

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

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

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

Научный рецензируемый журнал

№ 2 (6), 2020

Тверь 2020

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2020. № 2 (6). 96 с.

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

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74328 от 19 ноября 2018 года.

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

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

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический
университет»

Адрес редакции

170026, г. Тверь, наб. Афанасия
Никитина, д. 22

Тел. редакции +7 (4822) 78-89-00

E-mail: common@tstu.tver.ru

Цена свободная

Дата выхода в свет 07.08.2020

Формат 60x84 1/8

Тираж 500 экз.

ISSN 2658-7459

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доц.

Заместители главного редактора:

Белов В.В. – д.т.н., проф.;

Луцик В.И. – д.х.н., проф.;

Макаров А.Н. – д.т.н., проф.

Ответственный секретарь

Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доц.

Редакционная коллегия:

Качанов А.Н. – д.т.н., проф.;

Коротких Д.Н. – д.т.н., проф.;

Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., проф.;

Лепешкин А.Р. – д.т.н.;

Матар П.Ю. – к.т.н., проф.;

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

Release Date 07.08.2020

Format 60x84 1/8

Printing run 500 copies

ISSN 2658-7459

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., HDR, Prof.;

Nedoseko I.V. – d.t.s., Prof.;

Nikol'skij V.M. – d.c.s., Prof.;

Stroкова 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.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Белов В.В., Образцов И.В., Смирнов М.А. Проектирование зерновых составов минеральных вяжущих систем.....	7
Макарова Т.Ю. Расчет параметров водяных скважин с дифференцированной обсыпкой.....	16
Матар П.Ю., Асаад Ж.Ж., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В. Свойства и области применения бетона с утилизированными заполнителями.....	21
Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Завадько М.Ю. Теплоизоляционный гипсокостробоетон.....	29

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Виноградов Е.А., Степанов В.В., Егоров С.А., Крупнов А.В. Тренды цифровой трансформации электросетевого комплекса России.....	39
Егоров С.А., Степанов В.В., Виноградов Е.А., Крупнов А.В. Анализ характеристик теплового двигателя при изменении условий окружающей среды.....	45
Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины.....	49
Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области пространства.....	57

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Качановский Ф.В.</i> О кислотности осадков, выпадающих в Твери.....	66
<i>Семеенков С.Д., Копылова Т.С., Семеенков Д.С.</i> Микроскопический метод исследования физико-химической связи конструкционных материалов.....	76
<i>Семеенков С.Д., Копылова Т.С., Семеенков Д.С.</i> Исследования природы адгезионных свойств тканей с полимерными покрытиями на границе раздела фаз.....	80
<i>Твардовский А.В., Зайцев Д.С.</i> Анализ термодинамического поведения углеродного адсорбента ФАС-3 при адсорбции бензола.....	84

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Belov V.V., Obrazcov I.V., Smirnov M.A. Grain composition design of mineral binder systems.....	7
Makarova T.Yu. Calculation of parameters of water wells with differentiated backfill.....	16
Matar P.Y., Assaad J.J., Barkaya T.R., Gavrilenko A.V. Recycled aggregate concrete properties and applications.....	21
Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Zavadko M.Yu. Heat-insulating gypsum hempcrete.....	29

ELECTRICAL ENGINEERING

Vinogradov E.A., Stepanov V.V., Egorov S.A., Krupnov A.V. Trends of digital transformation of the Russian electric grid complex.....	39
Egorov S.A., Stepanov V.V., Vinogradov E.A., Krupnov A.V. Analysis of characteristics of a heat engine at changing of the environmental conditions.....	45
Popov I.P. Amplitude-frequency features of the load modes of the synchronous electric machin.....	49
Shum Al.An., Vetoshkin A.M., Shum An.Al. About the centers of symmetry of the function, defined in a convex area of space	57

CHEMICAL TECHNOLOGY

Kachanovsky F.V. About the precipitations acidity in Tver.....	66
Semeenkov S.D., Kopylova T.S., Semeenkov D.S. Microscopic method for studying the physical and chemical bond of structural materials.....	76
Semeenkov S.D., Kopylova T.S., Semeenkov D.S. Investigation of the nature of adhesive properties of fabrics with polymer coatings at the phase interface.....	80
Tvardovskiy A.V., Zaytsev D.S. Analysis of the thermodynamic behavior of the FAS-3 carbon adsorbent during benzene adsorption.....	84

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.539.216

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗЕРНОВЫХ СОСТАВОВ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ

В.В. Белов, И.В. Образцов, М.А. Смирнов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Изложены предпосылки оптимального проектирования составов строительных смесей для получения бетонов на цементной связке, базирующиеся на закономерностях формирования полидисперсных структур, включая микро- и наноуровень. Приведен выбор методов моделирования упаковок зернистых сыпучих систем и расчета оптимальной гранулометрии сырьевых смесей с наиболее плотной упаковкой зерен, обеспечивающих оптимальные параметры уплотнения смесей.

Ключевые слова: дисперсные минеральные вяжущие системы, компьютерное моделирование упаковок, методы расчета.

Важным этапом проектирования строительных смесей оптимального состава на основе минеральных вяжущих, прежде всего цемента, является определение состава многокомпонентного вяжущего, т.е. количества минеральных добавок, в том числе из условия формирования плотноупакованной структуры таких систем с учетом гранулометрии дисперсных добавок и самого цемента [1].

В работе [2] предполагается, что плотная упаковка на микроуровне может обеспечить контакты и синтез зерен, которые еще будут разрушаться, диспергировать, создавать новые частицы. В работе [3] изучалось влияние формы и размеров цементных частиц на свойства цемента и получаемого цементного камня. В настоящее время признан неоспоримым тот факт, что удельная поверхность дисперсной системы является недостаточно информативным показателем, так как система из частиц с различной гранулометрией может обладать одинаковой удельной поверхностью, что требует в производстве лазерного анализа гранулометрического состава цемента в режиме реального времени, который позволяет снизить степень переизмельчения цемента, обеспечивает быстрый переход производства с одной марки цемента на другую [4].

При изучении закономерностей упаковки систем с размером частиц от нескольких десятков миллиметров (крупный заполнитель) до нескольких микрометров (цемент, микрозаполнитель) и разработке соответствующих экспериментальных методик нами установлено [5], что необходимо учитывать наличие некоторого минимального (критического) размера зерна, ниже которого происходит изменение баланса действия поверхностных и гравитационных сил. При размере минеральных частиц меньше критического (0,14 мм) следует ожидать принципиальной невозможности определения

обычными способами (по определению максимальной насыпной плотности в сухом состоянии) вследствие образования арочных и мостиковых структур [5].

Разработка специальных экспериментальных и расчетных методик определения показателя плотной упаковки частиц тонкодисперсных систем чрезвычайно актуальна как с практической, так и с научной точек зрения, так как позволяет определять и обосновывать оптимальные составы вяжущих систем из условия их минимальной пустотности как из набора реальных компонентов известной гранулометрии, так и из набора определенных фракций. Последняя возможность открывается с учетом информации о новых, например вибрационных [6], способах фракционирования мелкодисперсных порошков. В работе [6] описываются эффективные системы грохочения, позволяющие производить рассев мелкодисперсных фракций (микрошариков) на сетках с ускорением от 500g до 1000g без эффекта застревания частиц.

Расчет смеси тонкодисперсных компонентов в составе вяжущей части строительного конгломерата из условия наиболее плотной упаковки в данной работе производили с помощью программного продукта «Подбор оптимальной гранулометрии заполнителя» версии 2.0 [7]. Достоинствами данного метода расчета являются быстрота выполнения вычислительных операций и проверки условия оптимальности, а также возможность нахождения наилучшего решения из комбинации возможных путем автоматического уменьшения погрешности.

Для расчета смеси тонкодисперсных материалов применяли цемент ПЦ500-Д0, молотый известняк и молотый кварцевый песок. Данные о гранулометрическом составе этих компонентов получены с помощью лазерного анализатора. По этим данным рассчитаны полные проходы фракций тонкодисперсных компонентов через условные сита, размеры которых соответствуют размерам фракций, определяемых лазерным анализатором (табл. 1).

Таблица 1

Наименование материала	Полные проходы, %, через сита, мм														
	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001	0,0005	0,0003
Портланд-цемент ПЦ500-Д0	100	99,5	97,9	94,56	88	76,76	61,05	42,62	29,06	25,05	20,31	14,49	6,62	2,56	0,00
Молотый известняк	100	99,71	98,91	97,38	94,42	88,97	79,45	62,21	44,2	38,35	30,94	21,24	8,59	2,76	0,00
Молотый песок	100	100	99,86	98,76	95,69	88,79	75,85	55,70	38,88	33,71	27,11	18,12	6,28	1,79	0,00

На рис. 1 в качестве примера приведены данные по расчету состава бинарной системы – цемент – молотый известняк. Расчет производился на основе известной модели Функа/Дингера с учетом коэффициента формы частиц. Эта модель имеет вид

$$\frac{G_{\text{пр}}}{100} = \alpha + (1 - \alpha) \frac{X^{0,5} - D_{\text{min}}^{0,5}}{D_{\text{max}}^{0,5} - D_{\text{min}}^{0,5}},$$

где $G_{\text{пр}}$ – проход частиц, %, через сито размером X , мм; D_{max} – наибольшая крупность зерна в смеси, мм; D_{min} – наименьшая крупность зерна в смеси, мм; n – коэффициент

распределения, равный, по Фуллеру, 0,5; по Андреасену (для пространственного распределения) – 0,37; α – коэффициент, учитывающий форму зерен,

$$\alpha = 1 - K_{\phi}.$$

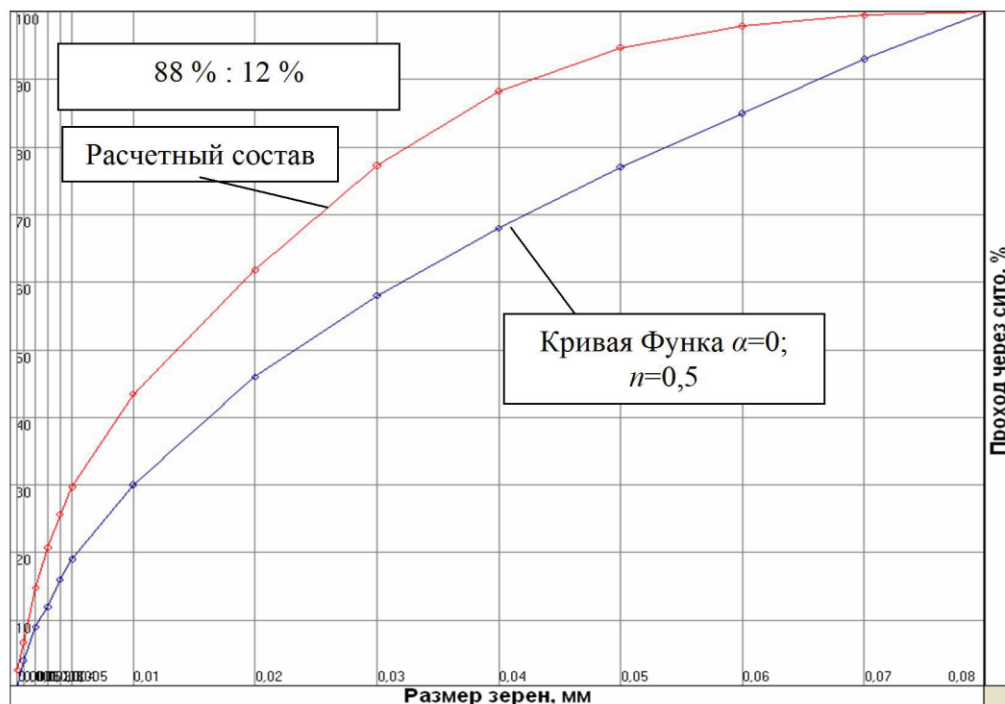


Рис. 1. Расчетный состав бинарной системы цемент – молотый известняк.
Величина погрешности составляет 17 %

Коэффициент формы зерна определяется как отношение площади поверхности шара $\Phi_{\text{шар}}$ к площади поверхности зерна Φ_z равного объема [8]:

$$K_{\phi} = \frac{\Phi_{\text{шар}}}{\Phi_z}.$$

Коэффициент формы шара равен единице. При этом чем сильнее форма зерен отличается от идеальной сферической формы, тем большую долю в зерновом составе должна занимать меньшая фракция [9].

По данным [9] и многих исследователей, коэффициент α для реальных частиц сыпучих систем может изменяться в пределах от 0,08 до 0,14.

Для бинарной системы цемент – молотый песок оптимальный состав оказался равным: 84,4 % : 15,6 %. Величина погрешности также составила 17 %.

Для экспериментальной проверки плотных упаковок частиц в тонкодисперсных системах необходимо использовать специальную методику, так как измерение насыпной плотности в сухом состоянии для таких систем не даст положительных результатов (в отличие от грубодисперсных материалов) вследствие агрегации частиц под действием сил

межчастичного взаимодействия. Методика оценки плотности упаковки частиц в тонкодисперсных системах может быть предложена исходя из следующих соображений.

Важнейшей технологической характеристикой дисперсной системы является водопотребность, т.е. расход воды физически связываемой минеральной дисперсной системой (необходимой для смачивания поверхности и заполнения открытых пор). Водопотребность разных минеральных дисперсных систем определяется по-разному. Так, под водопотребностью вяжущего вещества понимают то количество воды, которое необходимо ввести в него для получения теста с так называемой нормальной густотой. Водопотребность цемента при получении теста нормальной густоты равна количеству воды, рассчитанному в процентах по массе цемента. Водопотребность портландцементов обычно 24–28 %. Иногда это больше необходимого для прохождения реакции клинкерных минералов, в результате вводимая в тесто избыточная вода повышает пористость цементного камня, что отрицательно сказывается на его прочности.

Для улучшения свойств и придания специальных качеств цементов в них вводят тонкомолотые природные или искусственные материалы – активные или инертные минеральные добавки. Водопотребность портландцементов с минеральными добавками выше, чем водопотребность портландцемента. Это объясняется тем, что частички этих добавок отличаются очень развитой удельной поверхностью, требующей для ее смачивания значительного объема воды.

В то же время при проектировании составов минеральных дисперсных смесей с примерно одинаковой удельной поверхностью их минимальная водопотребность по объему, т.е. то минимальное количество воды, которое необходимо для перехода системы из состояния сыпучего вещества в суспензию, по отношению к объему тонкодисперсной системы в целом является достаточно объективной характеристикой ее минимальной пористости или наиболее плотной упаковки частиц. Для определения минимальной водопотребности по объему тонкодисперсной системы в данной работе применялась следующая методика.

Необходимое количество сухих составляющих минеральной дисперсной системы перемешивают до получения однородной системы, затем добавляют воду и перемешивают в течение 3 мин до образования однородной суспензии. В центре автоматического встряхивающего столика устанавливают форму-конус с центрирующим устройством. Внутреннюю поверхность конуса и диск столика перед испытанием протирают влажной тканью. Форму-конус заполняют приготовленной суспензией на половину высоты и уплотняют 15 раз штыкованием металлической штыковкой. Затем наполняют конус суспензией с некоторым избытком и штыкуют 10 раз. Во время укладки и уплотнения суспензии конус прижимают рукой к диску столика. После уплотнения верхнего слоя суспензии снимают насадку конуса и излишек ее срезают ножом вровень с краями конуса. Затем конус снимают в вертикальном направлении. После этого суспензию встряхивают на автоматическом столике КП-111Ф 30 раз за (30 ± 5) с, измеряют расплыв конуса по нижнему основанию штангенциркулем в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берут среднеарифметическое значение. Лепешку теста (суспензии) аккуратно переносят на весы и взвешивают. Точное содержание воды в системе определяют с помощью анализатора влажности «Элвиз-2» (влагомера) с погрешностью не более 0,2 %. По этим данным и средневзвешенной истинной плотности минеральной тонкодисперсной системы рассчитывают ее объем и отношение $V_{\text{вода}} / V_{\text{мдс}}$.

Далее увеличивают количество воды и опыт повторяют. Для цементных систем при каждом отношении объема воды к объему минеральной тонкодисперсной системы выполняют новый замес.

Полученные значения наносят на график зависимости показателя относительной осадки конуса Γ_p от отношения объема воды к объему минеральной тонкодисперсной системы ($V_{\text{вода}} / V_{\text{мдс}}$), по которому определяют минимальную водопотребность по объему тонкодисперсной системы β_p и степень восприимчивости системы к добавлению воды E_p . Показатель относительной осадки конуса определяется по формуле

$$\Gamma_p = \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - 1,$$

где r_0 – начальный диаметр конуса из смеси или суспензии (внутренний диаметр формы) по нижнему основанию (100 мм); r – расплыв конуса (лепешки), определяемый как среднеарифметическое значение диаметра конуса (лепешки) по нижнему основанию в двух взаимно перпендикулярных направлениях после встряхиваний на автоматическом столике, мм.

С помощью описанной выше методики выполнили экспериментальную проверку оптимальных смесей тонкодисперсных компонентов, результаты расчета которых приведены выше, а именно бинарных систем: портландцемент – молотый песок в соотношении 84,4 % : 15,6 % по массе и портландцемент – молотый известняк в соотношении 88 % : 12 % по массе, в сравнении с показателями плотности упаковки тонкодисперсных компонентов в отдельности. Помимо основной серии экспериментов, были выполнены дополнительные опыты с введением во все составы добавки гиперпластификатора Melflux (ГП) в количестве 0,5 % от массы сухой смеси (или отдельного компонента). Использование добавки гиперпластификатора имело целью проверить плотности упаковок частиц смесей в условиях диспергирующего эффекта добавки, облегчающего дезагрегацию частиц и их плотную укладку.

Результаты определения минимальной водопотребности исследованных систем β_p и степени восприимчивости системы к добавлению воды E_p приведены в табл. 2.

Смеси портландцемента с добавками молотого песка и молотого известняка в оптимальном соотношении имеют существенно меньшую минимальную водопотребность β_p , т.е. более плотную укладку частиц, по сравнению с тонкодисперсными компонентами в отдельности (за исключением молотого песка). Причем эти смеси отличаются меньшими значениями степени восприимчивости системы к добавлению воды E_p (по сравнению с цементом) аналогично действию пластификатора. Добавка гиперпластификатора значительно снижает минимальную водопотребность β_p как тонкодисперсных компонентов в отдельности (особенно портландцемента и в меньшей степени молотого песка и молотого известняка), так и их смесей, что подтверждает гипотезу о диспергирующем эффекте добавки, облегчающем дезагрегацию частиц и их плотную укладку; при этом существенно уменьшается и степень восприимчивости системы к добавлению воды E_p .

Таблица 2

Дисперсная система	β_p	E_p
Портландцемент	0,363	0,043
Портландцемент с добавкой ГП	0,229	0,005
Молотый песок	0,272	0,007
Молотый песок с добавкой ГП	0,243	0,007
Молотый известняк	0,347	0,017
Молотый известняк с добавкой ГП	0,275	0,009
Смесь портландцемента (84,4 %) с молотым песком (15,6 %)	0,329	0,038
Смесь портландцемента (84,4 %) с молотым песком (15,6 %) и добавкой ГП	0,223	0,005
Смесь портландцемента (88 %) с молотым известняком (12 %)	0,314	0,034
Смесь портландцемента (88 %) с молотым известняком (12 %) и добавкой ГП	0,249	0,004

Для определения предела прочности при сжатии вяжущего вещества, состоящего из тонкодисперсных смесей и чистого портландцемента, изготавливали образцы-кубы с размерами ребра 30 мм из теста одинаковой консистенции (по расплыву конуса) различного состава (цемент, смесь цемента и молотого известняка, смесь цемента и молотого песка). Образцы в формах хранили первые сутки в ванне с гидравлическим затвором. Затем образцы осторожно расформовывали и укладывали в шкаф, обеспечивающий относительную влажность воздуха не менее 90 %. Таким образом образцы хранили последующие 6 суток. Температура воды при хранении, а также при ее замене была (20 ± 2) °С. По истечении срока хранения образцы вынимали из шкафа и не позднее чем через 30 мин подвергали испытанию.

Зависимости предела прочности на сжатие образцов, изготовленных из теста на основе цемента, а также смесей цемента с молотым песком и молотым известняком от количества добавки наполнителя по массе в составе вяжущего вещества при близких значениях пластичности смеси приведены на рис. 2.

При оптимальном составе тонкодисперсных смесей вяжущего вещества, рассчитанном по разработанной методике с помощью предложенных компьютерных программ, а именно для смеси портландцемента (84,4 %) с молотым песком (15,6 %) и смеси портландцемента (88 %) с молотым известняком (12 %), достигаются наибольшие значения предела прочности на сжатие, несмотря даже на несколько большие значения водотвердого отношения. При этом прирост прочности для оптимальной добавки молотого песка составляет 30 %, а для оптимальной добавки молотого известняка – 54,4 %. Этот факт можно объяснить оптимальной гранулометрией тонкодисперсных смесей, что обуславливает более плотную укладку частиц вяжущего вещества и его повышенную прочность даже при меньшем содержании цемента.

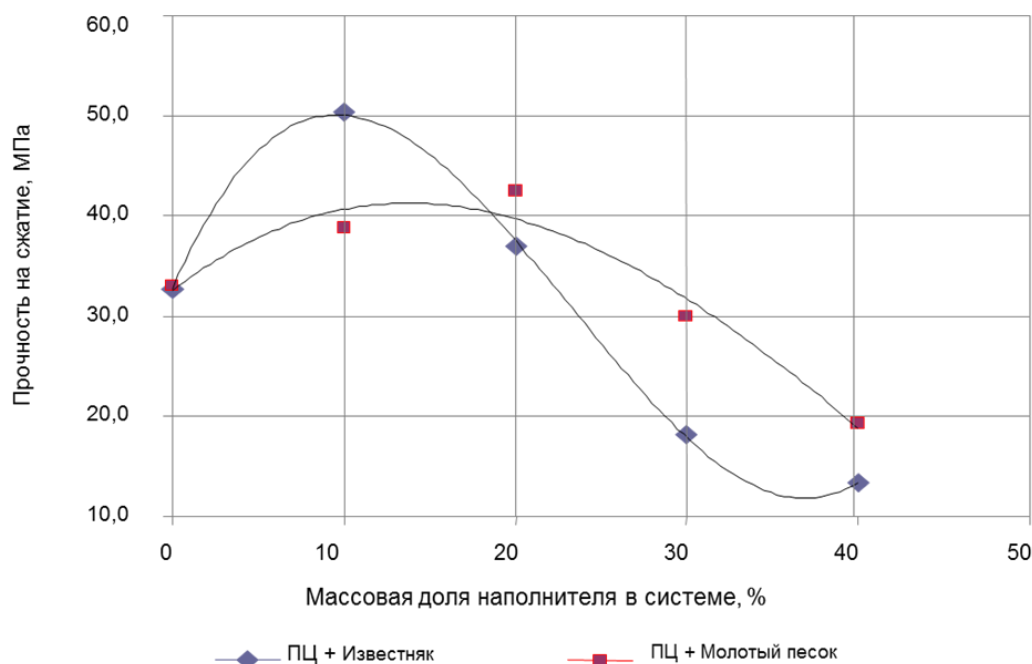


Рис. 2. Зависимости предела прочности на сжатие образцов, изготовленных из теста на основе цемента, а также смесей цемента с добавкой молотого песка и молотого известняка от количества добавки по массе в составе вяжущего вещества

Практическое применение знаний о плотности упаковок дисперсных систем отражается в методах расчета и подбора составов строительных сырьевых смесей. Правильное представление о дисперсной структуре заполнителей растворных и бетонных смесей дает возможность регулировать расход более дефицитных материалов, а также позволяет достигать высоких технико-экономических показателей изготавливаемых строительных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивков С.П. Современные тенденции в производстве цемента в РФ // *Российский ежегодник ССС*. 2011. С. 76–80.
2. Кучеренко А.А. Порошковая технология бетона // *Технологии бетонов*. 2009. № 1. С. 58.
3. Паниграхи П.К., Меде М., Саху Р.М., Панди С.П. Морфология цементных частиц после помола в различных агрегатах и ее влияние на свойства цемента // *Цемент и его применение*. 2010. № 1. С. 112–114.
4. Крутиков Д.М. Анализ гранулометрического состава цемента в реальном времени // *Цемент и его применение*. 2009. № 4. С. 53–56.
5. Белов В.В., Смирнов М.А. Формирование макроструктуры строительной смеси // *Строительные материалы*. 2009. № 9. С. 88–90.
6. Радзиван А.А., Деханов В.П., Омельчук О.В. Вибрационное оборудование для фракционирования мелкодисперсных порошков // *Строительные материалы*. 2005. № 12. С. 74–75.

7. Патент РФ 2010617267. *Подбор оптимальной гранулометрии заполнителя строительного композита* / Белов В.В., Образцов И.В.; Заявл. 29.10.10.
8. Удодов С.А., Черных В.Ф. Применение пористого заполнителя в отделочных составах для ячеистого строительного композита // *Сухие строительные смеси*. 2008. № 2. С. 68–70.
9. Стелов К.К., Кашев И.Д. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1996. 608 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, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

ОБРАЗЦОВ Илья Вячеславович – кандидат технических наук, научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: sunspire@list.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, д. 22. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Образцов И.В., Смирнов М.А. Проектирование зерновых составов минеральных вяжущих систем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 7–15.

GRAIN COMPOSITION DESIGN OF MINERAL BINDER SYSTEMS

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

Abstract. The article deals with preconditions of optimal designing of building blends compositions in order to obtain concrete on the cement binding, based on polydisperse structures formation regularity including micro- and nanolevel. The choice of methods of modeling of granular loose systems packing and calculation of optimal grading of raw blends with the densest grains packing, providing optimal parameters for blends compaction is given.

Keywords: disperse mineral binding systems, computer modelling of packings, calculation methods.

REFERENCES

1. Sivkov S.P. Current trends in cement production in Russia. *Rossijskij ezhegodnik SSS*. 2011, pp. 76–80. (In Russian).
2. Kucherenko A.A. Powder technology of concrete. *Tekhnologii betonov*. 2009. No. 1, pp. 58–60. (In Russian).
3. Panigrahi P.K., Mede M., Sahu R.M., Pandi S.P. Morphology of cement particles after grinding in different aggregates and its effect on cement properties. *Cement i ego primenienie*. 2010. No. 1, pp. 112–114. (In Russian).
4. Krutikov D.M. Real-time analysis of particle size distribution of cement. *Cement i ego primenienie*. 2009. No. 4, pp. 53–56. (In Russian).
5. Belov V.V., Smyrnov M.A. The formation of the macrostructure of the building mixture. *Stroitel'nye materialy*. 2009. No. 9, pp. 88–90. (In Russian).
6. Radzivan A.A., Dekhanov V.P., Omelchuk O.V. Vibration equipment for fine powder fractionation. *Stroitel'nye materialy*. 2005. No. 12, pp. 74–75. (In Russian).
7. Patent RF 2010617267. *Podbor optimal'noj granulometrii zapolnitelya stroitel'nogo kompozita* [Selection of optimal granulometry of building composite filler]. Belov V.V., Obrazcov I.V. Published 29.10.10. (In Russian).
8. Udodov S.A., Chernyh V.F. Use of porous aggregate in finishing compositions for cellular construction composite. *Suhie stroitel'nye smesi*. 2008. No. 2, pp. 68–70. (In Russian).
9. Strelov K.K., Kashcheev I.D. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii ognepornyh materialov* [Theoretical basis of refractory materials technology]. M.: Metallurgiya, 1996. 608 p.

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 of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

OBRAZTSOV Ilya Vyacheslavovich – Candidate of Technical Sciences, Researcher, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sunspire@list.ru

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 of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Obrazcov I.V., Smirnov M.A. Grain composition design of mineral binder systems // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 7–15.

