



ISSN 2587-9006 (Print)
ISSN 2949-3722 (Online)

Воронежский государственный
технический университет

Химия, физика и механика
материалов

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выпуск № 3(46), 2025

ISSN 2587-9006 (Print)
ISSN 2949-3722 (Online)

***ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»***

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

- ХИМИЯ
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
- ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
- ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ
- МЕХАНИКА

Выпуск № 3(46), 2025

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Адрес учредителя и издателя: 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 - 77347 от 05.12.2019).

Главный редактор – д-р хим. наук, проф. О.Б. Рудаков

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.Т. Перцев

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.А. Небольсин

Ответственные секретари – канд. техн. наук, доц. О.Б. Кукина

канд. техн. наук, М.А. Шведова

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. О.В. Артамонова (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. Д.Е. Барабаш (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р техн. наук, проф. Л.И. Бельчинская (г. Воронеж, ВГЛУ); д-р физ.-мат. наук, проф. П.А. Головинский (г. Воронеж, ВГТУ); д-р хим. наук, проф. А.Ю. Завражнов (г. Воронеж, ВГУ); д-р хим. наук, проф. А.Н. Зяблов (г. Воронеж, ВГУ); д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН В.М. Иевлев (г. Москва, МГУ); д-р хим. наук, проф. А.В. Калач (г. Воронеж, ВИ ФСИН); д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Калинин (г. Воронеж, ВГТУ); д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. Козлов (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук Д.Н. Коротких (г. Москва, МГСУ); д-р геогр. наук, проф. С.А. Куролап (г. Воронеж, ВГУ); д-р техн. наук, проф. С.И. Лазарев (Тамбов, ТГТУ); д-р техн. наук, проф. Л.В. Моргун (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); д-р техн. наук, проф. С.Л. Подвальный (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. К.К. Полянский (г. Воронеж, ВФ РЭУ им. Г.В. Плеханова); д-р техн. наук, проф. Ю.В. Пухаренко (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ); д-р хим. наук, проф. А.М. Самойлов (г. Воронеж, ВГУ); д-р хим. наук, проф. В.Н. Семенов (г. Воронеж, ВГУ); д-р физ.-мат. наук, проф. О.В. Стогней (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. П.Т. Суханов (г. Воронеж, ВГУИТ); д-р техн. наук, проф. А.А. Трещев (г. Тула, ТулГУ); д-р техн. наук, проф. О.Л. Фиговский (Израиль, Глава Департамента по науке инновационного центра «Альянс народов мира», г. Хайфа); д-р техн. наук, доц. О.Н. Филимонова (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р биол. наук, проф. Н.Н. Харченко (г. Воронеж, ВГЛУ); д-р хим. наук, проф. Н.В. Шелехова (г. Москва, ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»); д-р техн. наук, проф. У.М. Турдалиев (Республика Узбекистан, АндМИ).

В издании публикуются результаты научных исследований и производственного опыта сотрудников ВГТУ и других образовательных, научных, научно-производственных организаций по проблемам химии, физики и механики строительных и технических материалов; химической технологии и физико-химических методов диагностики, контроля качества и безопасности материалов, применяющихся в строительстве и технике; по техносферной безопасности.

Издание рекомендуется специалистам по промышленному и гражданскому строительству, материаловедцам, технологам, инженерам, научным сотрудникам, преподавателям, аспирантам и студентам архитектурно-строительных и технических учебных заведений.

Перепечатка материалов журнала допускается только с разрешения редакции.

Дизайн обложки Н.И. Мироненко

АДРЕС РЕДАКЦИИ

394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ком. 6420

тел.: +7(473)2717617, +7(910)3452888

E-mail: chemistry.kaf@cchgeu.ru, lgkkn@rambler.ru, marishwedowa@mail.ru

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ

Шабловский Я.О. Термохимия гомофазных реакций, протекающих в обход равновесия.....	4
---	---

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Рахимов Р.З. Материаловедение, химия и геология в эпоху Просвещения.....	20
Белов В.В., Куляев П.В., Баркая Т.Р., Шишаев Д.С. Деформативные свойства зольного неавтоклавного газобетона.....	33
Усачев А.М., Мильниченко Е.А., Телегина А.В. Изучение состава и свойств лунного грунта для производства космических строительных материалов.....	49
Трещев А.А., Теличко В.Г., Бесстраинов Д.О. Деформационная псевдонеоднородность ортотропных слоев модели полупространства.....	59
Figovsky O., Hudzenko N. Non-isocyanate polyurethane foams (NIPUFS). Part 1.....	71

ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ

Усачев А.М., Власов В.В., Козодаев С.П. Оценка технического состояния железобетонного фундамента.....	90
--	----

ПЕРСОНАЛИИ

Хамизов Р.Х., Рудаков О.Б., Селеменев В.Ф., Рудакова Л.В. Академику Мясоедову Борису Федоровичу 95 лет!.....	106
Рудаков О.Б., Рудакова Л.В., Селеменев В.Ф., Хохлов В.Ю. 70 лет Руслану Хажсетовичу Хамизову.....	111

БИБЛИОГРАФИЯ

Шведова М.А. Вышло в свет новое учебное пособие по аналитической химии.....	115
--	-----

УДК 544.431.6

**ТЕРМОХИМИЯ ГОМОФАЗНЫХ РЕАКЦИЙ,
ПРОТЕКАЮЩИХ В ОБХОД РАВНОВЕСИЯ**

Я.О. Шабловский

*Гомельский государственный технический университет
им. П.О. Сухого, Белоруссия, 246746, г. Гомель, просп. Октября, 48*

Адрес для переписки: Шабловский Ярослав Олегович, e-mail: ya.shablowsky@yandex.ru

Возможность протекания реакции в обход равновесия обеспечивается тем, что состояние устойчивого (статического) равновесия безусловно имеется только у изолированных реакционных систем. Закрытая реакционная система, во-первых, может эволюционировать при отсутствии таких состояний, что имеет место при протекании сопряжённых реакций, а во-вторых, может обладать унимодальным неустойчивым равновесием и/или парциальными равновесиями, что делает возможным протекание реакции в автоколебательном режиме либо в режиме свободных колебаний. Исследованы эксергетические компенсационные эффекты, обеспечивающие автоколебания горения и криополимеризации. Знак химической эксергии определяет теплообмен, необходимый для протекания реакции, а величина количественно характеризует происходящее при этом перераспределение связанной энергии. Самопроизвольное протекание реакции может быть термодинамически запрещено не только из-за недостатка энергии, но и из-за избытка эксергии. Показано, что если целевая реакция гомофазна и притом гомогенна, то её термодинамический запрет можно обойти, осуществляя в том же реакционном объёме сопряжённую реакцию – гомофазную реакцию, расходующую вещество, идентичное одному из ожидаемых продуктов целевой реакции. Дано аналитическое выражение, детерминирующее кинетику протекания термодинамически запрещённой реакции за счёт химической индукции.

Ключевые слова: автоколебания реакции, температурные автоволны, пространственные автоволны, сопряжённые реакции, химическая индукция.

THERMOCHEMISTRY OF HOMOPHASE REACTIONS PROCEEDING BEYOND AN EQUILIBRIUM

Ya.O. Shablovsky

Gomel State Technical University, prosp. Oktyabrya, 48, Gomel, 246746, Belorussia

**Corresponding author: Yaroslav O. Shablovsky, e-mail: ya.shablovsky@yandex.ru*

Some reactions proceed continuously toward completion with exhibiting either a unimodal unstable equilibrium or the multiplicity of equilibrium states (partial equilibria) or the total absence of the equilibrium. The unimodal unstable equilibrium and the multiplicity of equilibrium states refer correspondingly to auto-oscillations (self-oscillations) and to free oscillations of the reaction. The total absence of the equilibrium is inherent in conjugate reactions, i.e. in couples of chemical reactions, one of which (the induced reaction) is impossible in the absence of the other one (the inducing reaction) because of being thermodynamically prohibited. Thermochemical regularities of such reactions are revealed, and it is shown that they are determined neither by positive or negative feedback nor by autocatalytic phenomena. To sum up, the reactions that proceed beyond the equilibrium have two common features. First, a non-degenerate stable equilibrium in the reaction system is unachievable. Second, the achievable equilibrium in the reaction system is non-unimodal. Special attention is paid to autowave regimes of combustion and cryopolymerization.

Keywords: auto-oscillatory reaction, температурные автоволны реакции, thermal autowaves, spatial autowaves, conjugate reactions, chemical induction.

