены в табл. 2. Почвы сельскохозяйственных угодий этих областей можно исключить из категории почв, загрязненных ^{137}Cs . В настоящее время их следует отнести к почвам, имеющим повышенное, чем в среднем по России, содержание ^{137}Cs .

Радиологический мониторинг в Нижегородской, Саратовской, Тверской областях и Республиках Чувашия и Татарстан в 1992 и 1993 г. выявил площади радиоактивно загрязненных почв сельскохозяйственных угодий. В настоящее время в этих субъектах РФ радиоактивное загрязнение почв не обнаружено.

Обследование загрязненных территорий в 1992–1994 гг. показало, что основные площади сельскохозяйственных угодий находились в интервале загрязнения $1–5 \text{ Ки/км}^2$ по ^{137}Cs , причем большинство площадей черноземной зоны в интервале $1–3 \text{ Ки/км}^2$ [4, 11]. По истечении 1 периода полураспада ^{137}Cs (30 лет) следовало ожидать, что на значительной части загрязненных сельскохозяйственных угодий содержание ^{137}Cs в почве станет менее 1 Ки/км^2 ($\sim 120 \text{ Бк/кг}$). Современные данные мониторинга (табл. 2) подтверждают этот прогноз.

При рассмотрении общей радиационной ситуации на сельскохозяйственных угодьях России целесообразно выделить почвы с плотностью загрязнения по ^{137}Cs в интервале $0,3–1,0 \text{ Ки/км}^2$ в отдельную группу. Для этой группы почв внесение повышенных калийных и известковых удобрений не требуется. В практике землепользования важно применять агрохимические и агротехнические приемы снижения уровня загрязнения сельскохозяйственной продукции, проведение которых не требует существенного изменения применяемой технологии возделывания культур и коренной перестройки севооборотов.

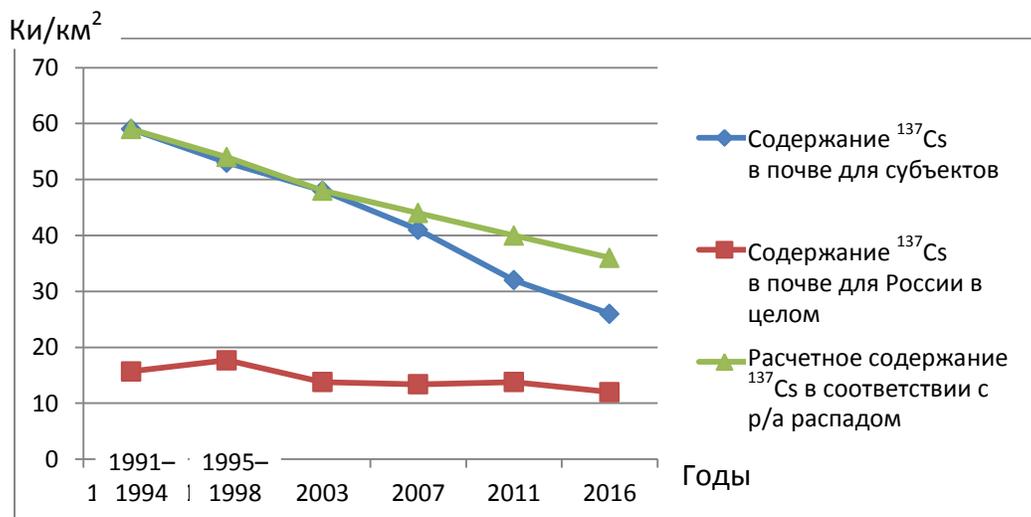
Таблица 2. Содержание ^{137}Cs в почве сельскохозяйственных угодий на радиоактивном пятне и субъекте РФ в целом

Субъект РФ (область)	Среднее содержание, Бк/кг (Ки/км ²)		Верхняя граница, Бк/кг (Ки/км ²)	
	Радио/а пятно	Субъект	Радио/а пятно	Субъект
Рязанская	75 (0,61)	56 (0,46)	106 (0,86)	92 (0,75)
Пензенская	54 (0,44)	35 (0,28)	70 (0,57)	41 (0,33)
Мордовия	37 (0,30)	25 (0,20)	60 (0,49)	40 (0,33)
Ульяновская	45 (0,37)	4,1 (0,03)	52 (0,43)	4,6 (0,04)
Белгородская	72 (0,59)	22 (0,18)	91 (0,74)	30 (0,24)
Липецкая	62 (0,50)	49 (0,40)	88 (0,71)	71 (0,58)
Воронежская	55 (0,45)	36 (0,29)	71 (0,58)	53 (0,43)
Курская	50 (0,41)	32 (0,26)	94 (0,77)	63 (0,51)
Тамбовская	44 (0,36)	38 (0,31)	54 (0,44)	54 (0,44)
Ленинградская	61 (0,50)	36 (0,29)	85 (0,70)	80 (0,65)
Смоленская	29 (0,24)	13 (0,11)	33 (0,27)	19 (0,15)

Высокая культура земледелия является основой снижения концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в продукции растениеводства. Результаты многочисленных и многолетних исследований показывают, что из почв, характеризующихся высоким плодородием, техногенные радионуклиды поступают в растения и накапливаются в значительно меньших количествах, чем из низкоплодородных почв [5–10]. Поэтому на почвах с плотностью загрязнения 0,3–1,0 Ки/км² по ^{137}Cs при высокой культуре земледелия, обеспечивающей получение высоких урожаев, следует ожидать относительно низкого уровня загрязнения растительной продукции.

На рисунке представлена динамика содержания ^{137}Cs в почвах реперных и контрольных участков 1991–2016 гг. для загрязненных Чернобыльскими выпадениями субъектов РФ (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Пензенская, Саратовская, Тамбовская области, республика Мордовия) и Российской Федерации в целом. Показано, что на загрязненной территории спад радиоактивного загрязнения протекал более быстро, чем в целом для страны.

В 2011 г. в Японии на АЭС «Фукусима» произошла радиационная авария. В окружающую среду было выброшено значительное количество ^{137}Cs . Эта авария скомпенсировала те положительные тенденции по снижению уровней загрязнения почв радионуклидами, которые наблюдались с 1998 по 2011 г. в целом по России. На рисунке также приведена в соответствии с законом радиоактивного распада ($T_{1/2} = 30$ лет) расчетная зависимость снижения содержания ^{137}Cs в почве субъектов. Видно, что в природных условиях с 2007 г. реальное снижение содержания ^{137}Cs в почве происходило интенсивнее в сравнении с расчетным. Это может быть обусловлено дополнительным выносом ^{137}Cs с весенним паводком. Более быстрому снижению содержания ^{137}Cs в почвах также способствует внесение повышенных доз калийных удобрений. В результате реакций изотопного (ионного) обмена ^{137}Cs между цезием (калием и рубидием) почвы и удобрениями часть радионуклида переходит в калийное удобрение и выносится с полей весенним паводком.