УДК 622.245.59;624.131.67

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНЫХ СКВАЖИН С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ОБСЫПКОЙ

Т.Ю. Макарова*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

Аннотация. В статье на основе предыдущих исследований приводятся результаты расчетов кривых откачек из водяных скважин с дифференцированной обсыпкой вокруг фильтра для водоносных грунтов различной структуры. Показано, что распределение размера фракций дифференцированной обсыпки по длине фильтра имеет общую закономерность – размер фракций обсыпки возрастает сверху вниз и зависит от структуры и проницаемости водоносного пласта.

Ключевые слова: водяная скважина, фильтр, дифференцированная обсыпка, размер фракций, водоносный пласт (грунт), проницаемость пласта.

Существующие способы строительного водопонижения и водоснабжения основаны на применении фильтра в качестве водозаборного устройства. Исследования в этом направлении на кафедре «Конструкции и сооружения» основывались на том, что при сооружении водяных скважин рекомендуется устройство вокруг фильтра гравийной обсыпки. Предлагаемый способ основан на применении фильтра с неоднородной по его длине (дифференцированной) обсыпкой, пропускная способность которой, оцениваемая коэффициентом фильтрации, возрастает сверху вниз вдоль фильтра по заданному закону [1].

Изменение дебита в скважине наглядней вначале продемонстрировать расчетом кривых откачек при устройстве дифференцированной обсыпки применительно к параметрам действующей скважины, не имеющей обсыпки. Скважины отбирались таким образом, чтобы их эксплуатационные характеристики соответствовали водоносным пластам различной проницаемости. Расчеты были выполнены по данным паспортов действующих скважин в следующей последовательности:

1. Определяли среднюю величину коэффициента фильтрации водовмещаемых пород K_ϕ (м/ч) по формуле для напорных пластов [2] при известных значениях расхода Q , мощности водоносного пласта T и понижения в скважине S .

2. При известных значениях K_ϕ , Q , r_0 , T рассчитывали величину понижения (перепад) в обсыпке S^1 :

$$S^1 = \frac{Q \cdot lq \cdot \frac{R^1}{r_0}}{2,73 \cdot K_\phi \cdot T},$$

где $R^1 = r_0 + d_0$; r_0 – радиус скважины ($r_0 = D_0 / 2$); d_0 – толщина обсыпки.

3. Напор на границе грунта водоносного пласта и обсыпки H_0^1 определяли так:

$$H_0^1 = h_0 + S^1; h_0 = H_0^{CT} - S,$$

где h_0 – высота столба воды в самой скважине, м; H_0^{CT} – статический уровень грунтовых вод, м.

4. Производили расчет параметров для построения графических зависимостей $\eta = f(D_{k_0} / D_\Pi)$ (рисунок) и $q = f(D_{k_0} / D_\Pi)$:

1) вычисляли скорость входа воды в фильтр по формуле $v = \frac{Q}{\pi D_0 T}$;

2) задаваясь различными значениями отношения D_{k_0} / D_{II} , определяли понижение в обсыпке S^1 по формуле

$$\frac{1}{\beta_y^2} = \frac{\pi^2 D_0^2 (H_0^1 - h_0)}{d_0 q^2} - a(T^2 - y^2) - \frac{2}{3}b(T^3 - y^3),$$

где D_{II} – средний размер фракций водоносного пласта (грунта); D_{k_0} – размер фракций нижнего слоя обсыпки ($y = 0$); $q = \frac{Q}{T}$ – удельный дебит скважины; β_y – скоростной параметр, $\beta_y = C_\phi m \sqrt{D_k}$, где C_ϕ – обобщенный коэффициент Шези; m – пористость грунта; h – напор воды в скважине; $a = \frac{16\alpha}{qd_0 D_0^2}$; $b = \frac{\pi^2 D_0^2 A}{2d_0}$; A – коэффициент, зависящий от рода стенки скважины.

При $y = T$

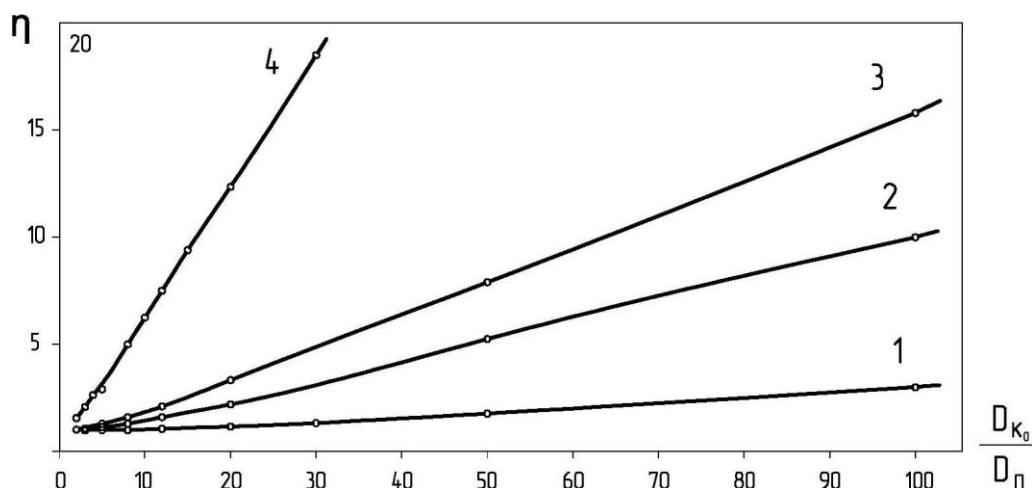
$$\frac{1}{\beta_T^2} = \frac{\pi^2 D_0^2 (H_0^1 - h_0)}{d_0 q^2},$$

где $S^1 = H_0^1 - h_0$;

3) вводили обозначение $\eta = \frac{D_{k_0}}{D_{k_T}}$, где D_{k_T} – размер фракций верхнего слоя обсыпки

($y = T$), результаты расчетов представлены в табл. 1, 2, 3 и 4.

5. Производили расчет параметров для построения графической зависимости $D_y = f(y)$ при $D_{k_0} / D_{II} = 20$.



Графические зависимости $\eta = f(D_{k_0} / D_{II})$ для скважин:

1 – $D_{II} = 0,004$ см ($K_\phi = 1,8$ м/сут); 2 – $D_{II} = 0,01$ см ($K_\phi = 15$ м/сут);
3 – $D_{II} = 0,015$ см ($K_\phi = 30$ м/сут); 4 – $D_{II} = 0,05$ см ($K_\phi = 175$ м/сут)

Таблица 1

Расчет параметров для построения графической зависимости $\eta = f(D_{\kappa_0} / D_{\Pi})$ для скважины с $D_{\Pi} = 0,004$ см

D_{κ_0} / D_{Π}	2	3	5	8	12	20	30	50	100
S^1	2,1	0,93	0,34	0,14	0,06	0,03	0,016	0,01	0,0075
$S = H_0^{CT} - H_0^1 + S^1$	13,85	12,18	11,59	11,39	11,31	11,28	11,27	11,26	11,255
η	1	1	1	1	1,065	1,16	1,33	1,77	3,0
$q = Q / S$	0,6	0,655	0,69	0,702	0,706	0,71	0,71	0,71	0,71

Таблица 2

Расчет параметров для построения графической зависимости $\eta = f(D_{\kappa_0} / D_{\Pi})$ для скважины с $D_{\Pi} = 0,01$ см

D_{κ_0} / D_{Π}	2	3	5	8	12	20	30	50	100
S^1	0,465	0,229	0,075	0,049	0,032	0,024	–	0,02	0,0194
$S = H_0^{CT} - H_0^1 + S^1$	3,015	2,77	2,63	2,6	2,58	2,574	–	2,57	2,569
η	1,02	1,07	1,14	1,3	1,6	2,2	–	5,25	10
$q = Q / S$	4,65	5,05	5,32	5,4	5,45	5,45	–	5,45	5,45

Таблица 3

Расчет параметров для построения графической зависимости $\eta = f(D_{\kappa_0} / D_{\Pi})$ для скважины с $D_{\Pi} = 0,015$ см

D_{κ_0} / D_{Π}	2	3	5	8	12	20	30	50	100
S^1	0,26	–	0,06	0,0385	0,03	0,026	–	0,024	0,0238
$S = H_0^{CT} - H_0^1 + S^1$	1,61	–	1,41	1,39	1,38	1,376	–	1,374	1,374
η	1,035	–	1,3	1,6	2,1	3,33	–	7,9	15,8
$q = Q / S$	9,4	–	10,65	10,80	10,90	10,95	–	10,95	10,95

Таблица 4

Расчет параметров для построения графической зависимости $\eta = f(D_{\kappa_0} / D_{\Pi})$ для скважины с $D_{\Pi} = 0,05$ см

D_{κ_0} / D_{Π}	2	3	5	8	10	12	15	20	30	50
S^1	0,07	0,054	0,048	0,044	0,0435	0,049	0,043	0,0425	0,0423	0,042
$S = H_0^{CT} - H_0^1 + S^1$	0,37	0,354	0,348	0,344	0,3435	0,343	0,3428	0,3425	0,3423	0,342
η	1,56	2,08	2,9	5,0	6,25	7,5	9,4	12,35	18,5	30,8
$q = Q / S$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Исследования графических зависимостей $q = f(D_{k_0} / D_{\Pi})$ выполнены в работе [4]. Результаты исследований графических зависимостей $D_y = f(y)$ при $D_{k_0} / D_{\Pi} = 20$ изложены в работе [3].

Из анализа представленных на рисунке графиков следует, что распределение размера фракций дифференцированной обсыпки по длине фильтра водяной скважины имеет общую закономерность – размер фракций обсыпки возрастает сверху вниз и зависит от структуры и проницаемости водоносного пласта (грунта). Различие в составе обсыпки возрастает с увеличением проницаемости водоносного пласта. Для тонкодисперсной среды соотношение диаметров фракций в крайних сечениях (нижнего и верхнего) обсыпки составляет примерно 1,5. Для крупнозернистой среды (с большой проницаемостью пласта) распределение размера фракций обсыпки меняет свой характер и соотношение диаметров фракций в крайних сечениях составляет уже 10.

Результаты расчетов и анализ приведенных зависимостей подтверждают выводы исследований в работах [3, 4] о том, что в любом случае при наличии дифференцированной обсыпки, имеющей закономерный характер распределения размера фракций вдоль фильтра, дебит водяной скважины возрастает и улучшаются ее эксплуатационные характеристики. В то же время влияние увеличения диаметра скважины за счет устройства обсыпки оказывается очень незначительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макарова Т.Ю. К вопросу применения дифференцированной обсыпки вокруг фильтра водяных скважин // *Вестник ТГТУ*. 2007. № 12. С. 11–15.
2. Емельянов А.В., Клейман Д.Б., Станченко И.К., Чельцов М.И. Водопонижение в строительстве. М.: Стройиздат, 1971. 186 с.
3. Макарова Т.Ю. Распределение размера фракций дифференцированной обсыпки по длине фильтра водяной скважины // *Строительство и архитектура: сборник научных трудов ИСФ ТГТУ*. 2001. Вып. 3. С. 155–160.
4. Кудристенко Т.Ю. К расчету состава обсыпки переменной проницаемости вокруг фильтра скважины // *Гидравлика сооружений и русловые процессы: межвузовский тематический сборник Калининского политехнического института*. Калинин: КПИ, 1982. С. 127–130.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВА Татьяна Юрьевна – доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: Makarovaty73@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макарова Т.Ю. Расчет параметров водяных скважин с дифференцированной обсыпкой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 16–20.

CALCULATION OF PARAMETERS OF WATER WELLS WITH DIFFERENTIATED BACKFILL

T.Yu. Makarova

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In this article on the basis of the previous researches presents the results of calculations curves of pumping out from water wells with differentiated backfill around a filter for aquifers of various structures. It is shown that the distribution of the size of fractions of differentiated backfill along the filter length has a common pattern - the size of fractions of backfill increases from top to bottom and depends on the structure and permeability of the aquifer.

Keywords: water well, filter, differentiated backfill, size of fractions, aquifer (soil), permeability of the aquifer.

REFERENCES

1. Makarova T.Yu. To the application of differentiated sprinkling around the water well filter. *Vestnik TGTU*. 2007. No. 12, pp. 11–15. (In Russian).
2. Emel'yanov A.V., Klejman D.B., Stanchenko I.K., Chel'cov M.I. *Vodoponizhenie v stroitel'stve* [Water decrease in construction]. M.: Strojizdat, 1971. 186 p.
3. Makarova T.Yu. Distribution of differentiated sprinkling fraction size along water well filter length. *Construction and architecture: Collection of scientific works of ISF TGTU*. 2001. Iss. 3. pp. 155–160. (In Russian).
4. Kudristenko T.Yu. To the calculation of the composition of dusting of variable permeability around the well filter. *Hydraulics of structures and channel processes: interuniversity thematic collection of Kalinin Polytechnic Institute*. Kalinin: KPI, 1982, pp. 127–130. (In Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHOR

MAKAROVA Tatyana Yurevna – Ass. Prof. of the Department of Structures and construction, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Makarovatyu73@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarova T.Yu. Calculation of parameters of water wells with differentiated backfill // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 16–20.

УДК 69.003.13

СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕТОНА С УТИЛИЗИРОВАННЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

П.Ю. Матар¹, Ж.Ж. Асаад², Т.Р. Баркая³, А.В. Гавриленко³

¹ «Ливанский университет» (г. Бейрут, Ливан)

² «Баламандский университет», (г. Аль Кура Ливан)

³ Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Статья представляет собой обзор исследовательской деятельности, проведенной авторами для изучения возможности использования заполнителей из рециклированного бетонного лома при производстве бетонных смесей. Исследуется влияние этих заполнителей на физические, механические свойства и долговечность бетона, а также области применения бетонов с утилизированными заполнителями.

Ключевые слова: рециклированный бетон, утилизированные заполнители, физико-механические свойства, долговечность.

ВВЕДЕНИЕ

Использование рециклированного бетона в качестве заполнителя в производстве нового бетона снижает затраты на организацию утилизации отходов сноса зданий и сооружений и главным образом способствует решению проблемы исчерпания природных ресурсов и снижения их расхода путем повторного использования. Заполнители, полученные при переработке (рециклинге) бетона, могут быть использованы в качестве частичной или полной замены природных заполнителей (ПЗ). Тем не менее включение рециклированных заполнителей (РЗ) в новый бетон влияет на его эксплуатационные характеристики из-за сниженных физических свойств РЗ, в частности их высокого водопоглощения, повышенной шероховатости и пониженной плотности. Параметры, влияющие на свойства бетона с утилизированными заполнителями (БУЗ), включают источник, природу и дозу утилизированных заполнителей. Эти параметры влияют на поведение бетона как в свежем, так и в твердом состоянии. В данной статье представлен обзор исследований, в которых изучались:

физико-механические свойства БУЗ,

долговечность БУЗ,

области применения БУЗ.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА С УТИЛИЗИРОВАННЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

В исследовании изучались физическо-механические свойства бетона, включающего заполнители из рециклированного бетона (ЗРБ), влияющие на его технологичность в стадии возведения и работоспособность и долговечность при эксплуатации конструкций. Кроме того, для учета качества самих заполнителей были рассмотрены два типа ЗРБ, полученные после утилизации бетона подверженного и не подверженного воздействию пожара. Исследование было направлено на определение физических, механических и химических свойств используемых ЗРБ, а также оценку влияния таких параметров, как источник, природа и процентное содержание ЗРБ на свойства бетона [1].

Были проведены испытания для оценки усадки, прочности при сжатии, пористости, ползучести и долговечности бетона. Полученные значения прочности на сжатие бетона, содержащего ЗРБ, независимо от того, подвержены ли они или нет воздействию пожара, позволяют использовать его в строительных конструкциях, не требующих высоких значений сопротивления сжатию, например для подбетонки под фундамент, и в ненесущих элементах. При этом следует заметить, что при изготовлении бетона с мелким заполнителем в виде природного песка и с крупным заполнителем, включающим только 25 или 50 % РЗ, не подверженных воздействию пожара или других агрессивных природных факторов, прочность бетона при сжатии может достигать 23 МПа [2]. Данные показатели прочности вполне позволяют использовать такой бетон для несущих конструкций, подверженных силовым воздействиям низкой интенсивности. Прочность на растяжение такого бетона оказалась на том же уровне, что и прочность сопоставимого бетона, изготовленного полностью на природных крупных заполнителях. Пористость бетона несколько увеличивалась с повышением процентного содержания ЗРБ вследствие относительно высокой пористости этих заполнителей и цементного камня на границе контакта с их поверхностью. Все значения пористости, полученные для БУЗ, были в значительной степени более высокими по сравнению с обычным бетоном.

Помимо этого, исследовались модуль упругости, усадка и ползучесть бетонов на природном мелком заполнителе и с крупным заполнителем, содержащим 25 и 50 % РЗ по массе. Было установлено, что при включении 50 % РЗ модуль упругости бетона снижается до 40 % по сравнению с модулем упругости аналогичного бетона, изготовленного с использованием только природного крупного заполнителя. При этом включение 25 % РЗ практически не привело к снижению модуля упругости бетона. Усадка бетона с содержанием 50 % крупного заполнителя оказывается выше примерно на 27 %, чем в бетоне только на природных заполнителях, тогда как усадка бетона с содержанием 25 % РЗ оказывается выше только на 7 %. Ползучесть бетона с включением РЗ также оказалась выше: примерно на 35 и 10 % для бетонов с содержанием 50 и 25 % РЗ соответственно относительно бетона на природных заполнителях. При этом включение в состав бетона РЗ не повлияло на характер развития быстро натекающей ползучести [2].

Дополнительные испытания показали, что бетон, содержащий РЗ в количестве до 50 % от общей массы крупных заполнителей, в полной мере сохраняет свои свойства сцепления с арматурой [2].

Показатели долговечности утилизированных заполнителей, полученных из бетона, подвергнутого воздействию пожара, были ниже, чем у заполнителей, полученных из бетона, не подвергнутого воздействию огня, поэтому бетон, содержащий утилизированные заполнители, не подверженные воздействию огня, несомненно, будет более долговечным, чем бетон, включающий утилизированные заполнители, подверженные воздействию огня. Корреляция между прочностью на сжатие и пористостью бетонов, включающих утилизированные заполнители, подвергшиеся и не подвергавшиеся воздействию огня, показали, что прочность бетона уменьшается с увеличением пористости.

ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕТОНА С УТИЛИЗИРОВАННЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

Были рассмотрены две области применения БУЗ: самоуплотняющийся бетон (СУБ) для использования в монолитных конструкциях и смеси для изготовления пустотелых бетонных блоков для кладки стен. Исследования, относящиеся к применению СУБ в качестве конструкционного бетона, включали оценку давления СУБ на опалубку элементов конструкций в процессе бетонирования и влияние на это давление утилизированных заполнителей, а также вертикального и горизонтального армирования [3, 4].

В исследовании бетонных пустотелых блоков изучалась консистенция бетонных смесей, а также плотность и прочность на сжатие блоков в зависимости от процентного содержания ЗРБ, расхода цемента, количества воды затворения и использования суперпластификатора [5, 6]. В другом исследовании рассматривалось одновременное включение утилизированных заполнителей и утилизированного стекла в бетонные пустотелые блоки. При этом оценивалась удобоукладываемость свежего бетона, а также плотность, поглощающая способность, прочность при сжатии и огнестойкость блоков [7].

Влияние армирования на величину давления на опалубку свежееуложенного самоуплотняющегося бетона, содержащего утилизированные заполнители [2, 3]

Растущее использование экологически чистого СУБ, модифицированного путем включения ЗРБ, в производстве железобетонных конструкций вызвало необходимость лучшего понимания процесса бетонирования, включая влияние арматурных стержней на изменение давления на опалубку. С этой целью было исследовано 32 состава смесей СУБ, включающие различные процентные содержания ЗРБ и обладающие уровнями устойчивости к водоотделению и расслаиванию от относительно низких до высоких. Давление на опалубку было исследовано при бетонировании образцов $200 \times 400 \times 1600$ мм с коэффициентом вертикального армирования от 0 до 4,71 % и горизонтальным армированием с шагом от 150 до 450 мм. Также было изучено влияние расположения вертикальных стержней арматуры на давление на опалубку. Давление определялось на стенки формы из органического стекла (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Форма из органического стекла: а – общий вид;
б – расположение тензодатчиков на расстоянии 50 мм от дна опалубки

При исследовании фиксировались такие свойства свежего СУБ, как подвижность (рис. 2), устойчивость к водоотделению, проходимость (рис. 3) и устойчивость к расслоению (рис. 4), а также реологические свойства, т.е. статический предел текучести, пластическая вязкость и скорость структурирования (тиксотропия). Особое внимание было уделено разработке регрессионных моделей и изучению пригодности имеющихся моделей для прогнозирования бокового давления СУБ на опалубку с учетом влияния добавления ЗРБ и наличия вертикального и горизонтального армирования.



Рис. 2. Определение подвижности СУБ путем измерения величины расплыва



Рис. 3. Определение проходимости СУБ в L-образном ящике



Рис. 4. Определение устойчивости к расслоению СУБ с помощью сита

Результаты испытаний показали, что введение ЗРБ в смеси снизило начальное давление и ускорило скорость падения давления с течением времени. Это может быть связано с шероховатостью поверхности ЗРБ, увеличивающей внутреннее трение, которое в свою очередь вызвано более высоким содержанием мелких частиц и их водопоглощением, что улучшает процесс образования структурного скелета СУБ в состоянии покоя и приводит к уменьшению трансформации вертикальных напряжений в боковые.

Для заданного шага горизонтальной арматуры увеличение плотности вертикального армирования (т.е. сокращение расстояния между стержнями) привело к убыванию начального максимального давления. Кроме того, уменьшение шага горизонтального армирования (т.е. увеличения плотности горизонтального армирования) привело к убыванию начального давления. Таким образом, на развитие бокового давления влияет процент как вертикального, так и горизонтального армирования. В то же время не было выявлено существенного изменения скорости падения давления с течением времени в зависимости от количества арматурных стержней. Это показывает, что снижение давления определяется главным образом свойствами, присущими бетону, такими как тиксотропия и гидратация цемента.

В неармированных образцах величина бокового давления на опалубку при данной высоте бетона одинакова вдоль стороны опалубки (как на краях, так и в середине). Напротив, в армированных образцах зарегистрированное давление в середине было относительно выше, чем на краях, что было связано со снижением плотности вертикального армирования в окрестности середины стороны опалубки.

Были предложены две модели регрессии для прогнозирования влияния ЗРБ и наличия арматурных стержней на начальное максимальное давление и скорость его падения с течением времени. Рассмотренные существующие модели, предложенные другими исследователями, переоценивают боковое давление, оказанное СУБ с ЗРБ, особенно когда бетонирование происходит в опалубке, содержащей высокое насыщение армированием. Включение подходящих коэффициентов, учитывающих водопоглощение ЗРБ, эффективные проценты вертикального и горизонтального армирования, оказались действенными для соотнесения измеренных начальных максимальных значений давления теоретическим. В среднем влияние горизонтального армирования на снижение давления на опалубку было примерно в 1,5 раза больше, чем у вертикального армирования.

Прочность на сжатие и огнестойкость бетонных пустотелых блоков, содержащих утилизированные заполнители [7]

Предыдущие исследования показали преимущества использования утилизированного стекла в качестве заполнителя в пустотелых бетонных стеновых блоках. Результаты испытаний смесей с оптимальным содержанием воды показали увеличение прочности блоков при увеличении количества утилизированного стекла.

Целью данной работы было определение влияния утилизированных заполнителей и стеклобоя, включенных в пустотелые бетонные блоки, на их прочность и огнестойкость. Были определены следующие свойства заполнителей: зерновой состав, истинная плотность, средняя плотность, насыпная плотность, водопоглощение, вес в сухом состоянии, содержание материала мельче 75 $\mu\text{м}$, эквивалента песка, содержание кислоторастворимых хлоридов, содержание кислоторастворимых сульфатов и щелочно-силикатная реактивность (химический метод).

Испытания проводились на образцах размером 400 × 150 × 200 мм, изготовленных методом вибропрессования и расформованных через несколько секунд после укладки бетонной смеси. Плотность и прочность на сжатие блоков оценивали с использованием стандартных методов, а их поведение при пожаре оценивали с использованием нестандартного метода испытаний. С целью определения степени воздействия огня на материал бетонного блока его поверхность в течение 2 ч подвергалась воздействию открытого пламени, созданного горящим бутаном. Анализ результатов испытаний показал, что все блоки (с содержанием ЗРБ и без него) имели нормальную плотность. Блоки, содержащие утилизированные заполнители и/или утилизированное стекло, обладали плотностью ниже, чем контрольные образцы без ЗРБ. Блоки без утилизированных материалов имели самую высокую прочность при сжатии. Потеря прочности при сжатии из-за утилизированных материалов составила 20–25 % по сравнению с контрольными образцами. Испытания блоков под воздействием огня показали, что через 5–15 мин от начала воздействия огня на их поверхности появлялись небольшие трещины шириной менее 1 мм, а по истечении 2 ч образования новых повреждений не наблюдалось.

Это исследование показало, что частичная замена природных заполнителей различными комбинациями утилизированных заполнителей и утилизированного стеклобоя позволяет производить пустотелые бетонные стеновые блоки с приемлемой прочностью и не влияет на поведение блоков при пожаре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в данной статье исследования показывают, что физические свойства бетонов с рециклированными заполнителями существенно отличаются от свойств обычного бетона на природных заполнителях. С одной стороны, бетоны с РЗ обладают меньшей прочностью при сжатии, большей пористостью, усадкой и ползучестью. С другой стороны, наличие в составе самоуплотняющегося бетона рециклированных заполнителей позволяет получить большие показатели внутреннего трения смеси и тем самым снизить давление на стенки опалубки при выполнении конструкций с применением таких бетонов.

Бетоны на рециклированных заполнителях могут найти эффективное применение в ненесущих конструкциях и элементах, в подбетонках. В то же время прочностные свойства бетонов, в составе которых до 50 % крупного заполнителя представлено РЗ, могут оказаться приемлемыми и для использования в слабонагруженных несущих конструкциях.

Применение бетонов с рециклированными заполнителями помогает решить важные и актуальные в настоящее время проблемы сохранения природных ресурсов и утилизации строительных отходов. Однако ввиду специфики свойств таких бетонов представляется целесообразным продолжение их всестороннего экспериментального и теоретического изучения для разработки исчерпывающих рекомендаций по возможности и порядку их применения в строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matar P., El Dalati R. Caractéristiques du béton à base de granulats recyclés. Etude expérimentale. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*. 2012. No. 3–4, pp. 32–39.
2. Аббас З.А., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В. Экспериментальное исследование механических свойств рециклированных бетонов // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения*. 2017. № 1. С. 1–9.
3. Matar P., Assaad J.J. Effect of vertical reinforcing bars on formwork pressure of SCC containing recycled aggregates. *Journal of Building Engineering*. 2017. No. 13, pp. 159–168. DOI: 10.1016/j.jobbe.2017.08.003
4. Assaad J.J., Matar P. Regression models to predict SCC pressure exerted on formworks containing vertical and transverse reinforcing bars. *Materials and Structures*. 2018. No. 51, Article number 62. DOI: 10.1617/s11527-018-1188-x
5. Matar P., El Dalati R. Using recycled concrete aggregates in precast concrete hollow blocks. *Materials Science and Engineering Technology (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik)*, 2012. No. 43(5), pp. 388–391. DOI: 10.1002/mawe.201200970
6. Matar P., El Dalati R. Strength of masonry blocks made with recycled concrete aggregates. *Physics Procedia*. 2011. No. 21, pp. 180–186. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.10.027
7. Матар П.Ю., Петропавловская В.Б., Баркая Т.Р., Байсари М.Ф., Эль-Хасанийе Л.С. Пустотелые стеновые бетонные блоки с рециклированными заполнителями и стеклом // *Строительные конструкции*. 2016. № 3. С. 69–75.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАТАР Пьер Юсеф – PhD, HDR, профессор кафедры гражданского строительства, инженерный факультет, Ливанский университет, Beirut, Ливан. E-mail: pmatar@ul.edu.lb

АСААД Жозеф Жан – PhD, доцент кафедры гражданского и экологического строительства, инженерный факультет, Баламандский университет, Аль Кура, Ливан. E-mail: Joseph.Assaad@balamand.edu.lb

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

ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович – ассистент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: gawaw@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Матар П.Ю., Асаад Ж.Ж., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В. Свойства и области применения бетона с утилизированными заполнителями // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 2 (6). С. 21–29.