Введение

Сопряжение химических процессов [1] может приводить не только к самоускорению/самозамедлению реакции (положительная/отрицательная обратная связь), но и к её протеканию в обход равновесия. В технологической практике с таким протеканием реакции обычно сталкиваются при её переходе в автоколебательный режим. Контролируемое колебательное проведение реакции в ряде случаев предпочтительнее непрерывного режима. Эти преимущества весьма значимы при осуществлении некоторых деликатных процессов пищевой

и фармацевтической химии (см., например, [2, 3]). Вместе с тем, химические автоколебания могут возникать спонтанно, что является серьёзной проблемой.

Так, форма осцилляций гидратационного тепловыделения при твердении бетонной смеси указывает на автоколебательный характер поглощения катионов Ca^{2+} поликремниевой кислотой [4], но химизм этих автоколебаний до сих пор не ясен [5]. Другой пример – спонтанные автоколебания реакций окисления углеводов. Эти автоколебания обуславливают одно из самых страшных техногенных явлений – вибрационное горение. Его теория далека от завершения, но хорошо известно, что вибрационное горение можно осуществить в особой установке – трубе Рийке [6]. Форсированные автоколебаниями горение позволяет сжигать отходы, которые в обычных утилизационных печах сгорают с низкой полнотой или не горят вовсе.

Тепловые эффекты реакций – ключевой фактор химического сопряжения, когда реакция гомофазна, т.е. реакционное пространство трёхмерно однородно и макроскопически изотропно. При гомофазных реакциях автоколебания представляют собой самосопряжённый процесс, поэтому методологически продуктивно рассматривать их в едином контексте с сопряжёнными реакциями. Данное концептуальное единство отмечалось ещё в работе [7], но идея не получила развития из-за фактического отсутствия теории сопряжённых реакций.^{*)} Цель нашей работы – выявление термохимических закономерностей сопряжения процессов при гомофазных реакциях, протекающих в обход равновесия.

Теоретический анализ

Будем использовать стандартные обозначения: G – энергия Гиббса, T – температура, S – энтропия, H – энтальпия, Δ_r – изменение соответствующей величины при протекании реакции. В закрытой системе реакция не протекает, если отвечающее ей изменение энергии Гиббса неотрицательно:

^{*)} Как указали авторы обзора [8], отсутствует не только общепринятая теоретическая концепция, но и единая терминология.

$$\Delta_r G \geq 0.$$

В данном выражении неравенство соответствует термодинамическому запрету, а равенство – остановке реакции в состоянии устойчивого (статического) равновесия

$$\left. \begin{array}{l} \Delta_r G = 0, \\ \delta(\Delta_r G) > 0, \\ \delta^2(\Delta_r G) > 0. \end{array} \right\} \quad (1)$$

Состояние (1) безусловно существует только у изолированных систем. Закрытая система может быть лишена таких состояний: тогда равенству $\Delta_r G = 0$ соответствует

$$\left. \begin{array}{l} \delta(\Delta_r G) \leq 0, \\ \delta^2(\Delta_r G) \leq 0. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Ограничение (2) допускает следующие случаи:

$$\Delta_r G \equiv 0 \quad (3)$$

либо

$$\left. \begin{array}{l} \Delta_r G = 0, \\ \delta(\Delta_r G) < 0, \\ \delta^2(\Delta_r G) < 0. \end{array} \right\} \quad (4)$$

В случае (3) система в целом сохраняет безразличное равновесие безотносительно к парциальным процессам в ней. Это, в частности, имеет место в режиме свободных колебаний, когда протекающие реакции термодинамически альтернативны и циклично чередуются. Такой режим был рассмотрен в нашей предшествующей работе [9].

В случае (4) равновесие унимодально и абсолютно неустойчиво, что свойственно автоколебаниям. Для их возникновения необходима обратная связь, т.е. синхронизированность разнонаправленных преобразований химической энергии. Величина G характеризует однонаправленное преобразование энергии в работу химического превращения, поэтому для количественной оценки энергетической обеспеченности автоколебаний мы будем руководствоваться следующим.

Если реакция – эндотермическая, то при её протекании поглощается теплота

$$\Delta Q = \Delta_r H + (-\Delta_r G) = T \Delta_r S,$$

а если реакция – экзотермическая, то теплота

$$\Delta Q = -\Delta_r H + \Delta_r G = -T \Delta_r S$$

при $\Delta_r S < 0$ отдаётся внешней среде, а при $\Delta_r S > 0$ поглощается из неё. Эти выражения для теплоты ΔQ дают основания принять следующее определение химической эксергии реакции:

$$\Xi = -T \Delta_r S. \quad (5)$$

Видно, что

$$\Xi \Big|_{T \rightarrow 0} \rightarrow 0,$$

как того требует общая концепция эксергии.

Определение (5) позволяет совместить баланс энтропии реакционной системы с балансом её связанной энергии. Воспользуемся этим преимуществом.

Термохимия гомофазных автоколебаний

Теплообмен, необходимый для протекания реакции, определяется знаком эксергии этой реакции. В самом деле, согласно (5) отрицательная величина Ξ по модулю равна количеству теплоты, без поглощения которого протекание данной реакции невозможно; если же величина Ξ положительна, то она равна количеству теплоты, которое при протекании данной реакции должно быть отведено вовне.

Осуществимость теплообмена и его продуктивность определяются не химическими, а физико-техническими свойствами реакционной системы. По данной причине химически идентичные реакционные системы, различающиеся гранулометрически, конструктивно и т. п., будут эволюционировать в разных режимах.

В частности, сказанное означает, что потенциально автоколебательной является любая реакция горения. Применительно к газовым и парожидкостным смесям это очевидно, поскольку таким смесям свойственен термоакустический резонанс. В контексте нашего рассмотрения интерес представляет возможность возникновения автоколебаний при горении твёрдого топлива.

Протекание реакции сопровождается перераспределением связанной энергии, количественно характеризуемым величиной Ξ . Общеизвестно, что воспламенению твёрдого топлива предшествует термолиз его компонентов с образованием летучих веществ и золы. Зола обычно расценивается как балластный побочный продукт горения. Между тем, с термохимической точки зрения золу корректно рассматривать как полноправный продукт первичной реакции. Для оценки температурной зависимости $S_a(T)$ удельной энтропии золы мы воспользовались усреднёнными значениями теплоёмкости золы твёрдых топлив [10]. Обработка этих значений дала следующие выражения:

$$S_a = S_a^\circ + \left(0.853 \ln T + 1.084 \cdot 10^{-4} T + \frac{5968.50}{T^2} \right) \text{кДж/кгК}, \quad 373 < T < 1473 \text{ К};$$

$$S_a = S_a^\circ + \left(1.831 \ln T - 1.379 \cdot 10^{-4} T + \frac{679493.45}{T^2} \right) \text{кДж/кгК}, \quad 1473 < T < 2273 \text{ К},$$

где S_a° – стандартная энтропия золы, на основании [11] принятая нами равной 660 кДж/кгК.

Разные компоненты топлива имеют разную температуру разложения и разную удельную энтропию S_d при этой температуре; для основных компонентов известных твёрдых топлив величины S_d , рассчитанные нами по литературным данным [12 – 16], приведены в таблице. Благодаря данному различию можно для любого природного (т.е. многокомпонентного) топлива указать его компонент, у которого при температуре термолиза удельная связанная энергия TS_d совпадает в пределах технической погрешности с удельной связанной энергией золы TS_a . При таком совпадении термолиз этого компонента выйдет из-под эксергетических ограничений и будет протекать безотносительно к теплообмену в зоне реакции.

Формально схожий компенсационный эффект способен вызвать автоколебания криополимеризации. Исследуем эту возможность.