Изменение во времени среднего содержания ¹³⁷Cs в почвах субъектов РФ, загрязненных чернобыльскими выпадениями (субъектов), и Российской Федерации в целом

В табл. 3 представлены параметры радиоактивного загрязнения почв Российской Федерации в 2016 г. по данным локального мониторинга: среднее значение равно 12,0 Бк/кг (~ 0,1 Ки/км²), стандартное отклонение – 14 Бк/кг. Верхняя граница загрязнения ¹³⁷Cs почв сельскохозяйственных угодий России составляет 26 Бк/кг (~0,2 Ки/км²). Отметим высокое значение эксцесса, что свидетельствует о том, что во множестве данных, характеризующих загрязнение почв, экстремальные значения встречаются достаточно редко, а большинство результатов группируются вблизи среднего значения.

Таблица 3. Мощность экспозиционной дозы и содержание ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почвах России (2016 г.)

Статистический параметр	МЭДГ, мкр/час	Содержание, Бк/кг	
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Среднее	11,0	12,0	4,7
Стандартное отклонение	2,7	14	3,7
Стандартное отклонение среднего	0,1	0,4	0,1
Эксцесс	0	32	6,5
Количество участков	1 088	1 167	1 070

При обобщении результатов радиологического мониторинга почвы сельскохозяйственных угодий РФ можно условно разделить на три группы.

К 1-й группе следует отнести радиоактивно (по ¹³⁷Cs) загрязненные почвы с плотностью загрязнения >1 Ки/км². Для этой группы введена градация по плотности радиоактивного загрязнения (Ки/км²): 1–5; 5–15; 15–40; 40–80; более 80. В эту группу входят почвы загрязненных территорий Брянской, Тульской, Калужской и Орловской областей. При отсутствии крупных радиационных аварий следует ожидать, что спад загрязнения почвы ¹³⁷Cs будет происходить с периодом полувыведения 24–30 лет. Ввиду того, что уровень загрязнения почв значительно превышает таковые среднестатистические

по России, то совокупность данных по радиоактивному загрязнению целесообразно выделить в отдельное множество.

Ко 2-й группе следует отнести почвы, имеющие уровень загрязнения ^{137}Cs 30–120 Бк/кг (0,3–1,0 Ки/км², см. табл. 2). В основном это почвы центральных черноземных областей и Поволжья. Они имеют повышенное содержание ^{137}Cs в почве по сравнению со стандартным содержанием по России. Нами установлено, что с 1991 по 2011 г. период полувыведения ^{137}Cs из этих почв составлял $24,0 \pm 1,5$ года [2]. В дальнейшем при приближении среднего содержания ^{137}Cs в почве субъектов к среднему содержанию по РФ следует ожидать увеличения периода полувыведения ^{137}Cs из почвы и замедление спада.

В 3-ю группу почв следует включить почвы, в которых содержание ^{137}Cs не превышает 37 Бк/кг (менее 0,3 Ки/км²). Большинство сельскохозяйственных угодий России входит в эту группу. Статистические параметры уровней радиоактивного загрязнения почв этой группы с 2003 г. стабильны в пределах погрешности оценки.

Изменение содержания радионуклидов в сельскохозяйственных растениях во времени связано не только со снижением уровней загрязнения почвы в результате радиоактивного распада и миграции, но и с изменением изотопных и ионных соотношений $^{137}\text{Cs}^+/\text{Cs}^+$; $^{137}\text{Cs}^+/\text{Rb}^+$; $^{137}\text{Cs}^+/\text{K}^+$. Вполне возможно, что K^+ и Rb^+ являются групповыми (щелочные металлы) носителями $^{137}\text{Cs}^+$. Внесение калийных удобрений снижает указанные изотопные и ионные соотношения, что способствует снижению коэффициентов накопления (перехода) и уровня загрязнения сельскохозяйственной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ пространственно-временных изменений уровней загрязнения почв сельскохозяйственных угодий показывает, что в течение первых 30 лет после аварии существенно снизились уровни загрязнения и сократились площади угодий, в которых плотность загрязнения почвы превышает уровень в 1 Ки/км². При этом сократилось и число субъектов РФ, имеющих такой уровень загрязнения, с 18 (1992 г.) до 9 (2014 г.). Проблема загрязнения почв и сельскохозяйственной продукции остается в Гордеевском, Злыковском, Красногорском и Новозыбковском районах Брянской области. Тема снижения последствий радиоактивного загрязнения почв в этих районах останется актуальной еще несколько десятилетий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данные по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ / под ред. С.М. Вакуловского. Обнинск: ФГБУ «НПО Тайфун», 2015. 225 с.
2. Сычев В.Г., Лунев М.И., Орлов М.М., Белоус Н.М. Чернобыль: радиационный мониторинг сельскохозяйственных угодий и агрохимические аспекты снижения последствий радиоактивного загрязнения почв. М.: ВНИИА, 2016. 183 с.
3. Орлов П.М., Лунев М.И., Сычев В.Г. Радиационный мониторинг сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. М.: ВНИИА, 2015. 175 с.
4. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1993 году». С. 64–69. Утв. Пост. Прав. РФ от 24.01. 93 г. № 53.
5. Моисеенко Ф.В., Шаповалов В.Ф. Итоги работы Новозыбковской Государственной сельскохозяйственной опытной станции за 2001–2006 г. В сб. «Повышение плодородия

- продуктивности дерново-подзолистых песчаных почв и реабилитация радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных угодий». М., 2007. С. 10–13.
6. Алексахин Р.М. Сельскохозяйственная радиология, 2000. В кн. Агроэкология / под ред. Черникова В.А., Чекереса А.И. М.: Колос, 2000. С. 300–322.
 7. Белоус Н.М. Воспроизводство плодородия и реабилитация радиоактивно загрязненных песчаных почв юго-запада России: автореф. дис. ... д. с.-х. н. М., 2000. 51 с.
 8. Марей А.Н., Бархударов Р.М., Новикова Н.Я. Глобальные выпадения ^{137}Cs и человек. М., 1974. 166 с.
 9. Моисеев И.Т., Рамзаев П.В. Цезий-137 в биосфере. М.: Атомиздат, 1975. 184 с.
 10. Рерих Л.А., Моисеев И.Т. Влияние свойств почв на трансформацию ^{137}Cs и поступление его в сельскохозяйственные растения // Агрохимия. 1995. № 8. С. 96.
 11. Светов В.А. Проблемы Чернобыля в агропромышленном комплексе России. Химия в сельском хозяйстве. 1996. № 1. С. 2–3.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОРЛОВ Павел Михайлович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории сельскохозяйственной токсикологии, ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 31А.

АКАНОВА Наталья Ивановна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории агрохимии органических и известковых удобрений ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 31А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Орлов П.М., Аканова Н.И. Динамика содержания ^{137}Cs в почвах сельскохозяйственных угодий, загрязненных от чернобыльской аварии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 1 (1). С. 79–87.