RECYCLED AGGREGATE CONCRETE PROPERTIES AND APPLICATIONS

P.Y. Matar¹, J.J. Assaad², T.R. Barkaya³, A.V. Gavrilenko³

¹ Lebanese University (Beirut, Lebanon)

² University of Balamand (Al Koura, Lebanon)

³ Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This paper presents an overview of research activities carried out by the authors and aiming to investigate the possibility of using recycled concrete aggregates in the production of concrete mixes. It evaluates the effect of these aggregates on the physical, mechanical and durability properties of concrete, as well as the applications of the recycled aggregate concretes.

Keywords: recycled concrete, recycled aggregates, physical and mechanical properties, durability.

REFERENCES

1. Matar P., El Dalati R. Caractéristiques du béton à base de granulats recyclés. Etude expérimentale. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*. 2012. No. 3–4, pp. 32–39. (In French).
2. Abbas Z.A., Barkaya T.R., Gavrilenko A.V. Experimental study of mechanical properties of recycled aggregate concretes. *Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya*. 2017. No. 1, pp. 1–9. (In Russian).
3. Matar P., Assaad J.J. Effect of vertical reinforcing bars on formwork pressure of SCC containing recycled aggregates. *Journal of Building Engineering*. 2017. No. 13, pp. 159–168. DOI: 10.1016/j.jobbe.2017.08.003
4. Assaad J.J., Matar P. Regression models to predict SCC pressure exerted on formworks containing vertical and transverse reinforcing bars. *Materials and Structures*. 2018. No. 51, Article number 62. DOI: 10.1617/s11527-018-1188-x

5. Matar P., El Dalati R. Using recycled concrete aggregates in precast concrete hollow blocks. *Materials Science and Engineering Technology (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik)*, 2012. No. 43 (5), pp. 388–391. DOI: 10.1002/mawe.201200970
6. Matar P., El Dalati R. Strength of masonry blocks made with recycled concrete aggregates. *Physics Procedia*. 2011. No. 21, pp. 180–186. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.10.027
7. Matar P.Y., Petropavlovskaya V.B., Barkaya T.R., Bayssary M.F., El-Hassanieh L.S. Concrete wall hollow blocks with recycled aggregates and recycled glass. *Construction Materials*. 2016. No. 3, pp. 69–75. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MATAR Pierre Youssef – PhD, HDR, Professor; Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Lebanese University, Beirut, Lebanon. E-mail: pmatar@ul.edu.lb

ASSAAD Joseph Jean – PhD, Associate Professor; Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Balamand, Al Koura, Lebanon. E-mail: Joseph.Assaad@balamand.edu.lb

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

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Matar P.Y., Assaad J.J., Barkaya T.R., Gavrilenko A.V. Recycled aggregate concrete properties and applications // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 21–29.

УДК 691.26

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ГИПСОКОСТРОБЕТОН

В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова, М.Ю. Завадько
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье обобщен опыт производителей строительных материалов на основе различных отходов сельского хозяйства. В целях решения проблемы ресурсосбережения и охраны окружающей среды исследована возможность получения облегченного материала с улучшенными теплоизоляционными параметрами на основе гипсового вяжущего и отходов производства льна – костры. Получены зависимости плотности гипсокостробобетона от содержания костры.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, льняная костра, отход, плотность.

В России в последнее время оказывается значительная поддержка со стороны государства сельскому хозяйству. В связи с этим растет и количество отходов. Использование подобных отходов в производстве строительных материалов является значительным резервом повышения эффективности строительства [1, 2].

В строительной отрасли возможно применение абсолютно различных местных отходов производства [3]. Разработаны технологии изготовления теплоизоляционных плит на основе рисовой шелухи (с портландцементом в качестве вяжущего компонента) и из хлопковой (с фенолформальдегидной смолой) [2]. Известны различные исследования по применению в производстве плитного утеплителя цельной и измельченной лузги подсолнечника [2].

Возможно использование также и древесных волокон – отходов от распиловки и вырезания замка при производстве ламината. Отходы могут быть использованы в качестве органического заполнителя для гипсовых изделий без дополнительной обработки. Содержание древесных отходов в композициях до 15 % обеспечивает получение изделий пониженной плотности при сохранении высоких прочностных показателей [4].

Еще одним видом отходов являются отходы волокна для модификации гипсового камня [3]. Исследования [3] подтверждают положительное влияние дисперсной добавки отходов волокна на эксплуатационные характеристики гипсового материала. Модификация гипсового камня минеральной добавкой в количестве 10 % позволяет повысить более чем в два раза прочность при изгибе (составляет 12,75 МПа), а также плотность и долговечность тонкостенных гипсовых изделий.

Среди отходов сельского хозяйства можно выделить следующие: костра льна и конопли; рисовая солома; отруби; шелуха; стебли хлопчатника, кукурузы, подсолнечника; джут, кенаф, гречишная и пшеничная солома и др. В связи с этим возникает потребность решения проблем – экологической (проблемы утилизации отходов) и ресурс- и энергосбережения (проблемы эффективного применения).

Решение проблемы утилизации растительных отходов и их вторичного использования – очень важный аспект с позиции экологии и сохранения природной среды для будущих поколений [5, 6, 7].

Известно много способов вовлечения отходов сельского хозяйства в производство строительных материалов, например утилизация рисовой шелухи без ее термической переработки. Создано поколение новых теплоизоляционных материалов с использованием рисовой шелухи в качестве наполнителя. Утилизация отходов переработки риса способствует сокращению площадей, занимаемых этими отходами и снижению выбросов токсичных веществ в атмосферу [1]. При этом решаются как задачи комплексного использования растительного сырья, так и экологические проблемы в регионах [6, 8].

Еще одним эффективным методом вовлечения отходов переработки риса является улучшение качества керамического кирпича за счет использования рисовой соломы в качестве выгорающей добавки. При ее сгорании образуется еще и аморфный кремнезем. Применения рисовой соломы в производстве керамического кирпича путем введения измельченной соломы в глиняную массу с последующим формованием, сушкой и обжигом, позволяет получать керамические изделия с высокой пористостью и достаточной прочностью при сжатии.

Еще больший интерес сегодня для российской стройиндустрии могут представлять отходы костры. По статистическим данным, ежегодно в РФ образуется до 500 тыс. т отходов льняной костры, которая в настоящее время практически не используется в

промышленности и вывозится в отвалы. Однако многие предприятия по производству строительных материалов и изделий могут быть потенциальными потребителями этого вида органического сырья [8].

По данным Росстата, посевные площади льна в России на 2019 г. в хозяйствах всех категорий находились на уровне 50,6 тыс. га. За год размеры площадей выросли на 13,1 % (на 5,8 тыс. га), за 5 лет – на 0,2 % (на 0,1 тыс. га) [7]. Тверская область входит в число пяти первых регионов по размеру площадей льна с посевной площадью 5,0 тыс. га, 9,8 % [7]. Следовательно, на современном рынке строительных материалов возникает новый сырьевой ресурс. Анализ экспериментальных работ по исследованию теплоизоляционных материалов указывает на перспективность и актуальность применения таких отходов в качестве заполнителя.

На основе костры льна получают превосходные тепло-, шумоизоляционные материалы, не уступающие по своим свойствам материалам из волокон конопли, рисовой шелухи, ржаной и гречишной соломы и других растительных компонентов.

В производстве теплоизоляционных костроплит часто используется жидкое стекло как вяжущее. Таким образом, достигается максимальный экономический эффект, обеспечивается экологическая безопасность окружающей среды и человека [2]. Получение экологически безопасного утеплителя с высокими теплотехническими характеристиками на основе соломы и костры льна с применением жидкого стекла в виде вяжущего – это перспективное направление успешной переработки сельскохозяйственных отходов [2].

Также предложено использование костросоломенных блоков на цементно-известковом вяжущем (плотность 529–585 кг/м³, предел прочности при сжатии 2–2,4 МПа, коэффициент теплопроводности 0,08–0,09 Вт/м·°C). Такие блоки обладают необходимой прочностью для возведения стен до 3 м высотой при толщине кладки 300 мм. Также они обладают хорошей адгезией со штукатурными растворами.

Исследователями из Томского государственного архитектурно-строительного университета [3] были проведены испытания различных композиций с клеевыми составами, в которых присутствовала костра льна. Результаты показали, что коэффициенты теплопроводности композиций таких составов, как костра-клей «Титан», костра-клей «Крепс», пыль костры-клей «Титан», равны соответственно: 0,028±0,001; 0,032±0,001; 0,037±0,001 Вт/м·K. По своим теплофизическим свойствам синтезированные материалы превосходят традиционный глиняный кирпич, коэффициент теплопроводности которого равен 0,56 Вт/м·K, что позволяет отнести исследуемые композиции к высокоэффективным теплоизоляционным материалам [3, 5, 6].

Исследователями из Украины предложено эффективное использование волокон конопляной/льняной костры в конструкции стен из природных материалов [5]. Теплопроводность полученных материалов в зависимости от используемых наполнителей колеблется в диапазоне от 0,07 Вт/м·K для соломенной панели до 0,4 Вт/м·K для самана. Использование арболита на основе костры конопли/льна почти втрое эффективнее использования самана и в полтора раза эффективнее использования соломенных панелей. На основании исследований Б.А. Масхудова [1] установлено, что применение для конструкции наружных стен утеплителя из арболитобетона с высокими теплозащитными свойствами ($\lambda_0 = 0,07–0,1$ Вт/м·K) на основе рисовой шелухи достаточно перспективно.

Известны технологии получения различных видов теплоизоляционных материалов на основе отходов льна и конопли и в других странах Европы (например, SREICO – в

Германии, а также на основе соломы злаковых культур – плиты «Стармит» – в Англии, Франции, Швеции и других странах) [2].

В работе в целях решения проблемы ресурсосбережения и охраны окружающей среды исследована возможность получения облегченного материала с улучшенными теплоизоляционными параметрами на основе гипсового вяжущего и отходов производства льна – костры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных материалов в исследованиях применяли гипсовое вяжущее β -модификации марки Г-6 производства Пешеланского гипсового завода, в виде отхода – костру льна одного из производств Тверской области. Гипсовое вяжущее β -модификации марки Г-5 А I (Б I) Пешеланского гипсового завода Нижегородской области «ДЕКОР-1» характеризуется водопотребностью 60–65 %, началом схватывания 5,5 мин, концом схватывания 8,5 мин. Зерновой состав характеризуется по ГОСТ 125 – 2018 остатком на сите 0,2 мм 4–6 %. Химический состав вяжущего Пешеланского гипсового завода приведен в табл. 1. Основные технические показатели вяжущего приведены в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав вяжущего Г-5 А II Пешеланского гипсового завода

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	F
0,8	Следы	Следы	–	37,52	0,10	53,78	0,05	0,007	–	–

Таблица 2

Основные показатели вяжущего Пешеланского гипсового завода

Марка вяжущего	Удельная поверхность, м ² /кг	Объемное расширение, %	Нерастворимые в HCl примеси, %
Г-5 А II	300	0,13	0,17

Основные показатели гранулометрического состава костры – отхода производства льнозавода Тверской области приведены в табл. 3 и на рис. 1.

Таблица 3

Гранулометрический состав костры – отхода производства льнозавода Тверской области

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах						Проход через сито N 0,14, % по массе
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Частный	0,95	39,07	17,60	30,18	6,72	3,50	1,98
Полный	0,95	40,02	57,62	87,8	94,52	98,02	–

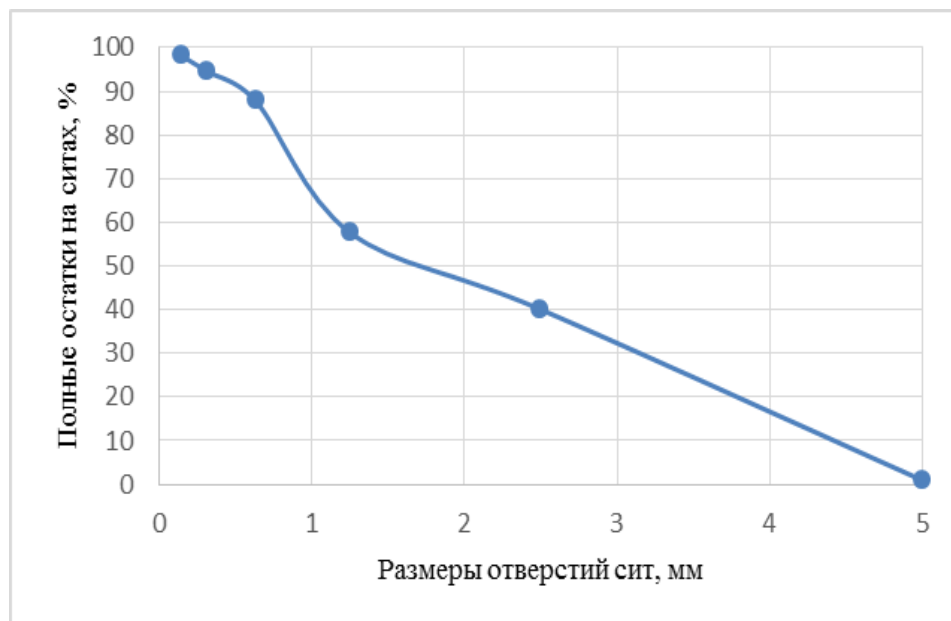


Рис. 1. Кривая рассева костры – отхода производства льнозавода Тверской области

Состав гипсового костробетона в данном исследовании варьировался в зависимости от изменения двух входных параметров – содержания костры и водотвердого отношения (В/Т). Содержание костры изменялось в пределах от 20 до 25 %. Водосодержание смесей изменялось в пределах от 0,65 до 0,75. Пределы варьирования входных параметров принимались по результатам ранее выполненных исследований. Выходными параметрами были приняты прочность и средняя плотность гипсового костробетона.

Для получения образцов костробетона гипсовое вяжущее и костра перемешивались в сферической чаше до однородности. Затем сухая смесь гипса и костры затворялась водой и тщательно перемешивалась в течение 30 с (рис. 2). Затем готовая сырьевая смесь укладывалась в металлические формы-кубы с размерами $70 \times 70 \times 70$ мм, где костробетон выдерживался в течение суток. Затем образцы расформовывались, маркировались и хранились 8 суток в нормальных условиях, при нормальной влажности воздуха (рис. 3). Перед испытанием образцы высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу. Для определения средней плотности расчетным методом образцы-кубы измерялись и взвешивались.



Рис. 2. Приготовление формовочной массы гипсового костробетона



Рис. 3. Образцы гипсового костробетона после расформования

Результаты исследований зависимости средней плотности гипсового костробетона от времени твердения и водотвердого отношения при различном содержании добавки костры приведены на рис. 4, 5.

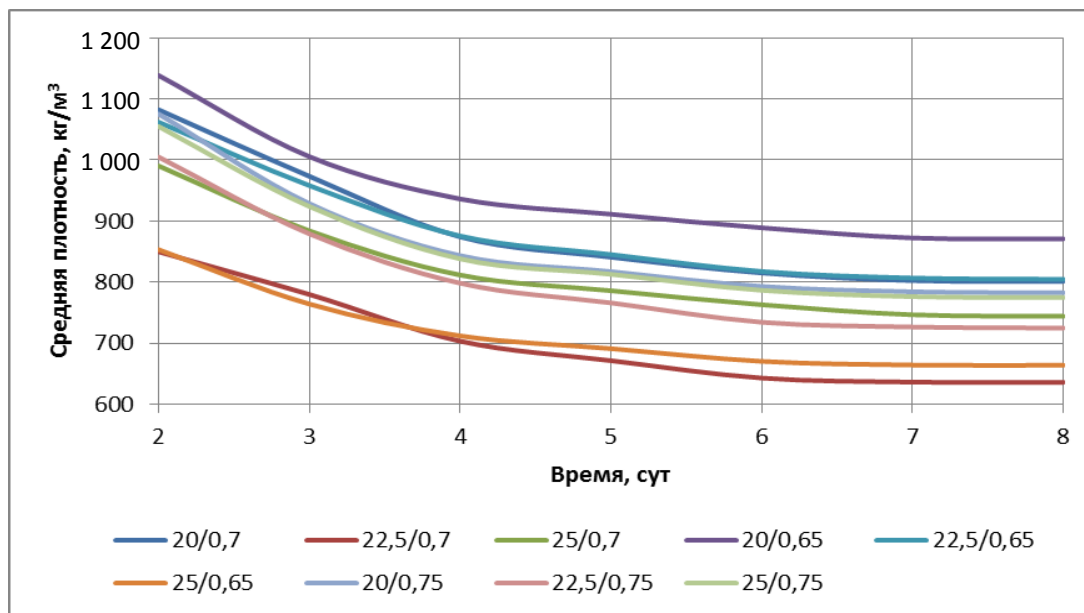


Рис. 4. Влияние времени твердения на среднюю плотность образцов гипсокремнебетона в зависимости от содержания кремнезема

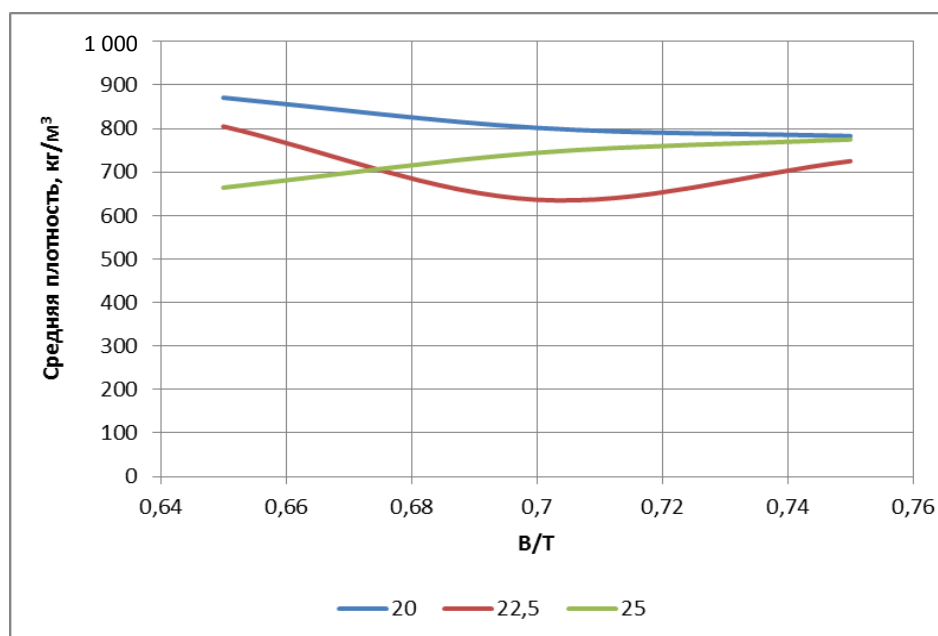


Рис. 5. Влияние водотвердного отношения на среднюю плотность образцов гипсокремнебетона в зависимости от содержания кремнезема

Все кривые зависимости плотности гипсокремнебетона от времени твердения имеют схожий характер. Минимальная плотность – 636 кг/м^3 , достигнутая в работе, соответствует в исследованном интервале составу с содержанием кремнезема 22,5 % при водотвердном отношении 0,7, максимальная – 1006 кг/м^3 составу с содержанием кремнезема 20 % при водотвердном отношении 0,65.

Для состава с содержанием костры 22,5 % снижение плотности на 8-е сутки твердения составило более 20 %, в то время как для состава с содержанием костры 20 % – лишь 15 %. Теплопроводность в естественном состоянии образцов гипсокостробо́тона составляла от 0,56 до 0,4 Вт/м·К. Предел прочности материала на 8-е сутки твердения варьировался в пределах 3,8–5 МПа.

Результаты исследования не противоречат известным закономерностям, армирование органическим волокном структуры гипсового камня способствует снижению физико-механических показателей. Однако полученные данные по прочности и плотности демонстрируют положительный технический эффект от введения добавки. При увеличении содержания костры в составе композита от 20 до 25 % плотность гипсокостробо́тона снижается на 33,5 % в возрасте 2 ч при других неизменных факторах. Снижение плотности при $V/T = 0,65$ составило 33 % на 8-е сутки твердения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, введение в состав гипсового камня местного отхода сельского хозяйства (костры льна) позволяет расширить сырьевую базу по производству строительных материалов в регионе и снизить нагрузку на окружающую среду. Полученные результаты по прочности показывают, что изделия на основе гипсокостробо́тонов могут быть использованы в малоэтажном строительстве при условии их защиты от увлажнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакатович А.А., Давыденко Н.В. Опыт применения теплоизоляционных плит на основе растительных отходов сельскохозяйственного производства // *Вестник гражданских инженеров*. 2014. № 5. С. 77–84.
2. Горбунов Г.И., Расулов О.Р. Использование рисовой соломы в производстве керамического кирпича // *Вестник МГСУ*. 2014. № 11. С. 128–136.
3. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Соловьев В.Н., Петропавловский К.С. Утилизация отходов минерального волокна в производстве гипсовых изделий // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. Вып. 12 (111). С. 1392–1398.
4. Анисимова С.В., Коршунов А.Е., Зекин А.А. Возможность переработки древесных отходов при производстве гипсовых изделий // *Строительные материалы*. 2015. № 6. С. 70–73.
5. Ванжула А.В., Бікс Ю.С. Оцінка теплотехнічного потенціалу стін будинків з природних матеріалів. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції: Інноваційні технології в будівництві*. Вінниця: ВНТУ, 2018. С. 69–73.
6. Бакатович А.А., Давыденко Н.В., Долгонож А.В. Стеновые материалы на основе соломы и костры льна с высокими теплоизоляционными свойствами // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия: Строительство. Прикладные науки*. 2016. № 8. С. 28–32.
7. Посевные площади льна-долгунца в России. Итоги 2019 года. URL: <https://agrovesti.net/lib/industries/linen/posevnye-ploshchadi-lna-dolguntsa-v-rossii-itogi-2019-goda.html> (дата обращения: 19.03.2020).
8. Павлова А.Н., Морозова Т.Н., Немова Л.В., Касимова Л.В., Лапова Т.В., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П. Теплоизоляционные материалы на основе костры льна-долгунца

// *Роговские чтения: проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий: материалы Всероссийской конференции.* Томск: ТГАСУ, 2015. С. 258–261.

9. Махсудов Б.А., Акрамов Х.А. Железобетонные трехслойные стеновые панели со средним эффективным теплоизоляционным слоем из низкопрочных бетонов на основе рисовой шелухи // *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина.* Томск: ТПУ. 2017. Т. 2. С. 403–404.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tanovi.69@mail.ru

ЗАВАДЬКО Мария Юрьевна – ассистент кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Завадько М.Ю. Теплоизоляционный гипсокремнеземобетон // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии».* 2020. № 2 (6). С. 29–38.

HEAT-INSULATING GYPSUM HEMPCRETE

V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova, M.Yu. Zavadko
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article summarizes the experience of producers of construction materials based on various agricultural wastes. In order to solve the problem of resource saving and environmental protection, the possibility of obtaining light material with improved heat insulation parameters based on gypsum binder and flax shive production wastes has been investigated. Dependence of density of gypsum hempcrete on content of bonfire is obtained.

Keywords: gypsum binder, linseed fire, waste, density

REFERENCES

1. Bakatovich A.A., Davydenko N.V. Experience of application of thermal insulation boards based on plant wastes of agricultural production. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov.* 2014. No. 5, pp. 77–84. (In Russian).

2. Gorbunov G.I., Rasulov O.R. Use of rice straw in ceramic brick production. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 11, pp. 128–136. (In Russian).
3. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Bur'yanov A.F., Solov'ev V.N., Petropavlovskii K.S. Disposal of mineral fibre wastes in the production of gypsum products. *Vestnik MGSU*. 2017. Vol.12. Iss. 12 (111), pp. 1392–1398. (In Russian).
4. Anisimova S.V., Korshunov A.E., Zekin A.A. The possibility of processing wood waste in the production of gypsum products. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 6, pp. 70–73. (In Russian).
5. Vanzhula A.V., Biks Yu.S. Assessment of heattechnical potential of walls of houses on natural materials. *Collection of materials of the International scientific and technical conference: Innovative technologies in construction*. Vinnicya: VNTU. 2018, pp. 69–73.
6. Bakatovich A.A., Davydenko N.V., Dolzhonok A.V. Wall materials based on straw and flax bonfires with high thermal insulation properties. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2016. No. 8, pp. 28–32. (In Russian).
7. Sowing areas of flax-longunz in Russia. Results of 2019. URL: <https://agrovesti.net/lib/industries/linen/posevnye-ploshchadi-lna-dolguntsa-v-rossii-itogi-2019-goda.html> (date of access: 19.03.2020). (In Russian).
8. Pavlova A.N., Morozova T.N., Nemova L.V., Kasimova L.V., Lapova T.V., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P. Heat-insulating materials based on flax-long fire. *Rogov Readings: Problems of Engineering Geology, Hydrogeology and Geoecology of Urbanized Territories: Materials of the All-Russian Conference*. Tomsk: TSUAB. 2015, pp. 258–261. (In Russian).
9. Mahsudov B.A., Akramov H.A. Reinforced concrete three-layer wall panels with a medium effective heat insulation layer of low-strength concrete based on rice husks. *Problems of geology and subsoil development: Works of the XXI International Symposium named after academician M.A. Usov students and young scientists dedicated to the 130th anniversary of the birth of Professor M.I. Kuchin*. Tomsk: TPU. 2017. Vol. 2, pp. 403–404. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

NOVICHENKOVA Tatyana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, the Associate Professor of the Department of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

ZAVADKO Maria Yuryevna – Assistant of the Department of Roads, Substructures and Foundations, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Zavadko M.Yu. Heat-insulating gypsum hempcrete // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 29–38.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.311

ТРЕНДЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

*Е.А. Виноградов¹, В.В. Степанов¹, С.А. Егоров¹, А.В. Крупнов²*¹ФГАУ ВИТ «ЭРА» (г. Анапа)²Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье проанализированы основные тренды цифровой трансформации электросетевого комплекса России в период до 2035 г. Рассмотрены крупные сегменты рынка электроэнергетики, формирующие основные направления ее развития.

Ключевые слова: электросетевой комплекс, цифровая трансформация, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, Интернет вещей, интеллектуальные системы.

ВВЕДЕНИЕ

В электросетевом комплексе накопилось немало проблем, связанных с постоянно растущими требованиями к качеству электроснабжения, его надежности, доступности электросетевой инфраструктуры для новых потребителей. Вызовы электросетевого комплекса должны быть учтены и проработаны при формировании стратегии технологического и инновационного развития отрасли в ближайшее время как необходимое условие так называемой цифровой трансформации отрасли.

АНАЛИЗ ТРЕНДОВ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Интеллектуальные энергетические системы будущего должны способствовать росту управляемости, надежности и энергоэффективности всех известных энергетических систем: электрических, газовых, тепловых. В перспективе необходимо осуществить принципиально новую архитектуру электросетей, основанную на активно-адаптивных принципах, формирующуюся на основе запросов конечного потребителя, а не навязываться поставщиками или властями. В следующие 5–10 лет потребители как из B2B, так и из B2C сместят свой фокус в сторону комплексных решений в области электроэнергетики, распределения, управления и мониторинга. Будут востребованы гибкие, многофункциональные решения с элементами программного управления и анализом больших данных [1].