Криополимеризацию, как и всякую радиационно-индуцированную реакцию, инициируют созданием дефектов (активных центров) в объёме исходной мономерной твёрдой фазы. Их образование сопровождается возникновением плотностных градиентов, из-за которых отклонения от правила Келли-Кубашевского отрицательны, т.е.

$$\Delta_r S < 0. \quad (6)$$

Таблица 1

Удельная энтропия компонентов твёрдых топлив в точке термоллиза

Вещество	S_d , кДж/кг К	Вещество	S_d , кДж/кг К
Мочевина	138,422	Янтарная кислота {Бутандиовая кислота}	256,283
Щавелевая кислота	167,594	Аспарагиновая кислота {(2S)-2-Аминобутандиовая кислота}	269,905
Дицианодиамид {2- Цианогуанидин}	192,398	Креатинин {2-Амино-1- метилимидазолидин-4-он}	252,750
Глицин {2-Аминоуксусная кислота}	160,793	Глицилглицин {2-[(2-Амино- ацетил)амино]уксусная кисло- та}	283,701
Меламин {1,3,5-Триазин-2,4,6-триамин}	270,140	L-Аспарагин {(2S)-2,4- Диамино-4-оксобутановая кислота}	267,676
L-Аланин {(2S)-2-Аминопропановая кислота}	217,261	Креатин {N- [Амино(имино)метил]-N- метилглицин}	300,305
L-Серин {(2S)-2-Амино-3- гидроксипропановая кислота}	224,602	Гипоксантин {1,7-Дигидро-6Н-пурин-6-он}	200,421
Аллоксан {1,3-Диазинан-2,4,5,6-тетрон}	247,842	Ксантин {3,7-Дигидропурин-2,6-дион}	244,719
Малеиновая кислота {(Z)-Бутендиовая кислота}	210,981	Мочевая кислота {7,9-Дигидро-3Н-пурин-2,6,8- трион}	288,846
Фумаровая кислота {2-Бутендиовая кислота}	264,473	Аденин {9Н-Пурин-6-амин}	267,500
Аллантоин {(2,5-Диоксо-4- имидазолидинил)мочевина}	300,598	Гуанин {2-Амино-1,9- дигидро-6Н-пурин-6-он}	287,448
L-пролин {(2S)-Пирролидин- 2-карбоновая кислота}	247,607	L-Цистин {(2R,2'R)-3,3'- Дисульфан-диилбис(2- аминопропановая кислота)}	435,254

Вещество	S_d , кДж/кгК	Вещество	S_d , кДж/кгК
L-Глутаминовая кислота {(2S)-2-Аминоглутаровая кислота}	293,842	α -D-Глюкоза {(2S,3R,4S,5S,6R)-6- (Гидроксиметил)оксан-2 ,3,4,5-тетрол}	399,049
DL-Аланилглицин {2-(2- Аминопро- паноиламино)уксусная кисло- та}	320,416	L-Сорбоза {(3S,4R,5S)- 1,3,4,5,6- Пентагидроксигексан-2-он}	460,361
L-Глютамин {(2S) -2,5- Диамино-5-оксопентановая кислота}	283,969	L-лейцин {(2S)-2-Амино-4- метилпентановая кислота}	349,342
L-Валин {(2S)-2-Амино-3- метилбутановая кислота}	300,591	L-Изолейцин {(2S,3S)-2- Амино-3-метилпентановая кислота}	333,974
Метионин {(2S)-2-Амино-4- (метилсульфанил)бутановая кислота}	424,316	Бензойная кислота	286,055
1,2-Динитробензол	362,386	2-Нитробензойная кислота	298,898
1,3-Динитробензол	358,408	3-Нитробензойная кислота	306,637
Фенол	204,653	4-Нитробензойная кислота	317,678
Катехол {Бензол-1,2-диол}	234,241	<i>o</i> -Гидроксibenзойная кислота {2-Гидроксibenзойная кисло- та}	293,900
Резорцин {Бензол-1,3-диол}	236,322	<i>m</i> -Гидроксibenзойная кисло- та {3-Гидроксibenзойная кисло- та}	298,198
Гидрохинон {Бензол-1,4- диол}	228,515	<i>p</i> -Гидроксibenзойная кислота {4-Гидроксibenзойная кисло- та}	260,277
Ангидрид фталевой кислоты {2-Бензофуран-1,3-дион}	287,336	Дифенил эфир {1,1'- Оксидибензол}	369,039
<i>o</i> -Фталевая кислота {Бензол-1,2-дикарбоновая кислота}	306,750	Дифениламин {N- Фениланилин}	448,595
Гиппуровая кислота {2-Бензамидоуксусная кисло- та}	367,447	Гексаметилбензол {1,2,3,4,5,6- Гексаметилбензол}	462,053
L-Фенилаланин {(2S)-2- Амино-3-фенилпропановая кислота}	344,539	Сахароза { β -D- Фруктофуранозил α -D- глюкопиранозид}	603,326
L-Тирозин {(2S)-2-Амино-3- (4-гидроксифенил)пропановая кислота}	364,705	Бензофенон {Дифенилмета- нон}	409,109
Нафталин	338,668	Дифенилкарбинол {Дифе- нилметанол}	409,195
2-Метилнафталин	336,255	Антрацен	367,786

Вещество	S_d , кДж/кгК	Вещество	S_d , кДж/кгК
L-Триптофан {(2S)-2-Амино-3-(1H-индол-3-ил)пропановая кислота}	408,752	Фенантрен	382,971
Дурол {1,2,4,5-Тетраметилбензол}	349,990	1,2-Дифенилэтилен {1,1'-(Этилен-1,2-диил)дибензол}	415,653
Гиппурилглицин {2-[(2-Бензамидо-ацетил)амино]уксусная кислота}	631,866	Дибензил {1,1'-Этан-1,2-диилдибензол}	440,162
Пентаметилбензол {1,2,3,4,5-Пентаметилбензол}	414,859	Пирен	421,650
Бифенил {1,1'-Бифенил}	332,018	Флуорантен	421,026
1,4-Дифенил-2-бутен-1,4-дион	549,979	1,3,5-Трифенилбензол	712,416
1,4-Дифенил-1,4-бутандион	575,542	Перилен	536,325
Гексадекановая кислота	803,426	Коронен	599,806
1-Гексадеканол {Гексадекан-1-ол}	775,669	Тетрацен {2,3-Бензантрацен}	428,926
Трифенилен	484,336	Тетракозан	1263,394
Трифенилметан	545,692	Тетрафенилметан {1,1',1'',1'''-Метантетраилтетрабензол}	700,879
Трифенилметанол	581,737	Пентакозан	1327,594
Трифениламин {N,N-Дифениланилин}	533,436	Дотриаконтан	1678,328
Трифенилэтилен {1,2-Дифенилэтилендибензол}	579,349	Тритриаконтан	1736,151

Поскольку

$$\Delta_r G = \Delta_r H + \Xi, \quad (7)$$

из (5) – (7) следует, что при критическом перепаде $\Delta_r S$ на фронте криополимеризации возможно $\Delta_r G \rightarrow 0$. Для нашего рассмотрения существенно, что скачок молярной энтропии $\Delta_r S$ сопряжён с соответствующим скачком молярного объёма, т.е. с возникновением реакционного напряжения. В идеальном кристалле топохимическая реакция тормозится даже при незначительных реакционных напряжениях. В стеклообразном мономере благодаря отсутствию в его структуре трёхмерной трансляционной инвариантности возможна объёмная релаксация реакционного напряжения, после которой остановленное этим напря-

жением движение фронта полимеризации возобновится (хемомеханические автоволны).

Автоволны криополимеризации могут быть не только пространственными, но и температурными. В самом деле, полимеризация экзотермична, поэтому ввиду малости теплоёмкости и теплопроводности криохимической реакционной зоны неизбежен её локальный перегрев. Если при этом будет достигнута температура $\tilde{T}$, для которой

$$\left(\Delta_r G\right)\Big|_{T=\tilde{T}} = 0, \quad (8)$$

то реакционный процесс остановится, а затем возобновится после восстановления температуры в реакционной смеси.

Химическая индукция гомофазных реакций

Обычно для преодоления термодинамического запрета реакции ищут возможности подвода энергии к реакционной системе. Между тем, из равенства

$$\Delta_r G = \Delta_r H + \Xi \quad (9)$$

следует: самопроизвольное протекание реакции может быть термодинамически запрещено не только из-за недостатка энергии, но и из-за её избытка, а точнее, из-за избытка эксергии, т.к. экзотермические реакции неосуществимы при

$$\Xi > -\Delta_r H > 0, \quad (10)$$

а эндотермические реакции неосуществимы при

$$\frac{\Xi}{\Delta_r H} > -1. \quad (11)$$

Если целевая реакция гомофазна и притом гомогенна, то её термодинамический запрет можно обойти с помощью химической индукции. Покажем это.

