Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Тверской государственный технический университет» $(Tв\Gamma TY)$

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал

№ 3 (3), 2019

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2019. № 3 (3). 104 с.

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

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

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

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Адрес редакции

170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22

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

Цена свободная

Подписано в печать 02.09.2019

Формат 60х84 1/8 ISSN 2686-794X Главный редактор

Гультяев 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 02.09.2019

Format 60x84 1/8 ISSN 2686-794X 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 Y.Y. – d.t.s., prof.; Lepeshkin A.R. – d.t.s.;

Matar P.Y. – 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.-ingineer;

Yasinskaya N.N. – k.t.s., assoc. prof.;

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	9
Белов В.В., Смирнов М.А. Структура и свойства	
искусственного белого камня	9
Курятников Ю.Ю., Кочетков Р.С. Вопросы разработки	
керамзитобетона для монолитного строительства	15
Михеев И.И. Анализ и обоснование геометрии	
уплотненного ядра на режущих кромках рабочих органов	
землеройных машин	21
<i>Москвина Ю.Н., Лебедев Д.С.</i> Особенности организации	
строительства в условиях реконструкции промышленных	
зданий и сооружений	27
Назарова М.Ю., Красильников В.В., Никуличев В.Б.,	
Матвиенко О.И. Моделирование стационарных течений	
вязкопластических сред	34
Сизов Ю.В., Егоров С.М. К проблеме повышения	
прочности и уменьшения объема древесины	
для изготовления деревянных клееных балок	
(на примере двускатных армированных клееных балок)	40

ISSN 2686-794X B	естник Тверского госу	ударственного технического универс	итета
№ 3(3), 2019 Co	ерия «Строительство.	Электротехника и химические техно	ологии)
Соколов С.А., Чер	емных С.В. , Гав	риленко А.В.	
Деформации цилиг	ндрических обол	ючек из стали 45	
при сложном нагру	жении на трехзі	венных траекториях	44
ЭЛЕКТРОТЕХНІ	ЛКА	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	51
Араратьян Л.С., К	Хрупнов А.В., К о	жекин А.Н.	
Энергоэффективны	ые силовые трано	сформаторы	
с сердечником из	аморфной стали.		51
Качанов А.Н., Миј	ронов Е.А., Сели	верстова О.С.	
Исследование инду	укционного устр	ойства для нагрева	
плоских металличе	еских изделий в	бегущем	
электромагнитном	поле в программ	иной среде ELCUT	58
Качановский Ф.В.	Электропроводи	ность осадков,	
выпадающих в Тве	ри		65
химическая	ГЕХНОЛОГИЯ		72
Горцевич С.Л., Кра	а вченко П.А. Ис	сследование	
окислительного ра	астворения меди	при образовании	
тиосульфатно-тиог	цианатных компл	І ЕКСОВ	
в присутствии кис	порода воздуха		72
Луговой Ю.В., Чал	нов К.В., Косивц	ов Ю.Ю., Сульман Э.М.	
Влияние хлоридов	металлов на про	оцесс пиролиза	
растительной биом	ассы	•••••	76

ISSN 2686-794X Bed	етник Трерского госу	дарственного технического университ	гета
		Электротехника и химические технол	
312 3(3), 2017 Cop	ил «Строительство.	Shekipoteanika u animi teekhe teano.	101 11117
Манаенков О.В., Су	ул <mark>ьман Э.М., К</mark> а	осивцов Ю.Ю.,	
Кислица О.В., Луго	вой Ю.В., Ратн	кевич Е.А.	
Исследование проце	есса конверсии		
микрокристалличес	кой целлюлозы		
в субкритической во	оде		82
Семеенков С.Д., Ко	пылова Т.С., С	емеенков Д.С.	
Исследование образ	цов тканей с по	лимерными	
покрытиями с помо	щью электронно	ого микроскопа	94
Семеенков С.Д., Ко	пылова Т.С., Се	емеенков Д.С.	
Сравнительные хара	актеристики стр	руктур	
полимерных покрыт	гий на тканях, о	бработанных	
различными метода	ми		98

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE	9
Belov V.V., Smirnov M.A. Structure and properties of artificial white stone	9
Kuryatnikov Y.Y., Kochetkov R.S. The development of concrete for monolithic construction	15
Mikheev I.I. The analysis and justification of geometry of the condensed kernel on the cutting edges of working bodies of digging cars	21
Moskvina Y.N., Lebedev D.S. Features of the organization of construction in the conditions of reconstruction of industrial buildings and constructions	27
Nazarova M.Y., Krasilnikov V.V., Nikulichev V.B., Matvienko O.I. Simulating stationary flows of viscoplastic media	34
Sizov Y.V., Egorov S.M. Construction of the innovative family farm for cattle.	40
Sokolov S.A., Cheremnykh S.V., Gavrilenko A.V. Deformation of cylindrical shells of steel 45 under complex loading on three-link trajectories.	44
ELECTRICAL ENGINEERING	51

98

healthy working conditions for the production of sulfuric acid

and ensuring the full safety of service of enterprises......

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691. 544

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИСКУССТВЕННОГО БЕЛОГО КАМНЯ

В.В. Белов, М.А. Смирнов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Рассматривается возможность использования отходов пиления известняка для изготовления мелкозернистого бетона — искусственного белого камня, не уступающего по свойствам природному известняку. Показано, что структура искусственного белого камня имеет оптимальное содержание замкнутых пор, что во многом определяет высокие строительно-технические свойства полученного материала. Данная технология позволяет создать безотходное производство строительных материалов на основе местного сырья.

Ключевые слова: отходы пиления известняка, мелкозернистый бетон, структура, строительно-технические свойства.

Белый камень – известняк – древнейший строительный материал, применявшийся в Северо-Восточной Руси. Он имеет уникальную внутреннюю структуру. Кристаллы кальцита и обломки древних раковин соединены между собой таким образом, что объем внутренних пор достигает 20–30 % от объема камня. Кристаллы выпавшего из воды кальцита поперечником 0,01–0,1 мм имеют очертания «лапок» и сцепляются не только друг с другом, но и с обломками раковин по кривым швам, оставляя промежутки в виде микроскопических пор. Эти поры в большинстве случаев соединены друг с другом и являются «условно замкнутыми», благодаря чему камень «дышит» и вода в нем может медленно фильтроваться под давлением. Этим объясняется сравнительно высокая морозостойкость известняка. Объем пор всегда больше объема замерзающей воды, так как величина водопоглощения по объему мячковских известняков примерно в полтора раза меньше их общей пористости.

Основные физико-технические характеристики белого камня:

истинная плотность -2.7 г/см³;

средняя плотность -1,85-2,2 г/см³;

предел прочности на сжатие – 18–36 МПа;

водопоглощение по массе – 7–12 %;

морозостойкость не менее 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания.

При производстве изделий из этого материала на производственной базе ООО «Стройинжиниринг» (г. Старица Тверской обл.) образуются многочисленные отходы пиления. Целью данной работы было возвращение этих отходов в производственный оборот и получение на их основе изделий из искусственного белого камня, не уступающего по свойствам природному известняку.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Композиционный строительный материал является средой с весьма специфическими свойствами, где доминирует случайность форм и размеров частиц, физикомеханических свойств и условия взаимодействия частиц друг с другом зависят от влажности материала [1]. Формирование структуры дисперсных систем во многом обусловливает свойства композиционных материалов, получаемых на их основе. Прочность пространственной структуры дисперсной системы и ее устойчивость, характер поведения при течении, скорость разрушения и восстановления структуры непосредственно связаны друг с другом [2].

Вопросы оптимизации составов дисперсных систем широко рассматриваются многими исследователями в области строительного материаловедения [2–4 и др.]. Проявление физических явлений уплотнения (заполнения пустот) и раздвижки одних минеральных материалов другими с меньшими размерами зерен и их количественная оценка обеспечивают не только заполнение единицы объема монолитным веществом или материалом, но и формирование оптимальной макроструктуры минеральной части строительных композитов, к которым относятся, в частности, многокомпонентные высококачественные бетоны [5].

При подборе составов мелкозернистого бетона для производства облицовочных плит использовались следующие основные сырьевые компоненты:

белый портландцемент М400;

известняковая крошка с модулем крупности 3,06 (относится к крупным пескам); кварцевый песок (белый) с модулем крупности 1,06.

В рамках планированных экспериментов изучались зависимости основных физико-механических свойств бетонных образцов (плотности, предела прочности на сжатие, морозостойкости, водопоглощения) от соотношения компонентов бетонной смеси. Эксперименты проводились на смесях с различной подвижностью, которая оценивалась по расплыву конуса из смеси на встряхивающем столике. Из указанных смесей формовались образцы мелкозернистого бетона в виде кубов с ребром 7 см, на которых изучалось влияние соотношения расходов вяжущего вещества и заполнителей на кинетику набора прочности мелкозернистого бетона, а также на другие свойства бетона. Образцы изготовлялись в стальных формах. Формование осуществлялось по стандартной методике, уплотнение бетонной смеси происходило на лабораторной виброплощадке до появления цементного молока. Твердение образцов в планированных экспериментах по подбору составов производилось в лабораторной пропарочной камере по режиму 2 + 7 + 2 ч при максимальной температуре 70 + 5 °C. Твердение основных образцов подобранных составов облицовочных плит происходило в нормальных условиях при температуре 20 ± 2 °C с относительной влажностью среды твердения не менее 95 %. При этом с целью изучения кинетики твердения бетона производились испытания части образцов на сжатие в возрасте 2, 3, 7, 14 и 28 суток. В марочном возрасте (28 суток) определялись все нормативные свойства бетона. Структуру искусственного белого камня изучали на сколах с помощью электронного сканирующего микроскопа CAMSCAN-4, для чего производили съемку при увеличении в 50, 100 (обзорная), 500, 1 000 и 2 000 раз.

На первом этапе нашли область соотношений кварцевого (белого) песка и известняковой крошки, обеспечивающих наиболее плотную упаковку частиц смеси. Оказалось, что соотношение составляет около 1/3 от массы сухой смеси для кварцевого песка и чуть больше 2/3 от массы сухой смеси для известняковой крошки. Это

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

соотношение было принято как среднее в экспериментах. Для подбора составов мелкозернистого бетона был поставлен нелинейный трехфакторный планированный эксперимент типа B- D_{13} .

Уровни варьирования факторов:

расход белого цемента Ц $400-500 \text{ кг/м}^3$;

В/Ц 0,54-0,58;

соотношение между кварцевым песком и известняковой крошкой r = 0.3 - 0.4.

Постоянные факторы:

содержание добавки С-3 составляло 0,7 % от массы цемента;

уплотнение на вибростоле до появления цементного молока.

По результатам планированного эксперимента были построены математические модели зависимостей свойств бетона от факторов его состава, на основании которых определялся оптимальный состав, удовлетворяющий комплексу свойств с учетом возможной экономии белого цемента.

Математическая модель зависимости предела прочности на сжатие от состава бетона:

$$R_{c \rightarrow c} = 14,6 - 0,2x_1 - 0,64x_2 - 2,47x_3 + 1,16x_1^2 - 1,4x_2^2 + 0,27x_3^2 + 0,6x_1x_2 + 0,61x_1x_3 + 0,87x_2x_3,$$

где
$$x_1 = \frac{II - 450}{50}$$
; $x_2 = \frac{B/II - 0.56}{0.02}$; $x_3 = \frac{r - 0.35}{0.05}$.

Данная зависимость показывает, что прочность материала снижается с увеличением B/U, а также с увеличением содержания известняковой крошки в исследованных пределах. Наилучшие показатели достигаются при минимальном количестве воды затворения, однако смесь получается очень жесткой и ее уплотнение затруднено. Составы, имеющие хорошую удобоукладываемость, характеризуются высоким расходом цемента. Вместе с тем полученная модель зависимости морозостойкости бетона от его состава показала, что этот параметр имеет максимальное значение при определенном содержании известняковой крошки. Следовательно, в этом случае образуется структура композита, которая характеризуется оптимальным содержанием замкнутых пор, получающихся в результате заключения зерен известняка в своеобразную «цементную обойму» (рис. 1, 2). Этот эффект «цементной обоймы» был ранее отмечен для искусственного пористого заполнителя [6].

На основании проведенного планированного эксперимента был определен оптимальный состав бетона для облицовочных плит, который удовлетворял комплексу свойств с учетом экономии белого цемента.

Кинетика твердения бетона оптимального состава приведена на рис. 3, а основные показатели качества и их соответствие ГОСТ 6927 приведены в таблице. Значения прочности на сжатие образцов бетона приведены к стандартному образцу 15х15х15 см (с коэффициентом 0,85).

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

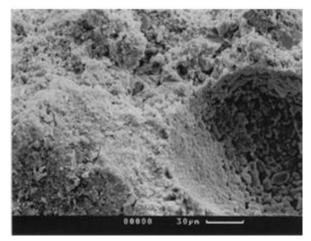


Рис. 1. Микрофотография скола искусственного белого камня при увеличении 500 крат

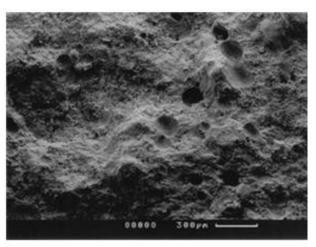


Рис. 2. Микрофотография скола искусственного белого камня при увеличении 2 000 крат

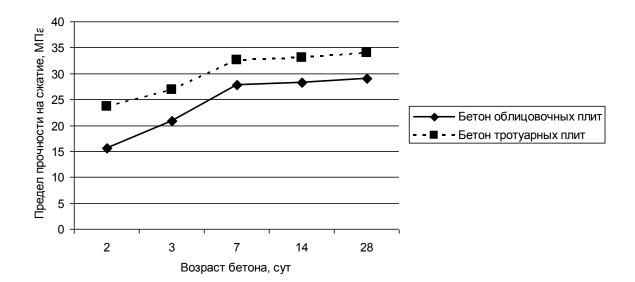


Рис. 3. Кинетика твердения искусственного белого камня (бетона на основе известняковой крошки) для изготовления облицовочных плит

Основные показатели качества искусственного белого камня и его соответствие ГОСТ 6927 для бетона облицовочных плит

Показатель	Значение	Соответствие ГОСТ		
Прочность на сжатие, МПа	29,1	Марка по прочности М300		
Средняя плотность, кг/м ³	2 230	_		
Водопоглощение, %	10,9	_		
Морозостойкость, циклов	162	Марка F 150		

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Таким образом, в результате выполненных исследований получен состав бетона на основе известняковой крошки, который благодаря оптимальной структуре идентичен и даже по некоторым показателям превосходит природный белый камень, что позволяет создать безотходное производство изделий из этих ценных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет. ГОУВПО Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. 2008. 116 с.
- 2. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высоко-качественные бетоны. М.: Ассоциация строительных вузов. 2006. 368 с.
- 3. Белов В.В., Смирнов М.А. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси // *Строительные материалы*. 2009. № 9. С. 88–90.
- 4. Белов В.В., Смирнов М.А. Теоретические основы методики оптимизации гранулометрического состава композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов // Российская академия архитектуры и строительных наук. Вестник отделения строительных наук. 2011. Вып. 15. С. 175–179.
- 5. Белов В.В., Смирнов М.А. Новые принципы определения состава высококачественного бетона // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2008. Вып. 13. С. 341–346.
- 6. Арбузова Т.Б. Исследование свойств и особенностей поведения в бетоне аглопоритового гравия из золы теплоэлектростанций. Дисс. ... канд. техн. наук. Калинин. 1972. 29 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Смирнов М.А. Структура и свойства искусственного белого камня // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 9–14.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ARTIFICIAL WHITE STONE

V.V. Belov, M.A. Smirnov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The possibility of recovery of a sawing of limestone for manufacture of fine concrete – the artificial white stone which isn't conceding on properties to natural limestone is considered. It is shown that the structure of an artificial white stone has the optimum maintenance

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

of closed pores that in many respects defines high structural and technical properties of the received material. This technology allows to create waste-free production of structural materials on the basis of these local raw materials.

Keywords: wastage of limestone, fine concrete, structure, structural and technical properties.

REFERENCES

- 1. Baranceva E.A., Mizonov V.E., Hohlova Y.V. Processy smeshivaniya sypuchih materialov: modelirovanie, optimizaciya, raschet [Processes of mixing of bulk materials: modeling, optimization, calculation]. Ivanovo: Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet im. V.I. Lenina. 2008. 116 p.
- 2. Bazhenov Y.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. Modificirovannye vysokokachestvennye betony [Modified high-quality concretes]. M.: Associaci stroitel'nyh vuzov. 2006. 368 p.
- 3. Belov V.V., Smirnov M.A. Formation of the optimal macrostructure of the building mixture. *Stroitel'nye materialy.* 2009. No. 9, pp. 88–90. (In Russian).
- 4. Belov V.V., Smirnov M.A. The theoretical basis of the optimization of the particle size distribution of compositions for the manufacture of unburned building conglomerates. *Rossijskaya akademiya arhitektury i stroitel'nyh nauk. Vestnik otdeleniya stroitel'nyh nauk.* 2011. Vol. 15, pp. 175–179. (In Russian).
- 5. Belov V.V., Smirnov M.A. New principles for determining the composition of high-quality concrete. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008. Vol. 13, pp. 341–346. (In Russian).
- 6. Arbuzova T.B. Study of properties and behavior of agloporite gravel in concrete from the ash of thermal power plants. Cand. Diss. (Engineering). Kalinin. 1972. 29 p. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOV Vladimir Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, adviser of the Russian academy of architecture and building sciences, head of chair of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Smirnov M.A. Structure and properties of artificial white stone // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 9–14.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

УДК 666.970

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ КЕРАМЗИТОБЕТОНА ДЛЯ МОНОЛИТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Ю.Ю. Курятников, Р.С. Кочетков

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы разработки модифицированного керамзитобетона для монолитного строительства. Разработаны математические модели зависимостей предела прочности на сжатие, средней плотности и коэффициента конструктивного качества от содержания микронаполнителя, суперпластификатора и дисперсного волокна. Разработаны составы керамзитобетона для транспортного строительства со средней плотностью 1 408–1 644 кг/м³, прочностью на сжатие 36,4–42,1 МПа, что соответствует маркам по плотности D1500–D1700, классам по прочности B25–B30. Использование дисперсного волокна способствует формированию более упорядоченных и однородных структур, характеризующихся повышенным сопротив-лением развитию трещин.

Ключевые слова: керамзитобетон, волокно, микронаполнитель, суперпластификатор, математические модели.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым днем находят все большее применение легкие бетоны, частью которых является керамзитобетон. Несущие или самонесущие стены из такого керамзитобетона плотностью от 1 500 до 1 800 кг/м³ являются оптимальным решением для жилищного строительства. В сравнении с бетонами плотностью, близкой к 2 500 кг/м³, нагрузка на перекрытия и фундамент сокращается, при улучшенных тепло- и звукоизоляционных свойствах. При строительстве керамзитобетон не требует ухода, а в процессе эксплуатации мала вероятность усадки здания [1].

Использование высокопрочного керамзитобетона при монолитном строительстве домов, мостов позволяет не только облегчить конструкцию, но и в значительной мере улучшить ее характеристики. Возведенные стены получаются легкими, прочными и теплыми, дополнительное утепление пенополистиролом с двух сторон позволяет упростить отделку и провести дополнительное утепление с выводом «точки росы» за границы стены дома. Такая конструкция будет практически «вечной» и главное – недорогой.

В строительстве монолитных конструкций существует проблема снижения веса, которую можно решить путем замены тяжелых строительных материалов на менее плотные. Для этого в качестве таких материалов могут использоваться легкие бетоны, которые существенно уменьшают нагрузку на несущие элементы сооружения [2]. В зависимости от применяемого крупного заполнителя легкий бетон подразделяют на керамзитобетон, аглопоритобетон, шлакобетон, пемзобетон и т. д. Для легкого бетона в качестве крупного заполнителя применяют природные и искусственные заполнители. К природным заполнителям относятся, например, пемза, вулканический туф, пористый известняк, к искусственным — керамзитовый гравий и его разновидности, аглопорит, алюмосиликатные микросферы, шлаковая пемза и др.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

На сегодняшний день одним из наиболее применяемых пористых заполнителей для легких бетонов является керамзит. Последние разработки позволяют получать керамзитовый гравий насыпной плотностью $300-600~{\rm kr/m}^3$, на основе которого можно изготавливать легкие бетоны плотностью до 1 000 ${\rm kr/m}^3$ и достаточной прочностью [3].

Разработку состава и технологии получения композиционного облегченного бетона с высокими показателями физико-механических свойств, трещиностойкости и водостойкости для применения в мостостроении в работе [4] осуществляли путем решения следующего комплекса задач. Применение смеси с низким В/Ц — отношением (менее 0,22) за счет использования эффективного гиперпластификатора; изготовление материала низкой средней плотности за счет воздухововлекающих добавок и использования повышенного содержания базальтового волокна; активации цемента и песка с помощью специального помольного комплекса; применение интенсивного перемешивания и равномерного распределения по объему смеси дисперсно-армирующих волокон.

Целью данной работы является разработка керамзитобетона для монолитного строительства с улучшенными физико-механическими свойствами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов применялся портландцемент ЦЕМ І 42,5Н, кварцевый песок (модуль крупности 2,4), керамзитовый песок (рис. 1) фракции 0–5 мм (модуль крупности 3,4, марка по насыпной плотности М500, марка по прочности П100), микрокремнезем, гиперпластификатор Melflux 5581F, базальтовое волокно (рис. 2) длиной 1 см.



Рис. 1. Керамзитовый песок



Рис. 2. Базальтовое волокно

Образцы изготавливались в соответствии с разработанной авторами методикой, которая заключается в следующем. На первом этапе изготавливали сухую готовую смесь (СГС), состоящую из всех компонентов за исключением портландцемента. Далее СГС перемешивали с цементом до получения однородной смеси. Затем добавляли воду до получения требуемой подвижности П4. При механической активации микрокремнезема и песка в присутствии поликарбоксилатного модификатора Melflux происходит преобразование данных сырьевых материалов в дисперсный композит. Данный композит

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

представляет собой равномерно перемешанные зерна песка и микрокремнезема, покрытые оболочкой структурированного модификатора. Вся поверхность зерен материала после измельчения покрыта Melflux, что обеспечивает высокую подвижность при меньшем количестве воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Был проведен планированный трехфакторный эксперимент (таблица), по результатам которого получены математические модели зависимостей предела прочности на сжатие, средней плотности и коэффициента конструктивного качества от содержания микронаполнителя, суперпластификатора и дисперсного волокна.

№	Уровни факторов		Значения факторов, %			
	X_1	X_2	X_3	МК	Melflux	Волокно
1	-1	-1	-1	0	0	0
2	+1	-1	-1	10	0	0
3	-1	+1	-1	0	0,4	0
4	-1	-1	+1	0	0	0,8
5	-1	0,19	0,19	0	0,238	0,476
6	0,19	-1	0,19	5,95	0	0,476
7	0,19	0,19	-1	5,95	0,238	0
8	-0,29	+1	+1	3,55	0,4	0,8

Матрица планирования эксперимента типа В-D₁₃

$$\rho = 1706 - 18, 3 \cdot x_1 + 8, 9 \cdot x_2 - 10, 9 \cdot x_3 + 1, 2 \cdot x_1^2 + 8, 8 \cdot x_2^2 - 11, 7 \cdot x_3^2 + 12, 8 \cdot x_1 \cdot x_2 - 10, 8 \cdot x_1 \cdot x_3 - 3, 7 \cdot x_2 \cdot x_3;$$

+1

-0,29

10

10

0,142

0,4

0.8

0,284

-0.29

+1

+1

+1

$$R = 32,8 + 0,83 \cdot x_1 + 2,4 \cdot x_2 + 0,032 \cdot x_3 - 0,91 \cdot x_1^2 + 0,19 \cdot x_2^2 - 0,42 \cdot x_3^2 - 0,07 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,08 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,09 \cdot x_2 \cdot x_3;$$

$$KKK = 19,203 + 0,681 \cdot x_1 + 1,32 \cdot x_2 - 7,37 \cdot x_3 - 2,73 \cdot x_1^2 - 6,17 \cdot x_2^2 + 2,37 \cdot x_3^2 - \\ -0,72 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,84 \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,14 \cdot x_2 \cdot x_3,$$

где X_1 , X_2 , X_3 — содержание микрокремнезема, Melflux 5581F и базальтового волокна соответственно.

Результаты представлены на рис. 3, 4.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

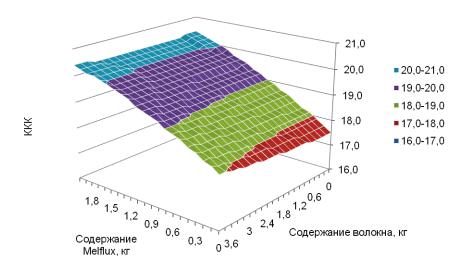


Рис. 3. Диаграмма зависимости коэффициента конструктивного качества от содержания Melflux 5581F и волокна

Анализ математических моделей показывает, что наибольшее влияние на рост прочности и коэффициента конструктивного качества керамзитобетона оказывает добавка суперпластификатора Melflux 5581F. При введении оптимального количества добавки за счет водоредуцирования и уплотнения межпорового пространства (между зернами керамзитового песка) прочность увеличивается на 24 %, коэффициент конструктивного качества – на 32 %.

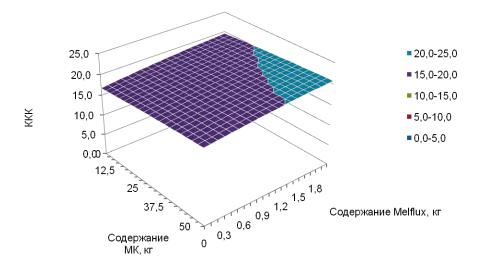


Рис. 4. Диаграмма зависимости коэффициента конструктивного качества от содержания Melflux 5581F и микрокремнезема

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Вторым по значимости является фактор введения микрокремнезема. При введении оптимального количества микрокремнезема увеличивается прочность и коэффициента конструктивного качества, а средняя плотность уменьшается. При введении базальтовых волокон до 4 кг на 1 м³ керамзитобетона отмечается небольшой прирост прочности на сжатие. Однако при превышении оптимальной объемной дозировки волокон прочностные характеристики начинают падать. Из-за перенасыщения бетона волокном происходит ухудшение структуры бетона. Основное значение базальтовых волокон — формирование более упорядоченных и однородных структур керамзитобетона, характеризующихся повышенным сопротивлением развитию трещин. Это ведет к снижению вероятности опасного хрупкого разрушения керамзитобетона с высокой прочностью, росту его способности к восприятию механических, динамических воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные математические модели зависимости предела прочности на сжатие, средней плотности и коэффициента конструктивного качества от содержания суперпластификатора микронаполнителя, И дисперсного волокна позволяют прогнозировать свойства и подбирать оптимальные составы керамзитобетона. Разработаны составы керамзитобетона для транспортного строительства со средней плотностью 1 408–1 644 $\kappa \Gamma/m^3$, прочностью на сжатие 36,4–42,1 МПа, что соответствует маркам по плотности D1500-D1700, классам по прочности B25-B30. С использованием недорогого сырья получены легкие бетоны, изготовленные из высокоподвижных смесей с марками по осадке конуса П4-П5, для применения в строительстве транспортных сооружений. Такие бетоны позволяют более чем на 30 % уменьшить нагрузку на конструкционные элементы сооружения, сохранить несущие характеристики, уменьшить стоимость строительства и улучшить теплофизические свойства конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Королев Е.В., Иноземцев А.С. Особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах // $Becmhuk M\Gamma CV$. 2015. № 6. С. 100–108.
- 2. Курятников Ю.Ю., Смирнов М.А., Федоров Ф.Г. Керамзитобетон с улучшенными характеристиками для транспортного строительства // *Технологии бетонов*. 2016. № 5–6. С 23-25.
- 3. Касторных Л.И., Синицина Н.А. Исследование свойств легких самоуплотняющихся бетонов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2017. № 1. С. 47–50.
- 4. Баранов И.М. Инновационные материалы для строительства и ремонта мостов // *Строительные материалы*. 2013. № 3. С. 82–87.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: yuriy–k@yandex.ru

КОЧЕТКОВ Роман Сергеевич – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: cochetckov.roma2013@yandex.ru

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курятников Ю.Ю., Кочетков Р.С. Вопросы разработки керамзитобетона для монолитного строительства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 15–20.