UDK 631.4:502.76

DYNAMICS OF ^{137}CS CONTENT IN SOILS AGRICULTURAL LAND CONTAMINATED BY THE CHERNOBYL ACCIDENT

P.M. Orlov¹, N.I. Akanova²

All-Russian research

institute of agrochemistry named D.N. Pryanishnikov (Moscow),

E-mail: ¹alex.orlov1988@gmail.com, ²N_Akanova@mail.ru

Abstract. Presents the results of radiation monitoring soils agricultural land contaminated by Chernobyl territories. Spatio-temporal changes analysis shows that during the first 30 years after the accident, soil pollution levels declined significantly farmland and reduced floor space, which exceeds the level of soil contamination density in 1 Ci/km^2 . While fewer constituent entities of the Russian Federation, with farmland with contamination levels over 1 Ci/km^2 , with 18 (1993) to 9 (2014). When considering the overall radiological situation in agricultural lands of

Russia it is expedient to allocate soil ^{137}Cs pollution density in the range of 0.3-1.0 Ci/km^2 in a separate group.

Keywords: soil, radiation monitoring, pollution levels of ^{137}Cs accumulation coefficients of ^{137}Cs and ^{90}Sr , potash fertilizer, liming, product quality.

REFERENCES

1. Data on radioactive contamination of the territory of the Russian Federation of settlements ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$. 2015/ed. S.m. RAMS, Obninsk, Vakulovskogo NPO Typhoon. 225 p. (In Russian).
2. Sychev V.G., Lunev M.I., Orlov P.M., Belous N.M. Chernobyl: radiation monitoring of agricultural land and agrochemical aspects reduce the consequences of radioactive contamination of the soil. M.: VNIIA, 2016:183 p. (In Russian).
3. Orlov P.M., Lunev M.I., Sychev V.G. Radiation monitoring of agricultural land in the Russian Federation. 2015. M.: VNIIA 175 p. (In Russian).
4. State report "on the State of the environment Wednesday of the Russian Federation in 1993 year-64-69. P.10. Post. Rights. RF from 24.01. 93, no. 53. (In Russian).
5. Moiseenko F.V., Shapovalov V.F. Outcome of the Novozybkovskoj State agricultural experimental station, 2001–2006. 2007. Improvement of productivity of Soddy-podzolic sandy soils and rehabilitation of contaminated agricultural land, pp. 10–13. (In Russian).
6. Alexakhin R.M. Agricultural Radiology. 2000. kn.Agroecology / edited Chernikova V.A., Chekeresa A.I., m.: Kolos. pp. 300–322 (In Russian).
7. Belous N.M. Reproduction fertility and rehabilitation of radioactively contaminated sandy soil Southwest Russia // Katege. diss d. s.-h. n. m. 2000. 51 p. (In Russian).
8. Marei A.N., Barhudarov R.M., Novikova N.Ya. Global fallout ^{137}Cs and people. 1974. pp. 166 (In Russian).
9. Moiseev I.T., Ramzaev P.V. Cesium-137 in the biosphere. M.: Atomizdat, 1975. pp. 184. (In Russian).
10. Roerich L.A., Moiseyev I.T. Influence soil properties on transformation of ^{137}Cs and uptake by agricultural crops. 1989. Chemistry. No. 8. pp. 96 (In Russian).
11. Svetov V.A. Chernobyl Problems lights in the agro-industrial complex of Russia. 1996. Chemistry in agriculture. No.1. pp. 2–3 (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ORLOV Pavel Mikhailovich – Ph.D. chemical sciences, senior researcher laboratory of agricultural toxicology, FGBNU «VNII agrochemistry», 31A, Pryanishnikov st., Moscow, 127550.

AKANOVA Natalia Ivanovna – doctor of biological sciences, professor, chief researcher of the laboratory of agricultural chemistry of organic and lime fertilizers, FGBNU «VNII agrochemistry», 31A, Pryanishnikov st., Moscow, 127550.

CITATION FOR AN ARTICLE

Orlov P.M., Akanova N.I. Dynamics of ^{137}Cs content in soils agricultural land contaminated by the Chernobyl accident // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 1 (1). pp. 79–87.

УДК 66.097.3

**СИНТЕЗ ЛАКТУЛОЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ОРГАНИЧЕСКИХ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ КАТАЛИЗАТОРОВ****А.М. Сульман, В.Ю. Долуда, Н.В. Лакина, В.Г. Матвеева,
В.П. Молчанов, М.Г. Сульман***Тверской государственный технический университет
(г. Тверь), E-mail: sulman@online.tver.ru*

Аннотация. Лактулоза представляет собой синтетический дисахарид, широко применяемый для фармацевтических, нутрицевтических и пищевых целей из-за его полезного действия в качестве бифидогенного соединения для здоровья человека. Технология синтеза лактулозы основана на реакции изомеризации лактозы. Изомеризация лактозы является сложным процессом, характеризующимся образованием многочисленных побочных продуктов. Поэтому синтез эффективных катализаторов изомеризации лактозы важен для увеличения выхода лактулозы. В статье приведен синтез катализаторов на основе модифицированного борной кислотой сверхсшитого полистирола (СПС) и модифицированного борной кислотой оксида железа (III). Борат-ион импрегнировали в (СПС) и оксид железа (III) с использованием силанольных линкеров (октан-1,8-диилбисдиметилсиланола, декан-1,10-диилбисдиметилсиланола, тетрадекан-1,14-диилбисдиметилсиланола, гексадекан-1,16-диилбисдиметилсиланола, октадекан-1,18-диилбисдиметилсиланола). Катализаторы были исследованы с помощью инфракрасной спектроскопии, которая показала образование ковалентной связи между носителем, линкером и борат-ионом. Изучено влияние температуры, концентрации лактозы и катализаторов, скорости рН на активность катализатора. Было обнаружено, что наиболее активным катализатором, обеспечивающим наибольший выход лактулозы, является СПС-С16-ВО₃, однако каталитическая активность синтезированного катализатора ниже по сравнению с наиболее активным гомогенным катализатором тетраборатом натрия и выше по сравнению с обычными гетерогенными катализаторами. Обнаружено образование побочных продуктов – галактозы, глюкозы, фруктозы, эпилактозы и изосахариновой кислоты. Селективность процесса изомеризации лактозы может быть улучшена путем снижения температуры реакции до 70°C и рН до 11, поскольку более высокая температура и более высокий рН увеличивают гидролиз лактозы и лактулозы, способствуя образованию побочных продуктов. Синтезированные катализаторы показали достаточную стабильность при повторном тестировании в реакции.

Ключевые слова: катализ, лактоза, лактулоза, изомеризация, сверхсшитый полистирол, оксид железа (III) гидролиз, активность, селективность.

ВВЕДЕНИЕ

Селективный синтез лактулозы из лактозы является одной из важных реакций для фармацевтического и пищевого применения благодаря пребиотическим свойствам лактулозы [1]. Кроме того, лактоза является широко распространенным и недорогим субстратом молочной промышленности: ежегодно во всем мире производится миллион тонн лактозы, и ее изомеризация в лактулозу может стать возможным способом получения ценных продуктов [1, 2]. Существует несколько каталитических методов синтеза

лактозу, включая гомогенную каталитическую изомеризацию сильными кислотами [1, 3], сильными основаниями [4–7], амфотерными катализаторами (гидроксилами, сульфитами, боратами) [1, 7–12], гетерогенную каталитическую изомеризацию (ионообменные смолы, алюмосиликаты) [13, 14], биокаталитическую изомеризацию галактозидазами и изомеразными ферментами [10, 15, 16] и электрокаталитическую изомеризацию [17, 18]. Изомеризация лактозы представляет собой сложный химический процесс, характеризующийся образованием множества побочных продуктов, таких как эпилактоза, галактоза, глюкоза, фруктоза и изосахариновая кислота, а также лактулоза [1–19] (рис. 1).