Рассмотрим закрытый объём V , содержащий вещества A и L. Пусть гомофазная гомогенная реакция



термодинамически запрещена, т.к. соответствующее приращение энергии Гиббса

$$\Delta_r G(I) = \Delta_r H(I) + \Xi(I) > 0.$$

В таком случае в закрытой реакционной системе (I) невозможно самопроизвольное изменение её энергии Гиббса:

$$\frac{dG(I)}{dt} \equiv 0,$$

т.е.

$$\mu_A \varsigma_A + \mu_L \varsigma_L + \mu_J \varsigma_J + \mu_R \varsigma_R \equiv 0, \quad (12)$$

где

$$\varsigma = \frac{dn}{dt},$$

n – число молей компонента, μ – его химический потенциал, t – время. Очевидно, что

$$\varsigma_A \leq 0, \quad \varsigma_L \leq 0, \quad (13)$$

а если реакция (I) не протекает, то

$$\varsigma_A = \varsigma_L = \varsigma_J = \varsigma_R = 0. \quad (14)$$

Теперь положим, что имеет место сопряжение реакций: в объёме V протекает гомофазная реакция



расходуемая вещество R , идентичное одному из ожидаемых продуктов реакции (I). Тогда процесс (II) создаст стационарное отклонение

$$\varsigma_R < 0,$$

и в объёме V статическое равновесие (14) станет невозможным, в то время как требование (12) и очевидное ограничение (13) останутся в силе. Вследствие этого в условиях сопряжения реакций (I) и (II)

$$\varsigma_J > 0,$$

т.е. реакция (II) индуцирует протекание реакции (I) в режиме, кинетика которого подчинена требованию (12).

Протекание сопряжённых реакций (I) и (II) в одном и том же объёме обеспечивает антибатную и стехиометрически соразмерную компенсацию не только у приращений сопрягающего компонента R, но и у соответствующих термодинамических эффектов. Если $\Delta_r H(I) < 0$, то для индуцирования реакции (I) достаточно компенсировать её избыточную положительную эксергию $\Xi(I)$, т.е. выполнить требование

$$-\Xi'' > \Xi' > 0, \quad (15)$$

где

$$\Xi' = \frac{\Xi(I)}{v'_R}, \quad \Xi'' = \frac{\Xi(II)}{v''_R},$$

$\Xi(II)$ – эксергия реакции (II). Если же $\Delta_r H(I) > 0$, то термодинамический запрет реакции (I) будет обойдён при её сопряжении с реакцией (II), у которой

$$-\Xi'' > G' > 0, \quad (16)$$

где

$$G' = \frac{\Delta_r G(I)}{v'_R}.$$

Требование материального (мольного) баланса при этом выполняется автоматически благодаря рациональности стехиометрического соотношения между $\zeta_R < 0$ для индуцирующей реакции (II) и $\zeta_R > 0$ для индуцированной реакции (I).

Заключение

I. Возможность протекания реакции в обход равновесия обеспечивается тем, что состояние устойчивого (статического) равновесия безусловно существует только у изолированных систем, тогда как закрытая система может эволюционировать, вовсе не имея таких состояний либо имея унимодальное неустойчивое равновесие и/или парциальные равновесия [условия (3), (4)].

II. Равенства (9) – (11) показывают, что самопроизвольное протекание реакции может быть термодинамически запрещено не только из-за недостатка

энергии, но и из-за избытка эксергии Ξ , знаком которой определяется характер теплообмена, необходимого для протекания реакции. Отрицательная эксергия реакции по модулю равна количеству теплоты, без поглощения которого протекание данной реакции невозможно, а положительная эксергия реакции равна количеству теплоты, которое должно быть отведено вовне.

III. Величина Ξ количественно характеризует перераспределение связанной энергии при протекании данной реакции. Для любого природного твёрдого топлива можно указать его компонент [см. таблицу], у которого при температуре термоллиза удельная связанная энергия совпадает с удельной связанной энергией золы. При таком совпадении термоллиз этого компонента выйдет из-под эксергетических ограничений и будет протекать безотносительно к теплообмену в зоне реакции, т.е. в обход статического равновесия. Формально схожий компенсационный эффект способен вызывать температурные и пространственные автоволны криополимеризации [соотношения (6) – (8)].

IV. Если целевая реакция гомофазна и притом гомогенна, то её термодинамический запрет можно обойти, осуществляя в том же реакционном объёме сопряжённую реакцию – гомофазную реакцию (II), расходующую вещество, идентичное одному из ожидаемых продуктов целевой реакции (I). Тогда при выполнении требования (15) [либо альтернативного требования (16)] термодинамически запрещённая реакция будет протекать в режиме, кинетика которого подчинена ограничению (12).

Список литературы

1. Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations. London, New York: John Wiley & Sons Ltd, 1971. 306 p.
2. Рудаков О.Б., Королькова Н.В., Полянский К.К., Рудакова Л.В., Котик О.А. Технохимический контроль в технологии жиров и жирозаменителей. Санкт-Петербург: "Лань", 2020. 576 с.

3. Селеменев В.Ф., Рудакова Л.В., Рудаков О.Б., Беланова Н.А., Мироненко Н.В. Витамины как объекты пищевой химии и фармакологии. Воронеж: "Научная книга", 2022. 212 с.
4. Вернигорова В.Н., Таубе П.Р. Концентрационные автоколебания в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ // Журнал физ. химии. 1979. Т. 53. № 4. С. 966–969.
5. Вернигорова В.Н., Саденко С.М. О нестационарности физико-химических процессов, протекающих в бетонной смеси // Строительные материалы. 2017. № 1-2. С. 86–89.
6. Rijke P.L. Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen // Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie. 1859. Bd. 183. H. 6. S. 339–343.
7. Keizer J. Thermodynamic coupling in chemical reactions // Journal of Theoretical Biology. 1975. Vol. 49, № 2. P. 323–335.
8. Брук Л.Г., Тёмкин О.Н. Сопряжённые реакции: новые возможности старой идеи // Кинетика и катализ. 2016. Т. 57, № 3. С. 275–295.
9. Шабловский, Я.О. Термодинамическая критеризация гомофазных колебательных реакций // Химия, физика и механика материалов. 2024. № 3. С. 4–18.
10. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования. М.: Наука, 1971. С. 85.
11. Yang Zh., Yuanhui J., Hongliang Q. Progress in thermodynamic simulation and system optimization of pyrolysis and gasification of biomass // Green Chemical Engineering. 2021. Vol. 2, № 3. P. 266-283.
12. Pedley J.B., Naylor R.D., Kirby S.P. Thermochemical Data of Organic Compounds. 2nd Ed. London: Chapman & Hall, 1986. 792 p.
13. Pedley J.B. Thermochemical Data and Structures of Organic Compounds. Thermodynamics Research Center: College Station, Texas. 1994. 579 p.
14. Dolmalski E.S., Evans W.H., Hearing E.D. Heat Capacities and Entropies of Organic Compounds in the Condensed Phase // Journ. Phys. Chem. Reference Data. 1984. Vol. 13, Suppl. 1. 284 p.

15. Dolmalski E.S., Evans W.H., Hearing E.D. Heat Capacities and Entropies of Organic Compounds in the Condensed Phase. Volume II // Journ. Phys. Chem. Reference Data. 1990. Vol. 19. № 4. P. 881–1047.
16. Domalski E.S., Hearing E.D. Heat Capacities and Entropies of Organic Compounds in the Condensed Phase. Volume III // Journ. Phys. Chem. Reference Data. 1996. Vol. 25. № 1. P. 1–524.

References

1. Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations. London, New York: John Wiley & Sons Ltd, 1971. 306 p.
2. Rudakov O.B., Korol'kova N.V., Poljanskij K.K., Rudakova L.V., Kotik O.A. Tehnohimicheskij kontrol' v tehnologii zhirov i zhirozamenitelej. Sankt-Peterburg: "Lan", 2020. 576 p. (in Russian)
3. Selemenov V.F., Rudakova L.V., Rudakov O.B., Belanova N.A., Mironenko N.V. Vitaminy kak obyekty pishhevoj himii i farmakologii. Voronezh, "Nauchnaja kniga", 2022. 212 p. (in Russian)
4. Vernigorova V.N., Taube P.R. Koncentracionnye avtokolebanija v sisteme $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Zhurnal fiz. himii, 1979, vol. 53, no. 4, pp. 966–969. (in Russian)
5. Vernigorova V.N., Sadenko S.M. O nestacionarnosti fiziko-himicheskikh processov, protekajushhih v betonnoj smesi. Stroitel'nye materialy, 2017, no. 1-2, pp. 86–89. (in Russian)
6. Rijke P.L. Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen // Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie. 1859. Bd. 183. H. 6. S. 339–343.
7. Keizer J. Thermodynamic coupling in chemical reactions // Journal of Theoretical Biology. 1975. Vol. 49, № 2. P. 323–335.
8. Bruk L.G., Temkin O.N. Conjugate reactions: new potentials of an old idea // Kinetics and Catalysis. 2016. V. 57. № 3. pp. 277-296.