Представленные выше тренды и связанные с ними качественные изменения в энергетике немыслимы без контакта с конечными потребителями энергии. По оценке экспертов, стоит ожидать наибольший рост рынка в период до 2035 г. (CAGR более 5 %, по некоторым продуктовым направлениям CAGR – более 10 %). По этой причине выделяют

три крупных блочных сегмента рынка, формирующие направления развития системы и сервисов интеллектуальной энергетики [2]:

надежные и гибкие распределительные сети,
интеллектуальная распределенная энергетика,
потребительские сервисы.

1. Надежность и гибкость распределительных сетей определяется следующими перспективными направлениями технической мысли.

Возможность *вариативного секционирования* и наличие АКБ и бустеров обеспечивают повышение параметров качества и надежности электроснабжения потребителей, что благоприятно сказывается на имидже компании и доверии к ней.

Распространение *распределенной генерации*, в том числе с использованием возобновляемых источников энергии, в удаленных районах избавит сетевую компанию от необходимости проведения мероприятий по реконструкции, что обеспечит экономию в реализации инвестиционных программ, позволит осваивать выделяемые средства в более перспективных направлениях [3].

Наличие актуальных коррелирующих между собой *информационных баз данных*, отражающих техническое состояние объектов электросетевого хозяйства, позволит компании уйти от обезличенных, эмпирически принятых плановых ремонтов оборудования и вкладывать ресурсы в те технологические точки сети, где это вложение даст наибольший эффект в части обеспечения надежности электрической сети.

Цифровая радиосвязь и повсеместное внедрение ГЛОНАСС в совокупности с вышеперечисленными нововведениями обеспечит оптимизацию логистики доставки оборудования и бригад, что в результате приведет к снижению издержек компании.

2. Интеллектуальные системы распределенной энергетики представлены следующими перспективными технологиями.

Благодаря *интеллектуальным системам учета* и современным автоматизированным методикам выявления бездоговорного и неучтенного потребления электроэнергии становится возможным значительное снижение потерь и, как следствие, сокращение издержек на покупку электроэнергии у системного оператора.

Введение *интеллектуального учета* позволит сделать плату за потребление более честной: каждое домохозяйство будет платить только за себя, а тот, кто не платит, просто не получит ресурсов. Энергетики, в свою очередь, начнут экономить за счет снижения потерь в сетях, что, по оценкам министра энергетики РФ Александра Новака, сэкономит до 80 млрд рублей в год. Эти средства компании будут вкладывать в обновление инфраструктуры.

Интеллектуальные энергосистемы – для роста эффективности, безопасности и надежности энергоснабжения. Данные технологии основаны на принципах активного децентрализованного взаимодействия между узлами сети в режиме онлайн.

Эксперты прогнозируют более глубокое распространение *беспроводных протоколов* в продукции электротехнических компаний. В 2017–2018 гг. в нескольких городах России уже были запущены в тестовую эксплуатацию сети IoT, которые могут оказать дополнительное влияние на распространение технологии цифровой энергетики. Телеком видит в этом новые возможности в рамках решения проблемы мониторинга и управления распределением энергии промышленных объектов, частной и коммерческой недвижимости.

По данным Global Market Insights, мировой рынок IoT в 2017 г. достиг 312,79 млрд долларов, что в три раза больше, чем в 2015 г. В период с 2017 по 2023 гг. будет расти с приблизительными среднегодовыми темпами (CAGR) в 14,36 %. К 2023 г. его объем составит 700,38 млрд долларов [4].

Важный тренд, без которого немыслимо развитие экосистемы промышленного Интернета вещей, связан с вовлечением лицензиаров и производителей индустриального оборудования в разработку специализированных приложений на базе существующей IoT-инфраструктуры. Подобные разработки могут размещаться в Application Store/APPs, что повысит мобильность и производительность труда персонала предприятия и будет способствовать решению узкоспециализированных задач повышения эффективности.

3. Технологии потребительских сервисов.

Помимо перечисленного выше, переход к цифровой экосистеме подразумевает трансформацию объектов компании из закрытых систем, внутри которых функционируют все необходимые бизнес-процессы, в открытые кросс-платформенные системы по модели облачных сервисов.

Переход к облачной экосистеме. Успешность проекта в рамках цифровой трансформации напрямую связана с успешной организацией цифровой экосистемы. Данный подход требует, чтобы вся необходимая информация о текущем состоянии ресурсов, таких как оборудование, сырье и материалы, электроэнергия, транспортные средства, производство, маркетинг, продажи, была доступна внутри каждого подразделения компании, на каждом уровне управления. Эта связь обеспечивается подключением к облачной платформе любых устройств и систем и реализуется за счет использования механизма открытых прикладных интерфейсов (API). Информация, передаваемая с использованием облачных технологий, должна быть надежно защищена с помощью современных систем и методов обеспечения кибербезопасности.

Внедрение искусственного интеллекта и управление большими данными [5]. Эффект от стратегии цифровизации в первую очередь строится на объединении данных с множества разрозненных систем в облачном хранилище, с применением аналитических вычислений и прогнозов. Далее следует разработка интегрированных приложений для обработки и отображения технологической информации. Приложения рассматриваются как сервисы и располагаются в облачной экосистеме, что дает доступ к дополнительным данным, поступающим с производственных участков или целых отдельных производств. После консолидации данных из разных источников компании смогут применять интеллектуальную аналитику для извлечения значимой информации.

Существующие и перспективные технологии цифровой энергетики представлены в таблице.

Для эффективного взаимодействия с новыми разновидностями интерфейсов и продуктивной реализации современных методик необходимо проведение разнообразных обучающих мероприятий, что позитивно скажется на уровне и компетенции персонала компаний.

Существующие и перспективные технологии цифровой трансформации
электросетевого комплекса

Решения	Существующие (2019–2024 гг.)	Перспективные (2025–2030 гг.)
Цифровые подстанции	Различные структуры построения вторичных цепей релейной защиты и автоматики с применением протокола IEC 61850	Компактные Plug-n-Play центры питания, работающие в основном с применением цифровых каналов связи. Предполагается иная архитектура по первичным цепям без проведения специальной длительной наладки при вводе в эксплуатацию. Выполнены по цифровым проектам
Системы автоматизации процессов ликвидации аварий воздушных (кабельных) сетей	Преимущественно распределенная автоматизация воздушных линий с применением автоматических пунктов секционирования электрической сети, реклоузеров и индикаторов короткого замыкания	Адаптивные, состоящие из элементарных автоматизированных ячеек (автокластерные) сети оптимальной топологии, рассчитанные с применением цифровых моделей сети, с интеллектуальными автоматическими устройствами (не требующими индивидуальных настроек)
Интеллектуальные системы учета и энергомониторинга	Системы АИИС КУЭ (AMI) и интеллектуальные приборы учета электроэнергии	Интеллектуальные системы энергомониторинга и управления энергопотреблением. Измерительные контроллеры на уровне конечных потребителей. Измерительные контроллеры энергомониторинга
Информационные системы управления	ADMS-системы с поддержкой функционала SCADA, AMI, WFM, OMS, DMS, EMS, GIS, базирующиеся на модели сети с процессором топологической схемы построения модели электрической сети	Сетецентрические двухконтурные онлайн и оффлайн системы поддержки принятия управленческих решений (включая цифровое проектирование) электросетевой компании, основанные на онтологической модели описания бизнес-процессов и математической модели электрической сети, как единой шины данных с элементами искусственного интеллекта (в том числе функции предиктивной риск-ориентированной аналитики)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что цифровая трансформация электросетевого комплекса обеспечивает беспрецедентное увеличение скорости и качества принятия решений на всех уровнях управления, возможность опережающего развития

сетевой инфраструктуры при увеличении доходности бизнеса, а также готовность противостоять качественно новым вызовам в условиях прогрессирующей мировой экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вергазов С.Ю., Кириленков В.С. Технические решения по РЗА, предлагаемые ПАО «Россети» в рамках создания «Цифровых подстанций» // Цифровая подстанция. 2018. 9 с. URL: <http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2018/04/3.-Rosseti.pdf> (дата обращения: 25.05.2019).
2. Мозохин А.Е., Дроздов В.Г., Староверов Б.А. Энергетика нового уклада (EnergyNet): проектирование интеллектуальных цифровых систем на электрических подстанциях: учеб. пособие. Кострома: Костром. гос. ун-т, 2018. 70 с.
3. Распределенная энергетика в России: потенциал развития // Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. 2018. 87 с. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf (дата обращения: 25.05.2019).
4. Моисеева И.В., Титова Н.А. Анализ рынка промышленного интернета вещей // *Актуальные вопросы экономики, менеджмента и инноваций: материалы международной научно-практической конференции ученых, специалистов, преподавателей вузов, аспирантов, студентов*. 20 ноября 2018 г. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. С. 169–172.
5. Индустриальный интернет вещей перспективы российского рынка // РОСТЕЛЕКОМ, 2017. 2 с. URL: https://www.company.rt.ru/projects/IIoT/study_IDC.pdf (дата обращения: 25.05.2019).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВИНОГРАДОВ Егор Алексеевич – магистр, оператор 4-й научной роты ФГАУ Военный инновационный технополис «ЭРА», 353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр-т, д. 28. E-mail: Vinogradov.EgA@gmail.com

СТЕПАНОВ Владимир Викторович – магистр, оператор 4-й научной роты ФГАУ Военный инновационный технополис «ЭРА», 353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр-т, д. 28. E-mail: vladimiraven@mail.ru

ЕГОРОВ Семен Анатольевич – магистр, оператор 4-й научной роты ФГАУ Военный инновационный технополис «ЭРА», 353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр-т, д. 28. E-mail: columbia1996@mail.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Виноградов Е.А., Степанов В.В., Егоров С.А., Крупнов А.В. Тренды цифровой трансформации электросетевого комплекса России // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 2 (6). С. 39–45.

TRENDS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE RUSSIAN ELECTRIC GRID COMPLEX

E.A. Vinogradov¹, V.V. Stepanov¹, S.A. Egorov¹, A.V. Krupnov²

¹*Military innovative technopolis "ERA" (Krasnodar Territory, Anapa)*

²*Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The article analyzes the main trends in the digital transformation of the electric grid complex of Russia in the period up to 2035. Large segments of the electric power market are considered, which form the main directions of its development.

Keywords: electric grid complex, digital transformation, energy efficiency, renewable energy sources, Internet of things, intelligent systems.

REFERENCES

1. Vergazov S.Yu., Kirilenkov V.S. Technical solutions for relay protection and automation proposed by PJSC Rosseti as part of the creation of Digital Substations // Digital Substation. 2018. 9 p. URL: <http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2018/04/3.-Rosseti.pdf> (date of access: 28.02.2020). (In Russian).
2. Mozokhin A.E., Drozdov V.G., Staroverov B.A. Energy of a new way (EnergyNet): the design of intelligent digital systems in electrical substations: textbook. allowance. Kostroma: Kostroma State University, 2018. 70 p. (In Russian).
3. Distributed energy in Russia: development potential // Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO. 2018. 87 p. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf (date of access: 28.02.2020). (In Russian).
4. Moiseeva I.V., Titova N.A. Industrial Internet of things market analysis. *Aktual'nye voprosy ekonomiki, menedzhmenta i innovacij. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii uchenyh, specialistov, prepodavatelej vuzov, aspirantov, studentov*. 20 November 2018. Nizhnij Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva, 2018, pp.169–172. (In Russian).
5. The industrial Internet of things, the prospects of the Russian market // ROSTELECOM, 2017. 2 p. URL: https://www.company.rt.ru/projects/IIoT/study_IDC.pdf (date of access: 28.02.2019). (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

VINOGRADOV Egor Alekseevich – master, operator of 4th scientific company Military Innovation Technopolis «ERA», 28, Pionersky Prospekt, Anapa, Krasnodar Territory, 353456, Russia. E-mail: Vinogradov.EgA@gmail.com

STEPANOV Vladimir Viktorovich – master, operator of 4th scientific company Military Innovation Technopolis «ERA», 28, Pionersky Prospekt, Anapa, Krasnodar Territory, 353456, Russia. E-mail: vladimiraven@mail.ru

EGOROV Semyon Anatolyevich – master, operator of 4th scientific company Military Innovation Technopolis «ERA», 28, Pionersky Prospekt, Anapa, Krasnodar Territory, 353456, Russia. E-mail: columbia1996@mail.ru

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Vinogradov E.A., Stepanov V.V., Egorov S.A., Krupnov A.V. Trends of digital transformation of the Russian electric grid complex // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 2 (6), pp. 39–45.

УДК 621.499.4

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

С.А. Егоров¹, В.В. Степанов¹, Е.А. Виноградов¹, А.В. Крупнов²

¹ФГАУ ВИТ «ЭРА» (г. Анапа)

²Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В статье приводится анализ характеристик тепловых двигателей при изменении температуры и давления окружающей среды на мощность и экономичность тепловых двигателей, работающих в диапазоне изменения температуры воздуха от -40 до +40 °С. Наибольшее влияние на мощность оказывает плотность воздуха на входе, а последняя – прямо пропорциональная давлению окружающей среды. Поэтому было рассмотрено только влияние температуры на характеристики теплового двигателя.

Ключевые слова: газотурбинная установка, термический КПД, температура воздуха, мощность.

ВВЕДЕНИЕ

Давление и температура окружающей среды P_n и T_n заметно влияют на мощность, экономичность и другие параметры тепловых двигателей: газотурбинных установок (ГТУ), паротурбинных установок (ПТУ), парогазовых установок, дизелей, газовых двигателей, бензиновых двигателей.

С поднятием на высоту давление быстро падает и, несмотря на снижение температуры, плотность воздуха ρ_n интенсивно уменьшается. Например, на уровне моря при стандартных условиях ($H = 0$) $P_n = 0,1013$ МПа, $T_n = 288$ К, $\rho_n = 1,22$ кг/м³. На высоте $H = 11$ км $P_n = 0,0226$ МПа, $T_n = 216,5$ К, $\rho_n = 0,333$ кг/м³. Таким образом, на высоте 11 км плотность воздуха падает в 2,97 раза. По грубым прикидкам это приводит к снижению мощности в 3 раза. Однако столь высокий подъем на высоту бывает только в авиации. У наземных двигателей в подавляющем большинстве случаев (кроме малонаселенных горных районов) высота меняется менее, чем на 1 км, что приводит к уменьшению давления примерно на 10 %. В связи с этим ниже будем рассматривать в основном влияние температуры воздуха на работу двигателя.

Изменение температуры воздуха бывает весьма значительным. Так, в странах с континентальным климатом, особенно на юге, зимой температура падает до -30 °С, а летом повышается до +50 °С. Такие колебания температуры при стандартном явлении приводят к снижению плотности воздуха от 1,35 до 1,09 кг/м³. В средней полосе России нередко бывают морозы до -30 °С и летняя жара до +35 °С, что очень сильно влияет на показатели двигателей.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ГТУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Сильнее всего на температуру окружающей среды реагируют газотурбинные установки. Это объясняется тем, что работа компрессора пропорциональна температуре воздуха в Кельвинах, а расход воздуха обратно пропорционален T_n . Это означает, что при повышении температуры с $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (253 К) до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (323 К) работа компрессора возрастает в 1,27 раза и во столько же падает расход воздуха.

Как известно из теории ГТУ [1], такое повышение работы компрессора снижает мощность ГТУ на 50 % и больше. Несколько слабее падает экономичность. В связи с очень сильным влиянием температуры на мощность и экономичность ГТУ этому вопросу посвящается значительное место в различных исследованиях по теории ГТУ [2].

На показатели энергетических характеристик ГТУ достаточно сильное влияние оказывают климатические условия (температура, относительная влажность, барометрическое давление перед компрессором ГТУ).

Среди всех режимных и эксплуатационных факторов наиболее сильно влияет на показатели ГТУ температура наружного воздуха, что связано с затратами мощности на сжатие воздуха в компрессоре при изменении его плотности. На привод осевого воздушного компрессора ГТУ расходуется значительная часть мощности, вырабатываемой газовой турбиной [3].

Во всех случаях при изменении давления, температуры или влажности наружного воздуха изменяется его плотность. Например, уменьшение плотности снижает мощность ГТУ и изменяет все ее характеристики, снижает массовый расход воздуха, забираемого из атмосферы компрессором [4].

Как отмечалось выше, при повышении температуры воздуха работа компрессора растет, а πk падает. Последнее дополнительно приводит к уменьшению расхода воздуха через двигатель. Увеличение работы компрессора, снижение расхода воздуха и его плотности уменьшают мощность и экономичность ГТУ. При уменьшении температуры воздуха работа компрессора уменьшается, величина πk растет, плотность воздуха и его расход увеличиваются. Мощность ГТУ при этом растет. Последнее возникает только в том случае, если при отрицательной температуре воздуха температура газа перед турбиной сохраняется постоянной или незначительно падает. Заметим, что если с падением температуры наружного воздуха T_n отношение температуры воздуха на входе в ГТУ к температуре наружного воздуха T_t/T_n будет сохраняться постоянным, то мощность ГТУ не только не будет расти, но и станет падать. Это показано ниже.

Если сохранить условия подобия, то при отклонении давления и температуры воздуха от стандартных величин должны выполняться условия газодинамического подобия.

Для этого должны сохраняться постоянными следующие безразмерные и условно безразмерные величины:

$$\frac{Ne \cdot 0,1013\sqrt{288}}{P_n \cdot \sqrt{T_n}} = const; g_s = const;$$

$$\frac{G_T \cdot 0,1013\sqrt{288}}{P_n \cdot \sqrt{T_n}} = const; \eta_s = const;$$

$$\frac{T_H^* \cdot 288}{T_H} = const; \pi k = const.$$

Как следует из формул выше, для выполнения условий подобий при температуре 40 °С (323 К) мощность должна возрасти пропорционально $\sqrt{\frac{323}{288}} = 1,06$, т.е. на 6 %.

Температура газа должна повыситься на 12 %, или не более, чем на 100 °С, экономичность будет неизменна.

При $t_n = -30$ °С (258 К) мощность уменьшится пропорционально $\sqrt{\frac{258}{288}} = 0,9$, т.е. на 10 %, а температура газа должна снизиться на 20 %, или на 200 °С. Величины g_e и η_e останутся неизменными.

В связи с тем, что температуру газа перед турбиной нельзя повышать более, чем на 5–10 °С, обычно температуру газа перед турбиной поддерживают близкой к постоянной. Практически это означает сохранение постоянной частоты вращения компрессоров.

Зависимость мощности от температуры выражается полуэмпирической формулой

$$Ne = Ne_o[1 - a(288 - T_n)],$$

где Ne_o – мощность при $t_n = 15$ °С; $a = (0,009-0,01)$ – для двухвальных ГТУ; $a = (0,012-0,013)$ – для трехвальных ГТУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно считать при увеличении температуры воздуха на 1 °С мощность двухвальных ГТУ уменьшается на 0,9–1 %, а трехвальной ГТУ – на 1,2–1,3 %.

Проведя анализ влияния температуры на тепловой двигатель, можно сделать вывод, что при увеличении температуры воздуха на 1 °С мощность двухвальных ГТУ уменьшается на 0,9–1 %, а трехвальной ГТУ – на 1,2–1,3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 584 с.
2. Латыпов Р.Ш. Вопросы рациональной эксплуатации газотурбинных установок. Уфа: УГНТУ, 2000. 100 с.
3. Антипов Ю.А., Барский И.А., Шаталов И.К., Терехов Д.В. Улучшение характеристик газотурбинных установок при повышенных температурах воздуха // *Вестник российского университета дружбы народов. Серия: инженерные исследования*. 2009. № 2. С. 75–79.
4. Антипов Ю.А., Барский И.А., Шаталов И.К., Натха Д.В. Мощность и экономичность парогазовых установок при изменении температуры и давления окружающей среды // *Промышленная энергетика*. 2010. № 12. С. 34–37.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕГОРОВ Семен Анатольевич – магистр, оператор 4-й научной роты ФГАУ Военный инновационный технополис «ЭРА», 353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр-т, д. 28. E-mail: columbia1996@mail.ru

СТЕПАНОВ Владимир Викторович – магистр, оператор 4-й научной роты ФГАУ Военный инновационный технополис «ЭРА», 353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр-т, д. 28. E-mail: vladimiraven@mail.ru

ВИНОГРАДОВ Егор Алексеевич – магистр, оператор 4-й научной роты ФГАУ Военный инновационный технополис «ЭРА», 353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр-т, д. 28. E-mail: Vinogradov.EgA@gmail.com

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Егоров С.А., Степанов В.В., Виноградов Е.А., Крупнов А.В. Анализ характеристик теплового двигателя при изменении условий окружающей среды // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 2 (6). С. 45–49.

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF A HEAT ENGINE AT CHANGING OF THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS

S.A. Egorov¹, V.V. Stepanov¹, E.A. Vinogradov¹, A.V. Krupnov²

¹*Military innovative technopolis "ERA" (Krasnodar Territory, Anapa)*

²*Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The article provides analysis of the characteristics of the heat engine when the temperature and pressure of the environment on the capacity and efficiency of thermal engines operating in the range of temperature from – 40 to +40 °C. The density of the air at the inlet has the greatest effect on power, and the latter is directly proportional to the ambient pressure. Therefore, only the effect of temperature on the characteristics of the heat engine was considered.

Keywords: gas turbine plant, thermal efficiency, air temperature, power.

REFERENCES

1. Tsanev S.V., Burov V.D., Remezov A.N. Gas Turbine and steam-gas installations of thermal power plants. Moscow: publishing house of MEI, 2006. 584 p.
2. Latypov R.Sh. Questions of rational operation of gas turbine installations. Ufa: UGNTU, 2000. 100 p.
3. Antipov Yu.A., Barsky I.A., Shatalov I.K., Terekhov D.V. Improvement of gas turbine performance at high temperatures of ambient air. *Vestnik rossijskogo universiteta druzhby narodov. Series: Inzhenernye issledovaniya*. 2009. No. 2, pp. 75–79. (In Russian).
4. Antipov Y.A., Barsky I.A., Shatalov I.K., Natha D.V. Power and efficiency of steam-gas installations at changes in temperature and pressure of the environment. *Promyshlennaya energetika*. 2010. No. 12, pp. 34–37. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

EGOROV Semyon Anatolyevich – master, operator of 4th scientific company Military Innovation Technopolis «ERA», 28, Pionersky Prospekt, Anapa, Krasnodar Territory, 353456, Russia. E-mail: columbia1996@mail.ru

STEPANOV Vladimir Viktorovich – master, operator of 4th scientific company Military Innovation Technopolis «ERA», 28, Pionersky Prospekt, Anapa, Krasnodar Territory, 353456, Russia. E-mail: vladimiraven@mail.ru

VINOGRADOV Egor Alekseevich – master, operator of 4th scientific company Military Innovation Technopolis «ERA», 28, Pionersky Prospekt, Anapa, Krasnodar Territory, 353456, Russia. E-mail: Vinogradov.EgA@gmail.com

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Egorov S.A., Stepanov V.V., Vinogradov E.A., Krupnov A.V. Analysis of characteristics of a heat engine at changing of the environmental conditions // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 2 (6), pp. 45–49.

УДК 621.3.011.713

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ НАГРУЗКИ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

И.П. Попов

Курганский государственный университет (г. Курган)

Аннотация. Амплитуда ЭДС обмотки вращающейся электрической машины зависит от частоты, следовательно, можно предположить, что амплитуды тока и вращающего момента для индуктивной синхронной электрической машины также зависят от частоты. В связи с этим в статье приводятся доказательства теорем: амплитуда тока в индуктивной нагрузке индуктивной синхронной электрической машины не зависит от частоты вращения; амплитуда вращающего момента для индуктивной синхронной электрической машины с индуктивной нагрузкой не зависит от частоты вращения; амплитуда напряжения на емкостной нагрузке емкостной синхронной электрической машины не зависит от частоты вращения; амплитуда вращающего момента для емкостной синхронной электрической машины с емкостной нагрузкой не зависит от частоты вращения.

Ключевые слова: синхронная машина, индуктивная нагрузка, ток, момент, амплитуда.

ВВЕДЕНИЕ

Представляет интерес поведение синхронных электрических машин при различном характере нагрузки. Для индуктивной синхронной электрической машины это зависимость амплитуды тока и вращающего момента от нагрузки, для емкостной синхронной электрической машины – это зависимость амплитуды напряжения и вращающего момента.

Потокосцепление обмотки вращающейся электрической машины

$$\psi = \Psi_m \cos \omega t.$$

ЭДС обмотки определяется выражением

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = \omega \Psi_m \sin \omega t.$$

Амплитуда ЭДС

$$E_m = \omega \Psi_m$$

зависит от частоты, в связи с этим можно предположить, что амплитуды тока и вращающего момента для индуктивной синхронной электрической машины (амплитуды напряжения и вращающего момента для емкостной машины) также зависят от частоты. В действительности это происходит не всегда. Существенную роль играет характер нагрузки электрической машины.

Цель исследования – установление влияния нагрузки на чувствительность синхронной электрической машины к частоте.

Задачи работы – получить доказательные на уровне теорем результаты.

Актуальность работы обусловлена широким распространением синхронных электрических машин, используемых, в частности, в качестве генераторов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе исследования применялись общенаучные и математизированные методы, а также электротехнические расчеты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ток и момент индуктивной синхронной электрической машины при индуктивной нагрузке

Пусть нагрузкой фазы индуктивной синхронной электрической машины является катушка индуктивности [1]. Далее суммарная индуктивность катушки и обмотки машины обозначается L ; число витков обмотки – n ; длина активной части витка – l ; индукция магнитного поля в рабочем зазоре – B ; угол поворота ротора – φ ; частота вращения – $\omega = d\varphi/dt$; ток – i ; число полюсов – два; диаметр ротора – D_r . Активные электрические и механические потери не учитываются [2, 3].

Для синхронной машины с индуктивной нагрузкой справедливы следующие теоремы.

Теорема 1. Амплитуда тока в индуктивной нагрузке индуктивной синхронной электрической машины не зависит от частоты вращения.

Доказательство. При указанных допущениях справедливо равенство (второй закон Кирхгофа и закон электромагнитной индукции применительно к вращающейся машине):

$$Bln \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi = L \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

Интегрирование этого выражения дает

$$i = -\frac{Bln D_r}{L} \frac{1}{2} \cos \varphi + I_0 = -I_m \cos \varphi + I_0.$$

Начальный ток I_0 можно положить равным нулю.

Амплитуда тока

$$I_m = \frac{Bln}{L} \frac{D_r}{2}$$

от частоты вращения ω не зависит. Теорема доказана.

Теорема 2. Амплитуда вращающего момента для индуктивной синхронной электрической машины с индуктивной нагрузкой не зависит от частоты вращения.

Доказательство. При указанных допущениях вращающий момент в соответствии с законом Ампера (применительно к вращающей машине):

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

Амплитуда вращающего момента

$$M_m = \frac{(Bln)^2}{L} \frac{D_r^2}{8}$$

от частоты вращения ω не зависит. Теорема доказана.

Правомерен вопрос – а как обстоит дело при другом характере нагрузки синхронной электрической машины?

Ток и момент при другом характере нагрузки

При активной нагрузке аналог уравнения (1) имеет вид

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

Амплитуда тока

$$I_m = \frac{Bln}{R} \frac{D_r}{2} \omega$$

от частоты вращения ω зависит (линейно).

Вращающий момент

$$\begin{aligned} \mu &= Blni \frac{D_r}{2} \sin \varphi = Bln \frac{Bln}{R} \frac{D_r}{2} \omega \sin \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= \frac{(Bln)^2}{R} \frac{D_r^2}{8} \omega \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Амплитуда вращающего момента

$$M_m = \frac{(Bln)^2}{R} \frac{D_r^2}{8} \omega$$

от частоты вращения ω зависит (линейно).

При емкостной нагрузке [4–6] аналог уравнения (1) имеет вид

$$Bln \frac{D_r}{2} \omega \sin \omega t = \frac{1}{C} \int_0^t i dt.$$

Дифференцирование этого выражения дает

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

Амплитуда тока

$$I_m = BlnC \frac{D_r}{2} \omega^2$$

от частоты вращения ω зависит (квадратично).