THE DEVELOPMENT OF CONCRETE FOR MONOLITHIC CONSTRUCTION

Y.Y. Kuryatnikov, R.S. Kochetkov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article deals with the development of modified expanded clay for monolithic construction. Mathematical models of the dependence of the compressive strength, average density and coefficient of structural quality on the content of the micro-filler, superplasticizer and dispersed fiber are developed. The compositions of expanded clay concrete for transport construction with an average density of 1 408–1 644 kg/m³, compressive strength of 36.4–42.1 MPa, which corresponds to the density grade D1500–D1700, strength class B25–B30. The use of dispersed fiber contributes to the formation of more ordered and homogeneous structures characterized by increased resistance to cracking.

Keywords: ceramsite concrete, fiber, micro-filler, superplasticizer, mathematical models.

REFERENCES

- 1. Korolev E.V., Inozemtsev A.S. Features of rheological properties of high–strength light concrete on hollow microspheres. *Vestnik MGSU*. 2015. No. 6, pp. 100–108. (In Russian).
- 2. Kuryatnikov Y.Y., Smirnov M.A., Fedorov F.G. Keramzitobeton with the improved characteristics for transport construction. *Tehnologii betonov*. 2016. No. 5-6, pp. 23–25. (In Russian).
- 3. Kastornykh L.I., Sinitsyn N.A. Issledovaniye of properties of the light self-condensed concrete. *Vestnik YUGU*. 2017. No. 1, pp. 47–50. (In Russian).
- 4. Baranov I.M. Innovative materials for construction and repair of bridges. *Stroitel'nye Materialy*. 2013. No. 3. pp. 82–87. (In Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, the Associate Professor of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yuriy–k@yandex.ru KOCHETKOV Roman Sergeyevich – 2nd year undergraduate, Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: cochetckov.roma2013@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Y.Y., Kochetkov R.S. Citation for an article the development of concrete for monolithic construction // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 15–20.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

УДК 624.132.3.002.5:624.131

АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ УПЛОТНЕННОГО ЯДРА НА РЕЖУЩИХ КРОМКАХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

И.И. Михеев

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье дается анализ и обоснование геометрии уплотненного ядра, которое образуется в виде нароста на затупленных режущих кромках рабочих органов землеройных машин при резании пластичных грунтов со стружкообразованием. Являясь прочным и устойчивым, уплотненное ядро принимает непосредственное участие в резании грунта, что делает необходимым учет его параметров при расчете сил резания грунта. На основании законов механики грунтов обоснована форма уплотненного ядра и его положение на площадке затупления. Полученные результаты проверены лабораторными исследованиями с применением предложенной методики на грунте с цветными вставками, что позволило изучить процесс возникновения уплотненного ядра и его форму. Полученные результаты хорошо согласуются с предложенными теоретическими зависимостями, что позволяет использовать их при практических расчетах сил резания грунта.

Ключевые слова: резание грунта, износ, затупление, уплотненное ядро, механика грунтов, теоретические зависимости, опытные исследования, стружкообразование.

ВВЕДЕНИЕ

При резании пластичных грунтов со стружкообразованием на площадках износа и затупления режущих кромок ножей образуется тело из уплотненного грунта — уплотненное ядро (УЯ), которое, являясь прочным и устойчивым, принимает не-посредственное участие в резании грунта. Это делает необходимым учитывать параметры УЯ при расчете сил резания грунта рабочими органами землеройных машин.

При изучении УЯ при резании грунта со стружкообразованием было установлено, что оно образуется как на площадках затупления, так и на площадках износа [1–6]. Оно формируется из примыкающего к площадкам слоя грунта, постоянно по своей структуре и устойчиво при движении ножа. Однако геометрия УЯ и расположение его оси относительно направления резания давались визуально. Так, А.Ю. Ветров описывает форму УЯ как клиновидную, имеющую закругленную вершину с углом 60° [2]. А.Н. Зеленин отмечает, что профиль УЯ ограничен кривыми, близкими по форме к параболе, а размер его в направлении резания равен 2/3 от толщины профиля [3]. В связи с этим необходима методика по определению геометрических параметров УЯ для последующего их использования в расчетных зависимостях усилий резания грунта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей статье геометрия УЯ и его расположение на поверхности затупления при стружкообразовании даны на основе законов механики грунтов [7].

На рис. 1 показана затупленная кромка режущего элемента, на закругленной вершине которого расположено уплотненное ядро $a\kappa b$, выполняющее функцию ножа с передней гранью $a\kappa$ и площадкой износа $b\kappa$.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

При этом усилие резания грунта на передней грани $a\kappa$ определяется удельным сопротивлением грунта сдвигу K_4 с отделением грунта в стружку, а на площадке износа $a\kappa$ – удельным сопротивлением грунта смятию K_5 с вдавливанием грунта в дно забоя. Из практики работы землеройных машин известно, что K_5 существенно больше K_4 [8, 9], то есть грунт, находящийся под нижней гранью $a\kappa$ в условиях всестороннего сжатия, требует больших усилий для его деформирования, чем грунт на передней грани $a\kappa$, находящийся со стороны открытой поверхности забоя.

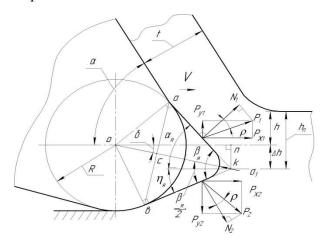


Рис. 1. Схема к определению параметров уплотненного ядра (УЯ) при резании пластичного грунта со стружкообразованием

Следует отметить, что авторы упомянутых выше публикаций без каких-либо обоснований располагают ось УЯ $(o\kappa)$ параллельно направлению резания грунта V [1–6]. Однако если представить на рис. 1 ось $o\kappa$ горизонтальной, то нормальная составляющая к площадке износа $g\kappa$ будет больше нормальной составляющей к передней грани $g\kappa$, то есть $N_2 > N_1$ (поскольку, как было отмечено выше, $K_5 > K_4$), а значит, положение УЯ будет неустойчивым. Однако результаты исследований показывают его устойчивость, что возможно при равенстве нормальных составляющих сил резания N_1 и N_2 к граням УЯ.

Для устранения этого противоречия ось $o\kappa$ УЯ должна быть отклонена в глубь грунтового массива на угол δ (см. рис. 1). Это приведет к увеличению угла резания $\alpha_{\mathfrak{g}}$ уплотненного ядра и уменьшению угла $\eta_{\mathfrak{g}}$ наклона грани $\mathfrak{g}\kappa$. На практике при увеличении угла резания α от 30° до 60° сила резания P_I возрастает на 60–80 % [2]. На площадке износа $\mathfrak{g}\kappa$ уменьшение угла $\eta_{\mathfrak{g}}$ вызовет, наоборот, уменьшение силы резания P_2 . Следовательно, увеличится нормальная составляющая N_I и уменьшится N_2 . При определенном угле δ будет выполнено условие $N_I = N_2$, при котором УЯ при движении будет устойчивым.

Таким образом, исходя из полученных выводов, полная толщина среза грунта h_n по сравнению с первоначальной h увеличится на Δh и составит

$$h_{n} = h + \Delta h. \tag{1}$$

Что касается угла β_n при вершине УЯ, то, поскольку взаимодействие поверхности УЯ с грунтом можно рассматривать как вдавливание штампа в грунтовый массив, наружные поверхности УЯ $a\kappa$ и $s\kappa$ должны быть площадками предельных напряженных

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

состояний, наклоненными к направлению главного нормального напряжения σ_1 под углом $(45^{\circ} - \frac{\rho}{2})$, где ρ – угол внутреннего трения грунта [7]. Следовательно, если исходить из теории предельных напряженных состояний, то угол при вершине УЯ

$$\beta_{\rm g} = 2 \cdot (45^{\circ} - \frac{\rho}{2}) = 90^{\circ} - \rho.$$
 (2)

Для исследуемого грунта, как показано выше, угол внутреннего трения $\rho=12^\circ$. Таким образом, расчетный угол уплотненного ядра согласно выражению (2) $\beta_{\rm g}$ должен быть равен $90-12=78^\circ$.

Геометрические параметры УЯ (см. рис. 1) для их использования в расчетах по определению усилий резания:

высота

$$o\kappa = \frac{R}{\sin(\frac{\beta_n}{2})};\tag{3}$$

боковые грани

$$a\kappa = \kappa = \frac{R}{ctg(\frac{\beta_{s}}{2})};$$
(4)

дополнительная толщина среза

$$\Delta h = n\kappa = o\kappa \cdot \sin \delta = \frac{R \cdot \sin \delta}{\sin(\frac{\beta_{s}}{2})};$$
(5)

угол резания

$$\alpha_{_{\mathcal{S}}} = \frac{\beta_{_{\mathcal{S}}}}{2} + \delta; \tag{6}$$

задний угол

$$\eta_{_{\mathcal{R}}} = \frac{\beta_{_{\mathcal{R}}}}{2} - \delta. \tag{7}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки предложенной на основании механики грунтов геометрии УЯ и его расположения на площадке затупления автором была разработана методика по изучению структуры УЯ непосредственно в забое с помощью цветных вставок из того же грунта, что и забой [9].

Характеристики грунта были следующие:

глина с содержанием глинистых фракций (d_{zp} < 0,005 мм) – 63–65 %; содержание пылеватых фракций (d_{zp} = 0,005 – 0,05 мм) – 35–37 %; весовая влажность – 21–22 %;

<u>№</u> 3(3), 2019

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

сцепление грунта $C = 2.2 \text{ H/cm}^2$;

угол внутреннего трения $\rho = 12^{\circ}$;

коэффициент внутреннего трения $\mu = \text{tg}\rho = 0.21$; угол внешнего трения $\varphi = 25^\circ$.

Радиус затупления ножа R равнялся 2 см, а его угол резания α находился в пределах от 60 до 30° (рис. 2–4), что соответствует значениям при работе землеройных машин. Была выполнена также проходка при нулевом угле резания (рис. 5).

После проходки грунт срезался перпендикулярно режущей кромке ножа, а полученная картина фотографировалась (рис. 2–5).



Рис. 2. Угол резания $\alpha = 60^{\circ}$



Рис. 4. Угол резания $\alpha = 30^{\circ}$



Рис. 3. Угол резания $\alpha = 45^{\circ}$



Рис. 5. Угол резания $\alpha = 0^{\circ}$

На полученных изображениях замерялись параметры УЯ, величины которых представлены в таблице.

Экспериментальные данные параметров УЯ

Угол резания ножа α, град.	Угол резания УЯ α _я , град.	Угол при вершине УЯ <i>β "</i> , град.	Угол наклона оси УЯ к направ- лению резания δ, град.	Толщина среза <i>h</i> , мм	Увеличение толщины среза Δh , мм
60	55	75	17	29	9
45	54	73	18	38	10
30	58	77	19	27	9
0	55	77	16	20	9
Среднее	55,5	75,5	17,5	_	9,25

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Полученные картины образования УЯ при резании пластичного грунта (см. рис. 2–5) показывают, что при движении УЯ деформация расположенного перед ним грунта начинается на расстоянии, равном высоте УЯ. В дальнейшем грунт наружной поверхностью УЯ вытесняется в стружку, а внутренней поверхностью вдавливается в дно забоя, то есть грунт обтекает УЯ в виде «чулка». При дальнейшем движении УЯ выполняет роль резца.

На основе механики грунтов показано, что угол $\beta_{\rm g}$ при вершине УЯ должен быть равным ($90^{\rm o}-\rho$), что подтверждено экспериментально, поскольку расчетное значение УЯ для испытанного грунта $\beta_{\rm g}=78^{\rm o}$ хорошо совпадает со средним опытным значением $\beta_{\rm g}=75,5^{\rm o}$ и не зависит от таких параметров резания, как угол резания ножа α и толщина среза (см. рис. 2–5, таблица).

Экспериментально подтверждено теоретическое обоснование отклонения оси УЯ в глубь грунтового массива на угол δ для выполнения условия равенства нормальных сил $N_I = N_2$ на гранях УЯ, при котором оно будет устойчивым при его движении. Для испытанного грунта угол $\delta = 17,5^{\circ}$. При этом полная толщина среза грунта h_n по сравнению с первоначальной h увеличилась на $\Delta h = 9,25$ мм (см. рис. 1-5, таблица). Видно, что ни угол δ , ни увеличение среза Δh не зависят от таких параметров резания, как угол резания ножа α и толщина среза (см. рис. 2-5, таблица).

выводы и заключение

- 1. Разработана методика по визуальному изучению внутренней структуры уплотненного грунта (УЯ) с помощью цветных грунтовых вставок, позволившая наглядно установить характер формообразования УЯ при резании пластичного грунта со стружкообразованием.
- 2. На основе механики грунтов теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены параметры УЯ и его расположение на поверхности затупления, что показывает возможность применения полученных результатов при практических расчетах сил резания грунта.
- 3. Для уточнения полученных в данной работе положений и выводов целесообразно проведение дополнительных опытных исследований с расширенным диапазоном таких параметров резания, как углы резания, толщина срезаемого слоя, а также применение пластичных грунтов с другими физико-механическими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Горячкин В.П. Собрание сочинений. М.: Колос. 1965. Т. 1. 720 с.
- 2. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М.: Машиностроение. 1971. 360 с.
- 3. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для землеройных работ. М.: Машиностроение. 1975. 422 с.
- 4. Федоров Л.И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение. 1990. 360 с.
- 5. Доценко А.И., Карасев Г.Н., Кустарев Г.В., Шестопалов К.К. Машины для земляных работ. М.: БАСТЕТ. 2012. $688~\rm c.$
- 6. Карасев Г.Н. Новые положения теории резания грунтов. URL: http://www.sdm.str-t.ru/publics/73 (дата обращения: 26.08.2019).
- 7. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа. 1979. 272 с.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

8. Огородников С.П. Некоторые вопросы теории подводной разработки грунтов // Гидромеханизация при разработке тяжелых грунтов. М.: ЦНИИТЭСтром. 1968. С. 9–43. 9. Михеев И.И., Разумов М.С. Износостойкость фрез земснарядов. Тверь: ТвГТУ. 2015. 120 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МИХЕЕВ Игорь Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и автоматизации машиностроения, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: mikheev1937@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Михеев И.И. Анализ и обоснование геометрии уплотненного ядра на режущих кромках рабочих органов землеройных машин // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 21–27.

THE ANALYSIS AND JUSTIFICATION OF GEOMETRY OF THE CONDENSED KERNEL ON THE CUTTING EDGES OF WORKING BODIES OF DIGGING CARS

I.I. Mikheev

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In article the analysis and justification of geometry of the condensed kernel which is formed in the form of an outgrowth on the blunted cutting edges of working bodies of digging cars when cutting plastic soil with a structurization is given. Being strong and steady, the condensed kernel is directly involved in soil cutting that does necessary to consider its parameters when calculating forces of cutting of soil. On the basis of laws of mechanics of soil the form of the condensed kernel and its situation on the platform of a blunting is proved. The received results are checked by laboratory researches with application of the offered technique on soil with color inserts that allowed to study process of emergence of the condensed kernel and its form. The received results, will well be coordinated with the offered theoretical dependences that allows to use them at practical calculations of forces of cutting of soil.

Keywords: soil cutting, wear, a blunting, the condensed kernel, mechanics of soil, theoretical dependences, skilled researches, chip formation.

REFERENCES

- 1. Goryachkin V.P. Sobranie sochinenij [Collected works]. M.: Kolos. 1965. T. 1. 720 p.
- 2. Vetrov Y.A. Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami [Cutting of soil by digging cars]. M.: Mechanical engineering. 1971. 360 p.
- 3. Zelenin A.N., Balovnev V.I., Kerov I.P. Mashiny dlya zemlerojnyh rabot [Cars for digging works]. M.: Mechanical engineering. 1975. 422 p.
- 4. Fedorov L.I. Rabochie organy zemlerojnyh mashin [Working bodies of digging cars]. M.: Mechanical engineering. 1990. 360 p.
- 5. Dotsenko A.I., Karasyov G.N., Kustarev G.V., Shestopavalov K.K. Mashiny dlya zemlyanyh rabot [Cars for earthwork]. M.: Bastet publishing House. 2012. 688 p.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

- 6. Karasyov G.N. New provisions of the theory of cutting of soil. URL: http://www.sdm.str-t.ru/publics/73 (date of access: 26.08.2019).
- 7. Tsytovich N.A. Mekhanika gruntov [Mekhanika of soil]. M.: The higher school. 1979. 272 p.
- 8. Ogorodnikov S.P. Nekotorye voprosy teorii podvodnoj razrabotki gruntov [Some questions of the theory of underwater development of soil] // Hydromechanization when developing heavy soil. M.: CNIITEStrom. 1968, pp. 9–43.
- 9. Mikheyev I.I., Razumov M.S. Iznosostojkost' frez zemsnaryadov [Wear of mills of dredges]. Tver: TvSTU. 2015. 120 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MIKHEEV Igor Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, the Associate Professor of the Department Technology and Automation of Mechanical Engineering, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mikheev1937@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Mikheev I.I. The analysis and justification of geometry of the condensed kernel on the cutting edges of working bodies of digging cars // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 21–27.

УДК 69.05

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬСТВА В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Ю.Н. Москвина, Д.С. Лебедев

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье рассмотрены основные особенности организации строительных работ на объектах промышленного фонда Российской Федерации. Приведены отличия планирования и разработки проектов организации строительной деятельности при реконструкции в условиях плотной городской застройки от нового строительства. Затронута возможность совмещения строительно-монтажных работ с производством предприятия и проанализирован эффект от такого комбинирования. Представлены особенности применения ручного труда строителей, использования средств механизации при эксплуатационной деятельности производств. Описаны мероприятия, проведение которых позволяет обеспечить безопасность и охрану трудовых ресурсов предприятия и подрядчика с указанием отличий организации работ подготовительного и основного периодов в условиях реконструкции от нового строительства. Даны рекомендации по эффективному совмещению технологического процесса предприятия со строительными работами при стремлении к удешевлению последних.

Ключевые слова: реконструкция, особенности организации строительства, строительно-монтажные работы, совмещение, технологический процесс.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России конструкции цехов и оборудование промышленных зданий и сооружений перестают отвечать предъявляемым к ним требованиям. Это обусловлено физическим и моральным износом строительных материалов в силу интенсивного использования производств, повышения требований нормативов по параметрам эксплуатационных качеств (ПЭК) и, в некоторых случаях, с нерентабельностью предприятий. В связи с этим возникает необходимость в проведении реконструкции зданий и сооружений, которые должны соответствовать современным стандартам нормативных источников, технико-экономическим показателям и быстрой окупаемости капитальных вложений в объект строительства. Этапам проектирования и организации строительного производства присущи свои особенности, которые рассмотрены в статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами и методами исследования являются изучение, обобщение, абстрагирование, аналогия, наблюдение, сравнение, анализ и синтез.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Градостроительному Пол реконструкцией, согласно кодексу Российской Федерации, понимается изменение объемно-планировочных решений объектов капитального строительства (ОКС) с заменой или восстановлением несущих и ограждающих строительных конструкций, а также повышение класса энергосбережения ОКС с модернизацией оборудования производственных зданий [1].

По данным Федеральной службы государственной статистики степень износа основных фондов Российской Федерации за период 2000–2017 гг. увеличилась с 39,3 до 47,3 % [2] (рис. 1). На гистограмме отражено моральное и физическое старение промышленного оборудования, падение производительности продукции и сокращение остаточного срока службы строительных конструкций.

решения возникшей проблемы следует восполнять производственные мощности 3a счет строительства новых энергоэффективных предприятий или реконструкции и модернизации существующих производств. Последнее становится актуальным при необходимости осуществления строительной деятельности в условиях плотной городской застройки и при наличии экономической целесообразности реконструкции, поскольку на территории РФ расположено большое количество недействующих промышленных объектов, строительные конструкции которых находятся в работоспособном состоянии, а мощности, с учетом мероприятий по их модернизации, соответствуют требованиям к формированию новых производств. Необходимость реконструкции в целом обусловлена многими причинами, в частности возросшими требованиями к технико-экономическим показателям ОКС, принятыми для снижения стоимости эксплуатации предприятий, и увеличением ветхого и аварийного промышленного фонда на фоне изношенности конструкций и недостаточности финансирования для поддержания их в надлежащем состоянии.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

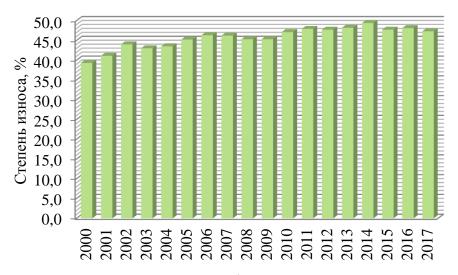


Рис. 1. Состояние основных фондов РФ за отчетный период

Организация труда в условиях реконструкции имеет свои характерные особенности, проявляющиеся не только на стадии проектирования, но и на этапе выполнения строительно-монтажных работ (СМР). Поэтому планирование и реализация проектов при таком строительстве требуют индивидуального инженерного подхода к решениям задач, одной из которых является выбор метода организации данной строительной деятельности.

Как и при новом строительстве, работы в условиях реконструкции могут быть спланированы тремя методами — последовательным, параллельным или поточным. При этом каждый из них имеет свои особенности, положительный и отрицательный эффект. В первом случае строительные работы выполняются отдельными участками с учетом приостановления на них деятельности предприятия, вследствие чего достигается быстрое возобновление части производства по окончании СМР на каждой захватке. Такая организация приводит к возрастанию общей продолжительности строительства по причине нерационального ритма работы бригад, увеличению сроков использования строительной техники и повышению затрат на ее содержание, что влечет за собой дополнительные финансовые затраты. Но, если прибыль от производства продукции превышает затраты от простоев фронта работ строителей, последовательный метод организации строительства может быть реализован при реконструкции. В иных случаях прибегают к использованию альтернативных схем.

При параллельном методе значительно повышается как скорость строительномонтажных работ, так и производительность труда подрядчика за счет того, что существует возможность деятельности бригад на всех этажах и захватках одновременно. Однако это требует полной остановки производства предприятия. Поточный же метод СМР применяется в случае наличия возможности организации последовательного, непрерывного и ритмичного производства строительных работ с целью эффективного использования материальных и трудовых ресурсов. В конечном счете выбор метода организации строительства при реконструкции зависит от технологии предприятия и экономической зависимости производства от получаемой прибыли и экономических потерь за счет прерывания выпуска готовой продукции. При любом варианте организации

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

строительной деятельности необходимо отражать во времени работы, движение трудовых ресурсов, материалов, машин и механизмов в соответствующих разделах графической части проекта организации реконструкции (ПОР).

При проектировании объектных и общеплощадочных стройгенпланов следует детально прорабатывать мероприятия, позволяющие значительно удешевлять стоимость строительных работ. Это, например, поиск возможности использования существующих мощностей производства в строительных целях и инфраструктуры стройплощадки для перемещения техники. Проблемой, возникающей на данном этапе и в дальнейшем, может явиться траектория перемещения монтажного крана, проходящая над подземными коммуникациями, что потребует либо их переноса, либо опирания путей движения крана на существующие несущие конструкции здания, и тогда следует проводить расчеты несущей способности конструкций с учетом дополнительной нагрузки и согласовывать такое решение с органами Ростехнадзора. В противном случае придется изменить точки стоянки крана или задействовать кран с большей грузоподъемностью и большим вылетом стрелы, что приведет к возрастанию стоимости реконструкции. Если монтаж конструкций крановщик может осложняется плохой видимостью, полагаться радиооповещение монтажников вне их видимости. При особых обстоятельствах требуется расширение управления техническими ресурсами, что также приводит к удорожанию работ по причине их повышенной трудоемкости.

Немаловажной особенностью организации реконструкции промышленных зданий и сооружений является необходимость совмещения деятельности предприятия со СМР [3]. При этом возможно их полное или частичное совмещение. В этом случае технологический процесс по выпуску готовой продукции пространственно разделяется со строительно-монтажными работами с целью освобождения некоторых помещений для производства работ и охраны труда. Такая организация находит применение на производстве, где существует возможность приостановки нескольких однотипных станков без уменьшения производительности предприятия за счет задействования резервных мощностей в других цехах. Поэтому при ведении строительных работ необходимо стремиться к максимальному совмещению их во времени с деятельностью завода, достигающемуся разбиением на захватки объекта реконструкции, которые освобождались бы предприятием и занимались подрядчиком. В некоторых случаях прибегают к полной остановке выпуска готовой продукции, когда совмещение работ не представляется возможным. Такой способ организации реконструкции применим к большинству предприятий с непрерывным технологическим процессом, особыми производствами, где есть вероятность повреждения оборудования или продукции строительными работами, а также при существовании возможности замещения данного производства на других аналогичных заводах без снижения производительности предприятия.

Другой особенностью организации строительства являются стесненные условия, то есть ограниченность пространства для производства строительно-монтажных работ вследствие непосредственного нахождения ранее смонтированных несущих и ограждающих конструкций здания и инженерных сетей, что ограничивает возможность применения строительной техники и использования площадок для складирования строительных материалов. Это приводит к поиску альтернативных решений по материально-техническому обеспечению реконструкции ОКС. В их число можно включить использование оснащения предприятий (тельферы, кран-балки, погрузчики) в

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

виде грузоподъемных ресурсов (рис. 2), а также площадей складирования строительных конструкций, которыми могут явиться существующие полезные пространства здания или его участков, подлежащих сносу. Возможно также применение монтажа конструкций с автотранспортных средств. Однако эти работы требуют обязательного увязывания с существующей технологией предприятия, поскольку может возникнуть занятость внутренних дорог строительной техникой и невозможность завоза сырья и вывоза готовой продукции с предприятия. Следует предусмотреть использование имеющихся инженерных сетей и временных сооружений для размещения строительного персонала. Это удешевит строительство благодаря сокращению продолжительности подготовительных работ, также имеющих свою специфику.



Рис. 2. Применение существующих мощностей производства в строительных целях

В условиях действующего производства для охраны труда рабочих и защиты технологического оборудования здания, инженерных сетей и зеленых насаждений бывает необходимо изолировать место проведения СМР от эксплуатационных процессов предприятия посредством устройства временных ограждений, навесов и перегородок [4]. Выполнение дополнительных проемов в несущих и ограждающих конструкциях для демонтажа крупногабаритного оборудования с последующей установкой новых агрегатов также часто применяется при реконструкции. Важным условием является и организация вытяжек с целью защиты строителей и монтажников от вредного воздействия производственной среды предприятия и, при необходимости, переноса существующих коммуникаций с устройством коробов во избежание их повреждения. Таким образом, большая часть подготовительных работ в условиях реконструкции приводит к их удорожанию. Однако их проведение необходимо для обеспечения нормальных условий труда и безопасности жизнедеятельности не только работников предприятия, но и строителей.

При организации работ основного периода следует иметь в виду, что состав, количественный объем и продолжительность работ зависят от индивидуальных особенностей конструктивных и технологических решений промышленного здания, его местоположения, экономической стабильности предприятия и возможности приостановки производства. В общем виде в этот период выполняются все основные работы: пристройки, надстройки, усиление строительных конструкций, ремонт или замена технологического оборудования, ремонт фасадов и крыш, перекладка наружных

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

коммуникаций и др. Предусматривается мусороудаление отходов производства СМР или частичной разборки здания, поскольку в некоторых случаях применение привычных способов выполнения этих операций не представляется возможным и приходится прибегать к использованию существующих мощностей предприятия (грузовые лифты, погрузчики). Тем не менее необходимо по возможности использовать индустриальные методы разборки и монтажа конструкций с применением типовых материалов для уменьшения сроков реконструкции и увеличения производительности труда. В таком случае будет соблюден важный аспект, касающийся минимального перерыва в функционировании действующего предприятия, поскольку незапланированные простои фронта работ приведут к убыткам от сокращения реализации продукции.