9. Shablovsky Ya.O. Thermodynamical criterization of homophase oscillating reactions. *Himija, fizika i mehanika materialov*, 2024, no. 3, pp. 4–18. (in Russian)
10. Ravich M.B. *Toplivo i jeffektivnost' ego ispol'zovanija*. M.: Nauka, 1971. С. 85.
11. Yang Zh., Yuanhui J., Hongliang Q. Progress in thermodynamic simulation and system optimization of pyrolysis and gasification of biomass // *Green Chemical Engineering*. 2021. Vol. 2, № 3. P. 266-283.
12. Pedley J.B., Naylor R.D., Kirby S.P. *Thermochemical Data of Organic Compounds*. 2nd Ed. London: Chapman & Hall, 1986. 792 p.
13. Pedley J.B. *Thermochemical Data and Structures of Organic Compounds*. Thermodynamics Research Center: College Station, Texas. 1994. 579 p.
14. Dolmalski E.S., Evans W.H., Hearing E.D. *Heat Capacities and Entropies of Organic Compounds in the Condensed Phase* // *Journ. Phys. Chem. Reference Data*. 1984. Vol. 13, Suppl. 1. 284 p.
15. Dolmalski E.S., Evans W.H., Hearing E.D. *Heat Capacities and Entropies of Organic Compounds in the Condensed Phase. Volume II* // *Journ. Phys. Chem. Reference Data*. 1990. Vol. 19. № 4. P. 881–1047.
16. Domalski E.S., Hearing E.D. *Heat Capacities and Entropies of Organic Compounds in the Condensed Phase. Volume III* // *Journ. Phys. Chem. Reference Data*. 1996. Vol. 25. № 1. P. 1–524.

Шабловский Ярослав Олегович – канд. физ.-мат. наук, доцент энергетического факультета Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 691

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ХИМИЯ И ГЕОЛОГИЯ В ЭПОХУ ПРОСВЕЩЕНИЯ

Р.З. Рахимов

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
Российская Федерация, 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1*

Адрес для переписки: Рахимов Равиль Зуфарович, e-mail: rahimova.07@list.ru

В 17 – 18-ом веках, времени, получившего название эпоха Просвещения, получило начало распространения идеалов прогресса научного знания, вопреки предрассудкам и суевериям, произошел отказ от религиозного мировоззрения предшествующих эпох и обращения к разуму, как единственному критерию назначения. Это период начала открытий в различных областях фундаментальных наук основе исследований и экспериментов.

В 17 – 18 веках достигнуты определенные успехи в: разработках, производства и применения материалов и материаловедения в областях: керамики, стекла, минеральных вяжущих и материалов на их основе, металлов; разработках и применения техники и методов исследований.

Этот период характеризуется формированием научных основ материаловедения, в который значительный вклад внесли развивающиеся в эпоху Просвещения химия и геология.

Ключевые слова: материаловедение, химия, геология, эпоха просвещения

MATERIALS SCIENCE, CHEMISTRY AND GEOLOGY IN THE AGE OF ENLIGHTENMENT

R.Z. Rakhimov

*Kazan State University of Architecture and Engineering, ul. Zelenaya, 1, 420043,
Russian Federation*

Corresponding author: Ravil Z. Rakhimov, e-mail: rahimova.07@list.ru

In the 17th and 18th centuries, the time called the age of Enlightenment, the ideals of the progress of scientific knowledge began to spread, contrary to prejudices and superstitions, there was a rejection of the religious worldview of previous eras and an appeal to reason as the only criterion of appointment. This is the period of the beginning of discoveries in various fields of fundamental sciences based on research and experiments.

In the 17th – 18th centuries, certain successes were achieved in the development, production and application of materials and materials science in the fields of: ceramics, glass, mineral binders and materials based on them, metals; developments and applications of research techniques and methods.

This period is characterized by the formation of the scientific foundations of materials science, to which chemistry and geology, which developed during the Enlightenment, made a significant contribution.

Keywords: materials science, chemistry, geology, the Age of Enlightenment

«Прежде чем обратить взор в будущее, надо как следует изучить прошлое»

Конфуций – мыслитель и философ Древнего Китая 1-го века до н.э.

Развитие химии в эпоху Просвещения

Химия – одна из отраслей естествознания, предметом изучения которой являются химические элементы (атомы), образуемые ими простые и сложные вещества (молекулы, минералы, материалы), их превращения и законы, которым они подчиняются.

В первой половине 17-го века главным направлением деятельности химиков, в подавляющем большинстве врачей и аптекарей – ятрохимия, которая представляет собой собрание рецептов составов и смесей отдельных веществ, преимущественно без всяких попыток научного обобщения явлений. В этом плане развивалось лишь учение о биохимическом катализе. Виднейший представитель ятрохимиков бельгийско-голландский химик, врач и мистик Я.Б. ван

Гельмонт, развивая это учение, ввел в химию групповое название газообразных продуктов, ввел термины «газ» (с латинского газ – хаос) и «фермент». Алхимические представления еще превалировали в умах химиков.

В это же время разработаны отдельные приемы качественного химического анализа, впервые установлено, что соли – продукты взаимодействия кислот и щелочей; впервые в эпоху ятрохимии в химию введен эксперимент, который стал играть основную роль в развитии химического анализа и установлении истинных составных частей сложных веществ. Немецкий врач ятрохимик О.Тахений ввел в химическую практику некоторые реактивы для определения составных частей минералов.

Первая половина 17-го века была переломным периодом в развитии химии. В то время как механика, физика и астрономия к середине 17-го века достигли определенных успехов, химия значительно отставала в своем развитии. В этот период сочетание новаторских и крайне реакционных взглядов характеризовало большую часть химиков всего натрохимического периода в развитии химии, который рассматривал ее как раздел медицинской науки. В этот же период времени немецкий химик И.Р. Глаубер разработал способы получения чистых соляной и азотной кислот. В работе «Химические соединения» описал получение и свойства «глауберовой соли» – $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, которая применяется в стекольном и содовом производстве.

1-я половина 17-го века – этап приближения к созданию химии как науки, характерный накоплением навыков экспериментальной работы, усовершенствованием лабораторных приборов.

Во второй половине 17-го века был положен отход от алхимии, преобразования химии в науку. Англо-ирландский физик, химик и богослов Р. Бойль сформулировал первое научное определение химического элемента; положил начало химическому анализу, ввел индикаторы в растворах; внес разграничения между «элементом», «соединением» и «смесью», разработал корпускулярную теорию. Он в своей книге 1661-го года «Химик-скептик» убрал первый слог из слова «алхимия» и эта область науки стала «химией», основоположником кото-

рой традиционно считается Р. Бойль. В сочинениях химиков 2-ой половины 17-го века большое внимание уделялось вопросам горения и кальцинации (превращения в известь) металлов.

В 1665-ом году английский естествоиспытатель Р. Гук опубликовал сочинение «Микрография», в котором изложена общая теория горения с представлением процесса горения как распада горючих тел.

В последней четверти 17-го века появились так называемые эклектические воззрения в трудах французского химика Н. Лемери и др., которые пытались увязать алхимические традиции и новые представления о химических элементах.

2-я половина 17-го века – с появления первого определения химического элемента, развития качественного анализа началось формирование химии на уровне науки.

С начала 18-го века у химиков все больше места занимали экспериментальные исследования по проблемам практической и технической химии. В ремесленных производствах до 17-го века из щелочей использовались сода и поташ. Соду получали из рассолов содовых озер и золы морских водорослей, поташ получали из золы деревьев. Это привело в 17-ом веке к истреблению лесов в некоторых районах Европы. Поваренную соль добывали в соляных копиях, из морской воды, воды соляных источников.

К концу 17-го – началу 18-го веков капиталистическое производство во многих странах получило все расширяющееся развитие. Зародилось машинное производство. В это время и в России происходят значительные экономические перемены: развиваются мануфактуры, разрабатывающие горнорудные богатства, значительное развитие получила металлургическая промышленность. 17-ый век для России был периодом, подготовившим базу для того, чтобы в 18-ом веке наука сразу встала на ноги.

С середины 18-го века в мировую химическую практику вошли методы и приемы качественного химического анализа, многие из которых легли в основу зарождающейся аналитической химии. Во второй половине 18-го века возникли и методы весового количественного анализа, некоторые приемы объемного

анализа (титрование). Историки химии вторую половину 18-го века называют аналитическим периодом в развитии химии. В 1748-ом году в Санкт-Петербурге студентам был прочитан первый в истории науки курс физической химии (М.В. Ломоносов).

В начале 18-го века получили некоторое развитие и атомистические идеи. В 1704-ом году И. Ньютон в работе «Оптика» высказал предположение умозрительное о том, что тела состоят из «частичек», разделенных промежутками. Научная атомистика, обоснованная экспериментально, зародилась позже именно в химии.