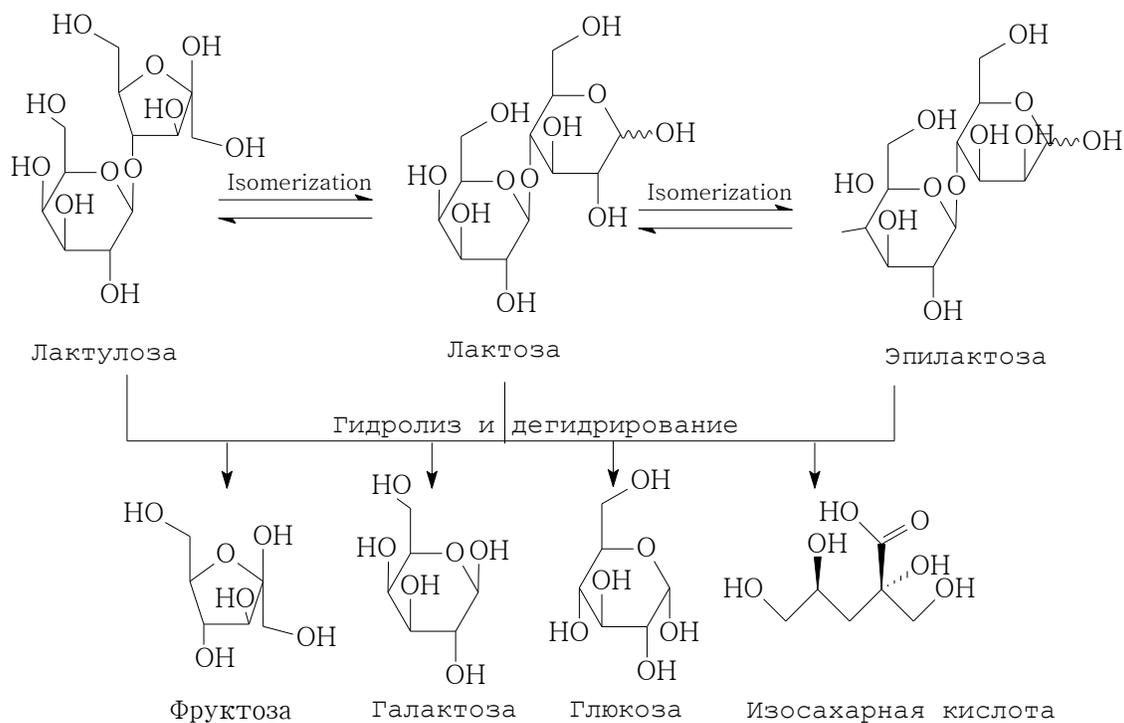


Рис. 1. Схема возможных реакций, происходящих при изомеризации лактозы

Каталитический метод изомеризации лактозы широко используется в промышленности для производства лактулозы. Однако выход лактулозы сильно различается (20–85 %) для разных катализаторов [7]. Наиболее эффективным процессом каталитической изомеризации является изомеризация в среде бората натрия. Изомеризация лактозы обычно проводится при температурах в диапазоне 40–90°C, pH 9–14 при атмосферном давлении, обеспечивает выход лактулозы до 80–85 % [7, 11]. Основным недостатком боратно-катализируемого метода синтеза лактулозы является необходимость очистки лактулозы от токсичных боратных загрязнений [1]. Возможным решением этой проблемы может быть синтез модифицированного боратом гетерогенного катализатора [9, 13]. Однако гетерогенные катализаторы обеспечивают более низкий выход целевого продукта [9, 13]. Поэтому разработка эффективных катализаторов изомеризации лактозы и исследование особенностей процесса являются критически важными для повышения выхода лактулозы и интенсификации процесса.

Полимер-стабилизированные носители представляют привлекательную возможность для разработки эффективного и стабильного гетерогенного катализатора [20]. Модификация полимеров с различными функциональными группами обычно используется для разработки эффективных катализаторов, обеспечивающих высокий выход целевого продукта наряду с улучшенной стабильностью катализатора [21]. Сверхсшитый полистирол (СПС) является представителем жестких сшитых полимеров, характеризующихся превосходной механической и химической стабильностью [22]. СПС может быть легко модифицирован различными активными группами и содержит как мелкие, так и крупные мезопоры, способствующие транспорту субстрата [22–24]. Другим возможным способом создания эффективных гетерогенных катализаторов является модификация поверхности традиционных оксидных носителей. Оксид железа (III) также представляет возможность для модификации поверхности, поскольку обладает ярко выраженными магнитными свойствами, что позволяет извлекать его непосредственно из раствора с магнитным полем [25–27]. В данной работе приводятся исследования борат модифицированного сверхсшитого полистирола и оксида железа (III) в процессе изомеризации лактозы. Каталитическую активность разработанных образцов сравнивали с традиционным процессом изомеризации лактозы, опосредованной щелочью, борат-ионами и алюминат ионами. Изучено влияние концентрации субстрата и катализаторов и различных условий реакции на активность и селективность изомеризации лактозы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Сверхсшитый полистирол был приобретен у компании Purolite Int. (Великобритания) как Macronet MN 270. Полимерные гранулы диаметром 0.5–1 мм дважды промывались ацетоном и водой и сушились в вакууме в течение 24 часов. Хлорид железа (III), пиридин, борная кислота, тетраборат натрия, гидроксид натрия, алюминат натрия, серная кислота, метанол, перекись водорода, ацетон, октан-1,8-диилбис (диметилсиланол), декан-1,10-диилбис (диметилсиланол), тетрадекан-1,14-диилбис (диметилсиланол), гексадекан-1,16-диилбис (диметилсиланол), октадекан-1,18-диилбис (диметилсиланол), лактоза, глюкоза, фруктоза были приобретены в компании Химмедсервис (Россия). Лактулоза, изосахариновая кислота и эпилактоза были приобретены в компании Sigma-Aldrich. Чистый азот с содержанием 99.9 % был приобретен в компании Тверьгазсервис. Дистиллированная вода очищалась с помощью системы ультраочистки воды Milli-Q.

Синтез катализаторов

Катализаторы были получены путем связывания борат-ионов с поверхностью носителя при помощи линкеров различной длины – октан-1,8-диилбисдиметилсиланола, декан-1,10-диилбисдиметилсиланола, тетрадекан-1,14-диилбисдиметилсиланола, гексадекан-1,16-диилбисдиметилсиланола, октадекан-1,18-диилбисдиметилсиланола.

Методика синтеза катализаторов показана на рис. 2, молекулярные линкеры присоединены к гидроксигруппам носителя, после чего происходит присоединение борат-иона к линкеру.