Повышенное внимание требуется уделять вопросам безопасности при производстве работ в условиях реконструкции. Если возникает ситуация, когда опасная зона строительных работ выходит на городские проезды, требуется предусматривать дополнительные ограждения в виде ограничений во вращении стрелы монтажного крана, установки козырьков над пешеходными проемами, а также закрывания проемов в наружных стенах для сохранения оконных и дверных заполнений [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При организации производства работ в условиях реконструкции промышленных фондов необходимо стремиться к удешевлению СМР посредством использования в строительных целях существующего оборудования предприятий, резервов складских помещений и совместного использования транспортных потоков на площадке строительства. Вследствие того, что в настоящее время происходит активное перепрофилирование ПОД современные требования нормативных документов нерентабельных производств, имеющих физический и моральный износ конструкций, и окупаемость капитальных вложений в реконструируемые объекты происходит быстрее, чем при строительстве новых зданий и сооружений, реконструкция действующих предприятий на фоне интенсивно развивающейся экономики РФ имеет одно из первостепенных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Градостроительный кодекс Российской Федерации: ФЗ от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 25.12.2018). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040 /cdec16ec747f1 1f3a 7a39c7303d03373e0ef91c4/ (дата обращения: 25.04.2019).
- 2. Степень износа основных фондов на конец года / Офиц. сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстат) -2019. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/fund/# (дата обращения: 26.04.2019).
- 3. Руководство по организации строительного производства в условиях реконструкции промышленных предприятий, зданий и сооружений / ЦНИИОМТП. М.: Стройиздат. 1982. 223 с.
- 4. Саморегулируемая организация «Некоммерческое партнерство "Юграстрой"». Организация строительного производства. Промышленное строительство. Реконструкция зданий и сооружений: стандарт организации: М.: ООО «ЦНИОМПТ». 2012. 121 с.
- 5. Антонец В.Н. Особенности производства строительно-монтажных работ в условиях реконструкции зданий и сооружений. Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т. 2012. 91 с.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МОСКВИНА Юлия Николаевна — кандидат философских наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. Е-mail: julim@yandex.ru ЛЕБЕДЕВ Дмитрий Сергеевич — студент 4-го курса кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. Е-mail: lebedevdiman97@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Москвина Ю.Н., Лебедев Д.С. Особенности организации строительства в условиях реконструкции промышленных зданий и сооружений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 27–34.

FEATURES OF THE ORGANIZATION OF CONSTRUCTION IN THE CONDITIONS OF RECONSTRUCTION OF INDUSTRIAL BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

Y.N. Moskvina, D.S. Lebedev

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article discusses the main features of the organization of construction work at the facilities of the industrial fund of the Russian Federation. The differences in the planning and development of projects for the organization of construction activities during reconstruction in the conditions of dense urban development from new construction are given. The article also touched upon the possibility of combining construction and assembly works with the production of an enterprise and analyzed the effect of such a combination. The features of the use of manual labor by builders, the use of mechanization tools during production operations are described, and measures are described to ensure the safety and security of labor resources of the enterprise and the contractor with a description of the differences in the organization of the preparatory and main periods of work in terms of reconstruction from new construction. Recommendations are given that help to effectively combine the technological process of an enterprise with construction work, while striving to reduce the cost of the latter.

Keywords: reconstruction, especially the organization of construction, construction and installation work, combination, technological process.

REFERENCES

- 1. Urban Development Code of the Russian Federation: Feder. Law of December 29, 2004 No. 190-FZ (as amended on December 25, 2018) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/cdec16ec747f11f3a7a39c7303d03373e0ef91c4/ (date of access: 04.25.2019).
- 2. The degree of depreciation of fixed assets at the end of the year. Federal State Statistics Service (Rosstat) 2019. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/fund / #. (date of access: 04.26.2019).
- 3. Rukovodstvo po organizacii stroitel'nogo proizvodstva v usloviyah rekonstrukcii promyshlennyh predpriyatij, zdanij i sooruzhenij [Guidance on the organization of construction

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

production in the conditions of reconstruction of industrial enterprises, buildings and structures]. TSNIIOMTP. M.: Stroyizdat, 1982. 223 p.

- 4. Samoreguliruemaya organizaciya nekommercheskoe partnerstvo «YUgrastroj». Organizaciya stroitel'nogo proizvodstva. Promyshlennoe stroitel'stvo. Rekonstrukciya zdanij i sooruzhenij: standart organizacii / Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «Centr nauchnyh issledovanij organizacii, mekhanizacii, tekhnologii stroitel'nogo proizvodstva» [Self-regulatory organization non-profit partnership "Yugrastroy". The organization of construction production. Industrial engineering. Reconstruction of buildings and structures: standard of organization / Center for Scientific Research on Organization, Mechanization, and Building Production Technology Limited Liability Company] (TsNIOMPT LLC): M., 2012. 121 p.
- 5. Antonets V.N. Osobennosti proizvodstva stroitel'no-montazhnyh rabot v usloviyah rekonstrukcii zdanij i sooruzhenij [Features of the construction and installation works in the reconstruction of buildings and structures: studies. Manual]. Khabarovsk: Pacific Publishing House state University. 2012. 91 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MOSKVINA Julia Nikolaevna – Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: julim@yandex.ru

LEBEDEV Dmitry Sergeevich – 4th year student of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: lebedevdiman97@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Moskvina Y.N., Lebedev D.S. Features of the organization of construction in the conditions of reconstruction of industrial buildings and constructions // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 27–34.

УДК 522.54:532.135

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД

М.Ю. Назарова, В.В. Красильников, В.Б. Никуличев, О.И. Матвиенко

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород)

Аннотация. В статье рассмотрено влияние структуры и химического состава молотого доменного шлака на реологические свойства шлаковых суспензий. Изучены различные по составу и структуре доменные шлаки при скоростях сдвига $1\div50~c^{-1}$. На основе экспериментальных данных представлена теоретическая модель течения в плоском бесконечном канале при конечном перепаде внешнего давления. Получено точное решение системы уравнений, описывающих рассматриваемое течение.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Ключевые слова: доменный шлак, структура, химический состав, реологические свойства, квазибингамовская среда.

Производственные процессы, протекающие при высоких температурах (например, металлургические), сопровождаются выделением побочных продуктов, называемых шлаками. Среди металлургических шлаков особенно привлекают внимание строителей доменные шлаки, поскольку для них характерны постоянный химический состав и экологическая безопасность. Кроме того, доменные шлаки обладают вяжущими свойствами, что важно для строительного дела.

В данной работе исследуются реологические свойства шлаковых суспензий на примерах конкретных доменных шлаков, производимых на Новокузнецком, Мариупольском и Челябинском металлургических комбинатах, и дается теоретическое описание течения шлаковых суспензий на основе новой реологической модели в плоском бесконечном канале при конечном перепаде внешнего давления.

Для экспериментальных исследований указанных выше шлаковых суспензий был использован ротационный вискозиметр «Rheotest-2», имеющий коаксиальные цилиндры [1]. Получены реограммы, показывающие изменение напряжения сдвига τ в зависимости от изменения скорости сдвига %. При этом интервал изменения скорости сдвига составлял $1\div50~c^{-1}$ и напряжение сдвига менялось в интервале $120\div250~\Pi$ а. На рис. 1 в качестве примера показана реограмма для новокузнецкого афанитового шлака.

Суспензии новокузнецкого и мариупольского образцов имеют очень малый предел текучести (не более $10\div15$ Па). Для них величина динамической вязкости равна соответственно 47 и 35 мПа·с. Суспензия челябинского образца имеет предел текучести 35 Па и динамическую вязкость, равную $120\div140$ мПа·с. Ход кривых на реограммах обнаруживает слабую нелинейность от скорости сдвига % по сравнению с зависимостями, характерными для бингамовских сред [2]. Эмпирическое реологическое уравнение для данных суспензий предлагается в виде

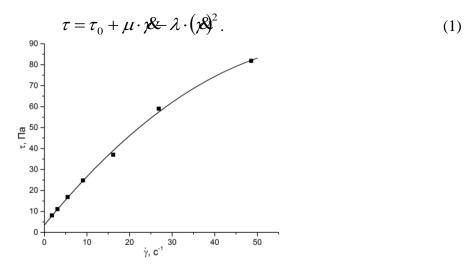


Рис. 1. Реограмма напряжения сдвига от скорости сдвига суспензии новокузнецкого афанитового шлака

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Символом • помечены экспериментальные точки, сплошная кривая соответствует теоретической зависимости

$$\tau = 3,50754 + 2,48875 \approx 0,01793 (x)^2$$

где μ – постоянная динамическая вязкость, а коэффициент λ характеризует консистенцию суспензии. В связи с наличием в уравнении (1) нелинейного слагаемого будем называть рассматриваемые шлаковые суспензии, описываемые данным реологическим уравнением, квазибингамовскими средами.

По аналогии с работой [2] запишем обобщенное реологическое уравнение квазибингамовской среды, соответствующее уравнению (1):

$$T = \tau_0 + 2\mu \cdot H - \lambda H^2, \tag{2}$$

где T – величина касательных напряжений, H – величина скоростей деформации сдвига в произвольной точке среды:

$$T = \left\{ \frac{1}{6} \left[(\tau_{xx} - \tau_{yy})^2 + (\tau_{yy} - \tau_{zz})^2 + (\tau_{zz} - \tau_{xx})^2 \right] + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yx}^2 \right\}^{1/2}; \tag{3}$$

$$H = \left\{ \frac{1}{6} \left[\left(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \right)^2 + \left(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz} \right)^2 + \left(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx} \right)^2 \right] + \varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{xz}^2 + \varepsilon_{yx}^2 \right\}^{1/2}. \tag{4}$$

Рассмотрим задачу о стационарном течении несжимаемой квазибингамовской среды в плоском канале с законом (2) при постоянной температуре и заданном перепаде давлений по аналогии с работой [2]. На рис. 2 приведена схема такого течения квазибингамовской среды с граничными условиями, аналогичными [2]:

для скоростей: $V_x \equiv U = 0$ при $y = \pm d$, $v^s = v^p$ при $y = \pm y_1$;

для давлений: $p=p_1$ при $x=0,\; p=p_2$ при $x=l,\; p_1>p_2$.

Стационарность течения $\frac{d\upsilon}{dt} = 0$ и несжимаемость среды обусловливают зависимость скорости υ только от переменной.

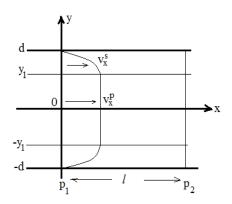


Рис. 2. Схема течения квазибингамовской среды

между параллельными плоскостями: $\pm d$ – границы канала; $\pm y_1$ – границы между областями сдвигового (s) и пластического (p) течений; v_x – скорость течения

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Кроме того, движение среды вдоль оси OY отсутствует, то есть $v_v = 0$.

Система уравнений для данного плоского течения квазибингамовской среды и равенства (2)–(4) аналогично работе [2] позволяет привести реологическое уравнение (2) при $y \ge 0$ к виду

$$\tau_{xy} = -\tau_0 + \mu \frac{dv}{dy} - \lambda (\frac{dv}{dy})^2, \tag{5}$$

то есть τ_{xy} является функцией только переменной y.

Решение задачи находим в верхней полуплоскости рис. 2: $0 \le y \le d$. В нижней полуплоскости решение получается симметричным образом.

В области сдвигового течения легко получаются выражения для напряжений:

$$\tau_{xy} = -\frac{\Delta p}{l} y, \qquad \tau_{xx} = \tau_{yy} = -p_1 + \frac{\Delta p}{l} x, \qquad (6)$$

после чего реологическое уравнение (5) имеет вид

$$-\frac{\Delta p}{l}y = -\tau_0 + \mu \frac{d\upsilon}{dy} - \lambda (\frac{d\upsilon}{dy})^2. \tag{7}$$

Его решение с использованием сформулированных граничных условий приводит к выражению для скорости сдвигового течения квазибингамовской среды:

$$\upsilon = \frac{\mu}{2\lambda} (y - d) + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\Delta p}{\lambda l}} [(d + a)^{3/2} - (y + a)^{3/2}], \quad a = \frac{l}{\Delta p} (\frac{\mu^2}{4\lambda} - \tau_0), \tag{8}$$

при этом эффективная динамическая вязкость $\mu_{\it eff}$ определится равенством

$$\mu_{eff} = \mu - \lambda \frac{d\upsilon}{dx} = \frac{\mu}{2} + \sqrt{\frac{\lambda \Delta p}{l}(y+a)} \,. \tag{9}$$

Из выражения (9) видно, что эффективная вязкость возрастает с увеличением переменной y, что в свою очередь означает, что эта вязкость возрастает с увеличением скорости сдвига. Последнее свидетельствует о проявлении дилатантных свойств квазибингамовской среды.

В области пластического течения скорость течения является максимальной по сравнению со скоростью течения в сдвиговой области. Определив максимальное значение сдвиговой скорости υ_{\max}^s , тем самым находим постоянную скорость пластического течения υ^p :

$$\upsilon^{p} = \frac{l}{\Delta p} \left\{ -\frac{\mu}{2\lambda} \left(\frac{\Delta p}{l} d + \frac{\mu^{2}}{6\lambda} - \tau_{0} \right) + \frac{2}{3\sqrt{\lambda}} \left(\frac{\Delta p}{l} d + \frac{\mu^{2}}{4\lambda} - \tau_{0} \right)^{3/2} \right\}. \tag{10}$$

Несложные расчеты показывают, что на границе пластического течения, то есть в

точке $y_1 = \frac{l}{\Delta p} \tau_0$, $\mu_{\rm eff}(y_1) = \mu$. Это означает, что у пластического течения имеется вязкость, не равная нулю.

В частном случае отсутствия динамической вязкости ($\mu = 0$) получается модель Гершеля — Балкли, описывающая реологию утяжеленных буровых растворов [3], с реологическим законом $\tau = \tau_0 - \lambda(\chi^2)^2$, в рамках которой из формул (8) и (10) получим:

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

$$\upsilon^{s} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\Delta p}{\lambda l}} \left[(d + \frac{l\tau_{0}}{4\Delta p\lambda})^{3/2} - (y + \frac{l\tau_{0}}{4\Delta p\lambda})^{3/2} \right], \quad \upsilon^{p} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\Delta p}{\lambda l}} (d - \frac{l\tau_{0}}{\Delta p})^{3/2} \right\},$$

Резюмируя вышеизложенное, отметим:

- 1. Для описания реологических свойств квазибингамовских сред, характерными представителями которых являются шлаковые суспензии Новокузнецкого, Мариупольского, Челябинского металлургических комбинатов, предложено реологическое уравнение (1), учитывающее зависимость динамической вязкости от скорости сдвига.
- 2. При стационарном течении квазибингамовской среды в канале, ограниченном параллельными плоскостями, при конечном перепаде давлений для пластического течения эффективная вязкость совпадает с обычной постоянной динамической вязкостью $\mu = const$.
- 3. В частном случае отсутствия динамической вязкости ($\mu=0$) предлагаемая реологическая модель сводится к модели Гершеля Балкли, описывающей реологию утяжеленных буровых растворов [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Малькова М.Ю. Влияние особенностей технологии на свойства мелкозернистых шлакобетонов // Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения: 8 академические чтения РААСН. Самара. 2004. С. 323–327.
- 2. Гноевой А.В., Климов Д.М., Чесноков В.М. Основы теории течений бингамовских сред. М.: Физматлит. 2004. 272 с.
- 3. Булатов А.И. Системный анализ исследований течения вязко-пластичных жидкостей глинистых и цементных растворов // *Бурение и нефть*. 2016. № 3. С. 18–23.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НАЗАРОВА Марина Юрьевна — доктор физико-математических наук, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, ул. Победы, 85. E-mail: nazarova m@ bsu.edu.ru

КРАСИЛЬНИКОВ Владимир Владимирович — профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, ул. Победы, 85.

НИКУЛИЧЕВ Виталий Борисович — ст. преподаватель кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, ул. Победы, 85. E-mail: v.b.nikulichev@mail.ru

МАТВИЕНКО Ольга Ивановна — магистрант кафедры материаловедения и нанотехнологий, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, ул. Победы, 85.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Назарова М.Ю., Красильников В.В., Никуличев В.Б., Матвиенко О.И. Моделирование стационарных течений вязкопластических сред // Вестник Тверского государственного технического университета. Сер.: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 2 (2). С. 34—39.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

SIMULATING STATIONARY FLOWS OF VISCOPLASTIC MEDIA

M.Y. Nazarova, V.V. Krasilnikov, V.B. Nikulichev, O.I. Matvienko

Belgorod State University (Belgorod)

Abstract. The article considers the influence of the structure and the chemical composition of ground blast furnace slag on rheological properties of slag suspensions. Different composition and structure of blast furnace slags were studied at shear rate $1\div50~c^{-1}$. The theoretical model of the flow in a flat endless channel at a final external pressure difference is presented on the basis of experimental data. The exact solution of the system of equations describing the considered flow is obtained.

Keywords: blast furnace slag, structure, chemical composition, rheological properties, quasi Bingham medium.

REFERENCES

- 1. Malkova M.Y. The impact of technology features on the properties of fine-grained slag concrete. *The current state and prospects for the development of building materials:* 8 academic readings of the RAASN. Samara. 2004, pp. 323–327. (In Russian).
- 2. Gnoeva A.V., Klimov D.M., Chesnokov V.M. Osnovy teorii techenij bingamovskih sred [Fundamentals of the theory of currents of Bingham media]. M.: Fizmatlit. 2004. 272 p.
- 3. Bulatov A.I. System analysis of studies of viscous—plastic fluids clay and cement mortars. *Burenie i neft'*. 2016. No. 3, pp. 18–23. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

NAZAROVA Marina Yur'evna – Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor of Department of Material Science and Nanotechnology, Belgorod State University, 85 Victory St., Belgorod, Russia. E-mail: nazarova_m@ bsu.edu.ru

KRASILNIKOV Vladimir Vladimirovich – Professor of Department of Material Science and Nanotechnology, Belgorod State University, Belgorod State University, 85 Victory St., Belgorod, Russia. E-mail: kras@ bsu.edu.ru

NIKULICHEV Vitaly Borisovich – Senior Teacher, Department of Higher Mathematics, Belgorod State Technological University after V.G. Shoukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, Russia. E-mail: v.b.nikulichev@mail.ru

MATVIENKO Olga Ivanovna – undergraduate, Department of Material Science and Nanotechnology, Belgorod State University, Belgorod State University, 85 Victory St., Belgorod, Russia. E-mail: nazarova_m@bsu.edu.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Nazarova M.Y., Krasilnikov V.V., Nikulichev V.B., Matvienko O.I. Simulating stationary flows of viscoplastic media // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 34–39.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

УДК 691.1

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И УМЕНЬШЕНИЯ ОБЪЕМА ДРЕВЕСИНЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КЛЕЕНЫХ БАЛОК (НА ПРИМЕРЕ ДВУСКАТНЫХ АРМИРОВАННЫХ КЛЕЕНЫХ БАЛОК)

Ю.В. Сизов, С.М. Егоров

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье рассматривается клееная двускатная армированная балка. Перечислены свойства двускатной армированной балки и обоснованы ее преимущества. Описаны виды армирования, свойства древесины и условия обеспечения их совместной работы. Указаны условия обеспечения надежной и долговечной работы конструкции. Приведено сравнение двускатной балки с арматурой и без нее. Рассмотрены пролеты зданий, которые могут перекрыть клееные двускатные балки, и указаны нагрузки, при которых целесообразно их использование. Дана методика расчета таких балок. Рассмотрен метод подбора сечения балки.

Ключевые слова: балка, армирование, клееная древесина, прочность, жесткость, пролет, сечения.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день химическая промышленность достаточно развита. Использование деревянных конструкций для постройки промышленных зданий, предназначенных для химического производства, становится актуальной темой. В данной статье речь пойдет о конструкциях, которые используются для покрытия таких зданий, а именно о деревянных двускатных армированных клееных балках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для армирования двускатной балки может использоваться арматура двух видов: обычная и предварительно напряженная [5, 6]. Первое более выгодно с экономической точки зрения, так как трудозатраты небольшие и не требуется вложений в специальное оборудование.

Армирование производится с применением различных видов арматуры: с круглым или квадратным сечением, с периодическим или гладким профилем; пластины и полосы могут быть изготовлены из металла или стеклопластика.

Для обеспечения надежной работы арматуры и древесины требуется клей. Самыми эффективными клеящими веществами являются композиции из эпоксидных смол. Склеивание древесины и арматуры — весьма эффективный способ обеспечения их совместной работы, так как при этом исключается скол древесины при нагрузках.

Древесина для несущих конструкций должна обладать высокими механическими свойствами, поэтому используют хвойные породы [1, 3]. Лучшим сортом хвойной древесины является сосна, так как затраты на ее обработку незначительны, а долговечность ее высока.

Чтобы обеспечить продолжительный срок и надежность эксплуатации армированных конструкций, нужно следить за тем, чтобы влажность древесины не превышала 15 % [2,4]. Может использоваться металлическая или пластмассовая арматура. Для того

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

чтобы правильно выбрать арматуру, нужно учитывать ее упругие характеристики, так как при нормальной совместной работе арматуры и древесины соотношение нормальных напряжений зависит от величины модулей упругости.

При использовании арматуры несущая способность в растянутой зоне частично сохраняется, даже если древесина полностью разрушена. В этом случае можно говорить о предотвращении хрупкого разрушения конструкции.

На рис. 1 представлены условия совместной работы арматуры и древесины.

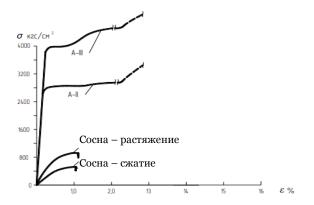


Рис. 1. Диаграммы растяжений арматурных сталей и диаграммы работы древесины

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные показатели, которые достигаются при использовании клееной двускатной армированной балки:

снижение монтажной массы составляет приблизительно 20 %;

расход древесины уменьшается примерно на 25 % при коэффициенте армирования до 3,5 % [3].

Часто встречаются промышленные здания с достаточно большими пролетами. Именно здесь может использоваться данная армированная конструкция, имеющая меньшую монтажную массу и низкий расход древесины по сравнении с такой же конструкцией, но без арматуры.

Если рассмотреть клееные и армированные клееные конструкции, то при одинаковой прочности и жесткости армированные требуют древесины примерно на $35\,\%$ меньше. Тем самым материальные затраты снижаются на $15\,\%$ на $1\,\text{ м}^3$ конструкции, монтажная масса уменьшается на $11\,\%$, а строительная высота – приблизительно на $25\,\%$.

Пролеты до 24 м можно перекрыть клееными армированными балками при нагрузках до 30 кН/м. Помимо этого учитывается нагрузка от конструкции потолка и различного оборудования (кран и т.п.).

В большинстве случаев отношение расчетной ширины к высоте балок составляет 1/6, а отношение расчетной высоты к пролету -1/15-1/20. Данные показатели зависят от значений жесткости и прочности балок.

Несмотря на то, что в большинстве случаев в промышленных каркасных зданиях используются металлические строительные фермы, а при химическом воздействии это проблематично, двускатные клееные армированные балки могут служить подходящей их заменой.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

На рис. 2 представлены клееные армированные двускатные балки.

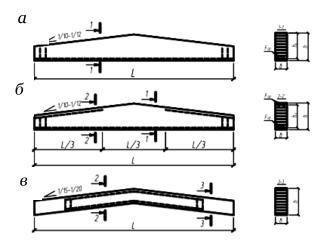


Рис. 2. Клееные армированные двускатные балки: a — одиночное армирование; δ — двойное симметричное армирование на части пролета

В зависимости от вида армирования двускатной армированной балки, а оно может быть одиночным или двойным, расчет идентичен расчету балок постоянной высоты сечения. У таких балок повышенная деформативность, поэтому в знаменатель формулы расчета прогиба нужно ввести коэффициент

$$K = 0.15 + 0.85 * h_{out}/h$$

где h_{on} – высота у опор балки; h – высота балки.

Основными пунктами для подбора сечения двускатной армированной балки являются:

- 1) высота сечения балки в середине пролета $h_{max}/l=1/10...1/16$, где $h_{max}-$ максимальная высота балки;
 - 2) уклон верхнего пояса $i = 2(h_{max} h_{on})/l$.

Наиболее рациональным является армирование при коэффициенте армирования $\mu \geq 0{,}01$. Расчетные сечения с нормальными максимальными напряжениями в клееных двускатных армированных балках находятся на расстоянии $X = 1*h_{on}/2*h_{max}$ от опор.

Найдя изгибающий момент в расчетном сечении и требуемый момент сопротивления, вычисляем для расчетных сечений требуемый коэффициент армирования:

$$\mu \, xrp = \frac{Wxrp - Wxd}{3nWxd},$$

где Wxtp — требуемый момент сопротивления расчетного сечения; Wxd — момент сопротивления древесины в расчетном сечении; n — отношение модулей упругости древесины и арматурной стали.

В расчетной части производится подбор арматуры и проверяется возможность размещения стержней по ширине сечения. Если это невозможно, используется групповое армирование. Затем нужно проверить прочность расчетного сечения по древесине и арматуре, а также прочность опорных сечений по древесине на действие касательных

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

напряжений и по клеевому шву (арматура – древесина). После проверки прогиба балки должна быть обеспечена жесткость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение в строительстве клееных армированных конструкций может повысить эффективность использования древесины с сохранением всех ее основных свойств, при большой надежности и долговечности. Особенно актуальны армированные конструкции при возведении сооружений для химической промышленности и при перекрытии пролетов до 24 м при нагрузках до 30 кН/м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. ГОСТ 8486-86. Пиломатериалы хвойных пород. М.: Стандартинформ. 2007. 9 с.
- 2. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. М.: Стандартинформ. 2017. 92 с.
- 3. Пособие по проектировании деревянных конструкций. М., 1986. 217 с.
- 4. ГОСТ Р 56705-2015. Конструкции деревянные для строительства. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2016. 124 с.
- 5. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. М.: Стандартинформ. 2015. 12 с.
- 6. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. М.: Стандартинформ. 2014. 38 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СИЗОВ Юрий Владимирович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: uvsizov1961@yandex.ru

ЕГОРОВ Сергей Михайлович — магистр, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: shhgk@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Сизов Ю.В., Егоров С.М. К проблеме повышения прочности и уменьшения объема древесины для изготовления деревянных клееных балок (на примере двускатных армированных клееных балок) // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 40–44.

TO INCREASE THE STRENGTH AND REDUCE THE AMOUNT OF WOOD FOR PRODUCTION OF WOODEN GLUED BEAMS (FOR EXAMPLE, A GABLE-REINFORCED LAMINATED BEAMS)

Y.V. Sizov, S.M. Egorov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article deals with a glued gable reinforced beam. The properties of a gable reinforced beam are listed and its advantages are substantiated. The types of reinforcement, the properties of wood and the conditions for ensuring their joint work are

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

described. The conditions for ensuring reliable and durable operation of the structure are indicated. A comparison of a gable beam with and without reinforcement is given. The spans of buildings that can overlap glued gable beams are considered, and the loads at which it is advisable to use them are indicated. A method for calculating such beams is given. The method of selecting the beam section is considered.

Keywords: beam, reinforcing, glued wood, durability, rigidity, flight, sections.