Основной движущей силой в развитии химической науки в первой половине 18-го века стало развитие учения об элементах, начавшейся с предложенной в 1703-ем году немецким химиком Г.Э. Шталем теории флогистона для объяснения процесса горения. Флогистон в истории химии – гипотетическая «сверхтонкая материя» – «огненная субстанция», якобы наполняющая все горючие вещества и высвобождающаяся при горении. Теория флогистона послужила мощным стимулом для развития количественного анализа сложных тел. Она стимулировала изучение газообразных продуктов и в результате появилась пневматическая химия. Начало пневматической химии было положено шотландскими химиками Дж. Блеком и Д. Резерфордом: введены понятия теплостойкости, открыты теплоты плавления и парообразования; опубликована работа о том, что при нагревании белой магнезии (MgCO_3) из нее выделяется «священный воздух» – углекислый газ, а с потерей массы образуется жженая магнезия (MgO).

Вторая половина 18-го века – английский ученый химик и физик Генри Кавендиш (1731 – 1810) открыл водород и состав воды, впервые осуществил синтез азотной кислоты из воздуха. Осуществил крупнейшие открытия в области пневматической химии. Его лаборатория превратилась в одну из ведущих научно-исследовательских лабораторий мира. Выполняя в ней исследования он: разработал методику собирания, очистки и изучения газов, с помощью которой получил водород и углекислый газ в чистом виде, установил их удельный

вес и другие свойства; определил состав воздуха и химический состав воды. Ввел в науку понятие электрического потенциала и теплоемкости. Определил среднюю плотность земного шара.

В этот же период времени другой английский химик Дж. Пристли открыл «сельтсеровскую воду» – содовую растворением CO_2 в воде, установил переход окиси азота в двуокись, впервые получил хлористый водород и аммиак, открыл кислород; шведский химик У.Б. Торнборн ввел в употребление многие реактивы, развил учение о реактивах и систематическом количественном анализе; разработан метод анализа силикатных материалов, переводя их в раствор сплавлением с поташом в серебряном тигле; шведский химик К.В. Шееле, считающийся основателем органической химии, открыл множество органических кислот: виннокаменную, лимонную, яблочную, щавелевую и др. и выделил ядовитые газы – фтористый водород, сероводород и цианистый водород.

В это же время: немецкий химик М.К. Клапрот опубликовал более 200 книг, статей, сообщений, посвященных исследованиям минералов и солей; опубликован труд «К химическому познанию минеральных тел» в шести томах с более чем 2000 страницами; открыт уран, бериллий, титан, хром, теллур; французский химик К.Л. Бертоле установил состав аммиака, болотного газа, синельной кислоты и др.

Во второй половине 18-го века шведский ученый, химик Торберн Улаф Бергман разработал метод химического анализа мокрым путем. Ввел в употребление многие реактивы, основал учение о реактивах и систематическом качественном анализе. Разработал учение о реактивах и систематическом качественном анализе. Разработал метод анализа силикатных минералов, переводя их в раствор сплавлением с поташом в серебряном тигле.

Процесс превращения химии в науку завершился во второй половине 18-го века открытиями французского ученого А.Л. Лавуазье, считающегося отцом современной химии. С создания им кислородной теории горения в 1777-ом году начался переломный этап в развитии химии, названный «химической революцией». В нем был представлен отказ от теории флогистона. В 1789-ом году

Лавуазье опубликовал учебник «Элементарный курс химии», основанный на кислородной теории горения и новой химической номенклатуре. Он привел первый в истории химии список химических элементов (таблицу простых тел), сформулировал закон сохранения массы, создал рациональную классификацию химических соединений, основанную на различном элементном составе. Развитие химии в период количественных законов стало превращать ее в точную науку, основанную и на наблюдениях и на измерениях. В конце 18-го века немецкий химик И.В. Рихтер, один из основателей учения о стехиометрии, в 1792 – 1794-ых годах опубликовал работу «Начала стехиометрии, или способ измерения химических элементов», в которой сформулировал закон эквивалентов, в соответствии с которым при образовании соединений элементы вступают во взаимосвязь в строго определенных соотношениях, что явилось одним из оснований прорыва в развитии химии.

В 18-ом веке были выявлены новые химические элементы: кобальт, платина, никель, водород, азот, кислород, марганец, хлор, барий, молибден, вольфрам, теллур, уран, цирконий, стронций, арий, титан, хром, бериллий.

Геология в эпоху Просвещения

17-ый век характеризуется ростом геологических наблюдений появлением научных произведений, в которых делались попытки обобщения еще далеко не достаточных знаний, и началом развития геологической науки:

- в 1636-ом году итальянский ученый Б. Цезиус впервые ввел в науку и практику горного дела термин «минералогия»;

- голландский ученый немецкого происхождения Б. Варениус один из основоположников современной географии как научной дисциплины в работе «Всеобщая география» (1650), представил общее научное описание земного шара, полезных ископаемых и их разработок;

- в 1657-ом году норвежский естествоиспытатель М. Эшольт в работе, посвященной охватившей Норвегию крупное землетрясение, впервые ввел термин «геология» в современном его понимании;

- датский ученый, основоположник стратиграфии И. Стенсон установил закон последовательности напластования горных пород; показал, что положение слоев осадочных пород является следствием тектонических нарушений и выявил значение несогласий; выполнил работы по кристаллографии; установил закон постоянства углов кристаллов; описал кристаллы алмаза, кварца, марказита; установил идентичность зубов акулы и определенных каменистых образцов в скальных грунтах, что позволило выдвинуть теорию органогенного происхождения отдельных разновидностей карбонатных ископаемых; сформулировал принципы – Стенсона, последовательности образования геологических тел, первичной горизонтальности слоев, суперпозиции; разработал первые представления о смещении слоев и их первоначальном залегании, дал впервые анализ геологического разреза, объясняя его как последовательность геологических событий;

- английский натуралист Д. Рей развивал в 1692-ом году представления о влиянии всемирного потопа на образование осадочных пород и содержание в них окаменелостей;

- нидерландский ученый Х. Гюйгенс, один из разработчиков первых геометрических законов для кристаллов и начала изучения их оптических свойств, в 1690-ом году изложил качественную теорию отражения, преломления и двойного лучепреломления в исландском шпате;

- англо-ирландский ученый Р. Бойль в изданном им в 1744-ом году в пяти томах сочинений в числе других разработок представил результаты своих исследований в области геологии и горных наук, в том числе – кристаллографии; в 1684 – 1685-ых годах исследовал и описал состав минеральных вод;

- английский естествоиспытатель Р. Гук в 1665-ом году опубликовал книгу «Микрография» с описанием ряда исследований горных пород с использованием микроскопа и оптических свойств кристаллов;

- итальянский натуралист в 1636-ом году ввел термин «минералогия» для науки природных ископаемых;

- английский ученый Дж. Вудворт собрал коллекцию «естественных объектов», в том числе окаменелости и около шести тысяч образцов минералов и был первым автором по классификации минералов.

В это же время датский естествоиспытатель Стенсен Николаус (1638 – 1686), автор работ по кристаллографии и экологии установил закон постоянства углов кристаллов. Описал кристаллы алмаза, кварца, марказита. Установил закон последовательности напластования горных пород; он показал, что наклонное положение слоев осадочных пород является следствием тектонических нарушений и выявил значение несогласий.

В 18-ом веке геология начала складываться как самостоятельная ветвь естествознания в связи с ростом потребности общества в минеральном сырье под влиянием нарождающейся крупной капиталистической промышленности. В этот период история геологии характеризуется разработкой элементарных приемов наблюдения и накопления фактического материала по свойствам и условиям залегания и генезиса горных пород, зарождаются и превращаются в самостоятельные ветви геологических наук стратиграфия, кристаллография и сейсмология.

Французский минералог Д. Леман внес большой вклад в исследования в областях геологии, минералогии и горного дела, описав при этом генезис отдельных горных пород и минералов, месторождения и разработку горных пород.

Российский ученый-энциклопедист М. Ломоносов произвел большое количество анализов горных пород, он впервые выдвинул положение о том, что главным определяющим признаком минерала должен быть химический состав. В его работах «Слово о рождении металлов от трясения Земли» (1757) и «О слоях земных» (1763) отмечается, что минералы в рудных жилах образуют естественные ассоциации и появление одного из них служит «признаком» присутствия другого; решающую роль в формировании лика Земли он отводил глубинным силам (жару в земной утробе), признавая вместе с тем влияние на земную поверхность и внесших факторов (ветра, осадков и др.), развивал идею

единства формирования гор и впадин, утверждал длительность и непрерывность геологических изменений, которым подвергается земная поверхность.