Вращающий момент

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

Амплитуда вращающего момента

$$M_m = (Bln)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^2$$

от частоты вращения ω зависит (квадратично).

Зависимость мощности от характера нагрузки

Для индуктивной нагрузки реактивная электрическая мощность

$$Q = I^2 X_L = I^2 \omega L = \frac{(Bln)^2}{L} \frac{D_r^2}{8} \omega, \quad (2)$$

где I – действующее значение тока;

механическая мощность

$$Q_M = M \omega = \frac{(Bln)^2}{L} \frac{D_r^2}{8} \omega. \quad (3)$$

Разумеется, (2) и (3) совпали.

Мощность линейно зависит от частоты.

Для резистивной нагрузки активная электрическая мощность

$$P = I^2 R = \frac{(Bln)^2}{R} \frac{D_r^2}{8} \omega^2; \quad (4)$$

механическая мощность

$$P_M = M \omega = \frac{(Bln)^2}{R} \frac{D_r^2}{8} \omega^2. \quad (5)$$

Разумеется, (4) и (5) совпали.

Мощность квадратично зависит от частоты.

Для емкостной нагрузки реактивная электрическая мощность

$$Q = I^2 X_C = I^2 \frac{1}{\omega C} = (Bln)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^3; \quad (6)$$

механическая мощность

$$Q_C = M \omega = (Bln)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^3. \quad (7)$$

Разумеется, (6) и (7) совпали.

Мощность кубично зависит от частоты.

Напряжение и момент емкостной синхронной электрической машины при емкостной нагрузке

Дуальным аналогом индуктивной синхронной электрической машины является емкостная синхронная электрическая машина.

В соответствии с законом магнитоэлектрической индукции (дуальный аналог закона электромагнитной индукции) ток

$$i = Dbv, \quad (8)$$

где D – электрическая индукция (электрическое смещение) в рабочем зазоре; b – ширина электрода; v – линейная скорость.

Выражение (8) можно преобразовать:

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= Db \frac{dx}{dt}; \\ dq &= Db dx; \\ \int_0^q dq &= Db \int_0^x dx; \\ q &= Dbx. \end{aligned}$$

С учетом последнего уравнения сила, действующая на электрод:

$$F = qE = q \frac{u}{x} = Db u. \quad (9)$$

Это дуальный аналог закона Ампера для электрического (магнитоэлектрического) взаимодействия. Здесь E – напряженность электрического поля, u – напряжение. Электрический ток

$$i = C \frac{du}{dt}. \quad (10)$$

Замечание. Формулы (8) и (9) могут быть получены из их электромагнитных аналогов путем простой дуально-инверсной замены величин $e \rightarrow i$, $B \rightarrow D$, $l \rightarrow b$, $i \rightarrow u$ [7].

Теорема 3. Амплитуда напряжения на емкостной нагрузке емкостной синхронной электрической машины не зависит от частоты вращения.

Доказательство. Для вращательной машины уравнение для тока с учетом (8) и (10) имеет вид

$$Db \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi = C \frac{du}{dt}.$$

Интегрирование этого выражения дает

$$u = -\frac{Db D_r}{C} \frac{1}{2} \cos \varphi + U_0 = -U_m \cos \varphi + U_0. \quad (11)$$

Амплитуда напряжения

$$U_m = \frac{Db D_r}{C} \quad (12)$$

от частоты вращения ω не зависит. Теорема доказана.

Теорема 4. Амплитуда вращающего момента для емкостной синхронной электрической машины с емкостной нагрузкой не зависит от частоты вращения.

Доказательство. Вращающий момент в соответствии с (9), (11) и (12) применительно к вращающейся машине

$$\begin{aligned}\mu &= Dbu \frac{D_r}{2} \sin \varphi = -DbU_m \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= -Db \frac{Db}{C} \frac{D_r}{2} \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi = \\ &= -\frac{D^2 b^2}{C} \frac{D_r^2}{8} \sin 2\varphi.\end{aligned}$$

Амплитуда вращающего момента

$$M_m = \frac{D^2 b^2}{C} \frac{D_r^2}{8}$$

от частоты вращения ω не зависит. Теорема доказана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, вопреки возможному интуитивному предположению, для индуктивной синхронной электрической машины с индуктивной нагрузкой амплитуды тока и вращающего момента от частоты вращения не зависят. При другом характере нагрузки – зависят. Для емкостной синхронной электрической машины с емкостной нагрузкой [9–10] амплитуды напряжения и вращающего момента от частоты вращения не зависят. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании электрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П., Попов Д.П., Кубарева С.Ю. Индуктивно-индуктивная колебательная система // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. 2013. Вып. 8. № 2 (29). С. 78–79.
2. Попов И.П. Электромагнитный маховик для ориентирования орбитальных объектов // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2019. № 2. С. 15–17.
3. Попов И.П. Накопитель энергии для транспортно-технологических машин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2019. Т. 19. № 4. С. 61–68. DOI: 10.14529/engin190407
4. Патент РФ 2086065 С1. Электрическое емкостное устройство / И.П. Попов. Заявл. 28.03.1994. Опубл. 27.07.1997. Бюл. № 21.
5. Попов И.П., Попов Д.П., Кубарева С.Ю. Вращательное инертно-емкостное зарядно-разрядное устройство // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. 2012. Вып. 7. № 2 (24). С. 85–86.
6. Попов И.П. Инертно-емкостной накопитель энергии для маневрового тепловоза // *Мир транспорта*. 2019. Том 17. № 3. С. 82–87. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-82-87
7. Попов И.П. О некоторых изоморфизмах между электромагнитными и магнито-электрическими соотношениями // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. 2010. Вып. 5. № 1 (17). С. 94–96.

8. Попов И.П., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Емкостно-емкостная колебательная система // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. 2014. Вып. 9. № 2 (33). С. 21–23.
9. Попов И.П. Вращательные инертно-емкостные устройства // *Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки*. 2011. № 3 (31). С. 191–196.
10. Попов И.П. Математическая модель искусственной электрической емкости для снижения пиковой нагрузки маневрового тепловоза // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2019. № 3. С. 57–64. DOI: 10.15593/2499-9873/2019.3.03

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.

AMPLITUDE-FREQUENCY FEATURES OF THE LOAD MODES OF THE SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINE

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. The magnitude of the EMF of the winding of a rotating electric machine depends on the frequency, and therefore it can be assumed that the amplitudes of current and torque for an inductive synchronous electric machine (amplitudes of voltage and torque for a capacitive machine) also depend on frequency. In this regard, the article provides evidence of theorems: the current amplitude in an inductive load of an inductive synchronous electric machine does not depend on the rotational speed; the torque amplitude for an inductive synchronous electric machine with inductive load does not depend on the rotational speed; the voltage amplitude on a capacitive load of a capacitive synchronous electric machine does not depend on the rotation frequency; the amplitude and torque for a capacitive synchronous electric machine with a capacitive load does not depend on the rotational speed.

Keywords: synchronous machine, inductive load, current, torque, amplitude.

REFERENCES

1. Popov I.P., Popov D.P., Kubareva S.Yu. Inductive-inductive oscillatory system. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. Iss. 8. 2013. No. 2 (29), pp. 78–79. (In Russian).

2. Popov I.P. Electromagnetic flywheel for orienting orbital objects. *Oboronnyy kompleks — nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. 2019. No. 2, pp. 15–17. (In Russian).
3. Popov I.P. Energy storage for transport-technological machines. *Vestnik YUUrGU. Seriya «Mashinostroyeniye»*. 2019. V. 19/ No. 4, pp. 61–68. DOI: 10.14529/engin190407 (In Russian).
4. Patent RF 2086065 C1. *Elektricheskoye yemkostnoye ustroystvo* [Electric capacitive device]. I.P. Popov. Declared 28.03.1994. Published 27.07.1997. Bulletin No. 21. (In Russian).
5. Popov I.P., Popov D.P., Kubareva S.Yu. Rotational inertial-capacitive charge-discharge device. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. Iss. 7. 2012. No. 2(24), pp. 85–86. (In Russian).
6. Popov I.P. Inertial-capacitive energy storage for a shunting diesel locomotive. *Mir transporta*. 2019. Vol. 17. No. 3, pp. 82–87. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-82-87 (In Russian).
7. Popov I.P. On some isomorphisms between electromagnetic and magnetoelectric relationships. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2010. Iss. 5. No. 1 (17), pp. 94–96. (In Russian).
8. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. Capacitive-capacitive oscillatory system. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2014. Iss. 9. No. 2 (33), pp. 21–23. (In Russian).
9. Popov I.P. Rotational inertial-capacitive device. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2011. No. 3 (31), pp. 191–196. (In Russian).
10. Popov I.P. A mathematical model of artificial electric capacity to reduce the peak load of a shunting diesel locomotive. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya*. 2019. No. 3, pp. 57–64. DOI: 10.15593/2499-9873/2019.3.03 (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – Senior Lecturer of the Department Technology of mechanical engineering, machine tools and instruments, Kurgan State University, 63/4, Sovetskaja, Kurgan, 640020, Russia. E-mail: ip.popov@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Amplitude-frequency features of the load modes of the synchronous electric machine // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 1 (5), pp. 49–56.

УДК 62-214

О ЦЕНТРАХ СИММЕТРИИ ФУНКЦИИ, ОПРЕДЕЛЕННОЙ В ВЫПУКЛОЙ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВА

*Ал.Ан. Шум¹, А.М. Ветошкин², Ан.Ал. Шум¹*¹*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*²*Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Мытищи, Московская область)*

Аннотация. Рассматриваются введенные в предыдущей работе авторов понятия центра s -симметрии и центра c -симметрии функции, определенной в некоторой области пространства. Устанавливается, что в любой выпуклой области пространства можно так определить функцию трех переменных, что ее центр s -симметрии (центр c -симметрии) будет находиться в любой наперед заданной внутренней точке этой области.

Ключевые слова: симметрия, c -симметрия, s -симметрия, центр симметрии, функция плотности, тело, деталь, масса, центр масс, электрическая машина.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии и методы механической и физико-технической обработки деталей машин многочисленны и разнообразны (об этом можно судить по названиям [1–13]). Между тем для неоднородной детали выбор той или иной конкретной технологии зависит от характера распределения массы внутри обрабатываемой детали. Такое распределение особенно важно учитывать при изготовлении и балансировке вращающихся деталей электрических машин (так, например, качество исполнения ротора электрической машины непосредственно определяет длительность его безаварийной работы).

Поскольку распределение массы внутри детали определяется соответствующей функцией плотности, то представляет интерес изучение свойств функции плотности и конкретно тех из них, которые обусловлены каким-либо видом симметрии. В работах [14–20] изучались вопросы симметрии функции плотности, зависящей от двух переменных, и рассматривались плоские детали (называемые *пластинами* [16]). В статьях [21–23] рассматривалась уже функция плотности, зависящая от трех переменных, и, таким образом, изучались объемные детали. Настоящая статья продолжает исследования симметрии объемных деталей (называемых *телами* [23]). Однако если в статье [23] рассматривались тела произвольной формы и использовалась прямоугольная система координат, то в настоящей работе привлекаются к рассмотрению *выпуклые* тела и используется сферическая система координат. Устанавливается, что для произвольно заданных границ выпуклого тела можно так определить плотность, что центр s -симметрии (центр c -симметрии) этого тела будет находиться в любой наперед заданной внутренней его точке. Это утверждение может быть сформулировано и таким образом: в любой *выпуклой* области пространства можно так определить функцию трех переменных, что центр ее s -симметрии (центр ее c -симметрии) будет находиться в любой наперед заданной внутренней точке рассматриваемой области. Следует отметить, что данный результат представляет собой естественный перенос на случай функции трех переменных аналогичного результата, полученного в работе [17] для случая функции двух переменных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Рассматривается трехмерное евклидово пространство. Под *областью* понимается замкнутая область этого пространства, ограниченная некоторой поверхностью (которая называется *границей* этой области и также считается ее частью). Точки области, не лежащие на ее границе, являются *внутренними* точками этой области. Область называется *выпуклой*, если всякая прямая, проведенная через любую внутреннюю точку этой области, пересекает ее границу ровно в двух точках.

Рассматриваем непрерывные функции трех переменных, определенные в некоторой области V . Эти функции удобно записывать в виде $f(\rho, \varphi, \theta)$, считая заданной подходящую сферическую систему координат (отметим, что при переходе от одной системы координат к другой выражение функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ через координаты изменяется, хотя сама функция, как функция точки, остается неизменной).

В соответствии с [23] точка пространства является *центром s-симметрии* функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ в области V , если любая плоскость, проведенная через эту точку, делит область V на две области V_1 и V_2 так, что

$$\iint_{V_1} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \iint_{V_2} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta$$

(заметим, что значения интегралов в левой и правой части равенства не зависят от выбора системы координат, а значит и данное определение инвариантно по отношению к этому выбору). В случае, когда функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ определяет плотность материала, заполняющего область V , значения интегралов представляют собой [24, 25] массы областей V_1 и V_2 . В этом случае точка будет центром s -симметрии функции тогда и только тогда, когда любая плоскость, проведенная через нее, будет делить область V на две части одинаковой массы (центр s -симметрии функции в этом случае также называют *центром полумасс* соответствующего тела [23]).

Предполагается, что переменные ρ и θ функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ меняются в следующих пределах: $0 \leq \rho < +\infty$, $0 \leq \theta \leq \pi$. Предполагается также, что эта функция имеет период 2π по переменной φ (это значит, что $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \varphi + 2\pi, \theta)$ для любого φ и любых $\rho \in [0; +\infty)$ и $\theta \in [0; \pi]$). Если изначально такая функция определена только для значений аргумента φ из некоторого промежутка длиной 2π , то предполагается, что она автоматически продолжается до периодической (по переменной φ) с периодом 2π . Функцию углов сферической системы координат $F(\varphi, \theta)$ называем *центросимметричной*, если $F(\varphi, \theta) = F(\varphi - \pi, \pi - \theta)$ при любых значениях φ и любом $\theta \in [0; \pi]$.

Лемма. Пусть начало сферической системы координат является внутренней точкой некоторой выпуклой области V , $r(\varphi, \theta)$ – расстояние от данного начала координат до границы области вдоль луча, определяемого углами φ и θ , и функция этих углов $F(\varphi, \theta) = \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho$ центросимметрична. Тогда функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ является s -симметричной в области V .

Доказательство.

Пусть функция $F(\varphi, \theta) = \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho$ является центросимметричной.

Докажем, что функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ является s -симметричной в области V . Через $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$ обозначаем часть области V , высекаемую пространственным углом

$$\begin{cases} \alpha_1 \leq \varphi \leq \alpha_2, \\ \beta_1 \leq \theta \leq \beta_2. \end{cases}$$

Масса этой части области

$$\begin{aligned} \iiint_{B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta &= \int_{\beta_1}^{\beta_2} d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\varphi \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho = \\ &= \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\varphi \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(\varphi, \theta) d\varphi. \end{aligned}$$

Симметричным для рассмотренного пространственного угла будет угол

$$\begin{cases} \alpha_1 + \pi \leq \varphi \leq \alpha_2 + \pi, \\ \pi - \beta_2 \leq \theta \leq \pi - \beta_1. \end{cases}$$

Часть области V , высекаемая этим пространственным углом, будет $B_{\alpha_1 + \pi, \alpha_2 + \pi}^{\pi - \beta_2, \pi - \beta_1}$, а ее масса

$$\begin{aligned} \iiint_{B_{\alpha_1 + \pi, \alpha_2 + \pi}^{\pi - \beta_2, \pi - \beta_1}} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta &= \int_{\pi - \beta_2}^{\pi - \beta_1} d\theta \int_{\alpha_1 + \pi}^{\alpha_2 + \pi} d\varphi \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho = \\ &= \int_{\pi - \beta_2}^{\pi - \beta_1} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1 + \pi}^{\alpha_2 + \pi} d\varphi \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho = \int_{\pi - \beta_2}^{\pi - \beta_1} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1 + \pi}^{\alpha_2 + \pi} F(\varphi, \theta) d\varphi = \left\{ \begin{array}{l} x = \varphi + \pi \\ \varphi = x - \pi \\ d\varphi = dx \end{array} \right\} = \\ &= \int_{\pi - \beta_2}^{\pi - \beta_1} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1 + 2\pi}^{\alpha_2 + 2\pi} F(x - \pi, \theta) dx = \left\{ \begin{array}{l} y = \pi - \theta \\ \theta = \pi - y \\ d\theta = -dy \end{array} \right\} = - \int_{\beta_2}^{\beta_1} \sin(\pi - y) dy \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(x - \pi, \pi - y) dx = \\ &= \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin y dy \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(x - \pi, \pi - y) dx = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(\varphi - \pi, \pi - \theta) d\varphi = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(\varphi, \theta) d\varphi. \end{aligned}$$

Таким образом, массы противоположных частей области $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$ и $B_{\alpha_1 + \pi, \alpha_2 + \pi}^{\pi - \beta_2, \pi - \beta_1}$ одинаковы. Пусть теперь исходная область V разбита на две части V_1 и V_2 плоскостью, проведенной через начало координат. Каждая часть может быть представлена как объединение (быть может, бесконечное) элементарных частей вида $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$. Каждой такой

элементарной части из области V_1 отвечает симметричная элементарная часть из области V_2 , имеющая точно такую же массу. Следовательно, части V_1 и V_2 также имеют равные массы. Этим доказано, что функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ является s -симметричной.

Доказанная лемма распространяет достаточный критерий s -симметрии функции трех переменных, установленный в [22] для случая шара, на случай произвольной выпуклой области пространства.

Теорема 1. Для любой внутренней точки выпуклой области V можно определить в области V такую функцию $f(\rho, \varphi, \theta)$, центр s -симметрии которой будет находиться именно в этой точке.

Доказательство.

Выберем начало сферической системы координат в той внутренней точке области V , в которой должен быть центр s -симметрии функции $f(\rho, \varphi, \theta)$. Пусть $r(\varphi, \theta)$ – расстояние от начала координат до границы области вдоль луча, определяемого углами φ и θ . Определим требуемую функцию так: $f(\rho, \varphi, \theta) = \frac{\rho}{[r(\varphi, \theta)]^4}$. Тогда

$$F(\varphi, \theta) = \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho = \int_0^{r(\varphi, \theta)} \frac{\rho}{[r(\varphi, \theta)]^4} \rho^2 d\rho = \frac{\rho^4}{4[r(\varphi, \theta)]^4} \Big|_0^{r(\varphi, \theta)} = \frac{1}{4}.$$

Таким образом, функция $F(\varphi, \theta)$ постоянна, а значит, является и периодической с периодом π . Поэтому (в силу доказанной выше леммы) центр s -симметрии функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ находится в начале координат, т.е. именно в нужной точке, и теорема доказана.

Следует отметить, что построенная в этом доказательстве функция непрерывна, неотрицательна и притом обращается в ноль лишь в начале координат, следовательно, она удовлетворяет всем принятым в [23] ограничениям.

В соответствии с [23] точка плоскости является *центром s -симметрии* функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ в области V , если любая плоскость, проведенная через эту точку, делит область V на две области V_1 и V_2 так, что

$$\iiint_{V_1} R(\rho, \varphi, \theta) f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \iiint_{V_2} R(\rho, \varphi, \theta) f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta,$$

где $R(\rho, \varphi, \theta)$ – расстояние от точки (ρ, φ, θ) до проведенной плоскости (заметим, что значения интегралов в левой и правой части равенства не зависят от выбора системы координат, поэтому рассмотренное определение инвариантно по отношению к этому выбору). В случае, когда функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ определяет плотность материала, заполняющего область V , центр ее s -симметрии представляет собой *центр масс* [24, 25] соответствующего тела.

Теорема 2. Для любой внутренней точки выпуклой области V можно определить в области V такую функцию $f(\rho, \varphi, \theta)$, центр s -симметрии которой будет находиться именно в этой точке.

Доказательство.

Выберем начало сферической системы координат в той внутренней точке области V , в которой должен быть центр s -симметрии функции $f(\rho, \varphi, \theta)$. Пусть $r(\varphi, \theta)$ – расстояние от начала координат до границы области вдоль луча, определяемого углами

φ и θ . Определим требуемую функцию так: $f(\rho, \varphi, \theta) = \frac{\rho}{[r(\varphi, \theta)]^5}$. Эта функция непрерывна и неотрицательна, причем обращается в ноль только в начале координат. Таким образом, она удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к функциям двух переменных в [23], и может рассматриваться как функция плотности соответствующего тела. Из теоремы 1 статьи [23] вытекает, что центр масс этого тела, а значит и центр s -симметрии функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ находится в начале координат в том и только том случае, когда выполнены следующие условия:

$$\begin{cases} \iiint_V f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \cos \varphi \sin^2 \theta d\rho d\varphi d\theta = 0, \\ \iiint_V f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \sin \varphi \sin^2 \theta d\rho d\varphi d\theta = 0, \\ \iiint_V f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \cos \theta \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = 0. \end{cases}$$

Эти условия для определенной нами функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ выполнены:

$$\begin{aligned} \iiint_V f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \cos \varphi \sin^2 \theta d\rho d\varphi d\theta &= \iiint_V \frac{\rho}{[r(\varphi, \theta)]^5} \rho^3 \cos \varphi \sin^2 \theta d\rho d\varphi d\theta = \\ &= \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi}{[r(\varphi, \theta)]^5} d\varphi \int_0^{r(\varphi, \theta)} \rho^4 d\rho = \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi}{5} d\varphi = 0; \\ \iiint_V f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \sin \varphi \sin^2 \theta d\rho d\varphi d\theta &= \iiint_V \frac{\rho}{[r(\varphi, \theta)]^5} \rho^3 \sin \varphi \sin^2 \theta d\rho d\varphi d\theta = \\ &= \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \frac{\sin \varphi}{[r(\varphi, \theta)]^5} d\varphi \int_0^{r(\varphi, \theta)} \rho^4 d\rho = \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \frac{\sin \varphi}{5} d\varphi = 0; \\ \iiint_V f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \cos \theta \sin \theta d\rho d\varphi d\theta &= \iiint_V \frac{\rho}{[r(\varphi, \theta)]^5} \rho^3 \cos \theta \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \\ &= \int_0^\pi \cos \theta \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} \frac{1}{[r(\varphi, \theta)]^5} d\varphi \int_0^{r(\varphi, \theta)} \rho^4 d\rho = \int_0^\pi \frac{\sin 2\theta d\theta}{2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{5} d\varphi = -\frac{\pi \cos 2\theta}{10} \Big|_0^\pi = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, центр s -симметрии функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ находится в начале координат, т.е. именно в нужной точке, и теорема доказана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установленные в настоящей статье лемма и две теоремы предполагают непрерывность функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ в выпуклой области V , но не требуют выполнения условия $f(\rho, \varphi, \theta) \geq 0$ (которое принято в [23]). Между тем при выполнении этого условия

данные результаты, разумеется, остаются в силе и могут быть интерпретированы в соответствии с определениями из [23]. Функцию $f(\rho, \varphi, \theta)$ в этом случае удобно понимать как *функцию плотности*. Тогда естественно считать, что область V вместе с определенной внутри нее функцией плотности представляет собой *тело*. В соответствии с [23] центр s -симметрии (центр s -симметрии) функции плотности в области V естественно становится центром s -симметрии (центром s -симметрии) этого тела. Утверждения доказанных теорем в этом случае можно формулировать так: *для любой внутренней точки выпуклой области можно так определить функцию плотности, что полученное тело будет иметь центр s -симметрии (центр s -симметрии) именно в этой точке*. Следует отметить, что, помимо этих теорем, самостоятельный интерес представляет и доказанная лемма, которая устанавливает достаточный критерий s -симметрии функции, определенной в выпуклой области пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожжалова В.И., Седыхин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. М.: Высшая школа, 1983. Т. 1. 247 с. Т. 2. 208 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение, 1979. 487 с.
4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1981. 266 с.
5. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение, 1983. 160 с.
6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. 303 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1980. 263 с.
10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и прессформ. М.: ОНТИ ЭНИМС, 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз, 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1, 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Мн.: Новое знание, 2006. 512 с.
14. Шум Ал.А. О симметрии функций, определенных в круге // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. Вып. 25. С. 3–8.
15. Шум Ал.А. Замечание об s -симметричных функциях // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 27. С. 3–6.
16. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 30. С. 19–23.

17. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области плоскости // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 31. С. 19–22.
18. Шум Ал.А. Симметрическая линия функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 32. С. 103–105.
19. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Симметрическая линия правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 47–53.
20. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Параметрические уравнения симметрической линии правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 44–47.
21. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о симметрии функций, определенных в шаре // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 38–46.
22. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Об одном критерии s-симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 30–35.
23. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 5 (1). С. 71–78.
24. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. М.: АЙРИС ПРЕСС, 2007. 604 с.
25. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2001. Т. 3. 662 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУМ Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: shum@tstu.ver.ru

ВЕТОШКИН Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, информатики и вычислительной техники, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1.

ШУМ Анатолий Александрович – студент факультета информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области пространства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 57–65.

ABOUT THE CENTERS OF SYMMETRY OF THE FUNCTION, DEFINED IN A CONVEX AREA OF SPACE

Al.An. Shum¹, A.M. Vetoshkin², An.Al. Shum¹

¹*Tver State Technical University (Tver)*

²*Mytishchi filial of MSTU named after N. Uh. Bauman (Mytishchi, Moscow region)*

Abstract. The concepts of the center of *s*-symmetry and the center of *c*-symmetry of a function defined in a certain area of space introduced in the previous work of the authors are considered. It is established that in any convex region of space, a function of three variables can be defined in such a way that its center of *s*-symmetry (the center of *c*-symmetry) will be located at any previously specified internal point of this region.

Keywords: symmetry, *c*-symmetry, *s*-symmetry, center of symmetry, density function, body, detail, mass, center of mass, electric machine.

REFERENCES

1. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Drozhzhaylova V.I., Sedykhin F.V., Smolentsev V.P., Yampolsky V.M. Electrophysical and electrochemical methods of processing materials: *uchebnoe posobie*. In 2 v. M.: Vysshaya shkola, 1983. Vol. 1. 247 p. Vol. 2. 208 p.
2. Vereschaka A.S. The performance of the cutting tool with wear-resistant coatings. M.: Mashinostroenie, 1993. 336 p.
3. Voronichev N.M., Tartakovsky J.E., Genin V.B. Automatic lines of modular machines. M.: Mashinostroenie, 1979. 487 p.
4. Dalskiy A.M., Gavriluk V.S. Mechanical treatment of materials: *uchebnik dlya vuzov*. M.: Mechanical Engineering, 1981. 266 p.
5. Nemilov E.F. Electroerosion treatment of materials. L.: Mashinostroenie, 1983. 160 p.
6. Poduraev V.N. Automatically adjustable and combined cutting processes. M.: Mashinostroenie, 1977. 303 p.
7. Silin S.S. Method of similarity when cutting materials. M.: Mashinostroenie, 1979. 152 p.
8. Starkov V.K. Cutting processing. Stability and quality management in automated production. M.: Mashinostroenie, 1989. 297 p.
9. Trent E.M. Metal cutting. M.: Mashinostroenie, 1980. 263 p.
10. Areas for electrical discharge machining of working parts of cutting dies and molds. M.: ONTI ENIMS, 1983. 47 p.
11. Etin A.O. Kinematic analysis and selection of effective methods of processing with a climbing tool. M.: Mashgiz, 1953. 173 p.
12. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. Contact processes in electro-diamond grinding. M.: Mashinostroenie-1, 2004. 230 p.
13. Yastcheritsyn P.I., Feldshtein E.E., Korniewicz M.A. Theory of cutting. Mn.: Novoe znanie, 2006. 512 p.
14. Shum Al.A. On the symmetry of the functions defined in the circle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. Vol. 25, pp. 3–8. (In Russian).
15. Shum Al.A. The comment about *s*-symmetric functions. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. Vol. 27, pp. 3–6. (In Russian).
16. Shum Al.A. About the centers of symmetry of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. Vol. 30, pp. 19–23. (In Russian).