REFERENCES

- 1. GOST 8486–86. Timber of coniferous breeds. M: Standartinform, 2007. 9 p.
- 2. Joint venture 64.13330.2017. Wooden designs. M: Standartinform, 201792 p.
- 3. A grant after design of wooden designs. M., 1986. 217 p.
- 4. GOST P 56705–2015. Designs wooden for construction. Terms and definitions. M.: Standartinform. 2016.124 p.
- 5. GOST 5781–82. Steel hot–rolled for reinforcing of reinforced concrete structures. M.: Standartinform. 2015. 12 p.
- 6. GOST 31938–2012. Fittings composite polymeric for reinforcing of concrete structures. M.: Standartinform. 2014. 38 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SIZOV Yury Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: uvsizov1961@yandex.ru

EGOROV Sergey Mikhaylovich – undergraduate, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shhgk@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Sizov Y.V., Egorov S.M. Citation for an article construction of the innovative family farm for cattle // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 40–44.

УДК 539.3

ДЕФОРМАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТАЛИ 45 ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ НА ТРЕХЗВЕННЫХ ТРАЕКТОРИЯХ

С.А. Соколов, С.В. Черемных, А.В. Гавриленко

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Рассматривается численное моделирование процесса непропорционального упругопластического деформирования стали 45 с участком постоянной кривизны с учетом сложного характера деформирования при сложном докритическом нагружении осевой сжимающей силой и крутящим моментом для тонкостенной круговой цилиндрической оболочки. Применена теория квазипростых процессов А.А. Ильюшина и математическая модель В.Г. Зубчанинова, учитывающая параметры сложного нагружения для плоских траекторий. Для оценки точности принятых теорий результаты

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

моделирования сопоставлены с экспериментальными результатами, полученными на автоматизированном комплексе СН-ЭВМ в лаборатории кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет». Представленная схема расчетов непропорционального пластического деформирования стали 45 с использованием предлагаемой математической модели показала удовлетворительный результат и рекомендована к дальнейшему использованию. Отмечается, что в описываемых процессах отсутствие некоторых параметров сложного нагружения в аппроксимациях снижает точность итоговых расчетных значений, различие которых существенно по сравнению с экспериментальными данными.

Ключевые слова: пластичность, автоматизированный комплекс СН-ЭВМ, сложное деформирование, оболочка, математическая модель, сталь 45, сложное нагружение.

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальные системообразующие теории процессов упругопластического деформирования материалов и основные уравнения основаны на уравнениях:

$$\left(\sigma_{ij}\right) = \sigma_0\left(\delta_{ij}\right) + \sigma\left(S_{ij}^*\right), \quad \left(\varepsilon_{ij}\right) = \varepsilon_0\left(\delta_{ij}\right) + \mathcal{O}\left(\mathcal{O}_{ij}^*\right), \quad (i, j = 1, 2, 3), \tag{1}$$

где

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij}, \ \varepsilon_0 = \frac{1}{3}\varepsilon_{ij}\delta_{ij}, \ \sigma = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \ \vartheta = \sqrt{\Im_{ij}\Im_{ij}} -$$
 (2)

модули шаровых тензоров и тензоров-девиаторов соответственно (первые и вторые инварианты);

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0, \ \ \partial_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon_0, \ \ S_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma}, \ \partial_{ij}^* = \frac{\partial_{ij}}{\partial} \ -$$
 (3)

компоненты девиаторов и их направляющих тензоров; δ_{ii} – символ Кронекера.

При пропорциональном (простом) нагружении направляющие тензоры напряжений и деформаций совпадают; с учетом упругости объемной деформации имеют место соотношения теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина, которые описаны в [1, 2, 5–7]. К основным уравнениям математической модели теории процессов в плоских задачах относятся также определяющие соотношения и универсальные аппроксимации функционалов В.Г. Зубчанинова [3]. При заданных начальных условиях с конкретизированными функционалами все соотношения приводятся к задаче Коши, которая решается с помощью численного метода Рунге – Кутта четвертого порядка точности. Полученные решения при сравнении расчетных и экспериментальных данных позволяют производить верификацию различных вариантов модели, в том числе без учета некоторых параметров сложности процесса в аппроксимациях функционалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные результаты получены на автоматизированном комплексе СН-ЭВМ в лаборатории кафедры «Сопротивление материалов, теория упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета [4]. Эксперименты выполнены на тонкостенных круговых цилиндрических оболочках, из-

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

готовленных из стали 45. Исследования проводились при упругопластическом деформировании (жесткое нагружение) тонкостенного трубчатого образца по плоской траектории, содержащей два прямолинейных участка и участка окружности постоянной кривизны.

На рис. 1 представлены рубчатые образцы, выполненные из стали 45 с механическими характеристиками $E=2,05\,$ МПа, $\mu=0,3,\ G=0,788\,$ МПа, толщиной стенки $h=1\,$ мм, радиусом срединной поверхности $r=15,5\,$ мм, длиной рабочей части $l=110\,$ мм.

Для проверки начальной изотропии материала выполнено сопоставление диаграмм деформирования $\sigma = \Phi(\Im)$ при простых процессах нагружения для образцов при растяжении, кручении и внутреннем давлении, которые показаны на рис. 2.

Сопоставление диаграмм деформирования позволило сделать вывод о том, что материал образцов является условно изотропным, так как при развитых пластических деформациях разброс величин модуля вектора напряжений не превышает 10 %.

Программы испытаний сложного нагружения при нормальной температуре при непропорциональном воздействии осевой силы и крутящего момента выполнялись с постоянной скоростью &= 10^{-6} с $^{-1}$ в плоскости $\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_3$ девиаторного пространства деформаций E_5 .

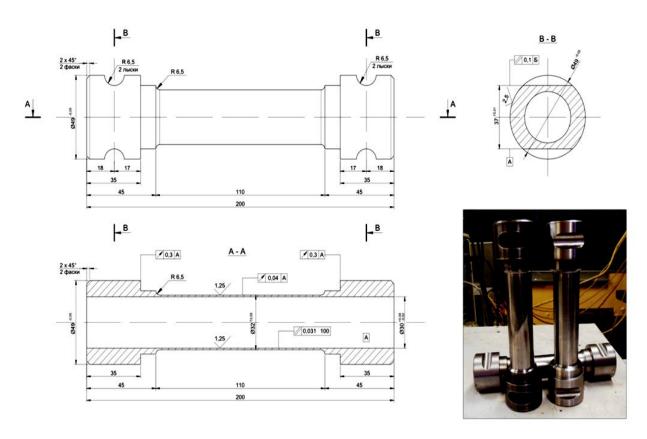


Рис. 1. Образец для испытания

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

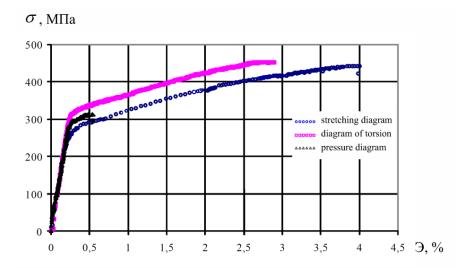


Рис. 2. Диаграммы деформирования материала при простых процессах нагружения

В серии проведенных испытаний реализовано несколько траекторий деформирования с участками различной постоянной кривизны $\kappa_1 = const$ [5]. Одна из таких трехзвенных траекторий представлена на рис. 3.

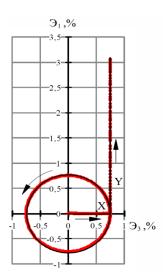


Рис. 3. Диаграмма деформирования материала при сложных процессах нагружения

На первом прямолинейном участке реализовывалось кручение до значения $\mathcal{O}_3=0,75\,\%$. В точке X начинается второй участок, где производится излом на угол $\mathcal{O}_1^0=90^\circ$ и осуществляется один виток непропорционального растяжения с кручением оболочки в виде окружной траектории радиуса $R=\mathcal{O}=0,75\,\%$ и кривизной $\kappa_1=100$. В точке Y берет начало третий участок, где происходит растяжение до потери

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

устойчивости при поддержании постоянного уровня деформации кручения \mathcal{G}_1 на последнем звене.

На рис. 4 приведен отклик на реализованную траекторию деформирования в плоскости $S_1 - S_3$ девиаторного пространства напряжений.

На рис. 5 представлена диаграмма $\sigma - s$, характеризующая скалярные свойства материала.

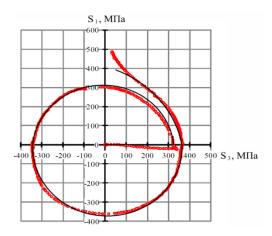


Рис. 4. Отклик на реализованную траекторию деформирования в плоскости $S_1 - S_3$

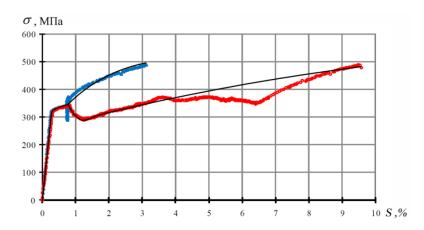


Рис. 5. Скалярные свойства материала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 2–5 экспериментальные точки отмечены кружками; сплошными линиями обозначены кривые, которые были построены согласно рассматриваемой математической модели теории процессов в плоских задачах, учитывающих в аппроксимациях функционалов процесса все параметры сложности процесса $s, \kappa_1, \mathcal{G}_1^0$ для плоских траекторий и обобщенный эффект Баушингера. Как видно, численные расчеты по представленной математической модели теории процессов с использованием аппроксимаций функционалов достаточно хорошо соответствуют экспериментальным данным для данного типа траектории по скалярным данным.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: АН СССР. 1963. 271 с.
- 2. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: МГУ. 1990. 310 с.
- 3. Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит. 2010. 352 с.
- 4. Ильюшин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. М.: Гостехиздат. 1948. 376 с.
- 5. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гультяев В.И. Моделирование процессов сложного упругопластического деформирования материалов по плоским криволинейным траекториям // *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77. Ч. 2. С. 113–123.
- 6. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гультяев В.И. Численное моделирование процессов сложного упругопластического деформирования стали по двузвенным ломаным траекториям // Проблемы прочности и пластичности. 2014. Т. 76. Ч. 1. С. 18–25.
- 7. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Алексеева Е.Г. Математическое моделирование процессов пластического деформирования материалов по сложным плоским траекториям // Materials Physics and Mechanics (MPM). 2015. Vol. 24. \mathbb{N} 2. C. 107–118.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СОКОЛОВ Сергей Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. Е-mail: gek.tver@mail.ru ЧЕРЕМНЫХ Степан Валерьевич — старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. Е-mail: stepan_1986@bk.ru ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович — ассистент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. Е-mail: gawaw@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Соколов С.А., Черемных С.В., Гавриленко А.В. Деформации цилиндрических оболочек из стали 45 при сложном нагружении на трехзвенных траекториях // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 44–50.

DEFORMATION OF CYLINDRICAL SHELLS OF STEEL 45 UNDER COMPLEX LOADING ON THREE-LINK TRAJECTORIES

S.A. Sokolov, S.V. Cheremnykh, A.V. Gavrilenko

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Reviewing the numerical simulation of the process of non–proportional elastic–plastic deformation of steel 45 by a knot of constant curvature, taking into account the complex nature of deformation under complex subcritical loading by axial compressive force and torque for a thin-walled circular cylindrical shell. The theory of Quas and simple processes of A.A. Ilyushin and the mathematical model of V.G. Zubchaninov were applied taking into consider the parameters of the

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

complex loading for plane trajectories To assess the accuracy of accepted theories, the simulation results are compared with experimental results, received on the automated complex CN – computer in the laboratory of the faculty of «Strength of materials and theory of elasticity and plasticity» of the Tver State Technical University. Was introduced the scheme of calculations disproportionate plastic deformation of steel 45 using the proposed mathematical model showed a satisfactory result and recommended for further use. Remarks, that in the described processes the lack of some parameters complex loading in approximations reduces the accuracy of the final calculated values, differences significantly compared to the experimental data.

Keywords: plasticity, automated complex of CN – computers, complex deformation, shell, mathematical model, steel 45, complex loading.

REFERENCES

- 1. Ilyushin A.A. Plasticity. Bases of the General Mathematical Theory. M.: AS USSR, 1963. 271 p.
- 2. Ilyushin A.A. Continuum Mechanics. M.: MSU. 1990. 310 p.
- 3. Zubchaninov V.G. Mechanics of processes in plastic environments. M.; Fizmatlit. 2010. 352 p.
- 4. Ilyushin A.A. Plasticity. Elastic-plastic deformation. M.: Gostekhizdat, 1948. 376 p.
- 5. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gultyaev V.I. Modeling the processes of complex elastoplastic deformation of materials along flat curvilinear trajectories. *Problems of strength and plasticity*. 2015. Vol. 77. No. 2, pp. 113–123.
- 6. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gultyaev V.I. Numerical simulation a processes of complex elastoplastic deformation stell on two-link broken trajectories. *Problems of strength and plasticity*. 2017. Vol. 76. No. 1, pp. 18–25.
- 7. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Alekseev E.G. Mathematical modeling of plastic deformation of materials on complex flat trajectories. *Materials Physics and Mechanics (MPM)*. 2015. Vol. 24. No. 2, pp. 107–118.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SOKOLOV Sergey Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, the Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: gek.tver@mail.ru

CHEREMNYKH Stepan Valerievich – Senior Lecturer of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: stepan_1986@bk.ru

GAVRILENKO Alexey Vladimirovich – Assistant of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: gawaw@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Sokolov S.A., Cheremnykh S.V., Gavrilenko A.V. Deformation of cylindrical shells of steel 45 under complex loading on three-link trajectories // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 44–50.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.314.21

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ

Л.С. Араратьян, А.В. Крупнов, А.Н. Кожекин

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье рассмотрена возможность повышения энергоэффективности силовых трансформаторов за счет применения аморфной стали для изготовления магнитопровода. Приведено сравнение эксплуатационных свойств аморфной стали с электротехнической и сравнение потерь мощности в трансформаторах с магнитопроводом из электротехнической стали и с магнитопроводом из аморфного сплава. Представлен экономический эффект от применения трансформатора с магнитопроводом из аморфной стали.

Ключевые слова: трансформатор, магнитопровод, электротехническая сталь, аморфная сталь, энергоэффективность, потери электроэнергии, энергосбережение.

ВВЕДЕНИЕ

Потери электроэнергии на подстанциях составляют 35 % от суммарных потерь в электрических сетях [1, 2], в том числе потери в трансформаторах составляют 27 %. В эксплуатации на территории страны находится большое количество силовых трансформаторов, которые имеют устаревшую конструкцию и выработали свой нормативный срок эксплуатации (30–40 лет). Для выполнения Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности ...» [3] и реализации «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [4] необходимы новые энергоэффективные силовые трансформаторы, отвечающие повышенным требованиям экологической безопасности.

Повышение энергоэффективности трансформатора можно добиться снижением потерь холостого хода (потери в магнитопроводе), совершенствованием конструкции и качества сборки, а также снижением нагрузочных потерь (потери в обмотках) за счет увеличения поперечного сечения проводника обмоток, применения новых проводников с низким удельным сопротивлением, эффективного охлаждения. Кроме того, КПД трансформатора можно повысить путем изменения материала магнитопровода (например, заменой электротехнической стали на аморфную сталь).

ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРФНОГО СПЛАВА

Исследование аморфных металлов началось в 60-х годах прошлого века. Аморфная сталь — это магнитомягкий материал с неупорядоченным расположением атомов в пространстве, в отличие от электротехнической стали с кристаллической решеткой (рис. 1) [5, 6]. В электротехнике наибольшее распространение получили аморфные сплавы на

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

основе металлов переходной группы — железа (Fe), никеля (Ni), кобальта (Co), взаимодействующих с металлоидами — бором (B), кремнием (Si) и углеродом (C), которые понижают скорость охлаждения, чтобы в результате образовалась аморфная фаза [7]. В ЦНИИчермет получен сплав FeSiB [8], не уступающий по свойствам зарубежным аналогам. В табл. 1 приведено сравнение основных параметров аморфной стали с параметрами электротехнической стали [8, 9].

У аморфной стали есть недостаток – невысокая термическая устойчивость, то есть потеря своих свойств при превышении температуры допустимых значений [7].

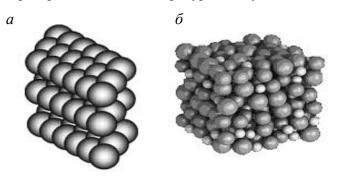


Рис. 1. Модель структуры материала: a - c кристаллической решеткой; $\delta -$ аморфного

Таблица 1 Физические свойства материалов сердечника трансформатора [6]

Материал	Индукция <i>В</i> , Тл	Удельное электрическое сопротивление ρ , мкОм·см	Потери на перемагни- чивание W _{1,5/50} , Вт/кг	Толщина <i>d</i> , мм
Электротехническая сталь	2,03	50	0,440	0,23
Аморфная сталь	1,56	130	0,070	0,025

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С МАГНИТОПРОВОДОМ ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ

Трансформаторы с магнитопроводом из аморфной стали выпускаются в однофазном или трехфазном исполнении, стержневой или броневой конструкции, масляные и сухие. Мощность производимых в настоящее время аморфных трансформаторов ограничена 10 MBA [9].

Конструкция магнитопровода выполняется витой, что создает стержень прямоугольной конструкции. Из-за хрупкости аморфной стали крепление магнитопровода производится к обмоткам, расположенным на несущей базе. По этой причине требуются дополнительные мероприятия по увеличению жесткости конструкции. Кроме того, аморфная сталь имеет более низкую рабочую индукцию, что приводит к более массивной активной части самого трансформатора [10].

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

В остальном конструкция трансформатора остается прежней.

Сравнение размеров и массы стержневых трансформаторов с магнитопроводом из электротехнической стали и трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали представлено в табл. 2 [9].

Таблица 2 Размеры и вес трансформаторов 1 000 кВА

Сталь		Электротехническая	Аморфная	
Размер, мм	Длина	1 395	1 430 (103 %)*	
	Ширина	700	800 (114 %)*	
	Высота	1 490	1 605 (108 %)*	
Bec,	КГ	2 400	3 050 (120 %)*	

СРАВНЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Потери холостого хода у трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали ниже по сравнению с обычными трансформаторами. Это обусловлено низкими потерями энергии на гистерезис (перемагничивание) и вихревые токи в аморфных лентах из-за небольшой толщины аморфных сердечников и низкой индукции. Снижение потерь холостого хода с применением магнитопровода из аморфной стали оценивается в 70–80 % [6, 9]. В табл. 3 представлено сравнение потерь мощности в трансформаторах, производимых различными компаниями.

Потери мощности в трансформаторах [9, 11, 12]

Таблица 3

Мощность,	Магнитопровод из электротехнической стали		Магнитопровод из аморфной стали	
кВА	P_{XX} , BT	P_K , BT	P_{XX} , BT	P_K , BT
	Трансформ	маторы производс	тва HitachiCo	
100	300	1 875	95	1 800
500	939	4 522	240	5 450
1 000	1 670	7 880	440	9 170
	Трансформ	аторы производст	ва ABB Group	
250	650	3 250	160	2 300
400	930	4 600	210	3 650
630	1 300	6 500	300	4 930
	Трансформат	оры отечественно	го производства	
250	520	3 700	140	3 050
400	750	5 400	200	4 300
500	_	_	240	5 150
630	1 000	7 600	320	6 200

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Экономический эффект от внедрения трансформатора с магнитопроводом из аморфной стали можно оценить через снижение ежегодных затрат на оплату потерь электроэнергии, руб.:

$$U_{\Delta W} = (P_K \cdot K_3^2 \cdot \tau + P_{XX} \cdot 8760) \cdot 10^{-3} \cdot C_3,$$

где P_K и P_{XX} — потери мощности нагрузочные и холостого хода соответственно, Вт; K_3^2 — коэффициент загрузки трансформатора; τ — количество часов наибольших потерь; C_3 — стоимость электроэнергии, руб./(кВт·ч) [13].

Экономию средств, руб., можно определить как разность затрат:

$$\Delta \Theta = U_{\Lambda W, \Theta C} - U_{\Lambda W, AC}$$

где $U_{\Delta W \ni C}$ и $U_{\Delta W A C}$ — затраты на оплату потерь трансформатора с магнитопроводом из электротехнической аморфной стали соответственно.

Приняв $C_3 = 4$ руб./(кВт·ч), $K_3 = 0.8$ и $\tau = 3~000$ ч, по приведенной выше формуле для отечественных трансформаторов мощностью 630 кВА получим:

$$M_{\Delta W \ni C} = 93 \text{ 408 py6.};$$

 $M_{\Delta W A C} = 58 \text{ 828,8 py6.};$
 $\Delta \Im = 34 \text{ 579,2 py6.}$

Учитывая большое количество распределительных трансформаторов и длительный срок их службы, потенциальный эффект экономии затрат за счет использования трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали составит миллионы рублей в год.

Целесообразность инвестиций в технологию трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали может оцениваться по совокупной стоимости владения (ССВ). Коэффициент ССВ включает начальную стоимость трансформатора и экономию на будущие затраты от потери энергии в течение его срока службы [9]. Аморфные трансформаторы на 20–30 % дороже трансформаторов из электротехнической стали [14]. Тем не менее значительное снижение потерь холостого хода в трансформаторах с магнитопроводом из аморфной стали обеспечивает преимущество ССВ в течение срока службы трансформатора (рис. 2).

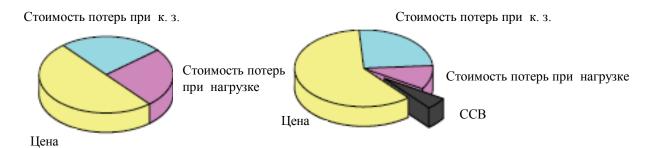


Рис. 2. Диаграмма общей стоимости владения [9]

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Более широкое применение аморфных трансформаторов в электроэнергетических системах даст не только экономию энергии, но и экологический эффект. Значительная экономия электроэнергии приводит к снижению расхода топлива на электростанциях, что снижает выбросы парниковых газов. Это важно с социальной и экономической точки зрения, поскольку упрощает выполнение международных соглашений в области охраны окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря существенному сокращению потерь холостого хода (до 70 %) энергоэффективные трансформаторы с магнитопроводом из аморфной стали имеют перспективу на широкое применение. Экономия энергии от этих трансформаторов оказывает большое влияние на объем производства и потребления электроэнергии, на сокращение выбросов парниковых газов.

Отечественные производители не отстают от зарубежных. Так, производством трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали серии ТМГА и ТСЛА занимается РОСТРЕЙДКОМ, серии АТМГ – ООО «Трансформер» и ТМГАМ ОАО «Электрозавод».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Лыкин А.В. Электрические системы и сети. М.: Юрайт. 2018. 362 с.
- 2. Справочник по проектированию электрических сетей. М.: НЦ ЭНАС. 2012. 376 с.
- 3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изменениями и дополнениями): ФЗ от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. 04.11.2014). URL: http://www.consultant.ru/document /cons_doc_LAW_170601/ (дата обращения: 20.05.2019).
- 4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 № 1715–р. URL: http://docs.cntd.ru/document/902187046 (дата обращения: 20.05.2019).
- 5. Павленко Т.П., Токарь М.Н. Определение возможности применения аморфной стали в магнитных системах электрических аппаратов. URL: https://web.kpi.kharkov.ua/elmash/wp-content/uploads/sites/108/2017/03/2013_10.pdf (дата обращения: 20.05.2019).
- 6. Хавроничев С.В., Сошинов А.Г., Галущак В.С., Копейкина Т.В. Современные тенденции применения аморфных сплавов в магнитопроводах силовых трансформаторов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015. № 12. С. 607–610. URL: https://applied-research.ru/pdf/2015/12–4/7986.pdf (дата обращения: 20.05.2019).
- 7. Обзор новых технологий в электроэнергетике. Вып. 1. URL: https://www.mrsk $-1.ru/docs/v1_2011.pdf$ (дата обращения: 20.05.2019).
- 8. Флиппов А.Е., Соснин В.В. Энергосберегающие трансформаторы с магнитопроводами из аморфных сплавов // Энерго Эксперт. 2012. № 2. С. 52–54.
- 9. Mariusz Najgebauer, Krzysztof Chwastek, Jan Szczygłowski. Energy efficient distribution transformers. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review). 2011. № 2. pp. 111–114. URL: http://pe.org.pl/articles/2011/2/27.pdf (дата обращения: 20.05.2019).
- 10. Силовые «аморфные» трансформаторы. Будущее в настоящем // Электротехнический рынок. 2012. № 5-6 (47-48). С. 46–47.
- 11. Трансформаторы. Силовое электрооборудование. URL: http://rostradecom.ru/equipment/transformers/ (дата обращения: 20.05.2019).

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

- 12. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д., Магницкий А.А. Нормирование энергоэффективности распределительных трансформаторов // Энергия единой сети. 2017. № 5 (34). С. 20–31.
- 13. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат. 1989. 592 с.
- 14. Могиленко А. Снижение потерь электроэнергии. Российские реалии // *Новости* Электротехники. 2015. № 2 (92).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АРАРАТЬЯН Любовь Сергеевна — доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. Е-mail: liuba.araratyan@yandex.ru КРУПНОВ Андрей Владимирович — старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»,

170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru *КОЖЕКИН Алексей Николаевич* — студент 4-го курса машиностроительного факультета, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kozhekin67@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Араратьян Л.С., Крупнов А.В., Кожекин А.Н. Энергоэффективные силовые трансформаторы с сердечником из аморфной стали // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 51-57.

ENERGY EFFICIENT POWER TRANSFORMERS WITH AMORPHOUS STEEL CORES

L.S. Araratyan, A.V. Krupnov, A.N. Kozhekin

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article considers the possibility of improving the energy efficiency of power transformers through the use of amorphous steel for the manufacture of magnetic core. The comparison of the operational properties of amorphous steel with electrical steel and the comparison of power losses in transformers with a magnetic core of electrical steel and magnetic core of amorphous alloy. The economic effect of using a transformer with an amorphous steel magnetic core is presented.

Keywords: transformer, magnetic core, electrical steel, amorphous steel, energy efficiency, power loss, energy saving.

REFERENCES

- 1. Lykin A.V. Electric systems and networks. M.: Yurayt Publishing House, 2018. 362 p.
- 2. Reference book on the design of electrical networks / ed. D.L. Faibisovich. 4-e izd., pererab. i dop. M.: NC ENAS. 2012. 376 p.
- 3. About energy saving and about increase of energy efficiency and about modification of separate legal acts of the Russian Federation (with changes and additions): Feder. law of

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

- 23.11.2009 № 261–FZ (ed. 04.11.2014). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_170601/ (date of access: 20.05.2009). (In Russian).
- 4. Energy strategy of Russia for the period up to 2030. Order of the Government of the Russian Federation of 13.11.2009 № 1715–p. URL: http://docs.cntd.ru/document/902187046 (date of access: 20.05.2009) (In Russian).
- 5. Pavlenko T.P., Turner M.N. Determination of the possibility of using amorphous steel in magnetic systems of electrical devices. URL: https://web.kpi.kharkov.ua/elmash/wp-content/uploads/sites/108/2017/03/2013_10.pdf (date of access: 20.05.2009) (In Russian).
- 6. Hebronites S.V., Sozinov A.G., Galushchak V.S., Kopeikin V.T. Modern trends in the application of amorphous alloys in magnetic cores of power transformers. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2015. No. 12, pp. 607–610. https://applied-research.ru/pdf/2015/12–4/7986.pdf (date of access: 20.05.2009) (In Russian).
- 7. Review of new technologies in the power industry. Issue 1. URL: https://www.mrsk-1.ru/docs/v1_2011.pdf (date of access: 20.05.2019). (In Russian).
- 8. Flippov A.E., Sosnin V.V. Energy-Saving transformers with magnetic cores from amorphous alloys. *Energo Expert*. 2012. No. 2, pp. 52–54. (In Russian).
- 9. Mariusz Najgebauer, Krzysztof Chwastek, Jan SzczygłowskI. Energy efficient distribution transformers. Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review). 2011. No. 2, pp. 111–114. URL: http://pe.org.pl/articles/2011/2/27.pdf (date of access: 20.05.2019).
- 10. Power "amorphous" transformers. The future in the present. *Elektrotekhnicheskij rynok*. 2012. No. 5-6 (47-48), pp. 46–47. (In Russian).
- 11. Transformers. Silovoe elektrooborudovanie. URL: http://rostradecom.ru/equipment/transformers/ (date of access: 20.05.2009). (In Russian).
- 12. Ivakin B.N., Kovalev V.D., Magnitsky A.A. Regulation of energy efficiency of distribution transformers. *Energiya edinoj seti.* 2017. No. 5 (34), pp. 20–31. (In Russian).
- 13. Idelchick, V.I. Electric systems and networks. M.: Energoatomizdat. 1989. 592 p.
- 14. Mogilenko A. Reduction of power losses. Russian realities. *Novosti Elektrotekhniki*. 2015. No. 2 (92). (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – the Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical equipment, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

KRUPNOV Anrey Vladimirovich – senior lecturer of the Department of Power Supply and Electrical equipment, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

KOZHEKIN Alexey Nikolaevich – student of the Department of Power Supply and Electrical equipment, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kozhekin67@gmail.com

CITATION FOR AN ARTICLE

Araratyan L.S., Krupnov A.V., Kozhekin A.N. Energy efficient power transformers with amorphous steel cores // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 51–57.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

УДК [621.313.13: 621.311.54]:628.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАГРЕВА ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В БЕГУЩЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ELCUT

А.Н. Качанов¹, Е.А. Миронов¹, О.С. Селиверстова² ¹Орловский государственный университет (г. Орел) ²ПАО «МРСК – Центра» – «Орелэнерго» (г. Орел)

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния основных параметров электромагнитного поля и геометрических размеров системы «индуктор с бегущим электромагнитным полем — плоская металлическая загрузка» на величину электродинамической силы. Выявлены закономерности распределения потребляемой системой мощности на нагрев и перемещение нагреваемых плоских металлических изделий в программной среде ELCUT.