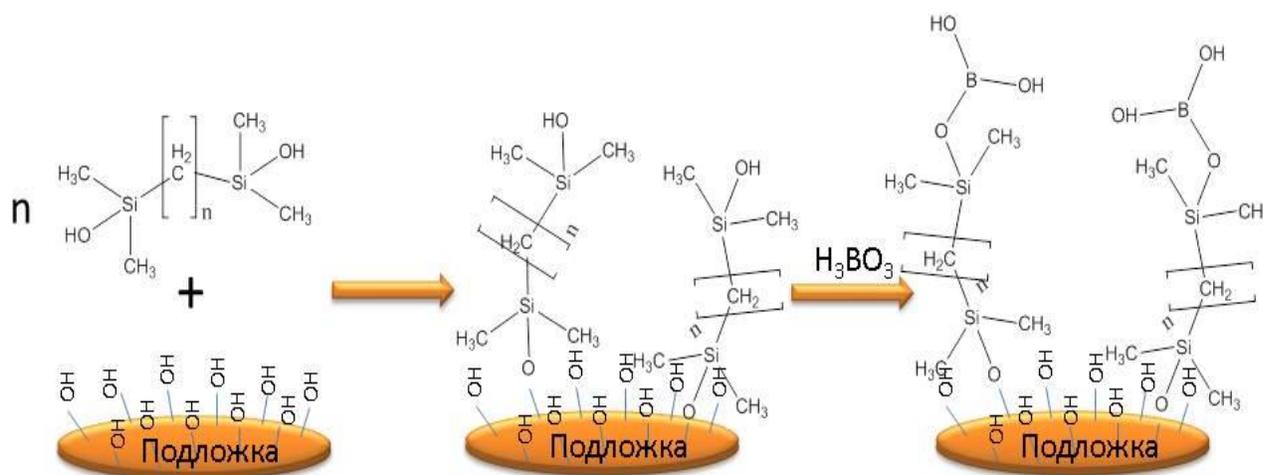


Рис. 2. Схема синтеза катализатора

1. Синтез катализаторов на основе СПС

СПС истирался и просеивался для получения фракции 47–70 мкм. Поверхность СПС была гидроксильирована с использованием перекиси водорода. Для этого 3 г СПС кипятили в 200 мл 5 мас.% раствора перекиси водорода в течение 2 часов, после этой обработки суспензию фильтровали и модифицированный НПС сушили при 105°C в течение 8 часов. Высушенный образец модифицированного СПС (2 г) суспендировали в 5 мл пиридина. После этого готовили 0.1 М растворы линкера и борной кислоты в пиридине в атмосфере азота. Затем 5 мл раствора линкера и раствора борной кислоты добавляли к суспензии СПС и суспензию встряхивали в течение 2 часов в атмосфере азота. После этого СПС отфильтровывали от раствора, промывали метанолом и водой и сушили при 60°C. Фильтрат анализировали на отсутствие борат-ионов с добавлением раствора ализарина красного в серной кислоте. Пять образцов с различной длиной линкера (С8, С10, С14, С16, С18) были подготовлены с использованием этой методики. Образцы были обозначены как СПС-С8-ВО₃, СПС-С10-ВО₃, СПС-С14-ВО₃, СПС-С16-ВО₃, СПС-С18-ВО₃ соответственно (таблица).

2. Синтез катализаторов на основе оксида железа (III)

Для синтеза катализатора 7,2 г хлорида железа (III) растворяли в 100 мл воды. Подготовленный раствор добавляли к 150 мл 1 М раствора гидроксида натрия. Осажденный гидроксид железа (III) отделяли центрифугированием и промывали дистиллированной водой в течение нескольких раз. После этого осадок прокаливали при 300°C в течение 3 часов и хранили на воздухе. Дальнейшая подготовка проводилась по той же методике, что и для катализаторов на основе НПС. Было приготовлено пять образцов с различной длиной линкера (С8, С10, С14, С16, С18). Образцы были обозначены как Fe₂O₃-С8-ВО₃, Fe₂O₃-С10-ВО₃, Fe₂O₃-С14-ВО₃, Fe₂O₃-С16-ВО₃, Fe₂O₃-С18-ВО₃ соответственно (таблица).

Характеристики активности катализаторов в процессе изомеризации лактозы

Катализатор	C (VO ₃ ²⁻)** моль/г	W*, с ⁻¹ *10 ²	Конверсия, %	Селективность, %
NaOH	-	0.51	48	55
Na ₂ B ₄ O ₇	-	1.25	95	88
NaAlO ₂	-	0.84	72	78
СПС-С8-VO ₃	0.01	0.33	27	54
СПС-С10-VO ₃	0.02	0.60	48	51
СПС-С14-VO ₃	0.02	0.64	51	57
СПС-С16-VO₃	0.03	0.93	74	78
СПС-С18-VO ₃	0.01	0.43	34	56
Fe ₂ O ₃ -С8-VO ₃	0.04	0.98	78	42
Fe ₂ O ₃ -С10-VO ₃	0.04	0.94	75	43
Fe₂O₃-С14-VO₃	0.05	1.10	91	42
Fe ₂ O ₃ -С16-VO ₃	0.04	0.96	77	41
Fe ₂ O ₃ -С18-VO ₃	0.03	0.90	72	38

* $TOF = \frac{C(Lac) \cdot X}{C(Cat) \cdot t \cdot 100}$, где X – конверсия, %, t – время; C(Lac) – начальная

концентрация лактозы, моль/л; C(Cat) – концентрация катализатора, моль/л.

W – скорость изомеризации лактозы при 15 % конверсии.

** – поверхностная концентрация (VO₃²⁻) рассчитана по данным ИК спектроскопии.

Методика изомеризации лактозы

Изомеризацию лактозы проводили в автоклаве Рагг 4561. Реактор был оборудован нагревательной рубашкой, охлаждающим змеевиком, фильтром в линии отбора проб и камерой для субстрата (для размещения раствора лактозы без смешивания с катализаторами), крыльчаткой с полым валом и лопастями для обеспечения эффективного перемешивания. Эффективный объем жидкости составлял 75 мл (общий объем 150 мл). Реактор работал при атмосферном давлении в атмосфере азота и температуре от 70 до 90°C. Концентрация лактозы варьировалась от 0,1 до 0,5 моль/л. Суспензию катализатора (35 мл), приготовленного с заданной концентрацией, помещали в реактор, в камеру подогрева помещали раствор лактозы (40 мл). После достижения необходимой температуры лактозу быстро вводили в реактор для начала процесса изомеризации. Эксперимент без добавления катализаторов был проведен при начальной концентрации лактозы 0,3 моль/л, 70°C в водной среде, не наблюдалось изомеризации лактозы в течение 3 часов реакции. Образцы реакционной смеси периодически отбирали для анализа. Реакцию в образцах останавливали, помещая образец в ледяную баню и добавляя несколько капель HCl для нейтрализации pH среды.