17. Shum Al.A. About the centers of symmetry of a function defined in a convex domain of the plane. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2017. Vol. 31, pp. 19–22. (In Russian).
18. Shum Al.A. Symmetric line of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2017. Vol. 32, pp. 103–105. (In Russian).
19. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. The symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 47–53. (In Russian).
20. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. Parametric equations of the symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 44–47. (In Russian).
21. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A note on the symmetry of functions defined in a ball. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Series «Technical Sciences»*. 2019. No. 3(3), pp. 38–46. (In Russian).
22. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On one criterion of s-symmetry of a function of three variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Series «Technical Sciences»*. 2019. No. 4 (4), pp. 30–35. (In Russian).
23. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the centers of symmetry of a function of three variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2020. No. 5 (1), pp. 71–78 (In Russian).
24. Pismennyi D.T. Lecture notes on higher mathematics (full course). M.: AIRIS PRESS, 2007. 604 p.
25. Fichtenholz G.M. Course of differential and integral calculus. M.: FIZMATLIT, 2001. Vol. 3. 662 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SHUM Alexander Anatolievich – Associate Professor of the Department of Mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shum@tstu.tver.ru

VETOSHKIN Alexander Mikhailovich – Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 1, 1st Institutskaya st., Mytishchi city, Moscow region, 141005, Russia.

SHUM Anatoliy Alexandrovich – student of the Faculty of Information Technologies, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.An., Vetoshkin A.M., Shum An.Al. About the centers of symmetry of the function, defined in a convex area of space// *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 57–65.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 674.093

О КИСЛОТНОСТИ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ

Ф.В. Качановский

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Проведен статистический анализ динамики кислотности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 1990–2019 гг. Установлено, что в последние три–четыре года наблюдавшееся ранее снижение значений водородного показателя кислотности осадков pH практически прекратилось. Подтверждена обоснованность применения для анализа полиномиальных моделей тренда ряда pH . Внутригодовая динамика кислотности осадков за последние семь лет изменилась незначительно.

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

Кислотность атмосферных осадков, выражаемая водородным показателем pH , существенно определяет состояние природной среды и является ее важной экологической характеристикой.

В статьях [1–8] представлены результаты статистического анализа, которому подвергся временной ряд показателя кислотности pH атмосферных осадков, выпадавших в Твери в последние десятилетия. Наблюдения за кислотностью осадков начаты в 1990 г. Статистический анализ ряда pH проводится ежегодно с 2009 г. [1, 8]. Рассматривается также влияние метеорологических и антропогенных факторов на кислотность осадков [3, 4]. В основе исследования лежат наблюдения, проводимые лабораторией мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии.

Результаты наблюдений за показателем pH в течение 1990–2019 гг. представлены временной последовательностью его среднемесячных значений, которые здесь и далее обозначаются как $amrH$. При сравнительно равномерных колебаниях значений $amrH$ происходит их постепенное снижение с течением времени (рис. 1). В период с октября 2005 г. по февраль 2009 г. в равномерные колебания $amrH$ вмешивается (совершает интервенцию) некоторый фактор неизвестного происхождения, приводящий к резкому увеличению амплитуды колебаний. Сравнительно непродолжительное действие (менее четырех лет) интервенции практически удваивает амплитуду колебаний $amrH$ по сравнению со средними амплитудами временного процесса.

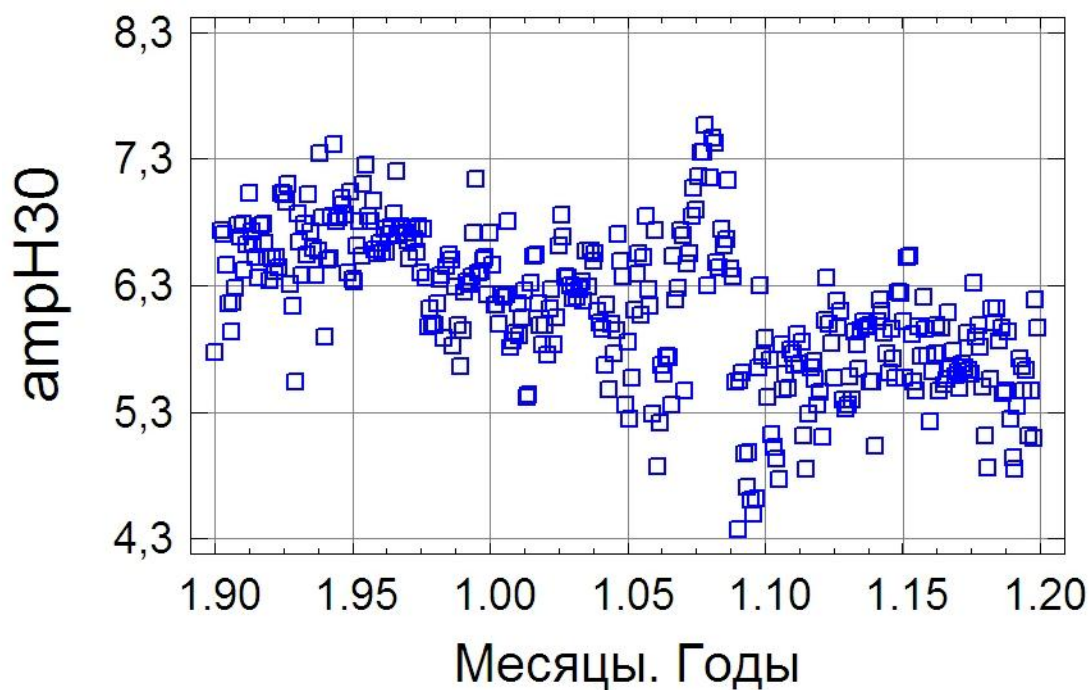


Рис. 1. Временная последовательность $amrH$ за 1990–2019 гг.

Временная последовательность среднемесячных значений величины $amrH$ рассматривается как нестационарный временной ряд. Статистическая модель последовательности состоит из четырех аддитивных компонент: трех детерминированных – циклической, сезонной и тренда – и одной случайной [8]. В качестве моделей тренда приняты полиномиальные кривые регрессии.

Тренды разной длины показывают (рис. 2), что в течение почти тридцати лет среднемесячные значения $amrH$ снижаются, т.е. кислотность атмосферных осадков, выпадающих в Твери, растет. При этом скорость снижения $amrH$ в последние несколько лет уменьшается.

По мере удлинения ряда наблюдений модель тренда $amrH$ постепенно изменялась. Пока длина ряда не превышала 15 лет, наиболее пригодной представлялась квадратическая модель, состоявшая из восходящей и нисходящей ветвей. Максимум тренда соответствовал концу второго года наблюдений (1991 г.). Дальнейшее удлинение ряда обнаружило тенденцию к уменьшению скорости снижения значений $amrH$, что побудило переход к кубической модели, учитывающей перегиб линии тренда. Кубическая модель используется с 2015 г. [5].

Срединная часть линии кубического тренда (1995–2010 гг.) сравнительно устойчива и свидетельствует о равномерном уменьшении значений $amrH$ (рис. 2).

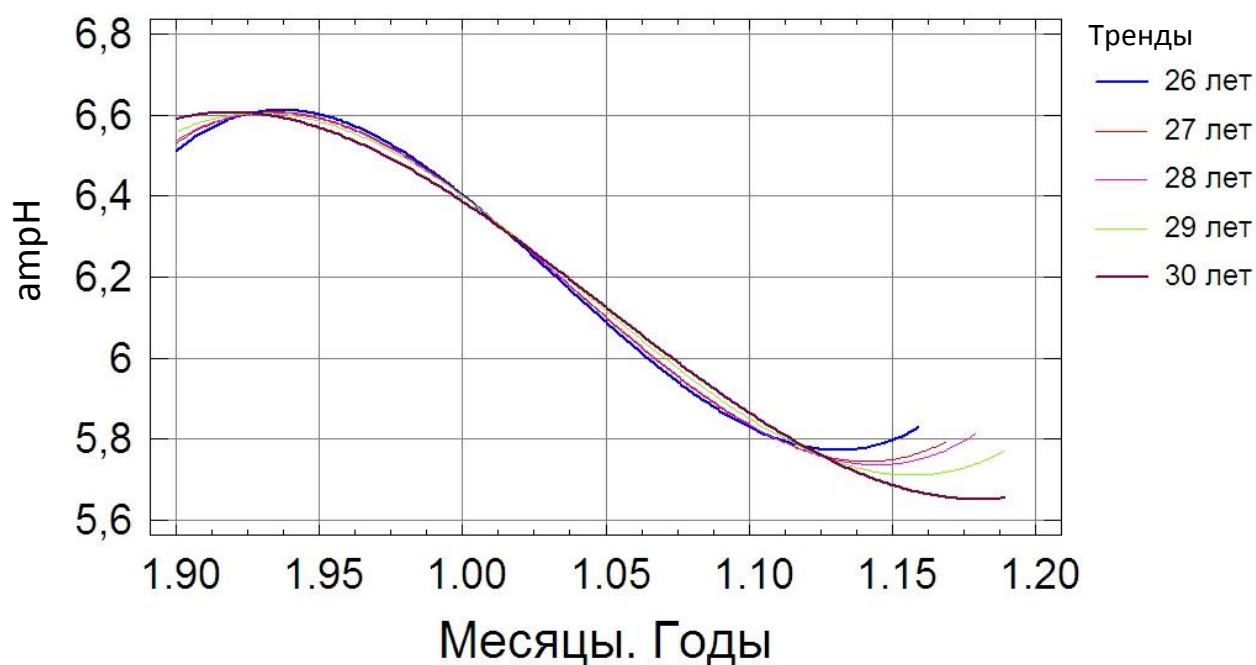


Рис. 2. Тренды $амрН$ 1990–2015, 1990–2016, 1990–2017, 1990–2018, 1990–2019 гг.

Тренды рядов (начинающихся с 1990 г.) длиной 26–30 лет описываются уравнениями:

$$tr_{26} = 6.50581 + 0.00497888 \cdot t - 0.0000641486 \cdot t^2 + 1.3222 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (1)$$

$$tr_{28} = 6.53204 + 0.00381184 \cdot t - 0.0000533631 \cdot t^2 + 1.06119 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (2)$$

$$tr_{30} = 6.58896 + 0.00147541 \cdot t - 0.0000334987 \cdot t^2 + 0,61926 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (3)$$

где t – порядковый номер месяца в ряду.

Из уравнений (1)–(3) видно, что при удлинении ряда $амрН$ все коэффициенты модели тренда монотонно изменяются по абсолютной величине: свободный член растет, остальные коэффициенты убывают. Тренды, описываемые уравнениями (1)–(3), показаны на рис. 2.

На срединной (большей) части своей длины тренды практически совпадают, т.е. согласованно описывают моделируемую временную последовательность. Модель тренда устойчива и заметно реагирует на появление новых членов (при удлинении ряда) только на своем конечном участке.

Точкам перегиба линий тренда, с которых начинает уменьшаться скорость снижения показателя pH , соответствуют значения:

$t \approx 162$ месяца и $амрН = 6,191$ (июнь 2003 г.) для 26-летнего ряда;

$t \approx 168$ месяцев и $амрН = 6,169$ (декабрь 2003 г.) для 28-летнего ряда;

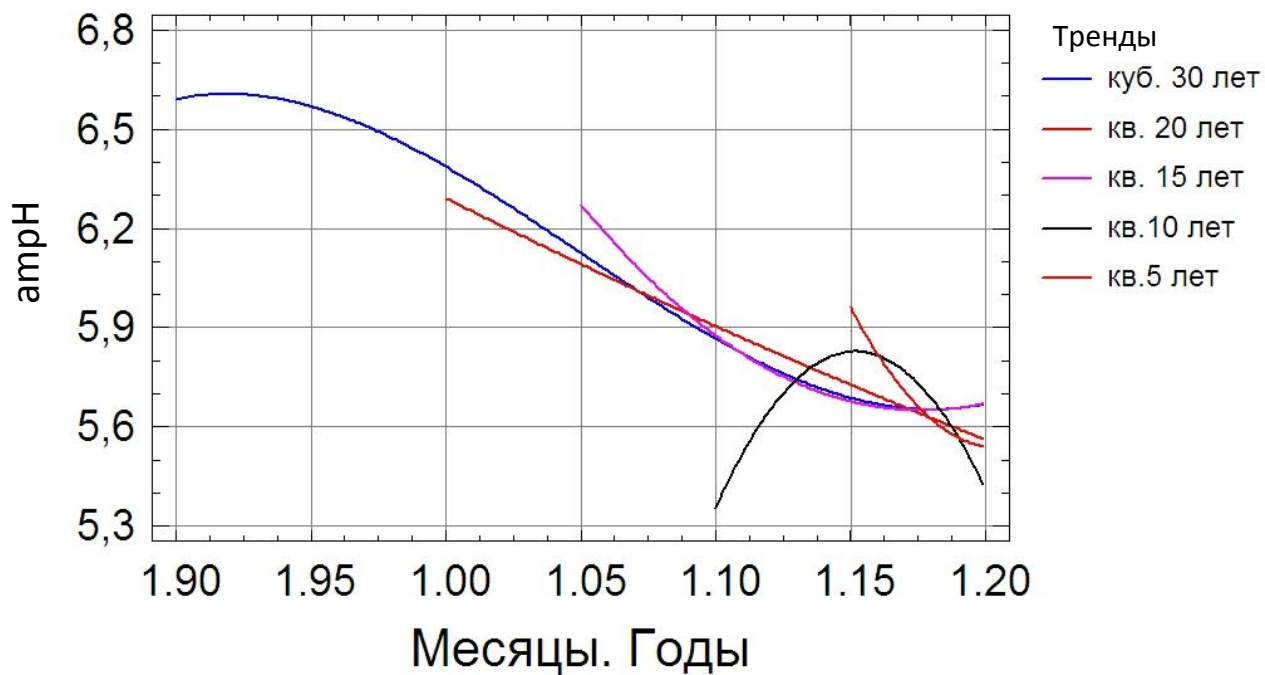
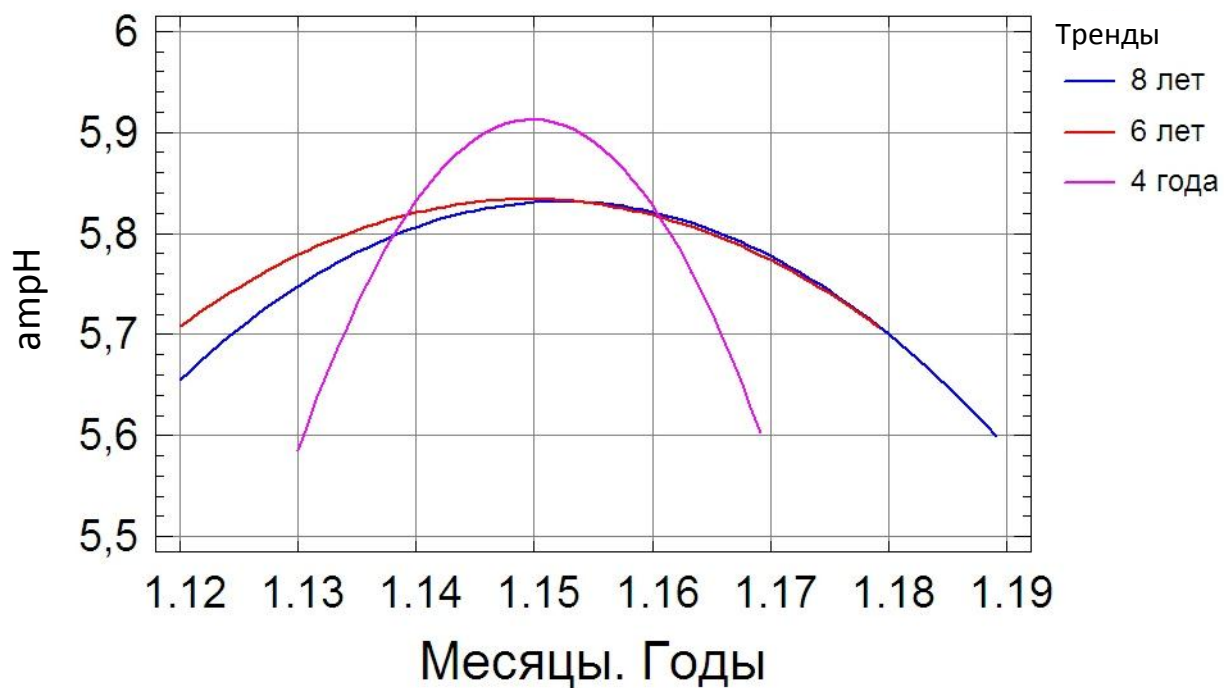
$t \approx 180$ месяцев и $амрН = 6,129$ (январь 2006 г.) для 30-летнего ряда.

Это означает, что по мере удлинения ряда наблюдений момент времени, когда рост скорости снижения $амрН$ сменяется ее (скорости) уменьшением, наступает все позже.

Уменьшение скорости снижения значений $ampH$ (выражаемое уменьшением наклона линии тренда) продолжается до достижения трендом точки своего минимума. Например, минимум тренда 26-летнего ряда ($ampH = 5,7730$) наступает при $t = 278$ месяцев (февраль 2013 г.), т.е. достигается за 34 месяца до конца ряда. Затем начинается ускоренный рост значений $ampH$, продолжающийся до конца расчетного периода. Заметим, что минимум модельного (кубического) тренда вовсе не означает, что реальный процесс снижения значений показателя $ampH$ остановился. Это становится очевидным из дальнейшего рассмотрения трендов более длинных рядов. Тренд 30-летнего ряда достигает своего минимума ($ampH = 5,7118$) при $t = 308$ месяцев (август 2015 г.), т.е. за 40 месяцев до конца ряда. Это может означать, что кубический тренд расплывается на своем конечном участке по мере удлинения ряда.

Очертания конечных участков кубических трендов $ampH$ последних лет ряда наблюдений, отчетливо просматривающиеся на рис. 2, обусловлены, на наш взгляд, не только (а может быть, не столько!) возникшей у показателя pH тенденцией к возрастанию, но также особенностями математической модели тренда, т.е. кубического полинома. Для проверки этого предположения (и одновременно для выяснения, перестали ли снижаться значения $ampH$, что практически очень важно) для второй половины наблюдаемого ряда pH снова применены квадратические модели трендов. На рис. 3 показаны кубический тренд 30-летнего ряда $ampH$ и квадратические тренды конечной части ряда длиной 20, 15, 10 и 5 лет. Все тренды, кроме 10-летнего, обнаруживают общую (основную) тенденцию к непрерывному снижению значений $ampH$. У 20-летнего и 5-летнего трендов экстремумы (минимумы) отсутствуют. Концевой участок 15-летнего квадратического тренда (начиная с 2010 г.) практически совпадает с кубическим трендом и имеет точку минимума, что говорит о близости к реальному минимуму значений $ampH$. Квадратический тренд 10-летнего ряда имеет совершенно иной характер: он содержит выраженный локальный экстремум противоположного знака, т.е. максимум, вблизи 2015 г. Это может означать, что в окрестностях экстремума существует реальный локальный максимум значений $ampH$, вызванный какой-то, пусть слабой и кратковременной, интервенцией. Заметим, что визуально возможность такой «мини-интервенции» просматривается уже на рис. 1, на котором в районе 2015 г. виден некоторый подъем наблюдаемых точек по сравнению с предыдущим и последующим отрезками временной последовательности pH .

Чтобы выяснить особенности и параметры обнаруженного локального максимума, построены квадратические тренды коротких (продолжительностью 8 лет, 6 лет и 4 года) участков ряда наблюдений, серединой которых является 2015 г. Тренды этих участков показаны на рис. 4. Максимум 6-летнего тренда ($ampH = 5,8338$) приходится на декабрь 2014 г., максимум 8-летнего ($ampH = 5,8316$) наступает в апреле 2015 г. То есть максимальные значения этих трендов близки как по значениям $ampH$, так и по времени их достижения. Максимум 4-летнего тренда наступает в январе 2015 г. и составляет $ampH = 5,9129$, что несколько больше, чем у двух других трендов. Таким образом, можно утверждать, что в последние несколько лет (2015–2019 гг.) средние значения показателя кислотности pH колеблются в пределах 5,7–5,9, т.е. временной ряд стабилизировался.

Рис. 3. Кубический и концевые квадратичные тренды ряда $атрН$ разной длиныРис. 4. Концевые квадратичные тренды участков ряда $атрН$ длиной 8 лет, 6 лет и 4 года

Сезонной декомпозицией 30-летний ряд $amrH$ (1990–2019 гг.) разделен на случайную компоненту и сумму двух детерминированных, тренда и циклической компоненты. Вычитанием тренда из этой суммы получена циклическая компонента (рис. 5), сохранившая свой характер при удлинении ряда наблюдений pH еще на один год [8]. На рис. 5 отчетливо видна не только интервенция 2005–2009 гг., но также «мини-интервенция», приходящаяся на 2015 г. и обсужденная выше.

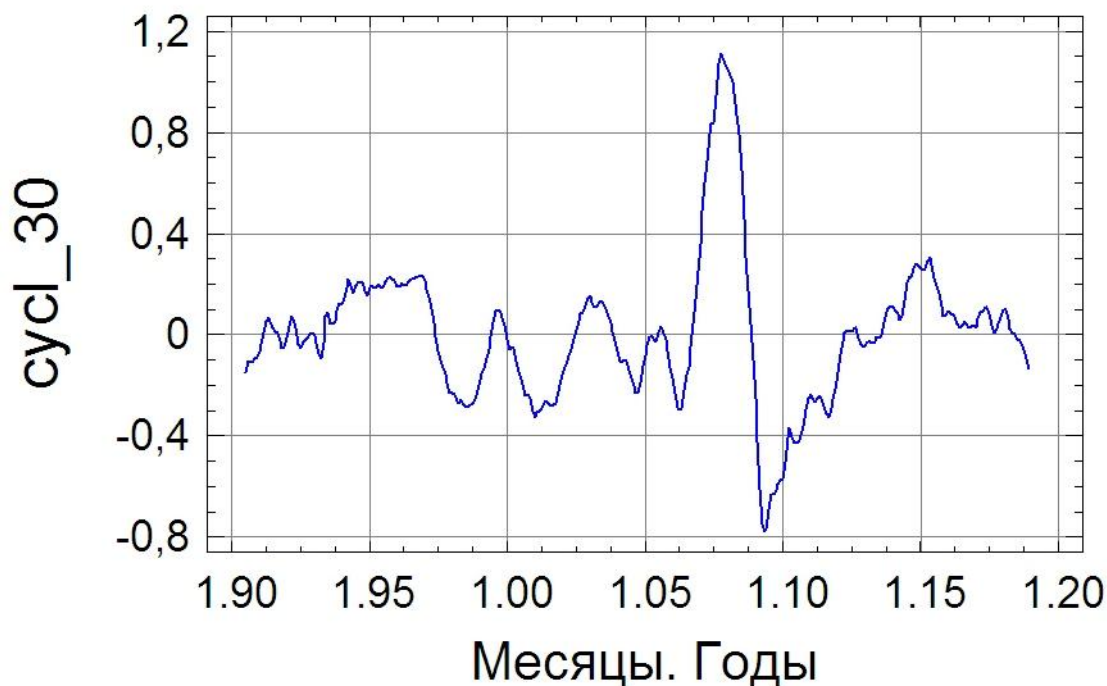


Рис. 5. Циклическая компонента ряда pH за 1990–2019 гг.

Внутригодовая динамика показателя pH характеризуется месячными индексами, которые определяются как простое среднее $\hat{s}_i$ отклонений значений pH от тренда [8, 9]:

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (pH_{i+lp} - \hat{r}_{i+lp}) \quad \text{для } i = 1, \dots, p; \quad (4)$$

где $m + 1 = 30$ – число (годовых) периодов в ряду наблюдений.

Ранее установлено [3], что между месячными индексами 26-летних временных рядов среднемесячных $amrH$ и температуры воздуха amt существует умеренно сильная положительная связь. Коэффициент корреляции при этом составил 0,515. Проверка этой связи была выполнена для 27–30-летних рядов. Коэффициент корреляции в последнем случае (для 30-летнего ряда) составил 0,584, что подтверждает факт уже установленной ранее существенной положительной связи между показателем кислотности pH и температурой воздуха t – самым важным фактором влияния на исследуемую величину. Внутригодовой ход месячных индексов $amrH$ и amt (рис. 6) сходен, но индексы кислотности, в отличие от индексов температуры, изменяются немонотонно. Глобальный максимум индекса $amrH$ наступает двумя месяцами позже максимума температурного индекса. Заметим, что корреляционная связь между срочными значениями pH и температуры t значительно слабее, чем между среднемесячными значениями $amrH$ и amt .

Ее коэффициент корреляции составляет всего 0,131. Причина такой разницы состоит, по-видимому, в маскирующей роли случайных колебаний этих величин.

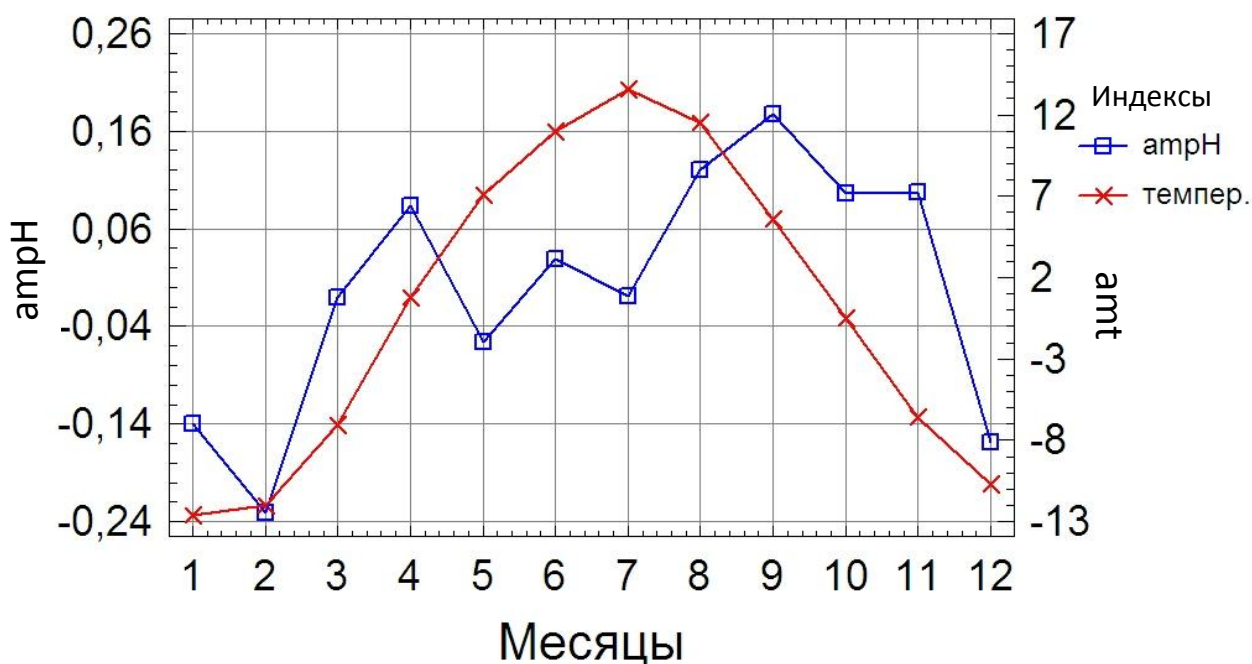


Рис. 6. Месячные индексы $amrH$ и температуры amt рядов 1990–2019 гг.