Ключевые слова: индукционный нагрев, бегущее электромагнитное поле, плоское металлическое изделие, программный продукт ELCUT.

Согласно классификации, приведенной в статье [1], устройства для нагрева плоских металлических изделий в бегущем электромагнитном поле (БЭМП) относятся к системам низкотемпературного индукционного нагрева (СНИН). Известно, что в области низких температур, до точки магнитных превращений, исследуемые металлические объекты, находящиеся в электромагнитном поле, следует рассматривать как нелинейную среду. Для исследования воздействия электромагнитных полей на нелинейную среду в настоящее время используют программные лицензионные продукты «Maxwell», «Femlab», «Elcut» и другие, базирующиеся на численных методах расчета.

Для создания бегущего электромагнитного поля трехфазные обмотки индуктора размещаются в пазах магнитопровода определенным образом и соединяются по одной из классических схем (в виде звезды или треугольника). Бегущее электромагнитное поле наводит в нагреваемом объекте ЭДС, вызывающую появление вихревых токов, которые обеспечивают не только нагрев, но и возникновение электродинамических сил. Магнитопровод одновременно служит для ограничения зоны действия и концентрации электромагнитного поля, а также для улучшения энергетических характеристик индукционного устройства.

Индукционный нагрев с использованием БЭМП может успешно применяться в различных технологических процессах, где требуется перемещение нагреваемых тел и сред (например, в деревообрабатывающей промышленности для сушки волокнистых материалов [2] и в химическом производстве, когда требуется подогрев и перемешивание содержимого химических реакторов [3]).

Цель выполненного математического моделирования — исследование зависимости величины электродинамической силы F_x индуктора от величины воздушного зазора δ_3 , а также выявление закономерностей распределения потребляемой системой мощности на нагрев и перемещение плоских металлических изделий. На рис. 1 приведен эскиз системы «индуктор с бегущим электромагнитным полем — плоская металлическая загрузка».

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

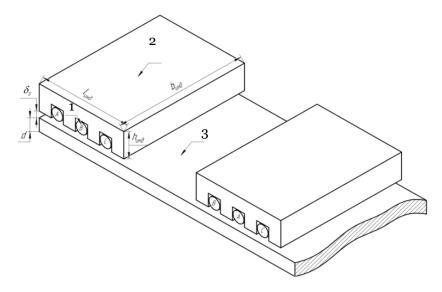


Рис. 1. Эскиз системы «индуктор с бегущим электромагнитным полем – загрузка»: 1 – индуктирующий провод; 2 – магнитопровод; 3 – загрузка

Поставленная задача была решена с использованием метода конечных элементов в программной среде *ELCUT* [4, 5].

Поскольку электромагнитные процессы, воздействующие на нагреваемую среду, под каждым индуктором одинаковы, на первом этапе исследований ограничились рассмотрением системы с одним индуктором. На рис. 2 представлен участок расчетной области в программе ELCUT. Для повышения точности расчетов сетка дискретизации задается неравномерной (устанавливается меньший шаг разбиения по краям индуктора и загрузки).

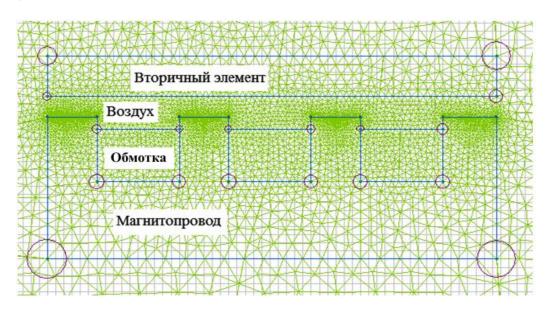


Рис. 2. Участок расчетной области в программной среде ELCUT

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

В качестве нагреваемого объекта могут использоваться электропроводящие немагнитные и магнитные материалы. Для немагнитных материалов относительная магнитная проницаемость постоянна и равна единице. У магнитных материалов относительная магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля. Расчеты выполнены для следующих параметров системы:

длина индуктора $l_{uh\partial}-100$ мм; высота индуктора $h_{uh\partial}-35$ мм; ширина индуктора $b_{uh\partial}-109$ мм; высота загрузки $h_{3ap}-10$ мм; длина и ширина загрузки равна размерам индуктора; частота тока индуктора 50 Γ ц.

На рис. 3 представлены результаты исследований для нагреваемого элемента из немагнитного материала (алюминий, $\Delta \approx 12$ мм). С увеличением воздушного зазора электродинамическая сила индуктора также уменьшается, однако процесс выражен слабее и наблюдаемая зависимость является практически линейной. Это объясняется тем, что магнитная проницаемость алюминия не зависит от изменения напряженности магнитного поля.

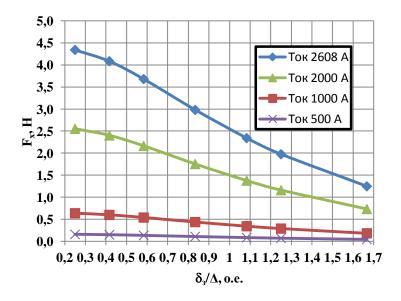


Рис. 3. Зависимость электродинамической силы F_x от величины отношения δ_3 / Δ при различных токах индуктора для вторичного элемента из алюминия

На рис. 4 представлена зависимость электродинамической силы от отношения воздушного зазора δ_3 к глубине проникновения тока в металл Δ . Для ферромагнитного материала, стали Ст.45, $\Delta \approx 3,67$ мм. Как видно из графика, с увеличением воздушного зазора электродинамическая сила, создаваемая индуктором, начинает резко уменьшаться, причем это падение проявляется сильнее при росте тока в индукторе.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

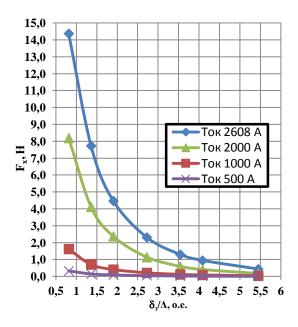


Рис. 4. Зависимость электродинамической силы F_x от величины отношения δ_3 / Δ при различных токах индуктора для загрузки из стали Ст.45

Практический интерес представляет выявление закономерностей влияния бегущих электромагнитных полей на нагреваемые плоские магнитные и немагнитные материалы в системах, содержащих два и более индуктора. Для выявления данной закономерности был смоделирован процесс нагрева и перемещения плоской загрузки для системы с двумя индукторами (см. рис. 1). Магнитопроводы индукторов размещены вдоль плоского нагреваемого объекта на расстоянии Δ относительно друг от друга. Воздушный зазор между полюсами магнитопровода и плоским изделием $\delta_3 = 5$ мм. Эксперимент проводился при чередовании фаз ABC первого индуктора и BAC второго. При этом создаваемые индукторами электродинамические силы направлены встречно.

На рис. 5 представлена зависимость отношения долей мощности индуктора, которые идут на создание движения P_F и на нагрев объекта P_Q , как функции от отношения токов в индукторах I_{ABC}/I_{BAC} . Кривые представлены для загрузки из стали Ст.45 и алюминия. Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод о том, что выделение мощности в ферромагнитном материале происходит более интенсивно по сравнению с немагнитными материалами.

На рис. 6 представлены графики зависимости электродинамической силы F_x , действующей на загрузку из стали Ст.45, и мощности тепловыделения P_Q в ней. Как видно из графиков, с ростом отношения I_{ABC}/I_{BAC} электродинамическая сила уменьшается до нуля, а затем меняет свой знак. Следовательно, можно регулировать скорость и направление перемещения загрузки. Мощность тепловыделения достигает максимальных значений при равенстве токов в обоих индукторах. Таким образом, для обеспечения технологического процесса, главной целью которого является преимущественно нагрев, необходимо рассчитать скорость перемещения путем выбора оптимального соотношения токов в индукторах. Несоблюдение данного условия может привести к технологическому браку — перегреву или недогреву.

, 2019 Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

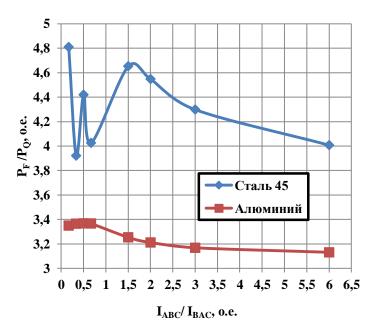


Рис. 5. Зависимость отношения мощностей P_F/P_Q от отношения токов в индукторах I_{ABC}/I_{BAC} при встречном включении индукторов для загрузки из стали Ст.45 и алюминия

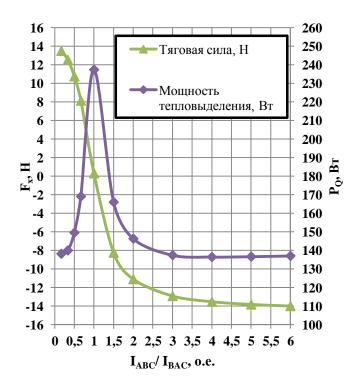


Рис. 6. Зависимость электродинамической силы F_x и мощности тепловыделения P_Q от отношения токов в индукторах I_{ABC}/I_{BAC} при встречном включении индукторов для загрузки из стали Ст.45

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Установлено, что распределение мощности, приходящейся на нагрев и на создание движения, неравномерно. Независимо от материала загрузки 80 % потребляемой мощности преобразуется в механическую энергию и 20 % – в тепловую.

Выводы:

- 1. При увеличении воздушного зазора уменьшается электродинамическая сила, действующая на загрузку. Поэтому при проектировании систем с БЭМП рекомендуется устанавливать индукторы с минимальным зазором между полюсами магнитопровода и поверхностью нагреваемого объекта.
- 2. Потребляемая системой энергия преобразуется на 80 % в механическую энергию и на 20 % в тепловую.
- 3. Система с БЭМП может обеспечить нагрев и перемещение магнитных и немагнитных нагреваемых объектов с требуемыми для технологических процессов скоростями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Качанов А.Н., Коренков Д.А., Качанов Н.А. Классификация и область применения систем низкотемпературного индукционного нагрева с разомкнутыми магнитопроводами // Вестник Московского энергетического института. 2016. № 2. С. 36–40.
- 2. Авторское свидетельство 970305.1. Сушилка для шпона и длинномерных волокнистых материалов / Качанов А.Н., Чукумов М.Н., Королева Т.Г., Качанов Н.А., Иващенко В.В.; Заявл. 01.04.1997. Опубл. 15.02.1999. Бюл. № 2.
- 3. Патент РФ 2257017. Индукционное устройство для нагрева и перемешивания жидких сред / Качанов А.Н., Кувалдин А.Б., Качанов Н.А. Опубл. 20.07.2005. Бюл. № 20.
- 4. Elcut. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. СПб.: Производственный кооператив ТОР. 2015. 303 с.
- 5. Дубицкий С.Д. ELCUT. Универсальная программа расчета магнитных, электрических, тепловых и упругих полей методом конечных элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 12. С. 325–330.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЧАНОВ Александр Николаевич — доктор технических наук, профессор, академик АЭН РФ, заведующий кафедрой электрооборудования и энергосбережения, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел, Наугорское шоссе, 29. Е-mail: kan@ostu.ru МИРОНОВ Евгений Андреевич — студент, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29. Е-mail: gen996@mail.ru СЕЛИВЕРСТОВА Оксана Сергеевна — магистр, специалист 1-й категории по работе с клиентами, ПАО «МРСК — Центра» — «Орелэнерго», г. Орел, пл. Мира, д. 2. Е-mail: Ks_1111@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качанов А.Н., Миронов Е.А., Селиверстова О.С. Исследование индукционного устройства для нагрева плоских металлических изделий в бегущем электромагнитном поле в программной среде ELCUT // Вестник Тверского государственного технического университета. Сер.: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 3 (3). С. 58–64.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

INVESTIGATION AND CALCULATION OF INDUCTION MASS HEATING DEVICES IN THE ELCUT PROGRAM ENVIRONMENT

A.N. Kachanov, E.A. Mironov, O.S. Seliverstova

Orel State University (Orel)

Abstract. The article presents the results of the study of the influence of the basic parameters of the electromagnetic field and the geometric dimensions of the system "inductor with a running electromagnetic field – flat metal load" on the magnitude of the electromagnetic force, as well as identifying patterns of distribution of power consumed by the system to heat and displace heated flat metal products in the ELCUT program environment.

Keywords: induction heating, running electromagnetic field, flat metal product, software product ELCUT.

REFERENCES

- 1. Kachanov A.N., Korenkov D.A., Kachanov N.A. Classification and scope of low–temperature induction heating systems with open magnetic conductors. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*. 2016. No. 2, pp. 36–40. (In Russian).
- 2. A.c. 970305.1 Sushilka dlya shpona i dlinnomernykh voloknistykh materialov [Drier for veneer and long fibrous materials].Kachanov A.N., Chukumov M.N., Koroleva T.G., Kachanov N.A., Ivashchenko V.V.; Declared 01.04.1997; Published 15.02.1999, Bulletin № 2.
- 3. Patent RF № 2 257 017 / Induktsionnoye ustroystvo dlya nagreva i peremeshivaniya zhidkikh sred [Induction device for heating and mixing of liquid substance]. Kachanov A.N., Kuvaldin A.B., Kachanov N.A.. Published 07.20.2005. Bulletin № 20.
- 4. ELCUT. Modelirovaniye dvumernykh poley metodom konechnykh elementov. Rukovodstvo pol'zovatelya [Simulation of two-dimensional fields by the finite element method. User's Guide]. Saint–Petersburg: Production cooperative TOP. 2010. 345 p.
- 5. Dubitsky S.D. ELCUT. Universal program for calculating magnetic, electric, thermal and elastic fields by the finite element method. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2007. No. 12, pp. 325–330. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KACHANOV Alexander Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department Electrical and Energy Saving, Orel State University named after I.S. Turgenev, 29 Naugorskoye Highway, Orel, 302020, Russia, E-mail: kan@ostu.ru

MIRONOV Evgeniy Andreevich – student gr. 81EE–m, Orel State University named after I.S. Turgenev, 29 Naugorskoye Highway, Orel, 302020, Russia, E-mail: gen996@mail.ru

SELIVERSTOVA Oksana Sergeevna – magistr, specialist of the 1st category in work with clients, "Interregional Distribution Grid Company – Center – "Orelenergo"; "IDGC of Center" – "Orelenergo", 2 Mira square, Orel, 302030, Russia, E-mail: Ks_1111@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanov A.N., Mironov E.A., Seliverstov O.S. Investigation and calculation of induction mass heating devices in the elcut program environment // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 58–64.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

УДК 674.093

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ

Ф.В. Качановский

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Проведен статистический анализ динамики удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2018 гг. Построена математическая модель статистического ряда удельной электропроводности осадков. Установлен слабый рост удельной электропроводности в 2016–2018 гг.

Ключевые слова: удельная электропроводность, кислотность, атмосферные осадки, модель, временной ряд, тренд, циклическая компонента, сезонная компонента, случайная компонента, показатель кислотности рН.

Электропроводность воды — количественная оценка способности водного раствора проводить электрический ток. Электрическая проводимость природной воды зависит в основном от содержания растворенных минеральных солей и температуры и обусловлена прежде всего ионами Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , $C\Gamma$, SO_4^{2-} , HCO_3^- . По значениям электропроводности природной воды можно приближенно судить о ее минерализации. Удельная электропроводность (мкСм/см) служит приблизительным показателем суммарной концентрации электролитов, главным образом неорганических, и используется в программах наблюдений за состоянием водной среды. Удельная электропроводность — удобный суммарный индикаторный показатель антропогенного воздействия [1].

Лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии с 2016 г. проводит наблюдения за удельной электропроводностью атмосферных осадков, выпадающих в Твери. Электропроводность воды в пробах измеряется (в мкСм/см) при 25 °C. За три года (2016-2018) произведено 369 измерений (в среднем около 10 измерений в месяц). Интервалы между срочными измерениями изменяются от одних суток до двух декад. Временная последовательность срочных значений удельной электропроводности показана на рис. 1 (здесь и далее удельная электропроводность обозначается как cw).

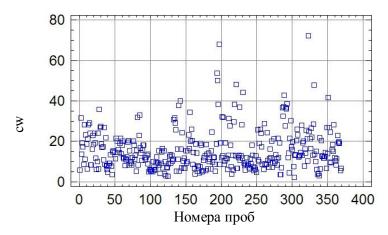


Рис. 1. Временная последовательность значений удельной электропроводности, 2016—2018 гг.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Наблюдаемые значения cw группируются в основном в интервале 0–20 мкСм/см, хотя отдельные «выбросы» достигают 70 мкСм/см. Одновременно с cw проводятся наблюдения за показателем кислотности pH, количеством выпадающих осадков и показателем температур воздуха.

Настоящая публикация представляет результаты статистического анализа удельной электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2018 гг.

Переход от наблюдавшихся (срочных) значений *сw* к среднемесячным позволил рассматривать совокупность среднемесячных значений удельной электропроводности *атисw* как нестационарный временной ряд из 36 элементов (месяцев), показанный на рис. 2.

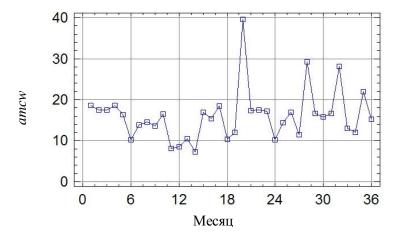


Рис. 2. Ряд среднемесячных значений удельной электропроводности *атсw*, 2016–2018 гг.

Наибольший интерес представляет определение тренда ряда *атмес*. В качестве модели тренда принята полиномиальная кривая регрессии. Характер значений *атмес* в трехлетнем ряду показал (рис. 2), что приемлемыми для предварительного анализа оказываются модели тренда первого и второго порядка, то есть линейная и квадратическая.

Уравнение линейной модели тренда:

$$tr_{\text{лин}} = 14,028 \ 8 + 0,109 \ 236 \cdot n,$$
 (1)

уравнение квадратической модели тренда:

$$tr_{\text{KBa}} = 15,586 \ 8 - 0,136 \ 769 \cdot n + 0,006 \ 648 \ 77 \cdot n^2, \tag{2}$$

где n — порядковый номер члена ряда (месяца).

Минимальное значение квадратического тренда 14,884 приходится на 10-й месяц ряда, то есть на октябрь 2016 г. С учетом корреляции *сw* и показателя кислотности рН естественно предположить, что значения показателя рН в это время также близки к минимальным. Анализ динамики показателя кислотности [3] подтвердил, что это действительно так.

При построении модели видимая (наблюдаемая) изменчивость ряда в согласии с основной идеей статистики разделена на закономерную и случайную составляющие. Закономерная (детерминированная) составляющая d_t может быть представлена как некоторая функция времени t. Для описания случайной составляющей ε_t применен статистический подход. Из содержательных соображений относительно причин изменчивости amcw принята аддитивная модель сезонной декомпозиции ряда:

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

$$amcw_t = d_t + \varepsilon_t$$
 $(t = 1, ..., n)$. (3)

Детерминированная составляющая в свою очередь представлена аддитивной моделью общего вида [2]:

$$d_t = tr_t + c_t + s_t, \tag{4}$$

где tr_t , c_t , s_t – тренд, циклическая и сезонная компоненты соответственно.

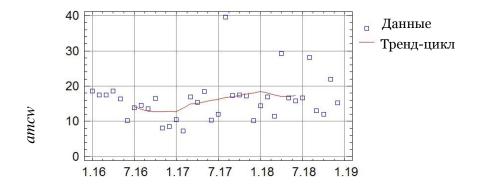


Рис. 3. Тренд + циклическая компонента ряда атсw

На первом этапе декомпозиции исходного ряда закономерная составляющая была разделена на две части:

1) тренд и циклическую компоненту, оцениваемые суммарно:

$$trc_t = tr_t + c_t; (5)$$

2) сезонную компоненту s_t .

На втором этапе из суммарной компоненты trc_t был вычтен тренд и выделена циклическая составляющая ряда amcw:

$$c_t = trc_t - tr_t. (6)$$

Суммарная компонента trc_t (см. рис. 3) получена сглаживанием исходного ряда с помощью простого арифметического скользящего среднего с интервалом сглаживания 12 значений. При этом сглаженный ряд стал короче исходного на 12 членов (6 членов в начале ряда и 6 в конце).

Характер тренда (описывающего влияние долговременных факторов, эффект которых сказывается постепенно) проступает здесь не вполне отчетливо, будучи скрадываем присутствием циклической компоненты. Можно видеть, что во второй половине 2016 г. график суммарной компоненты имеет участок с локальным минимумом, а в начале 2018 г. – участок с локальным максимумом.

Более отчетливо связь суммарной компоненты trc_t с трендом видна при наложении на нее линейного и квадратического трендов (рис. 4). Циклическую компоненту c_t , описывающую длительные подъемы и спады, можно качественно оценить по ее отклонению от трендов. Продолжительность единственного цикла составляет около 24 месяцев (то есть около двух лет). Отклонение (амплитуда) от линейного тренда составляет около 2,36, отклонение от квадратического тренда – около 2,13.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

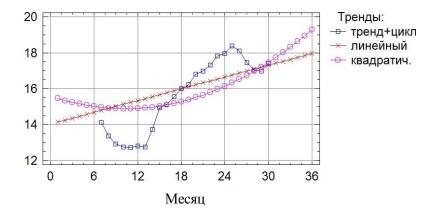


Рис. 4. Компонента trct (тренд + циклическая компонента) ряда *атсw*, линейный и квадратический тренды

Оба тренда, линейный и квадратический, указывают на слабый, но заметный рост удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2018 гг., с течением времени.

Сезонная компонента s_t моделировалась в предположении связи поведения cw с годовым ходом метеофакторов, прежде всего, температур воздуха. Период сезонных колебаний p принят равным 12 месяцам. В качестве оценки сезонной компоненты использовано среднее $\hat{s_t}$ отклонений значений cw от тренда, то есть положено [2], что

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^{m} (cw_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp})$$
 для $i = 1, ..., p,$ (7)

где m+1=3 — число (годовых) периодов в ряду наблюдений.

Годовой ход сезонной компоненты (месячных индексов, вычисленных по формуле (7)) показан на рис. 5. В течение года локальные минимумы (во 2, 6, 9 и 12-м месяцах) чередуются с локальными максимумами (в 1, 4, 8 и 10-м месяцах). Глобальный максимум соответствует 8-му месяцу года (августу), а глобальный минимум — 12-му (декабрю).

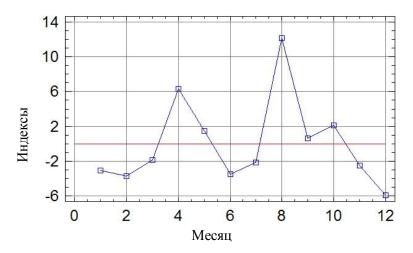


Рис. 5. Месячные индексы ряда атсw

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Оценена связь среднемесячных значений электропроводности amcw со среднемесячными показателями кислотности ampH, месячными суммами осадков sumpre и среднемесячными температурами воздуха amt. Установлено существование умеренно слабой положительной связи между amcw и ampH с коэффициентом корреляции 0,465 203 (на доверительном уровне 95 %). Для срочных значений cw и pH эта связь еще слабее (как уже отмечалось, коэффициент ее корреляции составляет 0,343 76). Таким образом, с ростом показателя pH (и ampH) растет и электропроводность cw (и amcw), значит, электропроводность осадков увеличивается при снижении их кислотности.

Существование этой связи позволяет предположить, что характер тренда amcw в течение двух десятилетий, предшествовавших началу наблюдений за электропроводностью осадков cw, имел существенное сходство с характером тренда ряда pH, наблюдавшегося в этот период.

Связь *атсw* с месячным количеством осадков *sumpre* – сравнительно слабая отрицательная, ее коэффициент корреляции составляет –0,262 629 (на доверительном уровне 95 %). Однако она сильнее связи электропроводности *cw* с суточным количеством осадков *pre*, коэффициент корреляции которой составляет всего –0,164 595. Таким образом, с ростом количества осадков их электропроводность может уменьшаться (повидимому, сказывается эффект разбавления).

Связь электропроводности amcw со среднемесячными температурами воздуха amt – слабая положительная, ее коэффициент корреляции составляет 0,253 913 (на доверительном уровне 95 %). Связь срочных значений cw с суточными температурами воздуха t – слабая положительная, характеризуется коэффициентом корреляции 0,198 263, то есть эта связь слабее, чем связь между среднемесячными amcw и amt.

Сравнение коэффициентов корреляции срочных значений обсуждаемых величин с коэффициентами корреляции среднемесячных значений этих величин показывает, что теснота связи между среднемесячными значениями существенно больше, чем между срочными значениями. Это можно объяснить снижением влияния случайных колебаний в результате осреднения.

Случайная компонента ряда рН (рис. 6) моделируется комбинированным случайным процессом авторегрессии — скользящего среднего ARMA(p,q) [2]:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{p} \varphi_i \cdot X(t-i) + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \cdot \varepsilon_{t-j}, \tag{8}$$

где параметры p и q указывают порядок процесса; ε_t – процесс белого шума (среднее = $M\varepsilon_t = 0$, дисперсия $D\varepsilon_t = 0$); φ , θ – параметры (коэффициенты) процессов авторегрессии и скользящего среднего соответственно.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

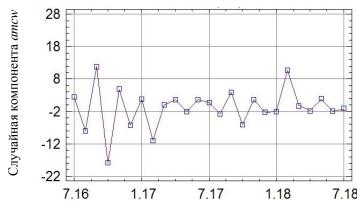


Рис. 6. Случайная компонента ряда атсw

Адекватное описание случайного остатка ряда amcw достигается (при доверительной вероятности 95 %) при p=4 и q=3, что говорит о достаточно длинной – примерно четырехмесячной – «памяти» комбинируемых процессов.

Значения параметров построенной статистической модели удельной электропроводности *cw* по мере удлинения ряда и накопления данных будут, безусловно, изменяться, однако выбранная структура модели представляется устойчивой и полезной как для прогнозирования динамики *cw*, так и для исследования связей с другими временными рядами, отражающими динамику влияния факторов на электропроводность атмосферных осадков.