Анализ реакционной массы методом ВЭЖХ

Анализ реакционного раствора проводили с использованием ВЭЖХ-хроматографии ULTIMATE-3000. Для анализа образцов была выбрана ионообменная колонка размером 250 * 4 мм. В колонку помещался носитель репрогель Н (7 мкм) в качестве стационарной фазы, тогда как раствор серной кислоты 0,1 ммоль/л в деионизированной воде использовали в качестве подвижной фазы. Скорость потока поддерживали постоянной, равной 0,5 мл/мин при 80 атм и 30°C. Детектор рефрактометр использовался для обнаружения компонентов. Концентрации лактозы, лактулозы, глюкозы, фруктозы, галактозы, эпилактозы и изосахариновой кислоты были определены с использованием внешних стандартов.

ИК спектроскопия

Для определения количества ионов бора, прикрепленных к подложкам, были записаны ИК спектры при температуре окружающей среды с помощью спектрометра Prestige 21 Shimadzu, снабженного насадкой для диффузного отражения. Образцы помещали в приспособление для диффузного отражения и собирали 200 сканов от 800 до 2 000 см^{-1} с разрешением 4 см^{-1} . Для определения ионов борной кислоты учитывались сигналы 1 400 см^{-1} , соответствующие асимметричным растяжениям В-О, а также сигнал В-О-Н на 1 150 см^{-1} , кроме того, учитывалась полоса асимметричного растяжения этой же группы при 950 см^{-1} . Для количественного анализа использовали стандартные смеси СПС, оксида железа (III) и борной кислоты.

Сорбция жидкого азота

Для определения площади поверхности синтезированных катализаторов проводили сорбцию азота при нормальной температуре кипения жидкого азота с использованием аппарата Beckman Coulter SA 3100 (Coulter Corporation, США). Перед анализом образцы дегазировали в аппарате Beckman Coulter SA-PREP в вакууме в течение 1 часа.

Эксперименты по лазерному светорассеянию

Для определения среднего диаметра частиц синтезированного катализатора был использован метод лазерного светорассеяния с использованием анализатора Mastersizer 3000E (Malvern, Великобритания). Для этого готовили суспензию 0.01 мас.% катализаторов в воде на установке Hydro EV Mastersizer 3000E.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

ИК исследование

ИК исследование наиболее активных образцов на основе сверхсшитого полистирола СПС-С16-ВО₃, а также образца на основе оксида железа Fe₂O₃-С14-ВО₃, модифицированных борной кислотой, было выполнено для определения образования ковалентной связи между модифицированным носителем, линкером и борной кислотой. Спектры борной кислоты и иммобилизованного борат-иона могут быть идентифицированы по правилам симметрии для молекул типа YX₃ и YX₄ [28]. ИК спектр борной кислоты (рис. 3а) имеет следующие полосы: полоса при 950 см^{-1} может быть отнесена к асимметричному растяжению тетраэдра В, полоса при 1 120 см^{-1} может быть отнесена к смешанным В-ОН изгибаниям тригональной и тетраэдрической структур, полоса при 1 010 см^{-1} может быть отнесена к тригональному растяжению ВО, а полоса при 885 см^{-1} – к растяжению ВО.

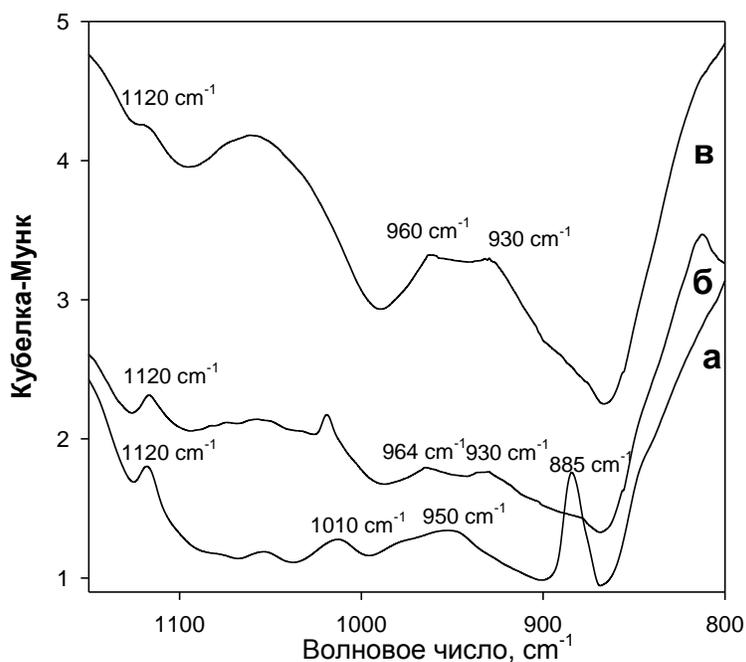


Рис. 3. ИК спектр: а – борной кислоты; б – СПС-С16-ВО₃; в – Fe₂O₃-С14-ВО₃

Иммобилизация борат-иона на модифицированном СПС и оксиде железа (см. рис. 3б, в) приводит к образованию моодентатного комплекса с линкером, характеризующимся симметрией C_{3v} . Поэтому полоса асимметричного растяжения тетраэдра В при 950 см^{-1} разделяется на два пика: $960\text{--}964\text{ см}^{-1}$. При этом полосы при 885 см^{-1} , отнесенные к растяжению В-О метаборат-иона, и 1010 см^{-1} , отнесенные к тригональному В-О, становятся крайне слабыми. Полоса при 1120 см^{-1} , отнесенная к В-ОН, сохраняется во всех образцах. В связи с этим можно констатировать образование связи Si-O-B на поверхности носителя.

Результаты определения активности катализаторов

Активность синтезированных и традиционных катализаторов оценивали при следующих условиях реакции: начальная концентрация лактозы $0,3\text{ моль/л}$, температура реакции 70°C и концентрация катализатора $0,1\text{ моль/л}$ и $\text{pH} = 11$. В процессе реакции было обнаружено образование лактулозы и основных побочных продуктов – глюкозы, фруктозы, галактозы, изосахариневой кислоты и эпилактозы – в следах. Наибольшее значение скорости реакции (см. таблицу) оказалось равным $0,0125\text{ с}^{-1}$ для традиционного катализатора $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, в то время как для наиболее активного катализатора на основе СПС (СПС-С16-ВО₃) скорость реакции составляла $0,0093\text{ с}^{-1}$ и для наиболее активного катализатора на основе оксида железа (III) (катализатор Fe₂O₃-С14-ВО₃) скорость реакции составила $0,011\text{ с}^{-1}$. Для катализаторов на основе СПС увеличение длины линкера от С8 до С16 приводит к соответствующему увеличению концентрации поверхностно-активных борат-ионов и увеличению скорости реакции, в то время как дальнейшее увеличение приводит к падению активности катализатора из-за низкой поверхностной концентрации борат-ионов. Обнаружено, что наибольшая достигнутая конверсия лактозы для катализаторов на основе СПС составила 74% и 78% соответственно, однако ее значение

ниже по сравнению с традиционно используемым катализатором $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Увеличение длины линкера для катализаторов на основе оксида железа (III) от C8 до C14 приводит к соответствующему увеличению поверхностной концентрации борат-ионов и скорости реакции, тогда как дальнейшее увеличение длины линкера до C18 приводит к снижению активности катализаторов из-за уменьшения поверхностной концентрации борат-ионов. Катализаторы на основе оксида железа (III) имеют более высокую начальную активность по сравнению с катализаторами на основе HPS из-за более высокой поверхностной концентрации ионов бората, однако селективность процесса ниже по сравнению с катализаторами на основе HPS из-за усиленного гидролиза лактозы и лактулозы на оксиде железа (III).