Значения случайной компоненты ряда $amrH$ колеблются в основном в диапазоне $\pm 0,8$ (рис. 7). Случайная компонента 30-летнего ряда pH моделировалась, как и для более коротких рядов [1–8], комбинированным случайным процессом авторегрессии-скользящего среднего ARMA (p, q) [9], где параметры p и q означают порядок процессов авторегрессии и скользящего среднего.

Общий вид модели:

$$X(t) = \sum_{i=1}^p \varphi_i \cdot X(t-i) + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \cdot \varepsilon_{t-j}, \quad (5)$$

где ε_t – процесс белого шума (среднее $M\varepsilon_t = 0$, дисперсия $D\varepsilon_t = 0$); φ – авторегрессионные коэффициенты; θ – коэффициенты скользящего среднего.

Адекватность описания случайного остатка 30-летнего ряда $amrH$ достигнута (при доверительной вероятности 90 %) при $p = 2$ и $q = 1$, что соответствует достаточно короткой – около двух месяцев – «памяти» у исследуемой величины.

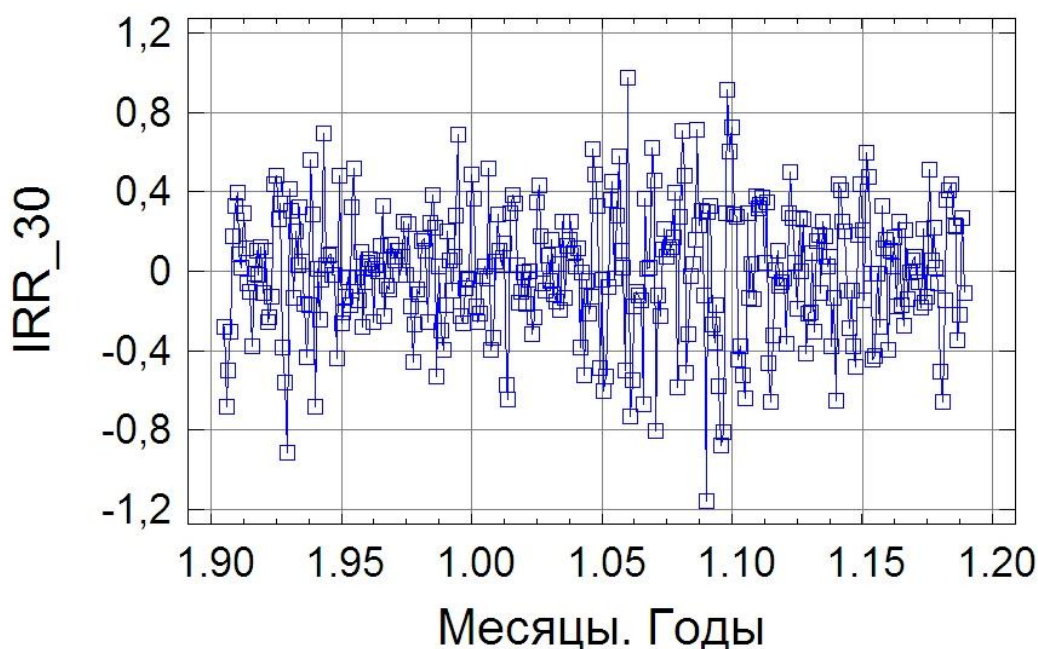


Рис. 7. Случайная компонента ряда $атрН$ за 1990–2019 гг.

ВЫВОДЫ

1. Анализ поведения 30-летнего ряда наблюдений за показателем pH кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, показал, что снижение средних значений показателя практически прекратилось. Наблюдаются признаки стабилизации средних значений показателя в течение трех-четырех последних лет (2015–2019 гг.): средние значения показателя кислотности pH колеблются в пределах 5,7–5,9, т.е. временной ряд практически стабилизировался.
2. Принятая, начиная с 26-летнего ряда, кубическая модель тренда подтвердила свою пригодность в основной своей части (но не в концевой) и для 30-летнего ряда.
3. Характер поведения циклической и случайной компонент 30-летнего ряда pH сохранился, хотя значения параметров компонент незначительно изменились.
4. Внутригодовая динамика показателя pH практически стабилизировалась.
5. Подтверждена установленная ранее существенная положительная связь показателя кислотности pH и температуры воздуха t (коэффициент корреляции для 30-летнего ряда составил 0,584 на 90%-м уровне доверия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качановский Ф.В. Динамика кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери (статистический анализ) // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2009. Вып. 15. С. 199–203.
2. Качановский Ф.В. Кислотность атмосферных осадков, выпадающих в Твери (статистический анализ динамики) // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2012. Вып. 22. С. 82–87.

3. Качановский Ф.В. Связь кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, с температурой воздуха // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2013. Выпуск 2 (24). С. 28–31.
4. Качановский Ф.В. Связь кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, с их количеством // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Выпуск 1 (27). С. 34–39.
5. Качановский Ф.В. Эволюция тренда и внутригодовой динамики кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Выпуск 2 (30). С. 83–87.
6. Качановский Ф.В. Изменение оценок кислотности осадков, выпадающих в Твери, в результате удлинения ряда // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Выпуск 2 (32). С. 93–96.
7. Качановский Ф.В. Что происходит с кислотностью осадков, выпадающих в Твери? // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Выпуск 2 (34). С. 90–94.
8. Качановский Ф.В. Характер динамики кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Строительство и землеустройство: проблемы и перспективы развития: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 59–65.
9. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 1998. 528 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. О кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 66–75.

ABOUT THE PRECIPITATIONS ACIDITY IN TVER

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of dynamics of the precipitation acidity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 1990–2019 years). Time series models of the indicator *pH* and her evolution were examined. Qubic and quadratic models have considered as adequate. Seasonal indices of the indicator *pH* preserved his character in spite of time series lengthening.

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

REFERENCES

1. Kachanovsky F.V. Dynamics of acidity of precipitation in Tver (statistical analysis). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. Iss. 15, pp. 199–203. (In Russian).
2. Kachanovsky F.V. Acidity of precipitation in Tver (statistical analysis of dynamics). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2012. Iss. 22, pp. 82–87. (In Russian).
3. Kachanovsky F.V. Association of acidity of atmospheric precipitation in Tver with air temperature. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013. Iss. 2 (24), pp. 28–31. (In Russian).
4. Kachanovsky F.V. Relationship of acidity of atmospheric precipitation in Tver with their quantity. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. Iss. 1 (27), pp. 34–39. (In Russian).
5. Kachanovsky F.V. Evolution of trend and intraannual dynamics of acidity of precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. Iss. 2 (30), pp. 83–87. (In Russian).
6. Kachanovsky F.V. Changes in the acidity estimates of precipitation in Tver as a result of the extension of the series. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. Iss. 2 (32), pp. 93–96. (In Russian).
7. Kachanovsky F.V. What happens to the acidity of precipitation falling in Tver? *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. Iss. 2 (34), pp. 90–94. (In Russian).
8. Kachanovsky F.V. The nature of the dynamics of the acidity of precipitation in Tver. *Construction and Land Administration: Problems and Prospects of Development: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Tver: TSTU, 2019, pp. 59–65. (In Russian).
9. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere* [Statistical analysis of computer data]. M.: INFRA-M, 1998. 528 p.

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.kachanovsky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. About the precipitations acidity in Tver// *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 66–75.

УДК 614.8.084

МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Д. Семеев, Т.С. Копылова, Д.С. Семеев

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. В данной работе представлен микроскопический способ исследования адгезионной прочности тканей с полимерными покрытиями. Показан метод количественной оценки степени прочности сцепления волокон с резиной.

Ключевые слова: микроскопический метод, адгезионная прочность, полимерные покрытия, микрофотографии, микросрезы.

Исследования в основном проводились на биологическом исследовательском микроскопе МБИ-6. Препараты для наблюдений представляли собой поперечные срезы контрольных тканей с полимерными покрытиями. Для получения полной и четкой картины структуры полимерного покрытия, в особенности линии адгезионного контакта, необходимо наблюдать участок ткани на значительной длине и по возможности без деформационных изменений последнего [1].

Наблюдение проводилось в отраженном свете в светлом и темном полях при увеличении в 400 раз. Фотографирование осуществлялось при увеличении в 900 раз [2].

Срез считался пригодным для исследования, если контуры поперечных и продольных волокон ткани видны вполне отчетливо (рис. 1).

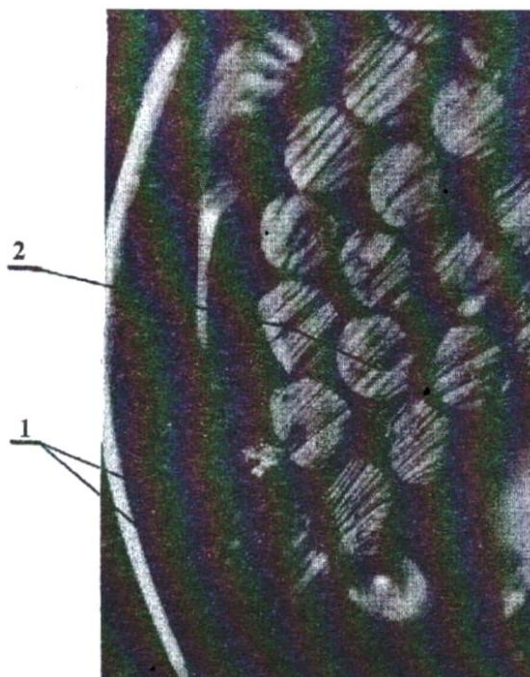


Рис. 1. Микросрез образца плащевой ткани 960^х: 1 – продольное волокно;
2 – поперечное волокно

Граница раздела ткани и полимерного покрытия представляет собой резкое и четкое изображение (рис. 2).

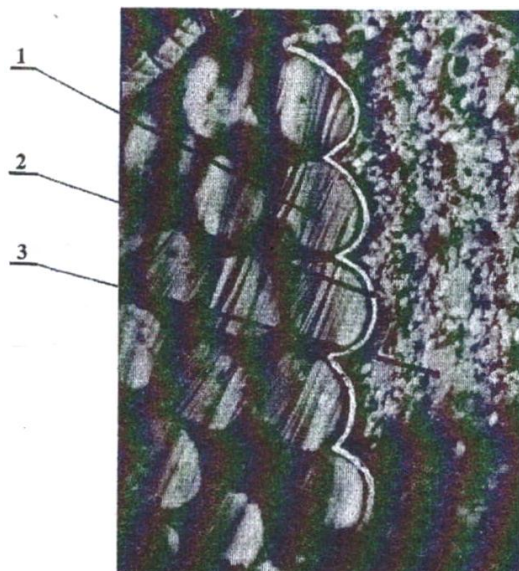


Рис. 2. Участок поперечного среза капроновой плащевой ткани с четко выраженной границей раздела «ткань – покрытие» 960^x: 1 – поперечное волокно; 2 – граница раздела «ткань – покрытие»; 3 – полимерное покрытие

Одинаковое по своему качеству во всем поле зрения микроскопа при одном и том же положении микровинта (рис. 3).

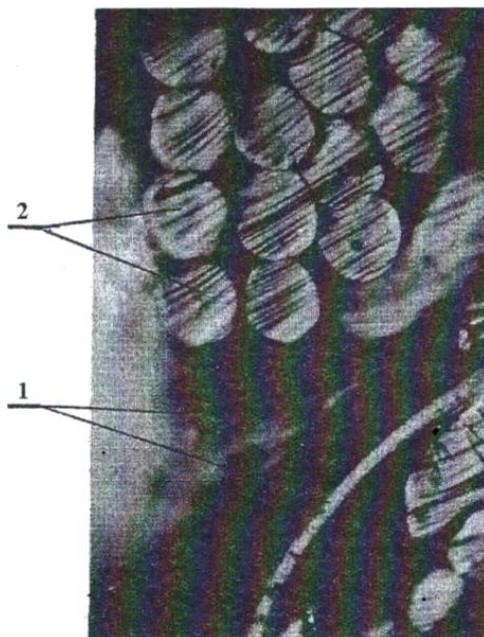


Рис. 3. Микросрез образца плащевой ткани 960^x: 1 – продольное волокно; 2 – поперечное волокно

Прочность связи резины с тканью в основном определяется степенью монолитности резиноканевых изделий, т.е. степенью проникновения полимерного покрытия в капроновую нить. Для оценки степени монолитности системы «ткань-покрытие» был проведен анализ микрофотографий поперечных срезов плащевых тканей, позволяющих непосредственно наблюдать структуру пограничного слоя «адгезив-субстрат» и количественно оценить степень проникновения покрытия в ткань [3].

Количественная оценка величин, характеризующих адгезию дается по трем параметрам (рис. 4):

- а) по глубине захода полимерного покрытия между волокнами ткани;
- б) углу обхвата полимерным покрытием капронового волокна α ;
- в) соотношению фактической и возможной длин линий контакта покрытия с волокном.

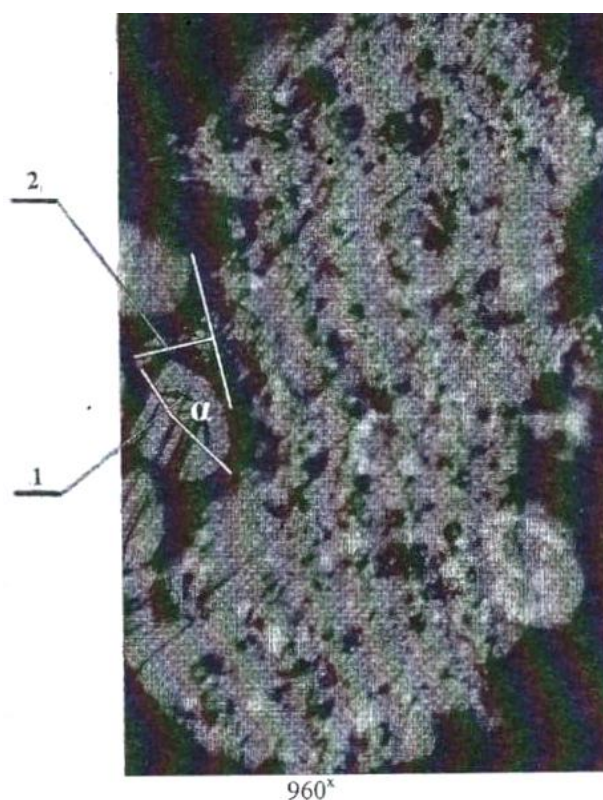


Рис. 4. Основные параметры количественной оценки адгезионной прочности покрытий на тканях микроскопическим методом: 1 – угол контакта покрытия с тканью; 2 – глубина захода полимерного покрытия между волокнами ткани

Для каждого исследуемого образца значения трех указанных параметров выводились как средняя величина, вычисленная из величин этих параметров для каждого из волокон, входящих в микросрез, соответствующих данному образцу (обычно микросрез каждого исследуемого образца содержит до 120 волокон), что полностью исключает возможность получения случайных значений этих величин [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия для материаловедения. М.: Техносфера, 2006. 256 с.
2. Рид С. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2008. 232 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, д. 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, д. 22. E-mail: tamara.kopylova.41@mail.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Семеенков С.Д., Копылова Т.С., Семеенков Д.С. Микроскопический метод исследования физико-химической связи конструкционных материалов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 2 (6). С. 76–80.

MICROSCOPIC METHOD FOR STUDYING THE PHYSICAL AND CHEMICAL BOND OF STRUCTURAL MATERIALS

S.D. Semeenkov, T.S. Kopylova, D.S. Semeenkov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This paper presents a microscopic method for studying the adhesive strength of fabrics with polymer coatings. A method for quantifying the degree of strength of the fibers ' adhesion to rubber is shown.

Keywords: microscopic method, adhesive strength, polymer coatings, micrographs, microscopes.

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. Rid S. Elektronno-zondovyy mikroanaliz i rastrovaya elektronnaya mikroskopiya v geologii [Electron probe microanalysis and raster electron microscopy in geology]. M.: Tekhnosfera, 2008. 232 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 spectrum 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 of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mr.semenkov@mail.ru

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

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Semenkov S.D., Kopylova T.S., Semenkov D.S. Microscopic method for studying the physical and chemical bond of structural materials // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 2 (6), pp. 76–80.

УДК 614.8.084

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДЫ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ТКАНЕЙ С ПОЛИМЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ

С.Д. Семеевков, Т.С. Копылова, Д.С. Семеевков

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию природы сил сцепления тканей с полимерными покрытиями на границе раздела фаз. Приведены доказательства зависимости адгезионной прочности таких конструкционных материалов от степени величины контакта поверхностей в зоне сцепления, а также показана зависимость величины адгезии от условий проведения термообработки материалов.

Ключевые слова: адгезия, пограничный слой, когезия, термообработка, сила сцепления.

Основным показателем, характеризующим качество тканей с полимерными покрытиями, является адгезия. Под адгезией (или прилипанием) понимают сцепление между двумя приведенными в контакт поверхностями различных по своей природе материалов. Прочность системы «ткань – полимерное покрытие» зависит от прочности

самого слабого элемента и самого слабого места склеивания, поэтому необходимо, чтобы клееные соединения были однородными и одинаково прочными.

Количественно адгезию можно охарактеризовать сопротивлением клеевого соединения разрушению (на отрыв, расслаивание, сдвиг) по месту первоначального контакта. Силу, преодолеваемую при одновременном отрыве по всей площади, называют удельной работой расслаивания (г/см^2) [1].

Поскольку величина адгезии характеризуется силой сцепления между адгезивом и субстратом, то независимо от физико-химической природы сил, действующих между адгезивом и субстратом в зоне контакта, адгезия определяется прежде всего величиной поверхности контакта их в межфазной зоне. В случае резинотканевых материалов она обусловлена наличием затекания пластичной и затем отвердевшей при вулканизации резиновой смеси в межволоконные пространства текстильного каркаса, в отдельных случаях образованием сплошных чехлов резины, размером, формой и когезионной прочностью резиновых тяжей (заходов полимерного покрытия между волокнами ткани), а также развитостью поверхности текстильного каркаса.

С увеличением степени нарушения поверхности субстрата (увеличением шероховатости) сопротивление отслаиванию непрерывно растет [2].

Этот рост обусловлен увеличением площади контакта. При оценке роли адгезии следует принимать во внимание когезионную прочность, жесткость и эластичность полимера (адгезива). Действительно, при рассмотрении механизма отслаивания адгезива от субстрата со сложной поверхностью следует учитывать возможность двух процессов: когезионный разрыв тяжей адгезива и разрушение адгезионного шва по месту контакта «адгезив – субстрат» [4].

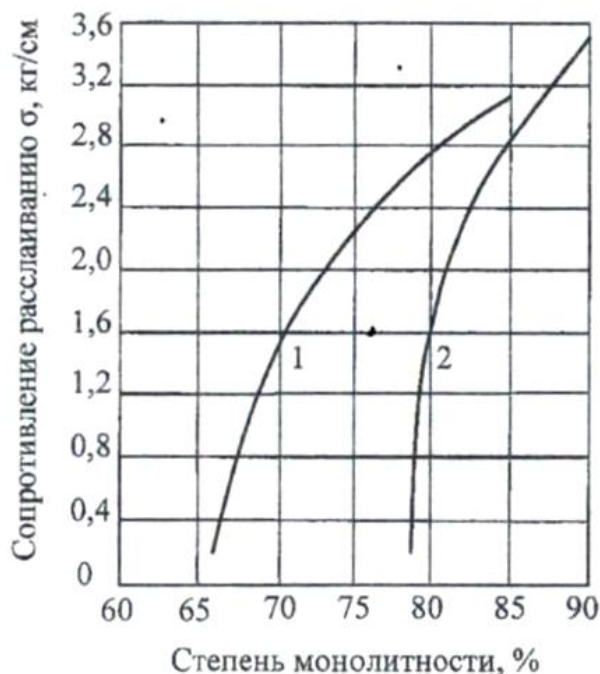
Величина адгезии характеризует прочность связи, отнесенную к единице реальной поверхности соприкосновения полимерного покрытия к ткани, а степень монолитности определяет величину этой поверхности. Степень монолитности шва зависит от условий формирования материала (обкладки на каландре, прессование и т.д.).

Данные таблицы позволяют заключить, что увеличение монолитности материала способствует повышению сопротивления расслаиванию и перехода расслаивания от адгезионного к когезионному.

Зависимость прочности связи ткани с полимерным покрытием
от метода изготовления материала

Метод изготовления материала	Текстильный каркас	Сопротивление расслаиванию, кг/см	
		без пропитки	с пропиткой
Каландрирование и дальнейшая вулканизация	Капрон	60	100
Прессование и дальнейшая вулканизация	Капрон	120	140

Влияние степени монолитности на прочность связи покрытия с каркасом графически представлена на рисунке.



Зависимость адгезионной прочности резиноматериалов от степени их монолитности:
1 – перкаль – резина; 2 – капрон – резина

Из вышесказанного следует, что увеличение степени монолитности независимо от типа каркаса приводит к увеличению прочности связи резины с тканью.

Найденная закономерность обусловлена, очевидно, тем, что прочность связи резины с тканью определяется только степенью монолитности образца. Действительно, прочность сцепления резины с тканью вообще может определяться факторами:

- а) степенью приближения величины реальной поверхности с предельно возможной, т.е. к величине удельной поверхности ткани;
- б) плотностью адгезионного шва.

Таким образом, прочность адгезионного шва полностью определяется степенью монолитности образца (степенью развитости общей линией контакта ткань – покрытие) [3].

Проведенные исследования по определению влияния температуры на адгезионную прочность материалов показали, что с повышением температуры обработки склеиваемых материалов значительно увеличивается работа расслаивания за счет повышения адгезионной прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов М.В. Энергосберегающая технология и оборудование для производства длинномерных резинотехнических изделий // *Химическая технология*. 2008. № 10. С. 496–499.
2. Комисаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 2011. 350 с.
3. Копылова Т.С., Бобров И.В. Исследования материалов термообработанных в псевдооживленном слое инертного теплоносителя. Тверь: ТвГТУ, 2011. 124 с.

4. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паныматченко А.Д. Технические свойства полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2003. 239 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, д. 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, д. 22. E-mail: tamara.kopylova.41@mail.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Семеенков С.Д., Копылова Т.С., Семеенков Д.С. Исследования природы адгезионных свойств тканей с полимерными покрытиями на границе раздела фаз // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 2 (6). С. 80–84.

INVESTIGATION OF THE NATURE OF ADHESIVE PROPERTIES OF FABRICS WITH POLYMER COATINGS AT THE PHASE INTERFACE

S.D. Semeenkov, T.S. Kopylova, D.S. Semeenkov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This work is devoted to the study of the nature of the adhesion forces of tissues with polymer coatings at the phase interface. Evidence is given for the dependence of the adhesive strength of such structural materials on the degree of surface contact in the bonding zone, and the dependence of the adhesion value on the conditions of heat treatment of materials is shown.

Keywords: adhesion, boundary layer, cohesion, heat treatment, adhesion force.

REFERENCES

1. Sokolov M.V. Energy-saving technology and equipment for the production of long-length rubber products. *Himicheskaya tekhnologiya*. 2008. No. 10, pp. 496–499. (In Russian).
2. Komisarov Yu.A., Gordeev L.S., Vent D.P. *Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii* [Chemical technology processes and apparatus]. M.: Himiya, 2011. 350 p.
3. Kopylova T.S., Bobrov I.V. *Issledovaniya materialov termoobrabotannykh v psevdoozhizhennom sloe inertnogo teplonositelya* [Studies of heat treated materials in fluidized bed of inert heat carrier]. Tver: TSTU, 2011. 124 p.
4. Kryzhanovskij, V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D. *Tekhnicheskie svojstva polimernyh materialov* [Technical properties of polymer materials]. SPb.: Professiya, 2003. 239 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Semeenkov S.D., Kopylova T.S., Semeenkov D.S. Investigation of the nature of adhesive properties of fabrics with polymer coatings at the phase interface // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 2 (6), pp. 80–84.

УДК 541.183

**АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
УГЛЕРОДНОГО АДСОРБЕНТА ФАС-3 ПРИ АДСОРБЦИИ БЕНЗОЛА**

А.В. Твардовский, Д.С. Зайцев

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

Аннотация. Впервые проведены комплексные исследования адсорбционной деформации – сорбострикции микропористого углеродного адсорбента ФАС-3 при адсорбции паров бензола из потока газа-носителя – азота в неравновесных условиях. В работе был использован микропористый углеродный адсорбент ФАС-3, полученный на основе фурфурола. Активные угли на основе реактопластов марок ФАС существенно превосходят серийно выпускаемые углеродные адсорбенты на основе каменного угля и на основе торфа по своим прочностным свойствам и низкому содержанию золы при значительно большем развитии объема адсорбирующих микропор. Изучены изотермы адсорбции паров бензола микропористым углеродным адсорбентом ФАС-3 в равновесных условиях. Результаты исследования волновой сорбострикции микропористого углеродного адсорбента ФАС-3 при адсорбции паров бензола из потока газа – носителя азота позволяют сделать вывод о возможности использования адсорбента в качестве сенсора для контроля содержания этого вещества в потоке азота. Были представлены формулы и проведены расчеты изменений удельных энтропии и внутренней энергии адсорбента в адсорбционном процессе.

Ключевые слова: адсорбция, адсорбент, адсорбционная деформация адсорбентов, дилатометрический метод измерения, термодинамика адсорбционной деформации адсорбентов.

ВВЕДЕНИЕ

Выявление неинертности адсорбентов в адсорбционных процессах, выраженное в изменениях термодинамических функций, является одной из наиболее актуальных задач в адсорбционной науке. Несмотря на это, ее исследование до настоящего времени по существу не проводилось, хотя очевидно: инертных адсорбентов (также и абсорбентов) в природе не существует. Об этом свидетельствует цикл работ [1–20], посвященных данному явлению.

Представляется, что для решения подобной задачи прежде всего требуются экспериментальные данные по деформациям адсорбентов. Кроме того, описание изменений термодинамических функций адсорбентов намного упрощается, если последние являются ограниченно набухающими или, точнее, испытывают в адсорбционном процессе упругие деформации. Далее, при адсорбции индивидуальных веществ адсорбционная система является двухкомпонентной и такие характеристики, как модуль Юнга (или модуль всестороннего расширения) и температурный коэффициент расширения, строго говоря, относятся не к адсорбенту, а ко всей системе в целом. Как показывают экспериментальные исследования (определение температурных коэффициентов расширения, модулей упругости чистых адсорбентов и в адсорбционной системе), влияние адсорбата на свойства адсорбента во многих системах бывает незначительно, что позволяет рассматривать адсорбат как некую внешнюю силу, вынуждающую адсорбент деформироваться. Такое поведение систем было использовано при расчетах изменений термодинамических функций адсорбентов при адсорбционных взаимодействиях.

Целью настоящей работы являлось выявление неинертности адсорбента ФАС-3 при адсорбции паров бензола в неравновесных условиях, выраженное в изменениях таких термодинамических функций, как внутренняя энергия и энтропия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе был использован микропористый углеродный адсорбент ФАС-3, полученный на основе фурфурола. Данный адсорбент представляет собой гладкие твердые гранулы округлой формы.

Получение сферических гранул адсорбента ФАС-3 осуществлялось в результате жидкостного формования сополимера фурфурола и эпоксидной смолы на основе принципиально нового процесса совмещения стадий осмоления мономера, формования смеси в сферический продукт и отверждения гранул.

Активацию сферических зерен ФАС-3 осуществляли во вращающейся печи смесью водяного пара и углекислого газа при температуре 850–900 °С до обгара, что соответствовало развитию пористости в адсорбенте.

Активные угли на основе реактопластов марок ФАС существенно превосходят серийно выпускаемые углеродные адсорбенты на основе каменного угля и на основе торфа по своим прочностным свойствам и низкому содержанию золы при значительно большем развитии объема адсорбирующих микропор.