Отметим, что содержательное истолкование компонент математической модели ряда cw требует специального исследования, выходящего за рамки обсуждаемой темы.

выводы

- 1. Построена математическая модель ряда удельной электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2018 гг. Модель включает тренд, а также циклическую, сезонную и случайную компоненты.
- 2. Установлена теснота связи срочных и среднемесячных значений удельной электропроводности осадков, выпадавших в Твери в 2016-2018 гг., с соответствующими значениями показателя кислотности pH, суточного количества осадков и температуры воздуха.
- 3. Наиболее тесная связь существует между среднемесячными значениями удельной электропроводности и среднемесячными значениями показателя кислотности pH. Коэффициент корреляции связи составляет 0,465 203 (на доверительном уровне 95 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Качество воды в Центральной Азии: База знаний: общие и суммарные показатели качества вод: электропроводность. URL: http://www.cawaterinfo.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (дата обращения: 14.04.2018).
- 2. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М. 1998. 528 с.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

3. Качановский Ф.В. Что происходит с кислотностью осадков, выпадающих в Твери? // Вестник Тверского государственного технического университета. Тверь: ТвГТУ. 2018. Вып. 2 (34). С. 90–94.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КАЧАНОВСКИЙ Феликс Вячеславович — доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпадающих в Твери // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 65–71.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION IN TVER

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of the precipitation's electrical conductivity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 1916–2018 years). Time series models of the electrical conductivity and her evolution were examined. Linear model has considered as adequate.

Keywords: conductivity, acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cycle component, seasonal component, residuals.

REFERENCES

- 1. Water quality in Central Asia. Knowledge base. Total and total water quality indicators. Conductivity. URL: http://www.cawater info. net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (date of access: 14.04.2018). (In Russian).
- 2. Tyurin Y.N., Makarov A.A. Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere [Statistical analysis of data on the computer]. M.: INFRA-M. 1998. 528 p.
- 3. Kachanovsky F.V. What happens to the acidity of precipitation in Tver? *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Tver: TvSTU. 2018. Vol. 2 (34), pp. 90–94. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich – Associate Professor of Hydraulics, Heat Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Electrical conductivity of the precipitation in Tver // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 65–71.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 543.054:543.48

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО РАСТВОРЕНИЯ МЕДИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ТИОСУЛЬФАТНО-ТИОЦИАНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ПРИСУТСТВИИ КИСЛОРОДА ВОЗДУХА

С.Л. Горцевич, П.А. Кравченко

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В работе представлены результаты исследования кинетики окислительного растворения меди при образовании смешанных тиосульфатнотиоцианатных комплексов в присутствии окислителя. Изучена термодинамическая вероятность процесса растворения меди в роданиде калия в присутствии окислителя – кислорода воздуха. Изучены зависимости удельной скорости растворения меди (W, моль/см 2 c) от концентрации реагентов (CH, моль/дм 3), рН среды, температуры (T, K), частоты вращения диска (ω , с $^{-1}$). Получены математические модели изучаемых процессов. Рассмотрены механизмы растворения меди, установлены режимы взаимодействия.

Ключевые слова: окислительное растворение, кинетика, тиосульфатнотиоцианатные комплексы, константа скорости, энергия активации.

ВВЕДЕНИЕ

Медь занимает второе по популярности место среди цветных металлов. В настоящее время основными источниками ее получения являются различные руды, их продукты обогащения, а также вторичное сырье. Известно более 250 медных минералов, причем большинство из них встречаются очень редко. В современном мире на долю получения меди при переработке вторичного сырья приходится более 50 % от общего ее выпуска.

При извлечении меди используют все типы руд:

сульфидные, которые занимают самое важное место в добыче меди. Из сульфидных руд в настоящее время добывают 95 % всей первичной меди;

окисленные (медный блеск, лазурит, малахит) с содержанием меди от 15 до 45 % (брикетировали с добавками глины, слабо обжигали, после чего выщелачивали раствором $Fe_2(SO_4)_3$ и подвергали электролизу со свинцовыми анодами. Отработанный раствор, обогащенный кислотой, вновь возвращался на выщелачивание);

смешанные – эти руды имеют сложный минеральный состав не только вмещающих, но и рудных пород. В них одновременно присутствуют карбонаты, оксиды, силикаты, сульфаты меди (халькантит – $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ и брошантит – $Cu_4(SO_4)(OH)_6$).

В современной практике целесообразно разрабатывать руды и обедневшие отвалы с содержанием меди около $0.8\,\%$, однако с удорожанием рынка цветных металлов следует обратить внимание и на переработку таких обедневших отвалов, в которых содержится порядка $0.4\,\%$ меди.

<u>№</u> 3(3), 2019

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕДИ ИЗ РУД

Основными методами переработки медных руд на сегодняшний день являются:

флотация медных минералов карбоновыми кислотами. Данный метод пригоден для легко- и среднеобогатимых руд. Карбоновые кислоты плохо флотируют обогащенные руды. Эффективность данного метода невысока;

комбинированный, то есть обогатительно-металлургический процесс [1];

для извлечения меди из забалансовых руд, отвалов и хвостов применяются гидрометаллургические процессы, а именно химические методы и выщелачивание – метод $\mathrm{B}\mathrm{H}\Phi.$

Сущность метода заключается в том, что руда измельчается до крупности, при которой происходит вскрытие медных минералов. Верхний предел крупности обычно не превышает 1 мм. Затем измельченную руду выщелачивают в контактных чанах растворами серной кислоты (0,5-3%), расход кислоты составляет 3-5 кг на 1 кг выщелачиваемой меди. Если в руде присутствуют труднорастворимые медные минералы, то пульпу при выщелачивании можно подогреть до 45-70%, что увеличивает извлечение меди в раствор на 6-10%. При таком процессе выщелачивания окисленные минералы меди растворяются и медь переходит в раствор в виде медного купороса по уравнению

$$Cu_2(CO_3)(OH)_2 + 2H_2SO_4 = 2CuSO_4 + 3H_2O + CO_2.$$
 (1)

Из раствора медь извлекается железной стружкой или скрапом непосредственно в пульпе с получением цементной меди:

$$CuSO_4 + Fe = FeSO_4 + Cu_1$$
 (2)

В среднем расход железной стружки составляет около 2 кг на 1 кг извлекаемой меди. Цементная медь, полученная в пульпе, флотируется сульфгидрильным собирателем или продуктами их окисления. Наиболее эффективным собирателем цементной меди является диксантогенид. Расход собирателя не превышает 80–100 г/т, а оптимальное значение рН 4,5–4,7 (среда кислая) [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для растворения меди значительный интерес представляют комбинированные реагенты, образующие устойчивые смешанные разнолигандные комплексы. В работе предложен метод извлечения меди из забалансовых руд, отвалов и хвостов с применением окислительного растворения меди при образовании смешанных тиосульфатнотиоцианатных комплексов.

Ранее [2, 3] было показано, что смешанные (разнолигандные) комплексы меди обладают повышенной устойчивостью в растворах по сравнению с простыми комплексами. Поэтому следовало ожидать существенного влияния состава комбинированного реагента и на скорость растворения меди.

Можно предположить, что реакция окисления меди кислородом может протекать по схеме

$$2Cu + 2mSCN^{-} + 2nS_{2}O_{3}^{2-} + H_{2}O + 1/2O_{2} = 2[Cu(SCN^{-})_{m}(S_{2}O_{3}^{2-})_{n}]_{l-m} + 2OH^{-}. (3)$$

Окисление меди в присутствии чистого тиоцианата калия происходит в кинетическом режиме. Зависимости скорости растворения меди от концентрации тиоцианата при барботаже кислорода и воздуха позволяют рассчитать порядки реакции по

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

концентрации лиганда (0.89) и окислителя (0.85). Окисление меди может протекать по следующей схеме:

$$Cu + 4SCN^{-} + 1/2 H_{2}O + 1/4 O_{2} = [Cu(SCN)_{4}]^{1} + OH^{-}.$$
 (4)

При температуре T = 298-318 K, частоте вращения диска $\omega = 10$ об/с и концентрации [SCN] = 0-0.5 M

$$W = k \cdot [SCN^{-}]^{0.89} \cdot [Ox]^{0.85}, \tag{5}$$

где W — скорость перехода меди в раствор, моль \cdot дм $^{-2}\cdot$ с $^{-1}$. Константа скорости $k=3,85\cdot 10^{-10}$, порядок по частоте вращения диска равен 0,5. Энергии активации (Еакт) – 56 кДж/моль. Растворение меди в растворах чистого тиосульфата лимитировано внешнедиффузионной стадией.

Суммарный процесс может быть описан уравнением

$$Cu + 2 Na_2S_2O_3 + 1/2 H_2O + 1/4 O_2 = Na[Cu(S_2O_3)_2] + NaOH.$$
 (6)

Исходя из представления о диффузии реагента соответствующее уравнение имеет вид

$$W = k \cdot [Tu]^{0.96} \cdot [Ox]^{1.05} \cdot \omega^{0.5}.$$
 (7)

Из уравнения (7) рассчитаны значения энергии активации процесса и константы скорости: $E_{akt} = 15 \text{ кДж/моль и } k = 9,58 \cdot 10^{-9} \text{ соответственно.}$

Для оценки влияния мольного отношения концентрации лигандов на скорость растворения меди предположим, что в системе образуется только один смешанный комплекс с разнородными лигандами (см. уравнение (3)) [4].

Изучена зависимость скорости растворения меди от мольной доли тиоцианата, полученная из изомолярной серии при сумме концентраций $[SCN] + [SC(NH_2)_2] = const.$ Максимальное значение скорости перехода меди в раствор наблюдается при молярном отношении [Ts] : [Tcy] = 1 : 2.

Кривые, полученные при барботаже кислорода и воздуха, позволили рассчитать порядок по парциальному давлению кислорода (окислителя), составляющий 1,15.

Формальная кинетическая модель, адекватно описывающая изменение скорости в области концентраций [SCN $^-$] = 0-0,25 и [SCN $_2$ H $_4$] = 0-0,25 при T = 288-318 К и частоте вращения диска $\omega = 1,6-25 \text{ c}^{-1}$, имеет вид

$$W = k \cdot [Ts]^{1,1} \cdot [Tcy]^{1,06} \cdot P_{Ox}^{1,15} \cdot \omega^{0,5}.$$
 (8)

По модели (8) рассчитаны кинетические характеристики $k = 8.5 \cdot 10^{-9}$ Еакт = 16,2 кДж/моль. Процесс протекает в диффузионном режиме. Порядок по частоте вращения диска близок к 0,5.

Образование смешанных комплексов влияет на увеличение скорости диффузии продуктов реакции за счет повышения концентрации меди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования кинетики окислительного растворения меди при образовании смешанных тиосульфатно-тиоцианатных комплексов в присутствии окислителя. Получены математические модели изучаемых процессов при растворении меди в роданиде калия в присутствии окислителя – кислорода воздуха.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

По полученным данным выявлено, что окисление меди в присутствии чистого тиоцианата калия происходит в кинетическом режиме. Растворение меди в растворах чистого тиосульфата лимитировано внешнедиффузионной стадией.

При молярном отношении [Ts] : [Tcy] = 1 : 2 наблюдается максимальное значение скорости перехода меди в раствор и процесс протекает в диффузионном режиме.

Образование смешанных комплексов влияет на увеличение скорости диффузии продуктов реакции за счет повышения концентрации меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Каковский И.А., Поташников Ю.М. Кинетика процессов растворения. М.: Металлургия. 1975. 224 с.
- 2. Горцевич С.Л., Подгорнов П.В., Чурсанов Ю.В., Поташников Ю.М. Кинетика окисления меди кислородом в водных растворах тиоцианата, тиомочевины и их смесей // Вестник Тверского государственного технического университета. 2006. № 8. С. 165–167.
- 3. Горцевич С.Л., Подгорнов П.В., Чурсанов Ю.В., Поташников Ю.М. Кинетика окисления меди кислородом в водных растворах тиоцианата // Журн. физ. химии. 2007. Т. 81. № 1. С. 1-3.
- 4. Горцевич С.Л., Кравченко П.А., Пичугина А.И. Применение фотометрического метода определения с 4(2-пиридилазо)резорцином (ПАР) для количественного анализа и исследования окислительного растворения меди при образовании тиоцианатных комплексов // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 12. С. 81.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОРЦЕВИЧ Светлана Леонидовна — кандидат химических наук, доцент кафедры химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: svetagor_70@mail.ru

КРАВЧЕНКО Павел Алексеевич — магистрант 2-го курса кафедры химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Горцевич С.Л., Кравченко П.А. Исследование окислительного растворения меди при образовании тиосульфатно-тиоцианатных комплексов в присутствии кислорода воздуха // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 72–76.

STUDY OF COPPER OXIDATIVE DISSOLVING IN PROCESS OF THIOSULFATE—THIOCYANATE COMPLEXES FORMATION IN THE PRESENCE OF OXYGEN

S.L. Gortsevich, P.A. Kravchenko

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Copper oxidative dissolution kinetics in the process of forming commixed thiosulfate-thiocyanate complexes in the presence of oxidising agent study results are presented in the article. Copper dissolving process thermodynamic probability was explored. The process of dissolving took place in potassium rhodanate in the presence of oxygen. Connection between copper dissolution rate (W, mol/cm2), reagent concentration (Cn, mol/dm3), pH, temperature

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

(T, K), and disk rotation rate (ω, Hz) was also explored. Mathematical models of these processes were developed.

Keywords: oxidative dissolution, kinetics, thiosulfate-thiocyanate complexes, rate constant, activation energy.

REFERENCES

- 1. Kakovsky I.A., Potashnikov Y.M. Kinetics of dissolution. M.: Metallurgy, 1975. 224 p.
- 2. Gortsevich, S.L., Podgornov P.V., Kursanov Y.V., Potashnikov Y.M. Kinetics of oxidation of copper with oxygen in aqueous solutions of thiocyanate, thiourea and their mixtures. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. No. 8, pp. 165–167. (In Russian).
- 3. Gortsevich S.L., Podgornov P.V., Kursanov Y.V., Potashnikov Y.M. Kinetics of oxidation of copper with oxygen in aqueous thiocyanate solutions. *Zhurn. fiz. himii.* 2007. Vol. 81. No. 1, pp. 1–3. (In Russian).
- 4. Gortsevich, S. L., Kravchenko P. A., Pichugina A.I. The application of photometric method for the determination of 4(2–pyridylazo)resorcinol (PAR) for the quantitative analysis and study of oxidative dissolution of copper during the formation thiocyanate systems. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2018. Vol. 4. No. 12, pp. 81. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

GORTSEVICH Svetlana Leonidovna – Candidate of Chemical Sciences, the Associate Professor of the Department of Chemistry, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail:svetagor_70@mail.ru

KRAVCHENKO Pavel Alekseevich – master, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: svetagor_70@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Gortsevich S.L., Kravchenko P.A. Study of copper oxidative dissolving in process of thiosulfate—thiocyanate complexes formation in the presence of oxygen // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 72–76.

УДК 662.636.3:66-977

ВЛИЯНИЕ ХЛОРИДОВ МЕТАЛЛОВ НА ПРОЦЕСС ПИРОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

Ю.В. Луговой, К.В. Чалов, Ю.Ю. Косивцов, Э.М. Сульман

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния хлоридов металлов на процессе пиролиза соломы пшеницы. Установлено, что все выбранные для исследования хлориды влияют на процесс пиролиза, однако наибольшая активность наблюдается при использовании хлорида меди (II). Наличие хлорида меди приводило к снижению начальной температуры деструкции гемицеллюлозной фракции соломы пшеницы, увеличивало выход жидких и твердых продуктов пиролиза, а также уменьшало молекулярно-массовое распределение летучих продуктов. Анализ площади удельной

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

поверхности и распределения пор по размерам образцов углеродсодержащих остатков пиролиза показал, что в присутствии хлорида меди (II) происходило увеличение пористости и величины площади удельной поверхности твердого углеродного остатка пиролиза с 24 до 63,5м 2 /г, что обусловлено увеличением объема мезо- и макропор.

Ключевые слова: термогравиметрический анализ, биомасса, пиролиз, хлориды металлов, углеродный остаток.

Ограничение применения традиционных топлив и экологические проблемы, возникающие при их использовании, повышают интерес к переработке биомассы с целью производства транспортных топлив, источников энергии и химических веществ [1]. Преимуществами биомассы по сравнению с ископаемым топливом являются низкое содержание серы и азота, а также отсутствие влияния на баланс CO_2 в атмосфере.

Сельскохозяйственные отходы, образующиеся из растений, являются доступным источником биомассы, которая ежегодно производится в больших количествах во всем мире [2]. В Российской Федерации количество отходов растениеводства, которые могут эффективно использоваться в энергетических целях без ущерба для сельскохозяйственных нужд, превышает 50 миллионов тонн условного топлива в год [3].

Существуют различные подходы к переработке отходов сельскохозяйственных растений. Ученых в настоящее время привлекают модификации методов пиролиза для эффективного использования отходов биомассы в энергетических целях [4].

Повышение эффективности процессов пиролиза, а также качества полученных конечных продуктов может быть достигнуто с помощью катализа. Хлориды железа, никеля, кобальта и меди значительно увеличивают образование углеродсодержащего остатка и снижают температуру пиролиза [5, 6]. Кроме того, кислотный характер хлоридов переходных металлов значительно ускоряет реакции пиролиза, что приводит к изменению состава газообразных продуктов [7]. Таким образом, изучение влияния хлоридов переходных металлов на процесс пиролиза соломы пшеницы представляет теоретический и практический интерес.

Солома пшеницы, используемая в исследовании, была собрана в Тверской области (Бологовский район, июль 2017 г). Поскольку состав сырья оказывает влияние на процесс пиролиза, было проведено определение содержания влаги, золы и основных компонентов соломы пшеницы — экстрактивных веществ, гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина согласно методике [8].

Для оценки влияния хлоридов переходных металлов на процесс пиролиза соломы пшеницы были выбраны следующие соединения: $ZnCl_2 \cdot 6H_2O$, $SnCl_2 \cdot 4H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Влияние данных хлоридов на процесс пиролиза определялось посредством термогравиметрического анализа с применением термоанализатора Iris TG 209 F1 (NETZSCH). Термогравиметрический анализ проводился в среде аргона (при температуре от 50 до 600 °C) при скорости нагрева печи 5 °С/мин. Вещества вводились в состав проб соломы пшеницы в сухом виде путем прямого внесения. Содержание исследуемых солей в пробе находилось в пределах от 1 до 10 % масс., что было определено в ходе предварительных экспериментов. Для образца, содержащего 10 % $CuCl_2$ и исходной соломы пшеницы, был выполнен анализ состава летучих продуктов посредством масс-анализатора NETZSCH QMS 403 D.

Исходя из полученных экспериментальных результатов, хлорид меди был отобран для исследования на лабораторной установке пиролиза, которая подробно описана в

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

статье [9]. Процесс пиролиза проводился при температуре 550 °C в течение одного часа в среде азота. Далее было выполнено хроматографическое определение состава газообразных продуктов пиролиза образцов соломы пшеницы с 10%-м содержанием CuCl₂, а также исходного образца без добавок.

Твердые остатки были исследованы на содержание соединений меди методом рентгенфлуоресцентного анализа и ретгенфотоэлектронной спектроскопии, а также было получено распределение пор по размерам и значения удельной площади поверхности методом низкотемпературной адсорбции азота. Условия хроматографического анализа газа и оборудование, использующееся при анализе твердых продуктов пиролиза соломы пшеницы, также подробно описаны в статье [9].

Влажность и зольность соломы пшеницы составляли 7,2 и 4,7 % соответственно. Содержание экстрактивных веществ, гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина в соломе пшеницы составляло 5,6; 41,1; 31,7 и 9,8 % соответственно. Как показали экспериментальные данные (рис. 1), все исследуемые хлориды металлов по-разному влияли на процесс пиролиза соломы пшеницы. Исследуемые хлориды металлов существенно снижали температуру начала деструкции гемицеллюлоз, входящих в состав соломы пшеницы, а также незначительно понижали начальную температуру деструкции целлюлозы. По смещению температуры деструкции гемицеллюлозы в сторону меньших температур исследованные хлориды переходных металлов можно расположить в следующий ряд по убыванию влияния:

$$CuCl_2 > SnCl_2 > ZnCl_2 > FeCl_3 > CoCl_2 > NiCl_2$$
.

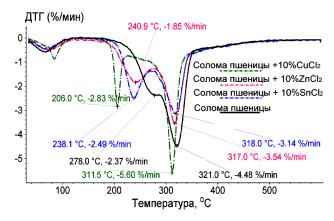


Рис. 1. ДТГ кривые, полученные в результате пиролиза соломы пшеницы в присутствии хлоридов меди, олова, цинка, а также образца без добавок

Как показали результаты масс-спектрометрического исследования летучих продуктов пиролиза соломы пшеницы, в присутствии CuCl₂ происходило снижение молекулярно-массового распределения и уменьшение молекулярной массы летучих продуктов, что может найти применение при термокаталитической очистке летучих продуктов от смолистых веществ. Наибольшее влияние на процесс деструкции соломы пшеницы оказал CuCl₂, поэтому данная соль применялась на лабораторной установке пиролиза. В случае некаталитического процесса пиролиза массы газообразных, жидких и твердых продуктов принимали значения 35,9; 26,1 и 38,0 % масс. соответственно. Использование хлорида меди (10 % масс.) приводило к увеличению массы жидких и

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

твердых продуктов соответственно в 1,35 и 1,11 раза за счет снижения массы газообразных продуктов в 1,36 раза. В процессе пиролиза соломы пшеницы в присутствии $CuCl_2$ в составе газообразных продуктов увеличивалось содержание водорода от 5 до 20 % (об.), а общее содержание CO_2 в суммарных газообразных продуктах снижалось с 11,5 до 0,3 % (об.). Анализ спектра подуровня $Cu 2p_{3/2}$ (рис. 2) показывает, что внесенный в качестве добавки хлорид меди полностью преобразовался в металлическую медь (932,4 эВ) и оксид меди (933,7 эВ), а также в частично окисленную медь (933,0 эВ).

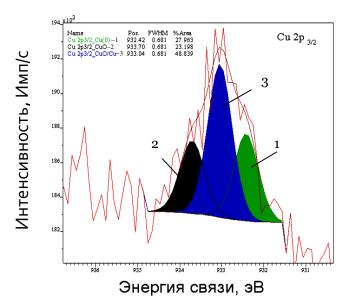


Рис. 2. Фотоэлектронный спектр подуровня Cu 2p_{3/2}

Исследование твердого углеродного остатка пиролиза соломы пшеницы с помощью метода РФА показало, что содержание меди в твердом остатке пиролиза составляло 0,31 %, что может свидетельствовать о незначительной миграции меди, входящей в состав хлорида, внутрь объема углеродного остатка. Результаты исследования твердых остатков пиролиза, полученных как в присутствии $CuCl_2$, так и без него, показали, что в присутствии данного соединения происходит увеличение площади удельной поверхности с 24 до 63,5 м²/г. Это обусловлено увеличением объемов мезо- и макропор.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-08-00794).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. K. Lazdovica, V. Kampars, L. Liepina, M. Vilka, Comparative study on thermal pyrolysis of buckwheat and wheat straws by using TGA-FTIR and Py-GC/MS methods, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2017. Vol. 124, pp. 1–15.
- 2. B. Biswas, N. Pandey, Y. Bisht, R. Singh, J. Kumar, and T. Bhaskar, Pyrolysis of agricultural biomass residues: comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk, Bioresource Technology, 2017.Vol. 237, pp. 57–63.
- 3. Prospects for the use of biofuels from wood raw materials. LesPromInform. 2013. Vol. 98. No 8. 174 p.
- 4. Eibner S., Broust F., Blin J., Julbe A. Catalytic effect of metal nitrate salts during pyrolysis of impregnated biomass/ Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, Vol. 113, pp. 143–152.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

- 5. Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Prog Energ Combus, 2008, Vol. 34, pp. 47–90.
- 6. Rutkowski P. Chemical composition of bio-oil produced by co-pyrolysis of biopolymer/polypropylene mixtures with K2CO3 and ZnCl2 addition. Analytical and Applied Pyrolysis. 2012; Vol. 98, pp. 86–97.
- 7. Nzihou A. Stanmore B., Lyczko N., Minh D.P. The catalytic effect of inherent and adsorbed metals on the fast/flash pyrolysis of biomass: A review. Energy. 2019 Vol. 170. pp. 326–337.
- 8. Augustine O.A., Opeyemi A.A., Oyinlola M.O., Temitayo E.O. Compositional analysis of lignocellulosic materials: Evaluation of an economically viable method suitable for woody and non-woody biomass. AJER., 2015. Vol. 4, pp. 14–19.
- 9. Lugovoy Yu.V., Chalov K.V., Tkachenko O.P., Sulman E.M., Wärnå J., Murzin D.Yu. Effect of iron-subgroup metal salts on polymer cord pyrolysis, RSC Adv., 2015, 5, pp. 56460–56469.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧАЛОВ Кирилл Вячеславович - кандидат химических наук, доцент технологии полимерных материалов, ФГБОУ BO«Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tschalov_k@mail.ru КОСИВЦОВ Юрий Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22. E-mail: kosivtsov@science.tver.ru

СУЛЬМАН Эсфирь Михайловна — доктор химических наук, профессор кафедры биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sulman@online.tver.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Луговой Ю.В., Чалов К.В., Косивцов Ю.Ю., Сульман Э.М. Влияние хлоридов металлов на процесс пиролиза растительной биомассы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 76–82.

INFLUENCE OF METAL CHLORIDES ON THE PROCESS OF PYROLYSIS OF PLANT BIOMASS

Y.V. Lugovoy, K.V. Chalov, Y.Y. Kosivtsov, E.M. Sulman

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents the results of a study of the influence of metal chlorides on the pyrolysis of wheat straw. It is established that the studied chlorides affect the pyrolysis process, however, the greatest activity is observed when using copper (II) chloride. The presence of copper chloride led to a decrease in the initial temperature of destruction of hemicellulose fraction of wheat straw, increased the yield of liquid and solid pyrolysis products, and also reduced the molecular

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

weight distribution of volatile products. Analysis of the specific surface area and pore size distribution of carbon–containing pyrolysis residues showed that in the presence of copper (II) chloride, the porosity and specific surface area of the solid pyrolysis carbon residue increased from $24 \text{ to } 63.5 \text{ m}^2/\text{ g}$, due to an increase in the volume of meso- and macropores.

Keywords: thermogravimetric analysis, biomass, pyrolysis, metal chlorides, carbon residue.