Шведский ученый А. Кронштедт в середине 18-го века опубликовал работу «Опыт классификации царства минералов», в которой улучшена минералогическая номенклатура. Отдельные ископаемые породы и другие геологические объекты от собственно минералов в его другой работе «Система минералогии». В 1781-ом году им опубликована работа «История минералов вестманданских и далекарлитских рудных гор, основанная на наблюдениях и исследованиях».

Шотландский естествоиспытатель, один из отцов современной геологии и геохронологии, Д. Геттон в 1788-ом году опубликовал двухтомный трактат «Теория Земли» в котором представлена история существования Земли как бесконечное повторение циклов с периодической сменой разрушения одних континентов и возникновения других; указано на сходство древних и современных геологических процессов, разработаны принципы актуализма (настоящее – ключи к будущему) и плутонизма; в 1787-ом году он нашел первый пример несогласного напластовывания, чередованием в пластах слоев осадочных и изверженных пород.

Выдвинутая теория плутонизма представляет собой предположения, что внутренняя часть Земли раскаленная, и что эта раскаленная лава стала двигателем, вызвавшим формирование новых гор: Земля подвергается эрозии под действием ветра и воды и осаждается на дне моря, затем раскаленная лава склеивает отстоявшиеся слои в камни и поднимает их в виде новых участков суши.

Шведский химик и минералог Т. Бергман разработал метод анализа силикатных материалов, переводя их в раствор сплавлением с поташом в серебряном тигле.

Один из основателей кристаллографии французский минералог и метролог Л.Р. де Лиль изложил ее как самостоятельную дисциплину в 1772-ом году в сочинении «Опыт кристаллографии». В 1783-ем году он расширил это сочинение в опубликованном в 1783-ем году под названием «Кристаллография или описание форм, присущих всем телам минерального царства».

Создатель научной кристаллографии, французский минералог Р.-Ж. Гаюи в 1781-ом году опубликовал работы по структуре гранита и известковых шпатов, а в 1784-ом году статью «Очерк теории строения кристаллов». Он открыл: плоскости спайности постоянны и имеют соотношение с наружной формой; закон симметрии, состоящего в том, что при изменении формы кристалла через комбинацию с другими формами все однородные части, ребра, углы, плоскости всегда изменяются одновременно и одинаковым образом.

Немецкий химик и минералог М. Клапрот опубликовал более 200 работ, посвященных исследованиям минералов, солей, минеральных вод, в числе которых сочинение «К химическому познанию минеральных тел» в шести томах с более 2000 страницами.

Создатель диагностической минералогии, основанной на внешних признаках минералов, немецкий геолог А. Вернер в 1774-ом году опубликовал книгу «О внешних признаках ископаемых тел», в которой создал описательный метод в минералогии и систему минералов. Разработал шкалы для определения минералов по множеству признаков: цвету, сцеплению частиц, осязаемости, весу, запаху, вкусу, твердости, ощущения холода (в руках); для кристаллов – форма и ее переходы, величина, взаимосвязь, характеристики поверхности. Открыл и описал пять новых минералов, ввел новые названия для минералов.

В конце 18-го и начале 19-го веков немецкий геолог и минеролог Вернер Абраам Готлиб (1750 – 1817) разработал классификацию горных пород и минералов, исходя из внешних признаков с учетом их химического состава. Возглавлял распространенное в конце 18-го века направление в геологии – нептунизм, согласно которому все горные породы, в том числе и известняк, образовались как осадки из воды.

Российский химик, геолог, минералог В. Севергин, с именем которого связано зарождение и развитие геологических и химических знаний в России, в 1798-ом году открыл закономерности совместного нахождения минералов в одном месторождении, которое назвал «смежностью» минералов (современный

термин – Парагенезис), создал первую геологическую номенклатуру на русском языке и ввел термины, описывающие свойства минералов – блеск, цвет и др.

Приведенные выше достижения XVII – XVIII веков в областях химии, геологии и минералогии стали определенной базой для дальнейшего развития материаловедения.

Список литературы

1. Лоуи Д.Б. Великая химия. От греческого огня до графена. 250 основных вех в истории химии; перевод с англ. А.Л.Капанадзе. М.: Лаборатория знаний, 2018. 540 с.
2. История и методология геологических наук. М.: Академия, 2005. 416 с.
3. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. История науки и техники: учебное пособие – 3-е издание переработанное и дополненное. СПб.: Лань, 2022. 528 с.
4. Курашов В.И. История и философия химии: учебное пособие. 2-е издание исправленное и дополненное. М.: «КДУ», «Университетская книга», 2019. 354 с.
5. Баженов Ю.М., Рахимов Р.З. Достижения, проблемы и направления развития теории и практики строительного материаловедения. Десятые академические сведения РААСН. Казань: КГАСУ, 2006. 37 с.
6. Сулейманов Е.В. Химическое материаловедение. Н.Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И.Лобачевского, 2006. 131 с.
7. Короновский Н.В. Общая геология: учебник. М.: Изд-во Московского университета, 2023. 606 с.

References

1. Lowy D.B. Great Chemistry. From Greek fire to graphene. 250 major milestones in the history of chemistry; translated from English by A.L. Kapanadze, Moscow: Laboratory of Knowledge, 2018. 540 p. (In Russian)
2. History and methodology of geological sciences. Moscow: Akademiya Publ., 2005. 416 p. (In Russian)

3. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. History of science and technology: a textbook – 3rd edition revised and expanded. St. Petersburg: Lan Publ., 2022. 528 p. (In Russian)

4. Kurashov V.I. History and philosophy of chemistry: a textbook. 2nd edition, revised and expanded. Moscow: "KDU", "University Library", 2019. 354 p. (In Russian)

5. Bazhenov Yu.M., Rakhimov R.Z. Achievements, problems and directions of development of theory and practice of building materials science. The tenth academic information of the Russian Academy of Sciences. Kazan: KGASU, 2006. 37 p. (In Russian)

6. Suleymanov E.V. Chemical materials science. N.Novgorod: Publishing House of N.I.Lobachevsky National Research University, 2006. 131 p. (In Russian)

7. Koronovsky N.V. General geology: textbook. Moscow: Publishing House of Moscow University, 2023. 606 p. (In Russian)

Рахимов Равиль Зуфарович – д-р техн. наук, профессор кафедры Строительных материалов Казанского государственного архитектурно-строительного университета, член-корреспондент РААСН

УДК 624.07.6

ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ЗОЛЬНОГО НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

В.В. Белов*, П.В. Куляев, Т.Р. Баркая, Д.С. Шишаев

*Тверской государственный технический университет, Российская Федерация,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, Россия*

**Адрес для переписки: Белов Владимир Владимирович, e-mail: vladim-bel@yandex.ru*

Автоклавный газобетон (НАГБ) отличается от традиционного бетона низкой плотностью. Это упрощает транспортировку и монтаж и придает материалу теплоизоляционные свойства. Однако у НАГБ есть и недостатки. Например, он менее прочен на сжатие по сравнению с обычным бетоном и больше подвержен усадке, что может привести к трещинам и снизить его долговечность. Несмотря на это, НАГБ широко используется в строительстве. Его применяют как конструкционный, так и теплоизоляционный материал для стен.

В работе представлены результаты исследования прочностных и деформационных свойств НАГБ с добавкой золы уноса, которая образуется на предприятиях электротеплогенерации. Добавление зольных отходов в состав смеси помогает снизить усадку НАГБ, не ухудшая его механические свойства. Это делает НАГБ более устойчивым к трещинам и усадке, сохраняя при этом прочность и деформационные характеристики. НАГБ с зольной добавкой может быть успешно использован в различных строительных конструкциях, не уступая традиционному тяжелому бетону по своим основным параметрам.

Ключевые слова: зольный неавтоклавный газобетон, деформации усадки, теплопотери, трещинообразование, прочность на сжатие.

DEFORMATIVE PROPERTIES OF ASH NON-AUTOCCLAVE AERATED CONCRETE

V.V. Belov, P.V. Kulyaev, T.R. Barkaya, D.S. Shishaev

**Corresponding author: Vladimir V. Belov, e-mail: vladim-bel@yandex.ru*

Autoclave aerated concrete (NAB) differs from traditional concrete in its low density. This simplifies transportation and installation and gives the material thermal insulation properties. However, NAGB also has drawbacks. For example, it is less compressive than conventional concrete and more prone to shrinkage, which can lead to cracks and reduce its durability. Despite this, NAGB is widely used in construction. It uses both structural and thermal insulation material for walls.