ВЫВОДЫ

Был произведен синтез новых катализаторов на основе СПС и оксида железа (III), модифицированных борат-ионами. Активность катализаторов определялась длиной линкера и поверхностной концентрацией борат-ионов. Каталитические свойства синтезированных катализаторов были исследованы в широком диапазоне условий реакции в процессе изомеризации лактозы. Было обнаружено, что наиболее активным катализатором, обеспечивающим наибольший выход лактулозы, является СПС-C16- BO_3 . Высокая селективность по отношению к лактулозе 78 % при конверсии лактозы 74 % может быть достигнута при следующих условиях реакции: начальная концентрация лактозы – 0,3 моль/л, температура реакции – 70°C и концентрация катализатора – 0,1 моль/л и pH = 11. Обнаружено образование побочных продуктов – галактозы, глюкозы, фруктозы, эпилактозы и изосахариновой кислоты. Селективность процесса изомеризации лактозы может быть улучшена путем снижения температуры реакции до 70°C и pH до 11, поскольку более высокая температура и более высокий pH увеличивают гидролиз лактозы и лактулозы, способствуя образованию побочных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айдер М., Хеллюкс Д. Направления развития в науке и технологиях продуктов питания. № 18. 2007. С. 356–364.
2. Руис-Магуте А.И., Санз М.Л., Корсо Н., Мартин-Альварес П.Дж., Ибанез Э., Мартинес-Кастро И., Олано А. Журнал сельскохозяйственной и пищевой химии. № 55. 2007. С. 3346.
3. Н. Хохно, С. Адачи. Дневник науки. № 65. 1982. С. 1421–1436.
4. Хашеми С.А., Аштани Ф.З. Обработка продуктов питания и биопродуктов. № 88. 2010. С. 181–192.
5. Морено Ф.Дж., Вильямиель М., Олано А. Журнал сельскохозяйственной и пищевой химии. № 51. 2003. С. 1894–2005.
6. Уистлер Р.Л. и Медкалф Д.Г. Журнал органической химии. № 27. 1962. С. 3560–3600.
7. Зокаи Ф., Когаша Т., Заре А., Солемани М. Процессы биохимии. № 37. 2002. С. 629–650.
8. Карделл-Кобас А., Корсо Н., Вильямиель М., Олано А. Журнал сельскохозяйственной и пищевой химии. № 56. 2008. С. 1095–1120.
9. Карубелли Р. Исследование углеводов. № 2. 1966. С. 480–510.
10. Ким Ю.С., Ким Ж.Е. Технология биоресурсов. № 128. 2013. С. 809–815.
11. Мендичино Дж.Ф. Журнал Американского химического общества. № 82. 1960. С. 4975–5120.

12. Верхар Л., Аласт М., Бенакерс Ж., Кустер Б. Журнал хроматографии А. № 170. 1979. С. 363–380.
13. Анхель де ла Фуэнте М., Хуарес М., де Рафаэль Д., Вилламиэль М., Олано А.М. Пищевая химия. № 66. 1999. С. 301–310.
14. Гаундер Р., Дэвис М. Журнал катализа. № 79. 2013. С. 126–154.
15. Ким Ю.С. Технология биоресурсов. № 104. 2012. С. 668–724.
16. Сонг Ю.С., Ли А., Парк С., Ким С.В. Исследование углеводов. № 369. 2013. С. 1–34.
17. Айдер М., Хименес-Видадь М. Инновационная наука о продуктах питания и новейшие технологии. № 16. 2012. С. 163–194.
18. Атт Айсса А., Агдер М. Журнал пищевой инженерии. № 119. 2013. С. 115.
19. Майкр Ж., Конрад Ж., Кляйбер И., Луц-Вахл С., Бьюфус У., Фишер Л. Журнал сельскохозяйственной и пищевой химии. № 52. 2004. С. 6983–7012.
20. Чанг Н., Сяо Н., Венг Х. Журнал китайского института инженеров-химиков. № 39. 2008. С. 449–454.
21. Ходж П. Современное состояние химической биологии. № 7. 2003. С. 362–375.
22. Цюрупа М.П., Даванков В.А. Реактивные и функциональные полимеры. № 53. 2002. С. 193–205.
23. Даванков В., Цюрупа М., Ильин М., Павлова Л. Журнал хроматографии А. № 965. 2002. С. 65–72.
24. Розенберг Г.И., Шабаева А.С., Моряков В.С., Мусин Т.Г., Цюрупа М.П., Даванков В.А. Реактивные полимеры. Ионообменники. Сорбенты. № 1. 1983. С. 175–184.
25. Брюнсен А., Утех С., Маскос М., Кнолл В., Ионас У. Журнал магнетизма и магнитных материалов. № 324. 2012. С. 1488–1450.
26. Хонг Р.И., Пан Т.Т., Ли Х.З. Журнал магнетизма и магнитных материалов. № 303. 2006. С. 60–65.
27. Ли Г., Чжоу З., Ли Ю., Хуан К., Чжонг М. Журнал магнетизма и магнитных материалов. № 322. 2010. С. 3862–3875.
28. Пик Д., Лютер Г.В., Спаркс Д.Л. Заметки геохимии и космохимии. № 67. 2003. С. 2551–2576.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СУЛЬМАН Александра Михайловна – аспирант, кафедра биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170023, г. Тверь, просп. Ленина, 25.

ДОЛУДА Валентин Юрьевич – кандидат химических наук, доцент, кафедра стандартизации, сертификации и управления качеством, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170023, г. Тверь, просп. Ленина, 25.

ЛАКИНА Наталия Валерьевна – кандидат химических наук, доцент, кафедра биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170023, г. Тверь, просп. Ленина, 25.

МАТВЕЕВА Валентина Геннадьевна – доктор химических наук, профессор, кафедра биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170023, г. Тверь, просп. Ленина, 25.

МОЛЧАНОВ Владимир Петрович – кандидат химических наук, доцент, кафедра стандартизации, сертификации и управления качеством, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170023, г. Тверь, просп. Ленина, 25.

СУЛЬМАН Михаил Геннадьевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой стандартизации, сертификации и управления качеством, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), 170023, г. Тверь, просп. Ленина, 25.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Сулман А.М., Долуда В.Ю., Лакина Н.В., Матвеева В.Г., Молчанов В.П., Сулман М.Г. Синтез лактулозы с использованием органических и неорганических катализаторов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 1 (1). С. 88–99.