REFERENCES

- 1. K. Lazdovica, V. Kampars, L. Liepina, M. Vilka, Comparative study on thermal pyrolysis of buckwheat and wheat straws by using TGA-FTIR and Py-GC/MS methods, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2017. Vol. 124, pp. 1–15.
- 2. B. Biswas, N. Pandey, Y. Bisht, R. Singh, J. Kumar, and T. Bhaskar, Pyrolysis of agricultural biomass residues: comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk, Bioresource Technology, 2017.Vol. 237, pp. 57–63.
- 3. Prospects for the use of biofuels from wood raw materials. LesPromInform. 2013. Vol. 98. No 8. 174 p.
- 4. Eibner S., Broust F., Blin J., Julbe A. Catalytic effect of metal nitrate salts during pyrolysis of impregnated biomass/ Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, Vol. 113, pp. 143–152.
- 5. Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Prog Energ Combus, 2008, Vol. 34, pp. 47–90.
- 6. Rutkowski P. Chemical composition of bio-oil produced by co-pyrolysis of biopolymer/polypropylene mixtures with K2CO3 and ZnCl2 addition. Analytical and Applied Pyrolysis. 2012; Vol. 98, pp. 86–97.
- 7. Nzihou A. Stanmore B., Lyczko N., Minh D.P. The catalytic effect of inherent and adsorbed metals on the fast/flash pyrolysis of biomass: A review. Energy. 2019 Vol. 170. pp. 326–337.
- 8. Augustine O.A., Opeyemi A.A., Oyinlola M.O., Temitayo E.O. Compositional analysis of lignocellulosic materials: Evaluation of an economically viable method suitable for woody and non-woody biomass. AJER., 2015. Vol. 4, pp. 14–19.
- 9. Lugovoy Yu.V., Chalov K.V., Tkachenko O.P., Sulman E.M., Wärnå J., Murzin D.Yu. Effect of iron-subgroup metal salts on polymer cord pyrolysis, RSC Adv., 2015, 5, pp. 56460–56469.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

LUGOVOY Yuri Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, the Associate Professor of the Department of Biotechnology and Chemistry, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: pn-just@yandex.ru

CHALOV Kirill Vyacheclavocich – Candidate of Chemical Sciences, the Associate Professor of the Department of Polymer Materials Technology, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tschalov_k@mail.ru

KOSIVTSOV Yury Yurievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Biotechnology and Chemistry, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kosivtsov@science.tver.ru

SULMAN Esfir Mikhailovna – Doctor of Chemistry, Professor, Department of Biotechnology and Chemistry, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sulman@online.tver.ru

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

CITATION FOR AN ARTICLE

Lugovoy Y.V., Chalov K.V., Kosivtsov Y.Y., Sulman E.M. Influence of metal chlorides on the process of pyrolysis of plant biomass // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 76–82.

УДК 661.728, 66.094.941

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕРСИИ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В СУБКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЕ

О.В. Манаенков, Э.М. Сульман, Ю.Ю. Косивцов, О.В. Кислица, Ю.В. Луговой, Е.А. Раткевич

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования процесса гидролиза микрокристаллической целлюлозы в среде субкритической воды. Изучено влияние на характер протекания процесса гидролиза температуры, парциального давления газа, времени процесса, соотношения целлюлоза / вода, размера частиц целлюлозы и других параметров. Проведено исследование влияния на процесс гидролиза предварительной обработки водных дисперсий целлюлозы мощным ультразвуком. Установлена связь основных параметров процесса с энергетическими параметрами ультразвуковой обработки. Проведено исследование карбонизатов целлюлозы, получаемых при гидротермальной деструкции, методом ИК-Фурье спектроскопии.

Ключевые слова: целлюлоза, субкритическая вода, гидролиз, ультразвук, глюкоза.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поиск новых эффективных и экологически безопасных методов переработки возобновляемых ресурсов проходит в рамках научного направления, которое сформировалось в 90-е гг. XX века и известно как «зеленая» химия (*Green Chemistry*) [1]. В частности, ведутся разработки новых способов конверсии растительной биомассы, в основе большинства которых лежит процесс гидролиза целлюлозы до мономеров (глюкозы) [2].

В 2000-х гг. появились работы, в которых указывалась возможность проведения процесса гидролиза целлюлозы и гидрогенолиза в суб- или сверхкритической воде. Гидролиз целлюлозы в субкритической воде имеет ряд преимуществ, делающих этот метод наиболее перспективным в процессах переработки целлюлозной биомассы. Такой гидролиз протекает быстро, не требует наличия минеральных кислот, щелочей или дорогостоящих ферментов. В итоге образуется водный раствор продуктов гидролиза [3–5].

Субкритическая вода (СубКВ) — это вода при температурах от 100 до 374 °C и соответствующих давлениях от 0,1 до 22,0 МПа [6]. По сравнению с водой в обычных условиях диэлектрическая константа субкритической воды имеет меньшее значение, меньшее количество водородных связей и высокую изотермическую сжимаемость [7]. Как реакционная среда СубКВ характеризуется рядом уникальных свойств. Например, при 250 °C р $K_{\rm w}$ такой воды имеет минимальное значение и равно 11,2, соответственно, концентрация ионов $H_{\rm 3}O^{+}$ или OH^{-} в ней в 25 раз больше, чем в воде при нормальных условиях, что делает СубКВ эффективной средой для проведения кислотно- и основно-

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

катализируемых реакций. Уменьшение вязкости воды с 0,89 мПа·с (н.у.) до 0,11 мПа·с (при температуре 250 °C) способствует устранению затруднений, связанных с внешним массопереносом реагентов [8, 9]. Кроме того, вследствие уменьшения значения диэлектрической проницаемости увеличивается растворимость в воде газов и гидрофобных веществ [10].

Гидролиз целлюлозы в чистой воде носит некаталитический характер. Под атмосферой водорода или кислорода в присутствии катализатора гидролиз целлюлозы способствует дальнейшим каталитическим процессам гидрогенизации, гидрогенолиза или окисления [11, 12]. Ряд ученых сходятся во мнении, что гидролиз в СубКВ – это начальный этап, необходимый для дальнейших исследований в области переработки целлюлозы [13, 14].

Цель данной работы — изучение процесса гидролиза микрокристаллической целлюлозы в среде субкритической воды, определение оптимальных условий процесса, обеспечивающих максимальный выход продуктов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали микрокристаллическую целлюлозу со степенью кристалличности 75–80 % и степенью полимеризации (СП) \sim 120. Процесс гидролиза проводили в реакторе высокого давления объемом 50 см³ с диапазоном рабочего давления от 1 до 300 бар, оборудованном контроллером PARR 4843 (Parr Instrument, США), нагревателем (диапазон рабочих температур от комнатной до 300 °C), пропеллерной мешалкой (диапазон скорости перемешивания от 0 до 700 об/мин), термопарой и манометром.

Эксперименты проводили в следующем порядке. В реактор загружали водную дисперсию целлюлозы, подключали газовую магистраль, термопару и крышку реактора с пропеллерной мешалкой. После проверки на герметичность осуществляли продувку внутреннего объема реактора газом из баллона. Затем включали нагрев реактора и привод пропеллерной мешалки. Скорость перемешивания устанавливали на значении 100 об/мин (для предотвращения образования локальных зон перегрева реакционной смеси). По достижении рабочей температуры число оборотов мешалки увеличивали до 600 об/мин. Отсчет времени эксперимента начинали с момента достижения рабочей температуры. По окончании процесса реактор охлаждали в токе холодного воздуха и фильтровали реакционную массу через предварительно высушенный и взвешенный бумажный фильтр (сорт 392 — «красная лента»). Фильтр с осадком негидролизованной целлюлозы высушивали в сушильном шкафу при температуре 70 °C в течение 3 ч, после чего взвешивали и по разнице масс фильтра с осадком и чистого фильтра находили массу негидролизованной целлюлозы. Степень конверсии (СК) целлюлозы рассчитывали по уравнению

$$X = \frac{m_0 - m_u}{m_0} \times 100 \%,$$

где m_0 — начальная масса целлюлозы в реакторе, $m_{\rm u}$ — масса негидролизованной целлюлозы. Фильтрат количественно переносили в мерную колбу объемом $100~{\rm cm}^3$ и разбавляли дистиллированной водой до метки. 5 мл полученного раствора профильтровывали через микропористый фильтр «Владипор» типа МФАС-Б-4 и использовали для ВЭЖХ-анализа, по результатам которого оценивали выход глюкозы.

Выход продукта гидролиза (глюкозы) определяли по формуле

$$\eta = \frac{m_c}{m_0} \cdot 100 \%,$$

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

где m_e — масса образовавшийся глюкозы; m_0 — начальная масса целлюлозы в реакторе. Для анализа жидкой фазы использовался высокоэффективный жидкостной хроматограф UltiMate 3000 (Dionex, США), оснащенный рефрактометрическим детектором.

Для ультразвуковой обработки водных дисперсий целлюлозы использовался ультразвуковой гомогенизатор Sonopulse HD 3200 (Bandelin electronic, Германия) с системой управления Amplichron[®], оборудованный высокочастотным генератором GM 3200, ультразвуковым преобразователем UW 3200, бустером SH 213 G с титановым зондом TT 13 диаметром 13 мм. В данной комплектации гомогенизатор позволяет проводить ультразвуковую обработку растворов, дисперсий объемом от 20 до 900 мл с максимально разрешенной амплитудой 100 % (амплитуда 165 мкм).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние температуры. Исследование влияния температуры на процесс гидролиза целлюлозы проводили при следующих условиях: диапазон температур от 140 до 260 °C; время 60 мин; парциальное давление H_2 60 атм; масса целлюлозы 0,5 г; объем воды 30 мл.

Зависимость СК микрокристаллической целлюлозы от температуры процесса гидролиза показана на рис. 1. Из приведенных данных видно, что зависимость носит экспоненциальный характер. Причем после анализа полученных значений и вида дифференциальной кривой зависимости, представленной на рис. 2, можно выделить два этапа процесса гидролиза целлюлозы в СубКВ:

- 1) гидролиз аморфной части целлюлозы, составляющей около 20–25 % массы образца;
- 2) гидролиз микрокристаллической части целлюлозы.

Гидролиз аморфной части целлюлозы начинается при температуре 150-170 °C.

Предположительно, короткие участки цепочек аморфной части целлюлозы в субкритической воде начинают отделяться от кристаллической части при относительно низких температурах (<150 °C) без разрыва гликозидных связей в цепочечных сегментах, поскольку интенсивной окраски получаемых растворов, вызванной наличием в них продуктов карамелизации глюкозы, не наблюдается (рис. 3а). На дифференциальной кривой (рис. 2) началу гидролиза аморфной части целлюлозы соответствует пик при температуре 160-170 °C. При 180 °C конверсия целлюлозы составляет уже 17,4 %. Таким образом, к этому моменту уже значительная часть аморфной целлюлозы подвергается растворению / гидролизу. Заметная бурая окраска получаемых при данной температуре растворов (рис. 3a) свидетельствует о том, что происходит не только растворение аморфной целлюлозы, но и ее гидролиз до мономеров - глюкозы, которая при таких температурах частично подвергается температурной деструкции с образованием окрашенных продуктов. Следовательно, минимальная температура для разрыва гликозидных связей в аморфных образцах составляет ~160 °C. С дальнейшим ростом температуры до 200 °C конверсия целлюлозы увеличивается незначительно, до 25,8 %. Однако уже при 210 °C это значение возрастает приблизительно на 5 % (до 30,6%). Следует считать, что при этих температурах начинается гидролиз кристаллической части целлюлозы. После 220 °C конверсия целлюлозы начинает резко расти и при температуре 250 °C достигает 100 % (рис. 1).

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

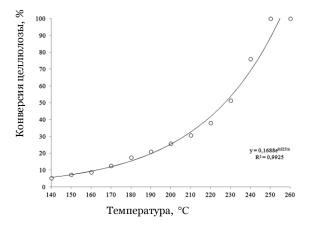


Рис. 1. Зависимость СК целлюлозы от температуры процесса гидролиза

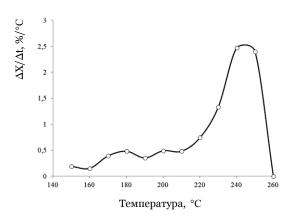


Рис. 2. Дифференциальная кривая зависимости СК целлюлозы от температуры процесса гидролиза

Одновременно с этим максимальных значений достигает скорость карамелизации глюкозы с образованием окрашенных продуктов (рис. 36) с характерным запахом. На дифференциальной кривой (см. рис. 2) данному периоду реакции соответствует второй пик с максимумом 2,47 %/°C при температуре 240 °C.



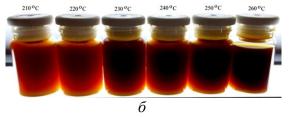


Рис. 3. Фотографии растворов, получаемых после окончания экспериментов при температурах: a - 140 - 200 °C; $\delta - 210 - 260$ °C

Было показано, что максимальный выход глюкозы наблюдается при температуре 230 °C и составляет 12,2 %. На этапе гидролиза аморфной части целлюлозы (при температурах от 140 до 170 °C) выход глюкозы растет незначительно – от 0 (в жидкой фазе были обнаружены лишь следовые количества глюкозы) до 2,3 %. Уже при этих температурах часть глюкозы карамелизуется, о чем свидетельствует появление бурой окраски реакционных растворов (см. рис. 3).

Влияние времени процесса. Время эксперимента варьировали в диапазоне от 0 (момент достижения рабочей температуры) до 120 мин с шагом в 10 мин при температуре 230 °C. Остальные условия не менялись.

Показано, что к моменту достижения температуры 230 °C (0-я мин) конверсия целлюлозы уже составляет 12,6 % вследствие начинающегося процесса гидролиза (в большей степени ее аморфной части). Кроме того, в промежуток времени, предшествующий началу эксперимента, происходит и карамелизация образующейся глюкозы, о чем свидетельствует характерная бурая окраска получаемых растворов. Для исключения влияния на процесс гидролиза периода нагрева реактора до рабочей температуры нагрев реактора во всех экспериментах проводили при средней скорости

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

нагрева 5,25 °С/мин. При данной скорости время нагрева реактора от комнатной температуры (\sim 20 °С) до температуры 230 °С составляло 40 \pm 3 мин.

На графике зависимости СК целлюлозы от времени процесса (рис. 4) можно выделить несколько участков, на которых общий ход реакции гидролиза целлюлозы объясняется разными процессами. После достижения рабочей температуры и увеличения числа оборотов пропеллерной мешалки со 100 до 600 об/мин степень конверсии целлюлозы увеличивается на 9,5 % (до 22,1 %). Такой скачок объясняется тем, что при интенсивном перемешивании скорость гидролиза возрастает. На дифференциальной кривой (рис. 5) этот момент соответствует первому пику на 10-й мин – 0,95 %/мин. Поскольку в период нагрева реактора до рабочей температуры в жидкой фазе могли накапливаться олигомеры аморфной части, отделившиеся от кристаллов, при увеличении интенсивности перемешивания происходит их быстрый гидролиз до глюкозы, продукты температурного распада которой придают характерную окраску реакционной массе.

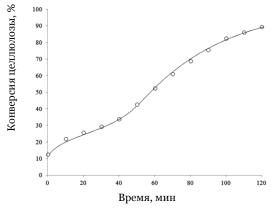


Рис. 4. Зависимость СК целлюлозы от времени процесса гидролиза

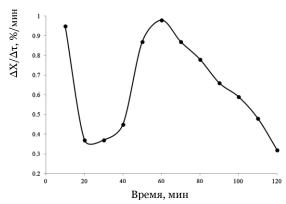


Рис. 5. Дифференциальная кривая зависимости СК целлюлозы от времени процесса гидролиза

Последующее снижение скорости гидролиза целлюлозы, вероятно, обусловлено тем, что после гидролиза аморфной части целлюлозы начинает подвергаться гидролитическому расщеплению ее кристаллическая часть. Гидролиз кристаллической целлюлозы происходит на поверхности кристаллов, без их растворения, в связи с чем скорость данного процесса будет ниже [15].

С дальнейшим увеличением времени процесса, примерно с 10-й по 40-ю мин, скорость гидролиза растет незначительно. Однако после 40-й мин она начинает постепенно повышаться и достигает максимума к 60-й мин. На дифференциальной кривой данный момент соответствует второму пику с максимумом 0,98 %/мин. К этому времени конверсия целлюлозы составляет приблизительно 50 %. Можно предположить, что в данный момент наиболее интенсивно гидролизуется та часть кристаллической целлюлозы, которая имеет наименее прочную структуру (например, связанная с аморфными фрагментами).

Через 60–70 мин после начала процесса скорость гидролиза начинает снижаться вследствие того, что в растворе к этому времени остаются трудногидролизуемые участки кристаллической целлюлозы. Скорость реакции гидролиза также может снижаться из-за наличия в жидкой фазе продуктов распада глюкозы, образования карбонизатов. К 110–120-й минуте течения процесса степень конверсии целлюлозы изменяется незначительно, приблизительно на 3 % за 10 мин. На дифференциальной

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

кривой этот период характеризуется резким снижением значения $\Delta X/\Delta \tau$. К окончанию времени эксперимента (то есть через 120 мин) степень конверсии целлюлозы достигает значения 89,5 %.

Влияние парциального давления водорода. Во всем диапазоне давлений (от 20 до 100 атм при прочих равных условиях) значение степени конверсии колебалось около среднего значения, составляющего ~52 %. Данный факт подтверждает предположение, что гидролиз макромолекул целлюлозы в субкритической воде идет только под воздействием in situ образующихся ионов H₃O⁺[15]. Вместе с тем результаты исследования показывают, что величина парциального давления водорода оказывает влияние на выход глюкозы и сорбита. При повышении давления выход сорбита увеличивается, ускоряется реакция гидрирования глюкозы, выход которой соответственно уменьшается. На рис. 6 и 7 приведены зависимости выходов глюкозы и сорбита от парциального давления водорода. Как видно из рис. 6, приблизительно до достижения парциальным давлением водорода величины 60 атм значение выхода глюкозы практически не изменяется, сохраняясь на уровне 10-12 %. При давлениях водорода более 60 атм выход глюкозы снижается и при 100 атм становится равным 7,4 %. Зависимость выхода сорбита от парциального давления водорода является более выраженной (рис. 7). При давлении водорода 20 атм выход сорбита не превышает 1 %, в диапазоне давлений от 20 до 70 атм наблюдается его линейный рост, а при 70 атм выход сорбита составляет уже 4,2 %. С дальнейшим ростом парциального давления водорода выход сорбита увеличивается незначительно: от 4,2 % при 70 атм до 5.1 % при 100 атм, то есть на 0.9 %.

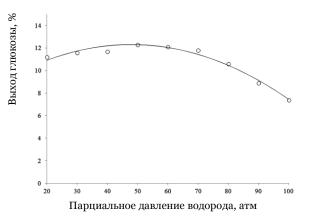


Рис. 6. Зависимость выхода глюкозы от парциального давления водорода

Рис. 7. Зависимость выхода сорбита от парциального давления водорода

Таким образом, оптимальное значение парциального давления водорода с точки зрения максимального выхода глюкозы составляет 60 атм. Меньшие значения нецелесообразны, поскольку, как показали исследования [16], при гидролитическом гидрировании целлюлозы давление водорода <60 атм не обеспечивают полного гидрирования глюкозы до сорбита. Использование давлений вышеуказанного значения также не является целесообразным и, кроме того, усложняет проведение процесса с технологической точки зрения.

Влияние ультразвуковой (УЗ) обработки. В ходе исследования дисперсии микрокристаллической целлюлозы подвергали УЗ-обработке в течение определенного времени при максимальном значении амплитуды 165 мкм (100 %). После обработки

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

дисперсии целлюлозы количественно переносили в реактор высокого давления и проводили процесс гидролиза при определенных оптимальных условиях. В таблице приведены значения энергии, переданной в дисперсии целлюлозы при различных параметрах УЗ-обработки.

Энергетические параметры ультразвуковой обработки
водных дисперсий целлюлозы

Время обработки, мин	Маркировка образца	<i>Е</i> , кДж	Время обработки, мин	Маркировка образца	Е, кДж
0	0/0	0,0	50	100/50	264,1
10	100/10	47,6	60	100/60	317,3
20	100/20	106,4	70	100/70	370,5
30	100/30	157,7	80	100/80	423,7
40	100/40	210,9	90	100/90	476,9

На рис. 8 приведена зависимость СК целлюлозы, обработанной УЗ различное время при относительной амплитуде зонда гомогенизатора 100 %. На первоначальном участке кривой, соответствующем времени УЗ-обработки от 0 до 30 мин, происходит резкое увеличение СК. Значение энергии, переданной зондом гомогенизатора в дисперсию за данный временной промежуток, в первом составило 157,7 кДж. Подобный характер кривой обусловлен, вероятно, тем, что при УЗ-обработке происходит частичный гидролиз аморфной части целлюлозы. Согласно данным, полученным ранее [17], УЗ-обработка высокой интенсивности приводит к переходу аморфной части целлюлозы (примерно 30 %) в наноформу с минимальным размером наночастиц 260–280 нм. В гидротермальных условиях эта целлюлоза подвергается быстрому гидролизу, чем и обусловлен наблюдаемый резкий рост конверсии. При дальнейшей обработке ультразвуком (более 30 мин) конверсия практически не растет. Это означает, что кристаллическая часть целлюлозы в минимальной степени подвергается ультразвуковой деструкции.

На рис. 9 представлена зависимость выхода глюкозы в результате гидролиза целлюлозы, обработанной УЗ. Резкое увеличение СК обработанной ультразвуком целлюлозы приводит к накоплению глюкозы в жидкой фазе на первых этапах эксперимента, в том числе и на этапе нагрева реактора до рабочей температуры. При этом оптимальные значения энергии находятся в диапазоне от 100 до 150 кДж.

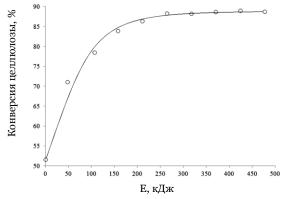


Рис. 8. Зависимость СК целлюлозы от энергетических условий УЗ-обработки

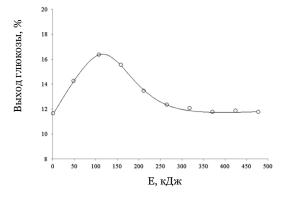


Рис. 9. Зависимость выхода глюкозы от энергетических условий УЗ-обработки

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

ИК-спектроскопическое исследование карбонизатов целлюлозы. В ходе работы было проведено определение качественного состава поверхности карбонизатов целлюлозы, полученных в результате гидротермальной карбонизации (некаталитического гидролиза целлюлозы при температуре 230 °C в среде СубКВ), методом ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. Применялась приставка диффузного отражения, позволяющая регистрировать ИК-спектры твердых веществ без использования матрицы в виде бромида калия и без вмешательства в структуру поверхности.

На рис. 10а приведены ИК-спектры диффузного отражения исходной целлюлозы и карбонизата, полученного в результате реакции при условиях, характеризующихся максимальным выходом глюкозы: температура процесса 230 °C, скорость 600 об/мин, масса целлюлозы 0,5 г, объем воды 30 см³. Анализ полученных спектров позволил выявить наличие полос поглощения, характерных как для целлюлозных материалов, так и для углеродсодержащих продуктов их разложения. В частности, на спектре карбонизата (рис. 10δ) имеется широкая полоса поглощения на 3 650–3 000 см $^{-1}$, которая характерна для валентных колебаний связи О-Н в гидроксильных или карбоксильных группах. Полосы в области 1 300–1 000 см⁻¹ подтверждают присутствие валентных колебаний связи С-О, характерных для гидроксильных, фенольных или эфирных групп, а также вращательные колебания связи О-Н. О присутствии других кислородных групп свидетельствует наличие полосы на 1 710 см⁻¹, соответствующей колебаниям связей С=О карбонильных, эфирных или карбоксильных групп, а также хинонов. В области 1 450-1 380 см-1 обнаруживаются деформации связей С-Н (симметричные или асимметричные). Полосы, характерные для ароматического скелета, находятся на уровне 1 510 см⁻¹. Сигнал на 1 610 см⁻¹ соответствует колебаниям связей С=С ароматических колец.

Результаты анализа ИК-спектров диффузного отражения демонстрируют различия в химической структуре между исходной целлюлозой и ее карбонизатом. Например, значительное увеличение интенсивности полос поглощения на 1 510 и 1 610 см⁻¹ (по сравнению с исходной целлюлозой) свидетельствует о том, что в карбонизате присутствует больше ароматических соединений.

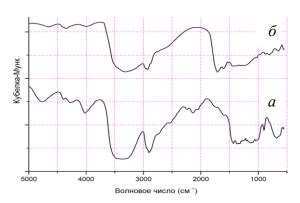


Рис. 10. ИК-спектры диффузного отражения: a – исходной целлюлозы; δ – карбонизата целлюлозы, полученного в результате реакции

Резкое усиление интенсивности полосы при 1 710 см⁻¹, что характерно для колебаний связей C=O карбонила, хининов, эфиров или карбоксила, свидетельствует и о том, что структура целлюлозы подверглась сильным изменениям. С учетом того, что в жидкой фазе

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

были обнаружены альдегиды, кетоны и органические кислоты (например, дигидроксиацетон, 2-ацетонилциклопентанон, ацетонилацетон, уксусная кислота), преобладающими продуктами были соединения с C_6 и C_5 , такие как сорбит, фурфурол, ксилит, гидроксиметилфурфурол и глюкоза, а также с учетом достаточно низкого суммарного выхода определяемых в жидкой фазе продуктов можно утверждать, что при температурах, превышающих 230 °C, конверсия целлюлозы в СубКВ протекает по механизму гидротермальной карбонизации целлюлозы, приводящему к образованию карбонизата. Карбонизат включает в себя несколько этапов (гидролиз целлюлозы, изомеризацию глюкозы во фруктозу, обезвоживание, альдольную конденсацию, агломерацию / рост частиц образующегося карбонизата).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе исследований результаты позволяют сделать вывод, что оптимальными условиями процесса гидролиза микрокристаллической целлюлозы в СубКВ являются следующие: температура 230 °С; время 60 мин; давление 60 атм H_2 . При указанных условиях были получены следующие показатели: конверсия целлюлозы $51,0\pm3,0$ %; выход глюкозы $11,5\pm1,5$ %.