Структурно-энергетические характеристики пористой структуры угля ФАС-3 определяли стандартным способом Дубинина по изотерме адсорбции паров бензола при 293 К. На изотерме адсорбции бензола в области давлений $p/p_s \geq 0,65$ обнаружена петля адсорбционного гистерезиса «адсорбции-десорбции». В этой области структурные характеристики определяли с использованием уравнения Кельвина. Результаты расчетов представлены в таблице.

Структурно-энергетические характеристики пористой структуры
микропористого углеродного адсорбента ФАС-3

Характеристика	Значение
Удельный объем микропор, W_o , см ³ /г	0,51
Стандартная характеристическая энергия адсорбции, E_o , кДж/моль	23,9
Эффективная ширина микропор, X_o , нм	1,0
Удельная поверхность по БЭТ, $S_{вд}$, м ² /г	1 088
Поверхность мезопор, $S_{мс}$, м ² /г	32,2
Диаметр мезопор, d_{max} , нм	12,8
Суммарный объем пор, W_s , см ³ /г	0,73

В качестве адсорбата (бензол) было использовано высокочистое вещество с чистотой 99,98 %, которое в соответствии с [20] обладает следующими физико-химическими характеристиками: молекулярный вес $M = 78,108$; критическая температура $T_{кр} = 562,45$ К; критическое давление $p_{кр} = 4,92$ МПа; критическая плотность $\rho_{кр} = 304$ кг/м³; температура кипения $T_{кип} = 353,1$ К.

Равновесные величины адсорбции паров бензола на ФАС-3 были измерены на гравиметрической вакуумной установке, разработанной в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН, г. Москва). Измерения проводились в интервале давлений от 0,1 Па до 10 кПа при температуре 293 К. Адсорбцию паров органических веществ измеряли на полуавтоматической адсорбционной весовой вакуумной установке. При проведении эксперимента была использована навеска адсорбента массой 0,28 г. Регенерацию адсорбента проводили в течение 6 ч при температуре 623 К до давления 0,1 Па. Максимальная абсолютная погрешность измерения, определенная по методике, приведенной в [21], составила $\pm 0,01$ ммоль/г с доверительной вероятностью 95 %.

Измерение давлений паров органических веществ в пределах от 0,13 Па до 10 кПа осуществляли манометрами абсолютного давления М10, М1000, разработанными и изготовленными в ИФХЭ РАН. Погрешность измерения давлений манометром М10 в интервале от 0,13 до 1 330 Па составила $\pm 0,066$ Па, а манометром М1000 в интервале от 13 Па до 10 кПа составляла $\pm 4,0$ Па.

Также в работе использовали установку для исследования адсорбционной деформации твердых адсорбентов, изготовленную в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН. Для измерений применялся проточный дилатометр, позволяющий измерять адсорбционную деформацию адсорбента при пропускании через него порции исследуемого вещества или смеси в потоке газа – носителя [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи (выявление неинертности адсорбента в адсорбционном процессе) необходимо использовать соотношения, устанавливающие зависимости изменений при адсорбции термодинамических функций изотропного твердого адсорбента от деформации последнего.

Чтобы термодинамически описать степень изменения состояния адсорбента, необходимо знать уравнение состояния твердого тела. Уравнение состояния в неявном виде:

$$P = P(V, T), \quad (1)$$

причем P играет роль некоторого результирующего давления (зависящего в основном от внутреннего давления в структуре адсорбента), вынуждающего адсорбент деформироваться. Расчет P представляет собой самостоятельную и достаточно трудную задачу.

Совершенно очевидно, что явный вид соотношения (1) в области больших деформаций и в широких температурных интервалах сложен и может быть найден только эмпирически. Однако в довольно широком интервале температур, далеких от точки плавления, и в области упругих деформаций можно воспользоваться классическими формулами:

$$P = K[V(T, P) - V(T, 0)] / V(T, 0), \quad (2)$$

$$V(T, 0) = V(0, 0)(1 + \beta T) \quad (3)$$

при $P = 0$.

Объединяя выражения (2) и (3), можно получить уравнение состояния

$$P = K[V / (V_0(1 + \beta T)) - 1], \quad (4)$$

где $V_0 = V(0, 0)$. В (2), (4) K – модуль всестороннего растяжения изотропного твердого тела; β – коэффициент объемного температурного расширения тела.

При дальнейшем рассмотрении будем считать K и β постоянными (как отмечалось ранее, в большинстве реальных случаев эти параметры характеризуют не столько адсорбент, сколько всю адсорбционную систему), а также учтем, что произведение βT является малым по сравнению с единицей вплоть до температур, близких к температуре плавления, и в связи с этим пренебрежем величинами второго порядка малости по βT . Это позволяет записать формулу (4) следующим образом:

$$P = K[(V / V_0)(1 - \beta T) - 1]. \quad (5)$$

Перед определением важнейших термодинамических функций деформирующегося тела сделаем несколько предварительных расчетов.

Работа, совершаемая при растяжении (набухании) тела, выражается формулой

$$\delta A = -PdV. \quad (6)$$

Здесь роль деформирующей нагрузки играет давление P .

Основное термодинамическое тождество можно записать в виде

$$dU(S, V) = TdS + PdV, \quad (7)$$

или с помощью якобиана

$$\partial(T, S) / \partial(P, V) = -1. \quad (8)$$

Таким образом, учитывая (8), можно записать

$$(\partial S / \partial V)_T = [\partial(S, T) / \partial(V, P)] [\partial(V, P) / \partial(V, T)] = -(\partial P / \partial T)_V. \quad (9)$$

Определим теперь энтропию набухающего тела. Имеем

$$dS = (\partial S / \partial T)_V dT + (\partial S / \partial V)_T dV = (\partial S / \partial T)_V dT - (\partial P / \partial T)_V dV. \quad (10)$$

Используя (5), найдем

$$(\partial P / \partial T)_V = -\beta K V / V_0,$$

откуда

$$dS = C_V dT / T + \beta K V dV / V_0. \quad (11)$$

Далее, подразумевая независимость молярной теплоемкости C_V от объема, а также учитывая тот факт, что для целого ряда тел при не слишком низких температурах C_V постоянна (не зависит от температуры) и составляет $\approx 25,1$ Дж/(К·моль) (закон Дюлонга – Пти) [21], формулу (11), интегрируя, можно представить следующим образом:

$$S - S^* = C_V \ln(T / T^*) + \beta K (V^2 - (V^*)^2) / (2V_0), \quad (12)$$

Где V^*, T^*, S^* – параметры некоторого произвольного состояния.

Согласно (5) и (11) можно записать

$$dU = TdS + PdV = C_V dT + (\beta K T V / V_0 + P) dV = C_V dT + K((V - V_0) / V_0) dV, \quad (13)$$

или, интегрируя, получаем выражение для внутренней энергии [22]:

$$U - U^* = C_V (T - T^*) + K[(V - V_0)^2 - (V^* - V_0)^2] / (2V_0). \quad (14)$$

Обобщая, отметим, что по формулам (12) и (14) можно рассчитывать изменения важнейших термодинамических характеристик адсорбента как функции величины адсорбции. Для этого необходимо обладать информацией о протяженности области упругих деформаций изотропных твердых адсорбентов (и, конечно, знать β и K). Кроме того, должна быть экспериментально выявлена, например дилатометрическим методом, зависимость деформации указанных выше типов адсорбентов от величины адсорбции.

На рис. 1 и 2 соответственно представлены изотерма адсорбции паров бензола на адсорбенте ФАС-3 и зависимости относительной линейной деформации этого адсорбента ($\Delta l / l$) при адсорбции бензола из потока газа-носителя азота от времени t для различных количеств введенного адсорбтива в неравновесных условиях.

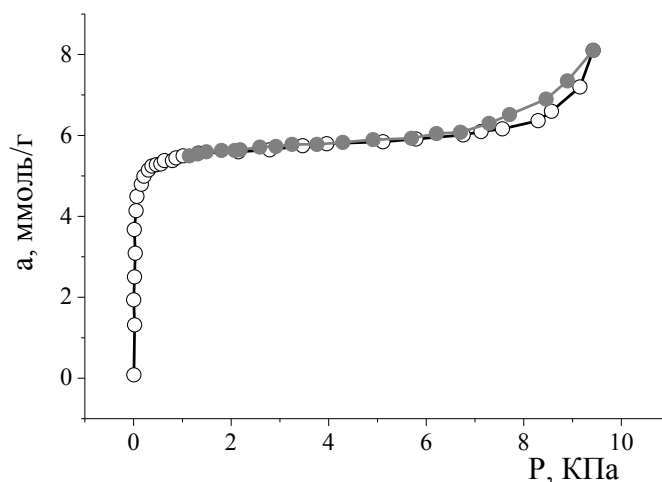


Рис. 1. Изотерма адсорбции (светлые маркеры) и десорбции (черные маркеры) паров бензола на микропористом углеродном адсорбенте ФАС-3 при 293 К

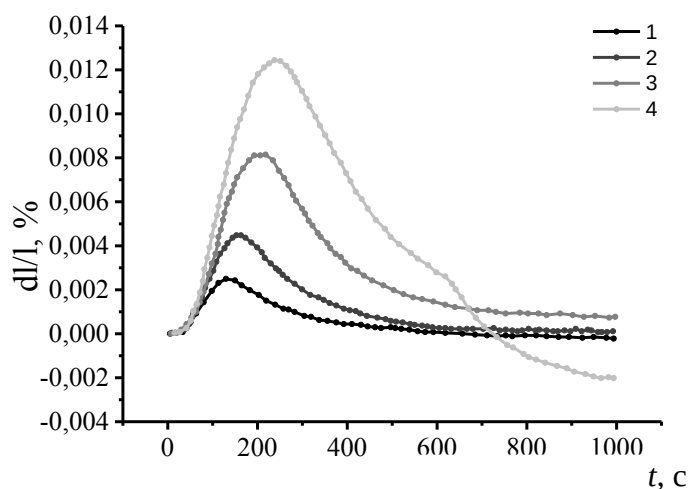


Рис. 2. Кривые сорбострикции микропористого углеродного адсорбента ФАС-3 при адсорбции бензола (t – время, с). Количество введенного адсорбтива, мл: 1 – 0,075; 2 – 0,125; 3 – 0,25; 4 – 0,5. Температура эксперимента 573 К. Газ-носитель – азот. Скорость потока газа-носителя 2 мл/с

На рис. 3 и 4 в качестве примера приведены рассчитанные по формулам (12) и (14) и данным, представленным на рис. 2, зависимости изменения удельных энтропии и внутренней энергии адсорбента ФАС-3 при адсорбции паров бензола. В расчетах были использованы следующие характеристики: $K = 1,00 \cdot 10^{11}$ Па; $\beta = 1,28 \cdot 10^{-5}$ К $^{-1}$; $V_0 = 1,13 \cdot 10^{-3}$ м 3 /кг.

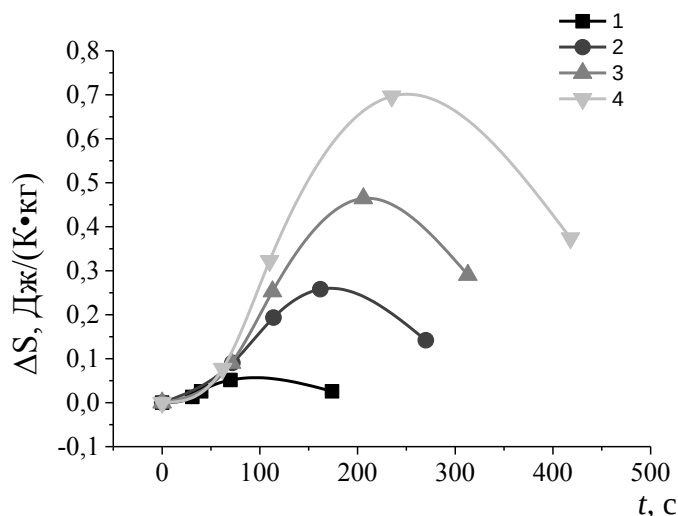


Рис. 3. Изменение удельной энтропии ΔS адсорбента ФАС-3 при адсорбции паров бензола при $T = 573$ К (t – время, с). Количество введенного адсорбтива, мл: 1 – 0,05; 2 – 0,125; 3 – 0,25; 4 – 0,5

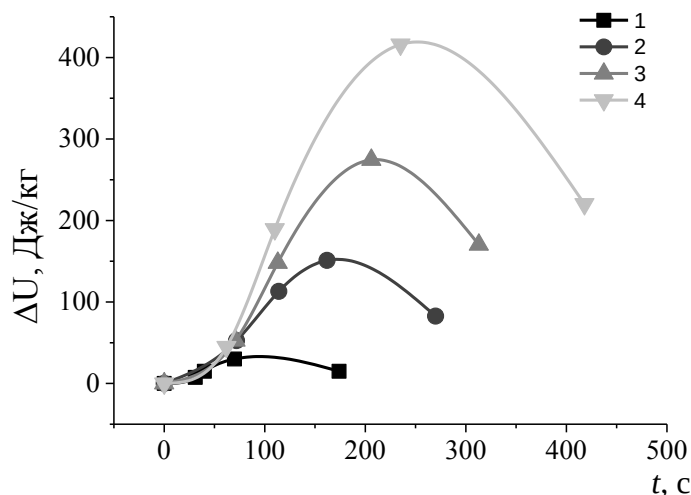


Рис. 4. Изменение удельной внутренней энергии ΔU адсорбента ФАС-3 при адсорбции паров бензола при $T = 573 \text{ K}$ (t – время, с).
Количество введенного адсорбтива, мл: 1 – 0,05; 2 – 0,125; 3 – 0,25; 4 – 0,5

Как показывает рис. 2, при всех вводимых количествах адсорбтива кривые сорбострикции имеют схожую форму: они проходят через максимум и возвращаются к нулевой исходной деформации по мере десорбции адсорбтива в проходящий газ-носитель. Заполнение основного объема микропор ответственно за формирование максимума волновой сорбострикции, величина которого определяется количеством вводимого в газ-носитель вещества. После достижения максимума сорбострикции за счет увеличения парциальной концентрации газа-носителя анализируемый компонент начинает постепенно вымываться, что приводит к плавному снижению степени деформации адсорбента и возвращению ее к исходной величине. Изменения же основных термодинамических характеристик адсорбента ФАС-3, представленных на рис. 3 и 4, повторяют ход кривых, изображенных на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен термодинамический анализ адсорбционной деформации упругодеформируемых изотропных адсорбентов и проведен расчет изменений удельных энтропии и внутренней энергии адсорбента ФАС-3 при адсорбции паров бензола в неравновесных условиях, что является количественным фактом неинертности (изменчивости) микропористого адсорбента в адсорбционном процессе.

Рассмотрение неинертности адсорбентов в адсорбционных процессах крайне важно при построении строгой теории равновесной адсорбции и в практических случаях использования адсорбентов. В связи с этим результаты работы будут востребованы, например, при учете адсорбционной деформации в качестве фактора влияния на скорость старения адсорбентов, что особенно важно при короткоцикловых режимах адсорбции и десорбции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дергунов П.И., Твардовский А.В., Фомкин А.А., Яковлев В.Ю. Описание неинертности микропористых углеродных адсорбентов при взаимодействии с газами // *Инженерно-физический журнал*. 2005. Т. 78. № 6. С. 78–83.
2. Скоробогатов А.М., Твардовский А.В. Изменение основных термодинамических характеристик полимерных сорбентов при взаимодействии с инертными газами в широком интервале давлений и температур // *Инженерно-физический журнал*. 2007. Т. 80. № 3. С. 198–200.
3. Скоробогатов А.М., Твардовский А.В. Изменение основных термодинамических характеристик для полиметилметакрилата (ПММА) при взаимодействии с диоксидом углерода // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2007. Т. 50. № 6. С. 27–28.
4. Tvardovskiy A., Nabiulin V., Fomkin A. Study of sorptive deformation of sorbent using dilatometric method // *Chemical Engineering Transactions*. 2011. V. 24. P. 583–588. DOI: 10.3303/CET1124098
5. Набиулин В.В., Фомкин А.А., Твардовский А.В. Адсорбция четыреххлористого углерода на микропористом углеродном адсорбенте AP-B // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2011. Т. 47. № 2. С. 136–139.
6. Набиулин В.В., Фомкин А.А., Твардовский А.В. Адсорбционная деформация микропористого углеродного адсорбента AP-B при адсорбции н-гексана // *Журнал физической химии*. 2011. Т. 85. № 11. С. 2100–2104.
7. Набиулин В.В., Фомкин А.А., Твардовский А.В. Деформация углеродного адсорбента AP-B при адсорбции бензола // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2012. Т. 48. № 4. С. 333–336.
8. Школин А.В., Фомкин А.А. Адсорбционная деформация микропористого углеродного адсорбента АУК при адсорбции н-гептана // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2013. Т. 49. № 4. С. 345–351. DOI: 10.7868/5004418561304013X
9. Твардовский А.В., Набиулин В.В., Фомкин А.А. Кинетика адсорбционной деформации гранулированного углеродного микропористого адсорбента при адсорбции углеводородов из потока газа-носителя // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2014. Т. 57. № 4. С. 17–19.
10. Потапов С.В., Школин А.В., Фомкин А.А. Деформация микропористого углеродного адсорбента АУК при адсорбции криптона // *Коллоидный журнал*. 2014. Т. 76. № 3. С. 382–388. DOI: 10.7868/50023291214020062
11. Школин А.В., Потапов С.В., Фомкин А.А. Деформация микропористого углеродного адсорбента АУК, стимулированная адсорбцией ксенона // *Коллоидный журнал*. 2015. Т. 77. № 6. С. 802–811. DOI: 10.7868/50023291215060208
12. Набиулин В.В., Фомкин А.А., Школин А.В., Твардовский А.В. Волновая сорбострикция рекуперационного углеродного адсорбента AP-B при адсорбции паров органических веществ // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2015. Т. 51. № 1. С. 16–23. DOI: 10.7868/50044185615010106
13. Твардовский А.В., Набиулин В.В., Фомкин А.А. Изменение термодинамических характеристик углеродного адсорбента AP-B при адсорбции бензола // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2015. Т. 58. № 10. С. 46–49.

14. Твардовский А.В., Набиулин В.В., Фомкин А.А., Зайцев Д.С. Изменение термодинамических характеристик углеродного адсорбента АР-В при адсорбции н-гексана // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2016. Т. 59. № 10. С. 30–35.
15. Меньщиков И.Е., Школин А.В., Фомкин А.А. Измерения адсорбционной и термической деформаций микропористых углеродных адсорбентов // *Измерительная техника*. 2017. № 10. С. 58–62.
16. Tvardovskiy A.V., Nabiulin V.V., Zaytsev D.S., Fomkin A.A., Shkolin A.V. Sorbostriction of AR-V carbon adsorbent in organic vapor adsorption // *Chemical Engineering Transactions*. 2017. V. 57. P. 1483–1488. DOI: 10.3303/CET1757248
17. Зайцев Д.С., Твардовский А.В., Школин А.В., Фомкин А.А. Сорбострикция микропористого углеродного адсорбента ФАС-3 при адсорбции паров органических веществ из потока газа-носителя азота // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 4. С. 54–59. DOI: 10.6060/tcct.2017604.5472
18. Фомкин А.А., Школин А.В., Пулин А.Л., Меньщиков И.Е., Хозина Е.В. Адсорбционная деформация адсорбентов // *Коллоидный журнал*. 2018. Т. 80. № 5. С. 610–619. DOI: 10.1134/50023291218050087
19. Зайцев Д.С., Твардовский А.В., Школин А.В., Фомкин А.А. Адсорбционная деформация микропористого углеродного адсорбента ФАС при прохождении через него паров воды и ацетона // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2019. Т. 62. № 2. С. 43–47. DOI: 10.6060/ivkkt.20196202.5807
20. Tvardovskiy A., Fomkin A. Sorptive deformation of porous sorbents // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. V. 73. P. 211–216. DOI: 10.3303/CET1973036
21. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976. 478 с.
22. Tvardovskiy A.V. Sorbent deformation. Amsterdam, Boston, London etc.: Elsevier (Holland), Academic Press (USA). 2006. 286 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТВАРДОВСКИЙ Андрей Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики, ректор, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tvardovskiy@tstu.tver.ru

ДМИТРИЙ Сергеевич Зайцев – аспирант кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: zaytsev.d.s@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Твардовский А.В., Зайцев Д.С. Анализ термодинамического поведения углеродного адсорбента ФАС-3 при адсорбции бензола // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 2 (6). С. 84–95.

ANALYSIS OF THE THERMODYNAMIC BEHAVIOR OF THE FAS-3 CARBON ADSORBENT DURING BENZENE ADSORPTION

A.V. Tvardovskiy, D.S. Zaytsev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. For the first time, complex studies of adsorption deformation – sorbostriction of a microporous carbon adsorbent FAS-3 were conducted at adsorption of benzene vapors from a nitrogen carrier gas stream under non-equilibrium conditions. The microporous carbon adsorbent FAS-3, obtained on the basis of furfural, was used in the work. Active coals based on FAS-grade reactoplasts are significantly superior to commercially available carbon adsorbents based on coal and peat in their strength properties and low ash content, with a significantly greater development of the volume of adsorbing micropores. Isotherms of benzene vapor adsorption by the microporous carbon adsorbent FAS-3 under equilibrium conditions were studied. The results of the study of wave sorbostriction of the microporous carbon adsorbent FAS-3 during the adsorption of benzene vapors from the nitrogen carrier gas stream allow us to conclude that the adsorbent can be used as a sensor for monitoring the content of this substance in the nitrogen stream. Formulas were presented and calculations were made for changes in the specific entropy and internal energy of the adsorbent in the adsorption process.

Keywords: adsorption, adsorbent, adsorption deformation of the adsorbent, the dilatometric method of measuring, thermodynamics of adsorption deformation of the adsorbent.

REFERENCES

1. Dergunov P.I., Tvardovskiy A.V., Fomkin A.A., Yakovlev V.Y. Description of noninertness of microporous carbon adsorbents at interaction with gases. *Inzhenerno-Fizicheskij Zhurnal*. 2005. V.78. No. 6, pp. 78–83. (In Russian).
2. Skorobogatov A.M., Tvardovskiy A.V. Changes in the main thermodynamic characteristics of polymer sorbents at interaction with inert gases in a wide range of pressures and temperatures. *Inzhenerno-Fizicheskij Zhurnal*. 2007. V. 80. No. 3, pp. 198–200. (In Russian).
3. Skorobogatov A.M., Tvardovskiy A.V. Changes in the basic thermodynamic characteristics for polymethyl methacrylate (PMMA) at interaction with carbon dioxide. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2007. V. 50. No. 6, pp. 27–28. (In Russian).
4. Tvardovskiy A., Nabiulin V., Fomkin A. Study of sorptive deformation of sorbent using dilatometric method. *Chemical Engineering Transactions*. 2011. V. 24, pp. 583–588.
5. Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Tvardovskiy A.V. Adsorption of carbon tetrachloride on a microporous carbon adsorbent AR-V. *Fizikokhimiya Poverkhnosti i Zashhita Materialov*. 2011. V. 47. No. 2, pp. 136–139. (In Russian).
6. Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Tvardovskiy A.V. Adsorption deformation of microporous carbon adsorbent AR-V during n- hexane adsorption. *Zhurnal Fizicheskoy Khimii*. 2011. V. 85. No. 11, pp. 2100–2104. (In Russian).

7. Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Tvardovskiy A.V. Deformation of the AR-V carbon adsorbent during benzene adsorption. *Fizikokhimiya Poverkhnosti i Zashhita Materialov*. 2012. V. 48. No. 4, pp. 333–336. (In Russian).
8. Shkolin A.V., Fomkin A.A. Adsorption deformation of microporous carbon adsorbent AUK during n- heptane adsorption. *Fizikokhimiya Poverkhnosti i Zashhita Materialov*. 2013. V. 49. No. 4, pp. 345–351. (In Russian).
9. Tvardovskiy A.V., Nabiulin V.V., Fomkin A.A. Kinetics of adsorption deformation of granular carbon microporous adsorbent during adsorption of hydrocarbons from the carrier gas stream. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2014. V. 57. No. 4, pp. 17–19. (In Russian).
10. Potapov S.V., Shkolin A.V., Fomkin A.A. Deformation of microporous carbon adsorbent AUK during krypton adsorption. *Kolloidnyj Zhurnal*. 2014. V. 76. No. 3, pp. 382–388. (In Russian).
11. Shkolin A.V., Potapov S.V., Fomkin A.A. Deformation of microporous carbon adsorbent AUK stimulated by xenon adsorption. *Kolloidnyj Zhurnal*. 2015. V. 77. No. 6, pp. 802–811. (In Russian).
12. Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Shkolin A.V., Tvardovskiy A.V. Wave sorbostriction of a recuperative carbon adsorbent AR-V during adsorption of organic substances. *Fizikokhimiya Poverkhnosti i Zashhita Materialov*. 2015. V. 51. No. 1, pp. 16–23. (In Russian).
13. Tvardovskiy A.V., Nabiulin V.V., Fomkin A.A. Changes in the thermodynamic characteristics of the AR-V carbon adsorbent during benzene adsorption. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2015. V. 58. No. 10, pp. 46–49. (In Russian).
14. Tvardovskiy A.V., Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Zaytsev D.S. Changes in the thermodynamic characteristics of the AR-V carbon adsorbent during n- hexane adsorption. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Seriya: KHimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2016. V. 59. No. 10, pp. 30–35. (In Russian).
15. Men'shnikov I.E., Shkolin A.V., Fomkin A.A. Measurements of adsorption and thermal deformation of microporous carbon adsorbents. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2017. No. 10, pp. 58–62. (In Russian).
16. Tvardovskiy A.V., Nabiulin V.V., Zaytsev D.S., Fomkin A.A., Shkolin A.V. Sorbostriction of AR-V carbon adsorbent in organic vapor adsorption. *Chemical Engineering Transactions*. 2017. V. 57, pp. 1483–1488.
17. Zaytsev D.S., Tvardovskiy A.V., Shkolin A.V., Fomkin A.A. Sorbostriction of microporous carbon adsorbent FAS -3 during adsorption of organic substances vapors from the nitrogen carrier gas stream. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2017. V. 60. No. 4, pp. 54–59. (In Russian).
18. Fomkin A.A., Shkolin A.V., Pulin A.L., Men'shnikov I.E., Khozina E.V. Adsorption deformation of the adsorbents. *Kolloidnyj Zhurnal*. 2018. V. 80. No. 5, pp. 610–619. (In Russian).
19. Zaytsev D.S., Tvardovskiy A.V., Shkolin A.V., Fomkin A.A. Adsorption deformation of a microporous carbon adsorbent FAS when water and acetone vapors pass through it. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2019. V. 62. No. 2, pp. 43–47. (In Russian).

20. Tvardovskiy A. Fomkin A. Sorptive deformation of porous sorbents. *Chemical Engineering Transactions*. 2019. V. 73, pp. 211–216.
21. Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular physics]. M.: Nauka, 1976. 478 p.
22. Tvardovskiy A.V. Sorbent deformation. Amsterdam, Boston, London etc.: Elsevier (Holland), Academic Press (USA). 2006. 286 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TVARDOVSKIY Andrey Viktorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, head of chair of General Physics, Rector, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tvardovskiy@tstu.tver.ru

DMITRIY Sergeevich Zaycev – graduate student of department of general physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: zaytsev.d.s@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Tvardovskiy A.V., Zaytsev D.S. Analysis of the thermodynamic behavior of the FAS-3 carbon adsorbent during benzene adsorption // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 84–95.

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 2 (6), 2020

Редактор Я.А. Петрова
Корректор А.В. Смирнов

Подписано в печать 23.06.2020

Дата выхода в свет 07.08.2020

Формат 60x84 1/8

Физ. п. л. 12

Тираж 500 экз.

Усл. п. л. 11,16

Заказ № 336

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 10,44

С – 96

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»
Центр инженерной печати

170024, г. Тверь, ул. Академическая, д. 14