UDK 66.097.3

LACTULOSE SYNTHESIS USING ORGANIC AND INORGANIC CATALYSTS

A.M. Sulman, V.Yu. Doluda, N.V. Lakina, V.G. Matveeva,

V.P. Molchanov, M.G. Sulman

Tver State Technical University (Tver),

E-mail: sulman@online.tver.ru

Abstract. Lactulose is a synthetic disaccharide widely produced for pharmaceutical, nutraceuticals and food purposes because of its beneficial effects as bifidogenic compound on human health. Technology of lactulose synthesis is based on the isomerization reaction of lactose. Lactose isomerization is a complex process characterized by formation of numerous side products. Therefore synthesis of efficient catalysts for lactose isomerization is important for increasing of lactulose yield. Synthesis of catalysts based on borate modified hypercrosslinked polystyrene (HPS) and borate modified iron oxide(III) and there study in the lactose isomerization are described in the current work. The borate ion was impregnated to HPS and iron oxide (III) using silanol linkers (octane-1,8-diylbis(dimethylsilanol), decane-1,10-diylbis(dimethylsilanol), tetradecane-1,14-diylbis(dimethylsilanol), hexadecane-1,16-diylbis(dimethylsilanol), octadecane-1,18-diylbis(dimethylsilanol)). The catalysts were investigated by FTIR showing formation of covalent bond between support, linker and borate ion. The influences of temperature, lactose and catalysts concentration, pH rate on catalyst activity were studied. The most active catalyst providing highest lactulose yield was found to be HPS-C16-BO₃, however the catalytic of synthesized catalyst is lower compare to most active sodium tetraborate homogeneous catalyst and higher compare to conventional heterogeneous catalysts. Nevertheless possibility of heterogeneous catalysts easy separation from reaction mass has a lot of advantages for industrial implementation. High selectivity to lactulose 78 % at 74 % lactose conversion can be achieved at following reaction conditions: lactose initial concentration 0.3 mol/l, reaction temperature 70°C and catalyst concentration 0.1 mol/l and pH=11. Formation of side products – galactose, glucose, fructose, epilactose and isosacharinic acid was observed. Selectivity of lactose isomerization process can be improved by decreasing reaction temperature down to 70°C and pH to 11 because higher temperature and higher pH increases lactose and lactulose hydrolysis, promoting formation of side products. Synthesized catalysts shows sufficient stability in repeated reaction test.

Keywords: lactulose, lactose, isomerization, hypercrosslinked polystyrene, iron oxide (III).

REFERENCES

1. M. Aider and D.d. Halleux, *Trends in Food Science & Technology*, 18 (2007) 356.
2. A.I. Ruiz-Matute, M.L. Sanz, N. Corzo, P.J. Martin-Alvarez, E. Ibanez, I. Martinez-Castro and A. Olano, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (2007) 3346.
3. H. Hohno and S. Adachi, *Journal of Dairy Science*, 65 (1982) 1421.
4. S.A. Hashemi and F.Z. Ashtiani, *Food and Bioproducts Processing*, 88 (2010) 181.
5. F.J. Moreno, M. Villamiel and A. Olano, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51 (2003) 1894.
6. R.L. Whistler and D.G. Medcalf, *The Journal of Organic Chemistry*, 27 (1962) 3560.
7. F. Zokaee, T. Kaghazchi, A. Zare and M. Soleimani, *Process Biochemistry*, 37 (2002) 629.
8. A. Cardelle-Cobas, N. Corzo, M. Villamiel and A. Olano, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56 (2008) 10954.
9. R. Carubelli, *Carbohydrate Research*, 2 (1966) 480.
10. Y.-S. Kim, J.-E. Kim and D.-K. Oh, *Bioresource Technology*, 128 (2013) 809.
11. J.F. Mendicino, *Journal of the American Chemical Society*, 82 (1960) 4975.
12. L.A.T. Verhaar, M.J.M. van der Aalst, J.A.W.M. Beenackers and B.F.M. Kuster, *Journal of Chromatography A*, 170 (1979) 363.
13. M. Angel de la Fuente, M. Juarez, D. de Rafael, M. Villamiel and A.M. Olano, *Food Chemistry*, 66 (1999) 301.
14. R. Gounder and M.E. Davis, *Journal of Catalysis*, (2013).
15. Y.-S. Kim and D.-K. Oh, *Bioresource Technology*, 104 (2012) 668.
16. Y.-S. Song, H.-U. Lee, C. Park and S.-W. Kim, *Carbohydrate Research*, 369 (2013) 1.
17. M. Aider and M. Gimenez-Vidal, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16 (2012) 163.
18. A. Aït Aïssa and M. Aïder, *Journal of Food Engineering*, 119 (2013) 115.
19. J. Mayer, J. Conrad, I. Klaiber, S. Lutz-Wahl, U. Beifuss and L. Fischer, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52 (2004) 6983.
20. H.-T. Chung, H.-C. Hsiao and H.-S. Weng, *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 39 (2008) 449.
21. P. Hodge, *Current Opinion in Chemical Biology*, 7 (2003) 362.
22. M.P. Tsyurupa and V.A. Davankov, *Reactive and Functional Polymers*, 53 (2002) 193.
23. V. Davankov, M. Tsyurupa, M. Ilyin and L. Pavlova, *Journal of Chromatography A*, 965 (2002) 65.
24. G.I. Rosenberg, A.S. Shabaeva, V.S. Moryakov, T.G. Musin, M.P. Tsyurupa and V.A. Davankov, *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents*, 1 (1983) 175.
25. A. Brunsen, S. Utech, M. Maskos, W. Knoll and U. Jonas, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324 (2012) 1488.
26. R.Y. Hong, T.T. Pan and H.Z. Li, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 303 (2006) 60.
27. G.-y. Li, Z.-d. Zhou, Y.-j. Li, K.-l. Huang and M. Zhong, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322 (2010) 3862.
28. D. Peak, G.W. Luther, D.L. Sparks, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (2003) 2551.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SULMAN Aleksandra Mihajlovna – department of biotechnology and chemistry, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 25, Lenin avenue, Tver, 170023, Russia.

DOLUDA Valentin Yur'evich – Ph.D. chemical sciences, associate professor, department of standardization, certification and quality management, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 25, Lenin avenue, Tver, 170023, Russia.

LAKINA Nataliya Valer'evna – Ph.D. chemical sciences, associate professor, department of biotechnology and chemistry, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 25, Lenin avenue, Tver, 170023, Russia.

MATVEEVA Valentina Gennad'evna – doctor chemical sciences, professor, department of biotechnology and chemistry, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 25, Lenin avenue, Tver, 170023, Russia.

MOLCHANOV Vladimir Petrovich – Ph.D. chemical sciences, associate professor, department of standardization, certification and quality management, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 25, Lenin avenue, Tver, 170023, Russia.

SULMAN Mihail Gennad'evich – doctor chemical sciences, professor, head of the department of standardization, certification and quality management, Federal state educational institution of the higher education «Tver State Technical University» (TvSTU), 25, Lenin avenue, Tver, 170023, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Sulman A., Doluda V., Lakina N., Matveeva V., Molchanov V., Sulman M. Lactulose synthesis using organic and inorganic catalysts // Vestnik of Tver state technical university. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 1 (1). pp. 88–99.