Проведено исследование влияния на процесс гидролиза предварительной обработки водных дисперсий целлюлозы мощным ультразвуком. Показано, что оптимальное время обработки составляет 30 мин (\sim 150 кДж). За данный промежуток времени происходит деструкция и частичный гидролиз аморфной части целлюлозы, чем обусловлено увеличение степени конверсии целлюлозы в среде СубКВ и выхода глюкозы. В результате гидролиза обработанной УЗ (A = 100 %, время 30 мин) целлюлозы при оптимальных условиях были получены следующие значения: СК целлюлозы 89,0 %; выход глюкозы 16,4 %.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы. В субкритической воде при температуре около 180 °C целлюлоза подвергается последовательной деполимеризации до олигосахаридов (в том числе водорастворимых), дисахаридов (целлобиоза) и моносахаров (глюкозы), затем гидролизу. Глюкоза подвергается частичной карамелизации и, в некоторой степени, гидрированию (под атмосферой водорода) с образованием различных продуктов. При более высоких температурах (от 230 °C) и / или более длительном времени реакции происходит реполимеризация, конденсация и пиролиз данных низкомолекулярных соединений с образованием жидких масел и карбонизатов целлюлозы, содержащих соединения с ароматическими фрагментами в химической структуре.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-29-06004 мк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Кустов Л.М., Белецкая И.П. «Green Chemistry» новое мышление // *Рос. хим. журнал* (Журнал Рос. хим. общества им. Д.И. Менделеева). 2004. Т. XLVIII. Вып. 6. С. 3–12.
- 2. Van de Vyver S., Geboers J., Jacobs P.A., Sels B.F. Recent advances in the catalytic conversion of cellulose // *ChemCatChem*. 2011. V. 3. Issue 1. P. 82–94. DOI: 10.1002/cctc.201000302.
- 3. Dhepe P.L., Fukuoka A. Cracking of Cellulose over Supported Metal Catalysts // Catal. Surv. Asia. 2007. V. 11. P. 186–191. DOI: 10.1007/s10563–007–9033–1.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

- 4. Sasaki M., Fang Z., Fukushima Y., Adschiri T., Arai K. Dissolution and Hydrolysis of Cellulose in Subcritical and Supercritical Water // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2000. V. 39(8). P. 2883–2890. DOI: 10.1021/ie990690j.
- 5. Sasaki M., Adschiri T., Arai K. Kinetics of Cellulose Conversion at 25 MPa in Sub— and Supercritical Water // *American Institute of Chemical Engineers*. 2004. Vol. 50. Issue 1. P. 192–202. DOI: 10.1002/aic.10018.
- 6. Yu Y., Lou X., Wu H. Some Recent Advances in Hydrolysis of Biomass in Hot Compressed Water and its Comparisons with Other Hydrolysis Methods // *Energy & Fuels*. 2008. V. 22(1). P. 46–60. DOI: 10.1021/ef700292p.
- 7. Akiya N., Savage P.E. Roles of water for chemical reactions in high-temperature water // *Chem Rev.* 2002. V. 102. P. 2725–2750. DOI: 10.1021/cr000668w.
- 8. International Association for the Properties of Water and Steam, Release on the Ionization Constant of H₂O, 2007. URL: http://www.iapws.org (дата обращения: 29.04.2019).
- 9. Kruse A., Dinjus E. Hot compressed water as reaction medium and reactant. Properties and synthesis reactions // *J. of Supercritical Fluids*. 2007. V. 39. P. 362–380. DOI: 10.1016/j.supflu.2006.03.016.
- 10. Shitu A., Izhar S., Tahir T.M. Sub-critical water as a green solvent for production of valuable materials from agricultural waste biomass: A review of recent work // Global J. Environ. Sci. Manage. 2015. V. 1. Issue 3. P. 255–264. DOI: 10.7508/GJESM.2015.03.008.
- 11. Jollet V., Chambon F., Rataboul F., Cabiac A., Pinel C., Guillon E., Essayem N. Non-catalyzed and Pt/γ -Al₂O₃ catalyzed hydrothermal cellulose dissolution-conversion: influence of the reaction parameters // *Top. Catal.* 2010. V. 53. Issue 15. P. 1254–1257. DOI: 10.1039/B915758A.
- 12. Palkovits R., Tajvidi K., Procelewska J., Rinaldi R., Ruppert A. Hydrogenolysis of cellulose combining mineral acids and hydrogenation catalysts // *Green Chem.* 2010. Vol. 12. P. 972–978. DOI: 10.1039/C000075B.
- 13. Kobayashi H., Ito Y., Komanoya T., Hosaka Y., Dhepe P.L., Kasai K., Haraa K., Fukuoka A. Synthesis of sugar alcohols by hydrolytic hydrogenation of cellulose over supported metal catalysts // *Green Chem.* 2011. V. 13. P. 326–333. DOI: 10.1039/C0GC00666A.
- 14. Kobayashi H., Komanoya T., Hara K., Fukuoka A. Water-Tolerant Mesoporous-Carbon-Supported Ruthenium Catalysts for the Hydrolysis of Cellulose to Glucose // *Chem. Sus. Chem.* 2010. V. 3. P. 440–443. DOI: 10.1002/cssc.200900296.
- 15. Luo C., Wang S., Liu H. Cellulose Conversion into Polyols Catalyzed by Reversibly Formed Acids and Supported Ruthenium Clusters in Hot Water // Angew. Chem. Int. Ed. 2007. V. 46, pp. 7636–7639. DOI: 10.1002/anie.200702661.
- 16. Matveeva V.G., Sulman E.M., Manaenkov O.V., Filatova A.E., Kislitza O.V., Sidorov A.I., Doluda V.Yu., Sulman M.G., Rebrov E.V. Hydrolytic hydrogenation of cellulose in subcritical water with the use of the Ru–containing polymeric catalysts // *Catal. today.* 2017. V. 280. P. 45–50. DOI: 10.1016/j.cattod.2016.09.001.
- 17. Гаврилова А.С., Манаенков О.В., Филатова А.Е. Исследование влияния ультразвукового воздействия на микрокристаллическую целлюлозу // Вестник Тверского государственного технического университета. 2015. № 1 (27). С. 60–66.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАНАЕНКОВ Олег Викторович — кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

СУЛЬМАН Эсфирь Михайловна — доктор химических наук, профессор кафедры биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sulman@online.tver.ru

КОСИВЦОВ Юрий Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kosivtsov@science.tver.ru

КИСЛИЦА Ольга Витальевна — кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22

ЛУГОВОЙ Юрий Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии и химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. Е-mail: pn—just@yandex.ru РАТКЕВИЧ Екатерина Алексеевна — аспирант кафедры Стандартизация, сертификация и управление качеством, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Манаенков О.В., Сульман Э.М., Косивцов Ю.Ю., Кислица О.В., Луговой Ю.В., Раткевич Е.А. Исследование процесса конверсии микрокристаллической целлюлозы в субкритической воде // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 82–94.

RESEARCH OF PROCESS OF CONVERSION OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE IN SUBCRITICAL WATER

O.V. Manaenkov, E.M. Sulman, Y.Y. Kosivcov, O.V. Kislica, Y.V. Lugovoj, E.A. Ratkevich

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Work is devoted to discussion of results of a research of hydrolysis of microcrystalline cellulose in subcritical water. Influence on process of hydrolysis of the following parameters is studied: temperature, partial pressure of gas, process time, ratio cellulose/water, size of cellulose particles, etc. parameters. Researches as hydrolysis is influenced by preliminary processing of water dispersions of cellulose with use of powerful ultrasound were conducted. It is established that the value of key parameters of process is connected with power parameters of ultrasonic processing. The research was conducted by IK-Fourier's method of spectroscopy of karbonizat of cellulose which turn out at hydrothermal destruction.

Keywords: cellulose, subcritical water, hydrolysis, ultrasound, glucose.

REFERENCES

- 1. Kustov L.M., Beleckaya I.P. «Green Chemistry» new thinking. *Ros. him. zhurnal (Zhurnal Ros. him. obshchestva im. D.I. Mendeleeva)*. 2004. T. XLVIII. Vol. 6. pp. 3–12.
- 2. Van de Vyver S., Geboers J., Jacobs P.A., Sels B.F. Recent advances in the catalytic conversion of cellulose. *ChemCatChem*. 2011. V. 3. Issue 1, pp. 82–94. DOI: 10.1002/cctc.201000302.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

- 3. Dhepe P.L., Fukuoka A. Cracking of Cellulose over Supported Metal Catalysts. *Catal. Surv. Asia.* 2007. V. 11, pp. 186–191. DOI: 10.1007/s10563–007–9033–1.
- 4. Sasaki M., Fang Z., Fukushima Y., Adschiri T., Arai K. Dissolution and Hydrolysis of Cellulose in Subcritical and Supercritical Water. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2000. V. 39(8), pp. 2883–2890. DOI: 10.1021/ie990690j.
- 5. Sasaki M., Adschiri T., Arai K. Kinetics of Cellulose Conversion at 25 MPa in Sub— and Supercritical Water. *American Institute of Chemical Engineers*. 2004. Vol. 50. Issue 1, pp. 192–202. DOI: 10.1002/aic.10018.
- 6. Yu Y., Lou X., Wu H. Some Recent Advances in Hydrolysis of Biomass in Hot Compressed Water and its Comparisons with Other Hydrolysis Methods // *Energy & Fuels*. 2008. V. 22 (1), pp. 46–60. DOI: 10.1021/ef700292p.
- 7. Akiya N., Savage P.E. Roles of water for chemical reactions in high-temperature water. *Chem Rev.* 2002. V. 102. pp. 2725–2750. DOI: 10.1021/cr000668w.
- 8. International Association for the Properties of Water and Steam, Release on the Ionization Constant of H₂O, 2007. URL: http://www.iapws.org (date of access: 29.04.2019).
- 9. Kruse A., Dinjus E. Hot compressed water as reaction medium and reactant. Properties and synthesis reactions. *J. of Supercritical Fluids*. 2007. V. 39, pp. 362–380. DOI: 10.1016/j.supflu.2006.03.016.
- 10. Shitu A., Izhar S., Tahir T.M. Sub-critical water as a green solvent for production of valuable materials from agricultural waste biomass: A review of recent work. *Global J. Environ. Sci. Manage*. 2015. V. 1. Issue 3, pp. 255–264. DOI: 10.7508/GJESM.2015.03.008.
- 11. Jollet V., Chambon F., Rataboul F., Cabiac A., Pinel C., Guillon E., Essayem N. Non-catalyzed and Pt/γ -Al₂O₃ catalyzed hydrothermal cellulose dissolution—conversion: influence of the reaction parameters. *Top. Catal.* 2010. V. 53. Issue 15, pp. 1254–1257. DOI: 10.1039/B915758A.
- 12. Palkovits R., Tajvidi K., Procelewska J., Rinaldi R., Ruppert A. Hydrogenolysis of cellulose combining mineral acids and hydrogenation catalysts . *Green Chem.* 2010. Vol. 12, pp. 972–978. DOI: 10.1039/C000075B.
- 13. Kobayashi H., Ito Y., Komanoya T., Hosaka Y., Dhepe P.L., Kasai K., Haraa K., Fukuoka A. Synthesis of sugar alcohols by hydrolytic hydrogenation of cellulose over supported metal catalysts // *Green Chem.* 2011. V. 13, pp. 326–333. DOI: 10.1039/C0GC00666A.
- 14. Kobayashi H., Komanoya T., Hara K., Fukuoka A. Water-Tolerant Mesoporous-Carbon-Supported Ruthenium Catalysts for the Hydrolysis of Cellulose to Glucose. *Chem. Sus. Chem.* 2010. V. 3, pp. 440–443. DOI: 10.1002/cssc.200900296.
- 15. Luo C., Wang S., Liu H. Cellulose Conversion into Polyols Catalyzed by Reversibly Formed Acids and Supported Ruthenium Clusters in Hot Water. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2007. V. 46. pp. 7636–7639. DOI: 10.1002/anie.200702661.
- 16. Matveeva V.G., Sulman E.M., Manaenkov O.V., Filatova A.E., Kislitza O.V., Sidorov A.I., Doluda V.Yu., Sulman M.G., Rebrov E.V. Hydrolytic hydrogenation of cellulose in subcritical water with the use of the Ru-containing polymeric catalysts. *Catal. today.* 2017. V. 280, pp. 45–50. DOI: 10.1016/j.cattod.2016.09.001.
- 17. Gavrilova A.S., Manaenkov O.V., Filatova A.E. Investigation of the effect of ultrasonic action on microcrystalline cellulose. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. No. 1 (27), pp. 60–66.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

SULMAN Esfir Mikhailovna – Doctor of Chemistry, Professor, Department of Biotechnology and Chemistry, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sulman@online.tver.ru

KOSIVTSOV Yury Yurievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Biotechnology and Chemistry, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kosivtsov@science.tver.ru

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

LUGOVOY Yuri Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, the Associate Professor of the Department of Biotechnology and Chemistry, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: pn-just@yandex.ru

RATKEVICH Ekaterina Alekseevna – graduate student of the Department of Standardizing, certification and quality management, Tver State Technical University, 22 embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: soloha26@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Manaenkov O.V., Sulman E.M., Kosivcov Y.Y., Kislica O.V., Lugovoj Y.V., Ratkevich E.A. Research of process of conversion of microcrystalline cellulose in subcritical water // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 82–94.

УДК 614.8.084

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ТКАНЕЙ С ПОЛИМЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ С ПОМОШЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

С.Д. Семеенков, Т.С. Копылова, Д.С. Семеенков

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Работа посвящена исследованию адгезионных взаимодействий тканей с полимерными покрытиями в области их контакта. Исследования проводились с помощью электронного микроскопа. Анализировались образцы, вулканизованные в псевдоожиженном слое инертного теплоносителя и вулканизованные в автоклавах. Образцы, вулканизованные в псевдоожиженном слое, отличаются более высокой адгезией, определяющейся степенью монолитности системы «ткань — покрытие». Установлено, что адгезия переходного слоя с волокном являются более прочной, нежели с полимерным покрытием.

Ключевые слова: электронный микроскоп, исследование ткани, полимерные покрытия, переходный слой, молекулярный состав.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Среди приборов, получивших в последнее время широкое распространение при проведении научных исследований, электронный микроскоп является наиболее важным [1]. Применению этого прибора способствует то обстоятельство, что значительное количество объектов может быть обнаружено и изучено с полезным увеличением, превышающим возможности светового микроскопа примерно на два порядка [2].

Исследования с помощью оптического микроскопа показали преимущества способа вулканизации плащевых тканей с полимерными покрытиями в псевдоожиженном слое инертного теплоносителя перед существующими производственными способами.

Образцы, вулканизованные в псевдоожиженном слое, отличаются более высокой адгезией, определяющейся степенью монолитности системы «ткань – покрытие».

Для более тщательного изучения зоны контакта с целью получения дополнительных сведений относительно природы сил, обеспечивающих адгезионную прочность высокополимерных соединений, был использован метод электронной микроскопии. Использовался микроскоп просвечивающего типа JEM-7 у, который обладает большой разрешающей способностью и успешно применяется для проведения исследований в области биологии, химии и физики. Был выбран прямой метод препарирования, при котором исследуемый объект помещается внугрь микроскопа, подвергаясь электронной бомбардировке [3].

Чтобы наблюдать исследуемый объект в электронном микроскопе JEM-7 γ прямым методом, необходимо иметь ультратонкий срез этого объекта.

Для получения достаточно тонких срезов в исследованиях использовался ультрамикротом пьезострикционный типа УМПТ-1 [2].

С помощью электронно-микроскопических методов исследования ультратонких срезов нитей капрона с полимерным покрытием изучена физико-химическая природа адгезионных взаимодействий в зоне контакта «капрон – полимерное покрытие».

Установлено, что волокно имеет равномерную плотную структуру (рис. 1).

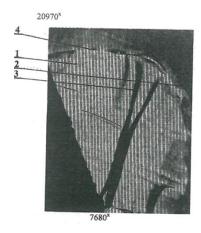


Рис. 1. Микросрез капронового волокна:

1 – капроновое волокно; 2 – полимеризационная смесь; 3 – складки на срезе капрона; 4 – граница раздела «капрон-полимеризационный состав»

Чрезвычайный интерес представляет наличие переходного слоя между капроновым волокном и полимерным покрытием, наблюдаемого весьма отчетливо вследствие разницы интенсивности светового тона (рис. 2, 3). При увеличении в 20 000 раз этот слой становится видным вполне отчетливо. Размер пограничного слоя приблизительно равен 1/5 размера полимерного покрытия. Структура пограничного слоя отличается от поли-

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

мерного покрытия гораздо большей плотностью. Характер структуры переходного слоя напоминает фибриллоподобные структуры. В нем отсутствуют макропоры, что присуще покрытию, и лишь при увеличении более чем в 50 000 раз можно наблюдать тончайшие поры размером менее 100° А, вытянутые преимущественно параллельно поверхности покрытия. В то же время структура этого слоя отличается и от капрона, в котором при увеличении в 100 000 раз присутствие мельчайших пор менее 80 °А не отмечено.

Линия контакта пограничного слоя с полимерным покрытием видна более отчетливо, чем с волокном, где она представляет собой плавный переход от структуры мелкопористой к структуре равномерной абсолютно плотной.

На рис. 2 наглядно показано отслоение полимерного покрытия от волокна. Важно отметить, что в этом случае пограничный слой остается на волокне. Отсюда можно сделать вывод, что связь переходного слоя с волокном является более прочной, нежели с полимерным покрытием.

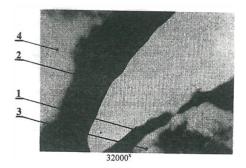


Рис. 2. Микросрез образца капроновой плащевой ткани: 1 – переходный слой; 2 – полимерное покрытие; 3 – капроновое волокно; 4 – полимеризационный состав

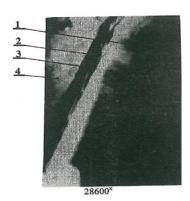


Рис. 3. Микросрез образца капроновой плащевой ткани:

- 1 капроновое волокно; 2 полимерное покрытие;
- 3 переходный слой; 4 полимеризационная смесь

Изучение химического состава переходного слоя весьма затруднительно вследствие очень незначительного количества его на поверхности ткани, явно недостаточного для проведения химического анализа, поэтому физико-химические свойства переходного слоя остаются в настоящее время невыясненными [4].

Можно предположить, что молекулярный состав переходного слоя включает в себя отдельные части обоих компонентов (капрона и каучука). Поскольку связь переходного

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

слоя с капроновым волокном прочнее, нежели с полимерным покрытием, то очевидно, что связь элементов молекул каучука с молекулами капрона прочнее, чем связь молекул каучука между собой.

На основании изложенного можно предположить, что молекулярный состав переходного слоя включает в себя отдельные элементы обоих компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия для материаловедения. М.: Техносфера. 2006. 256 с.
- 2. Фульц Б. Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов. М.: Техносфера. 2011. 904 с.
- 3. Коржевский Д.Э. Иммуноцитохимия и конфокальная микроскопия. СПб.: Спецлит, 2018. 103 с.
- 4. Глезер А.М. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. М.: Техносфера. 2009. 208 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕМЕЕНКОВ Сергей Дмитриевич — кандидат технических наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

КОПЫЛОВА Тамара Семеновна — кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. Е-mail: tamara.kopylova.41@mail.ru СЕМЕЕНКОВ Дмитрий Сергеевич — магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. Е-mail: mr.semeenkov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Семеенков С.Д., Копылова Т.С., Семеенков Д.С. Исследование образцов тканей с полимерными покрытиями с помощью электронного микроскопа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 94–98.

THE STUDY OF TISSUE SAMPLES WITH POLYMER COATING WITH AN ELECTRON MICROSCOPE

S.D. Semeenkov, T.S. Kopylova, D.S. Semeenkov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This work is devoted to the study of adhesion interactions of tissues with polymer coatings in the area of their contact. The studies were carried out using an electron microscope. Samples vulcanized in a fluidized bed of an inert coolant and production conditions vulcanized in autoclaves were analyzed. Samples vulcanized in a fluidized bed are characterized by higher adhesion, determined by the degree of solidity of the "fabric-coating" system. It is

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

concluded that the interaction of the transition layer with the fiber is more durable than with the polymer coating.

Keywords: electron microscope study of the fabric, the polymer coating, the transition layer, the molecular structure.

REFERENCES

- 1. Sindo, D., Oikava T. Analiticheskaya prosvechivayushchaya elektronnaya mikroskopiya dlya materialovedeniya [Analytical transmission electron microscopy for materials science]. M.: Tekhnosfera. 2006. 256 p.
- 2. Ful'c B. Prosvechivayushchaya elektronnaya mikroskopiya i difraktometriya materialov [Transmission electron microscopy and diffractometry of materials]. M.: Tekhnosfera. 2011. 904 p.
- 3. Korzhevskij D.E. Immunocitohimiya i konfokal'naya mikroskopiya [Immunocytochemistry and confocal microscopy]. SPb.: Speclit. 2018. 103 p.
- 4. Glezer A.M. Skaniruyushchaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyj mikroanaliz [Scanning electron microscopy and x-ray spectral microanalysis]. M.: Tekhnosfera. 2009. 208 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SEMEENKOV Sergey Dmitrievich – Professor of Technological Machines and Equipment Department, Tver State Technical University, 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

KOPYLOVA Tamara Semenovna – associate Professor of Technological Machines and Equipment Department, Tver State Technical University, 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tamara.kopylova.41@mail.ru

SEMEENKOV Dmitry Sergeevich – undergraduate, Tver State Technical University, 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Semeenkov S.D., Kopylova T.S., Semeenkov D.S. The study of tissue samples with polymer coating with an electron microscope// Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 94–98.

УДК 614.8.084

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТКАНЯХ, ОБРАБОТАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

С.Д. Семеенков, Т.С. Копылова, Д.С. Семеенков

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В работе приводятся результаты исследований образцов тканей с полимерными покрытиями, вулканизованными в производственных условиях и в псевдоожиженном слое инертного теплоносителя. Исследования проводились с помощью микроскопа МБИ-6. При наблюдении микросрезов покрытий можно отметить, что

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

плотность опытных образцов значительно выше, чем производственных. На основании наблюдений микросрезов покрытий опытных и производственных образцов было установлено, что производственные образцы отличаются повышенной пористостью и большой неоднородностью пор по форме и размерам, а покрытия опытных образцов имеют однородную губчатую структуру.

Ключевые слова: ткани, полимерные покрытия, исследование структур тканей, образцы опытные и производственные.

Данная статья посвящена исследованию структур полимерных покрытий, обработанных в обычных производственных условиях и в псевдоожиженном слое инертного теплоносителя, так как этот фактор сильно влияет на качество тканей с полимерными покрытиями [1].

Физико-химические свойства пленочных материалов находятся в непосредственной зависимости от внутренней структуры полимерной пленки [1].

Исследование структуры полимерного покрытия проводилось с помощью микроскопа МБИ-6 [2]. При наблюдении микросрезов покрытий можно отметить, что плотность опытных образцов значительно выше, чем производственных. Обращает на себя внимание различный характер и расположение пор. В производственных образцах форма пор преимущественно округлая (рис. 1a), реже раковистая (рис. 1a, δ – поры 2, 3).

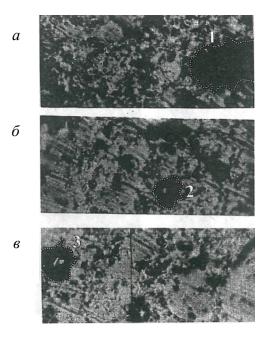


Рис. 1. Микросрезы полимерных покрытий производственных образцов капроновой плащевой ткани: a, δ – участок с наличием крупных раковистых пор (поры 2, 3); ϵ – участок с наличием крупной полости – результат неравномерного удаления летучих компонентов при вулканизации

Размеры пор отличаются большой неоднородностью. Чаще всего встречаются поры размерами от 2 до 3 мк. Направленности в расположении и форме пор не наблюдается. Иногда в производственных образцах полимерных покрытий встречаются крупные

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

раковинообразные полости и более узкие каналы, пронизывающие стенки последних (рис. 2a, ε).

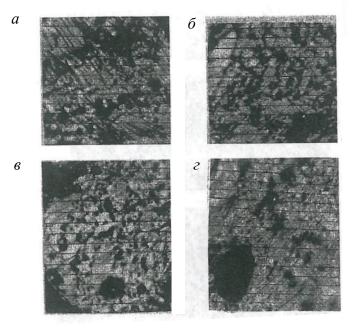


Рис. 2. Микроструктура полимерных покрытий производственных образцов капроновой плащевой ткани: a — участок покрытия с наличием пор вытянутой щелевидной формы; δ — участок покрытия с полным отсутствием ориентации пор; ϵ — участок покрытия с наличием пор преимущественно округлой формы; ϵ — участок покрытия с крупной полостью

Эти крупные полости обычно ориентированы вдоль линии контакта «ткань – полимерное покрытие». Происхождение их можно объяснить неравномерным выходом летучих компонентов при термообработке.

Визуальными наблюдениями поперечных срезов капрона с полимерным покрытием в отраженном свете было отмечено, что покрытия опытных и производственных образцов отличаются по своей структуре. Эта разница выражается прежде всего в различной пористости образцов, вулканизованных различными методами (см. рис. 2, 3). Полимерное покрытие имеет губчатую структуру. Поры представляют собой промежутки между глобулами или червеобразными частицами полимера. Иногда можно наблюдать (как на рис. 2, 3) некоторую сложность в структуре покрытия, характерную для опытных образцов. Таким структурам присуще наличие вытянутых канальных пор – щелей между отдельными слоями плотного полимерного материала.

Для производственных образцов характерно наличие обширных областей, представляющих собой сплошную непористую массу [3].

В опытных образцах структура полимерных покрытий весьма однородна, поры значительно меньше по размерам, имеют более вытянутую форму. Чаще всего это мелкие каналы, расположенные почти параллельно друг другу и направленные к свободной поверхности покрытия (рис. 3г). Иногда встречаются и круглые поры небольших размеров, из которых обычно берет начало целая сеть мелких вытянутых пор (рис. 3в). Поры

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

опытного образца расположены чаще, чем у производственного, неравномерность их расположения создает впечатление паутинообразной сетки.

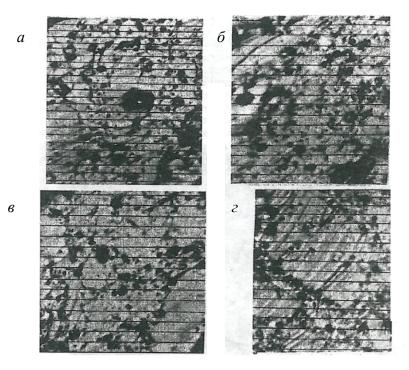


Рис. 3. Микроструктура полимерных покрытий опытных образцов капроновой плащевой ткани: a — участок покрытия с порами, расположенными в виде паутины; δ — участок покрытия с полным отсутствием ориентации пор; ϵ — участок покрытия с наличием пор преимущественно округлой формы; ϵ — участок покрытия с наличием пор вытянутой формы

Характерные отличия опытных образцов от производственных – большая однородность пор по крупности и незначительные структурные изменения покрытия на разных участках (см. рис. 3) [4].

На основании наблюдений микросрезов покрытий опытных и производственных образцов можно сделать следующие выводы:

- 1. Производственные образцы отличаются повышенной пористостью и большой неоднородностью пор по форме и размерам.
 - 2. Покрытия опытных образцов имеют однородную губчатую структуру.

Различия в структурах покрытия опытных и производственных образцов объясняются разными условиями их формирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Глезер А.М. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. М.: Техносфера. 2009. 208 с.
- 2. Рид С. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера. 2008. 232 с.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

- 3. Соколов М.В. Энергосберегающая технология и оборудование для производства длинномерных резинотехнических изделий заданного качества // *Химическая технология*. 2008. № 10. С. 496–499.
- 4. Тябин Н.В., Попов А.В. Процессы и аппараты резиновой промышленности. Л.: Химия. 1988. 248 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕМЕЕНКОВ Сергей Дмитриевич — кандидат технических наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

КОПЫЛОВА Тамара Семеновна — кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: tamara.kopylova.41@mail.ru

СЕМЕЕНКОВ Дмитрий Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Семеенков С.Д., Копылова Т.С., Семеенков Д.С. Сравнительные характеристики структур полимерных покрытий на тканях, обработанных различными методами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 3 (3). С. 98–103.

CREATION OF HEALTHY WORKING CONDITIONS FOR THE PRODUCTION OF SULFURIC ACID AND ENSURING THE FULL SAFETY OF SERVICE OF ENTERPRISES

S.D. Semeenkov, T.S. Kopylova, D.S. Semeenkov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This paper presents the results of studies of tissue samples with polymer coatings, vulcanized in production conditions and in the fluidized bed of an inert coolant. The studies were carried out using an MBI-6 microscope. When observing the coating micro-cuts, it can be noted that the density of the prototypes is much higher than the production ones. On the basis of observations of micro-cuts of coatings of experimental and production samples conclusions were made: production samples are characterized by high porosity and large heterogeneity of pores in shape and size; coverage pilot samples have a uniform sponge-like texture.

Keywords: cloth, polymer coatings, the study of structures of tissues, the samples experienced and the production.

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

REFERENCES

- 1. Glezer A.M. Skaniruyushchaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyj mikroanaliz [Scanning electron microscopy and x-ray spectral microanalysis]. M.: Tekhnosfera. 2009. 208 p.
- 2. Rid S. Elektronno-zondovyj mikroanaliz i rastrovaya elektronnaya mikroskopiya v geologii [Electron probe microanalysis and scanning electron microscopy in Geology.] M.: Tekhnosfera. 2008. 232 p.
- 3. Sokolov M.V. Energy-saving technology and equipment for the production of long rubber. *Himicheskaya tekhnologiya*. 2008. No.10. pp. 496–499. (In Russian).
- 4. Tyabin N.V., Popov A.V. Processy i apparaty rezinovoj promyshlennosti [Processes and apparatus of the rubber industry]. L.: Chemistry. 1988. 248 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SEMEENKOV Sergey Dmitrievich – Professor of Technological Machines and Equipment Department, Tver State Technical University, 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

KOPYLOVA Tamara Semenovna — Associate Professor of Technological Machines and Equipment Department, Tver State Technical University, 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tamara.kopylova.41@mail.ru

SEMEENKOV Dmitry Sergeevich – undergraduate, Tver State Technical University, 22, embankment A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mr.semeenkov@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Semeenkov S.D., Kopylova T.S., Semeenkov D.S. Creation of healthy working conditions for the production of sulfuric acid and ensuring the full safety of service of enterprises // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2019. No. 3 (3), pp. 98–103.

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал № 3 (3), 2019

Редактор М.Б. Юдина Корректор С.В. Борисов Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

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