The paper presents the results of the study of the strength and deformation properties of NAGB with the addition of fly ash, which is formed at enterprises of electric heat generation. The addition of ash waste to the mixture helps to reduce the shrinkage of NWB without degrading its mechanical properties. This makes NWD more resistant to cracks and shrinkage, while maintaining strength and deformation characteristics. NDS with ash additive can be successfully used in various building structures, not inferior to traditional heavy concrete in its main parameters.

Keywords: ash non-autoclaved aerated concrete, shrinkage deformations, heat loss, cracking, compressive strength.

Введение

В условиях глобальных экологических вызовов и растущих требований к энергоэффективности строительных материалов газобетон сохраняет лидирующие позиции на рынке благодаря своим отличным теплоизоляционным характеристикам и экологичности. Однако совершенствование технологий производства газобетона позволяет не только повысить его теплоизоляционные свойства, но и улучшить прочностные характеристики, устойчивость к внешним факторам, а также минимизировать энергозатраты при эксплуатации зданий [1].

В настоящее время изделия из газобетона становятся все более популярными. Они имеют большой потенциал на рынке и, судя по тенденциям, будут вытеснять кирпичные и бетонные конструкции, которые отличаются высокой стоимостью и низкой теплопроводностью. Преимущества газобетона очевидны – низкая теплопроводность, высокая прочность, простота монтажа, легкая об-

рабатываемость, экологичность, огнестойкость, стоимость, широкая номенклатура производимых изделий [2].

Неавтоклавный газобетон, играет важную роль в строительной отрасли. В мире становится всё более актуальной задача по экономии тепла. В России и других странах мира стремятся снизить потребление топлива и энергии, улучшить теплоизоляцию зданий и сооружений, а также внедрить энергоэффективные материалы и технологии [3]. Неавтоклавный газобетон – это инновационный строительный материал, который отличается лёгкостью и обладает высокими теплоизоляционными и звукоизоляционными свойствами. Основное отличие технологии производства неавтоклавного газобетона от технологии производства автоклавного газобетона заключается в том, что при его изготовлении не требуется использование автоклава. Это позволяет значительно снизить затраты на энергию и ресурсы [4–6].

Существует множество исследований, посвященных неавтоклавным газобетонам, которые производятся с использованием композиционных вяжущих различных типов, составов и методов получения. Эти работы в целом демонстрируют эффективность и перспективность данного направления. Однако одним из ключевых недостатков этих исследований является то, что свойства используемых вяжущих и характеристики готовых ячеистых бетонов зачастую рассматриваются отдельно друг от друга [7].

Для получения изделий с высокой прочностью необходимо создать материал с минимальным количеством дефектов. Формирование оптимальной структуры неавтоклавного газобетона зависит от параметров, определяющих кинетику газообразования (добавки газообразователя, щелочи, их соотношение и др.), и параметров, регулирующих скорость увеличения пластической прочности ячеистого бетона в процессе его твердения [8]. В этом отношении ключевую роль могут сыграть полимерные добавки. Например, при добавлении поливинилацетата (ПВА) прочность полимерцемента при растяжении и изгибе увеличивается в 2–2,5 раза по сравнению с обычным цементом. Однако, если

полимер не обладает достаточной водостойкостью, то при увлажнении прочность полимерцемента может снизиться [9].

В работах [10, 11] исследованы различные аспекты влияния полимеров и условий отверждения на прочность цементных связующих материалов на основе полимеров. Прочностные характеристики материалов на основе портландцемента в значительной степени зависят от условий их затвердевания. Если процесс происходит во влажной среде, то полимерная плёнка замедляет испарение воды, что способствует лучшей гидратации частиц. Однако это замедляет скорость процесса. При водном твердении или во влажных условиях формирование полимерной структуры происходит медленнее, что приводит к снижению прочностных показателей, особенно при изгибающих нагрузках. Рекомендуется использовать комбинированный режим, который включает 7–10 дней твердения образцов во влажной среде с последующей воздушно-сухой гидратацией при относительной влажности 40–60 %.

Актуальную задачу улучшения физико-механических и эксплуатационных характеристик неавтоклавного газобетона можно решать также за счет использования микронаполнителей, которые обеспечивают высокие прочностные характеристики на границах раздела фаз [12]. Мировой опыт показывает, что в качестве таких наполнителей целесообразно применять материалы из отходов промышленности, обеспечивающие экономический и экологический эффекты, а также, желательно, обладающие шарообразной формой частиц. Например, использование золы-уноса со сферическими частицами размером 5-15 мкм придает сырьевым смесям свойство, получившее название «шарикоподшипниковый эффект». Благодаря данной отличительной особенности, улучшается скольжение цемента и песка по стекловидной поверхности частичек золы. Такой пластифицирующий эффект позволяет уменьшить содержание воды в бетонной смеси, что способствует повышению прочности бетона [13]. Аналогичный эффект оказывают и стеклянные микросферы, применяемые в качестве эффективного мелкодисперсного пустотелого наполнителя при изготовлении бетонов [14-16]. Исходя из указанных предпосылок можно предположить, что отходы производства стеклянных микросфер за счет высокой

дисперсности и шарообразной формы [17] также могут стать ценным сырьевым компонентом неавтоклавного газобетона, снижающим его стоимость и наряду с использованием полимерцементного вяжущего улучшающим физико-механические свойства газобетона.

В работе [18] изучалась прочность на сжатие и плотность НАГБ на основе рисовой шелухи, а в работе [19] – золы-отвала. Результаты экспериментов показали, что при плотности блоков в сухом состоянии от 600 кг/м^3 до 1200 кг/м^3 прочность на сжатие составила 3–5 МПа, а предел огнестойкости достигал 7 часов. Сравнение с эксплуатационными характеристиками стен из керамического кирпича (как основного альтернативного материала) показывает, что их значения вполне сопоставимы. Однако из-за увеличения пор прочность на сжатие снижается, а деформативность возрастает.

Физические и механические свойства газобетона неавтоклавного твердения могут варьироваться в широком диапазоне в зависимости от количества используемого сырья, состава смеси и условий твердения [20, 21, 22]. Важно отметить, что многие свойства НАГБ как теплоизоляционного и конструкционного материала могут быть представлены в виде функций насыпной плотности и толщины, качества и параметров микроармирования [23, 24, 25].

Целью данной работы было получение облегченного зольного неавтоклавного газобетона с плотностью $1000\text{--}1300 \text{ кг/м}^3$, классом по прочности при сжатии не менее В5, который отвечал бы не только теплотехническим, но и конструкционным требованиям при проектировании конструкций и узлов, где применение традиционных бетонов менее оправдано. При этом исследовались физико-механические и теплотехнические характеристики НАГБ, плотность и коэффициент теплопроводности, прочность на сжатие, модуль деформации и усадка.

Экспериментальная часть

Исследовались свойства двух составов НАГБ со средним значением плотности 1300 кг/м^3 (табл. 1).

Расход компонентов в кг на 1 м³ газобетонной смеси

Компонент	Состав 1	Состав 2
цемент	360	320
зола	150	380
песок	420	160
известь	59	56
жидкое стекло	8	10
АП (эмульсия)	30	36
суперпластификатор С-3	10	9,6
вода	280	270

В качестве опытных образцов для определения физико-механических свойств были изготовлены кубы 100×100×100 мм и призмы 100×100×400 мм. После выдерживания образцов в течение 28 суток были проведены испытания для определения прочностных и деформационных характеристик.

Оценка усадки и определение модуля деформации производилась на призмах размерами 100×100×400 мм с помощью установки (рис. 1). База между центрами крепёжных болтов составляла 260 мм. Измерение деформаций заключалось в фиксации сокращения размера образца относительно базы в процентах. При уменьшении длины образца стальной стержень каркаса-обоймы, упирающийся в индикатор, сохранял размер за счёт прочной фиксации крепёжных болтов в теле бетона. Определение модуля деформации газобетона проводилось путём сжатия образцов, с установленными индикаторами перемещения на прессе. Нагрузка прикладывалась ступенями с последующей выдержкой, скорость нарастания нагрузки была – 0,1 кН/с. При этом использовались индикаторы часового типа и измерительная линейка.

Влияние длительного воздействия сжимающей нагрузки на физико-механические свойства НАГБ с последующим определением модуля деформации определялось при проведении испытаний на сжатие двух серий образцов-близнецов в виде призм, одни из которых находились под действием длительного сжатия, затем разгружались и лишь потом испытывались до разрушения. Образцы другой серии нагружались однократно до разрушения. Испытание образцов обеих серий было проведено в одинаковом возрасте.

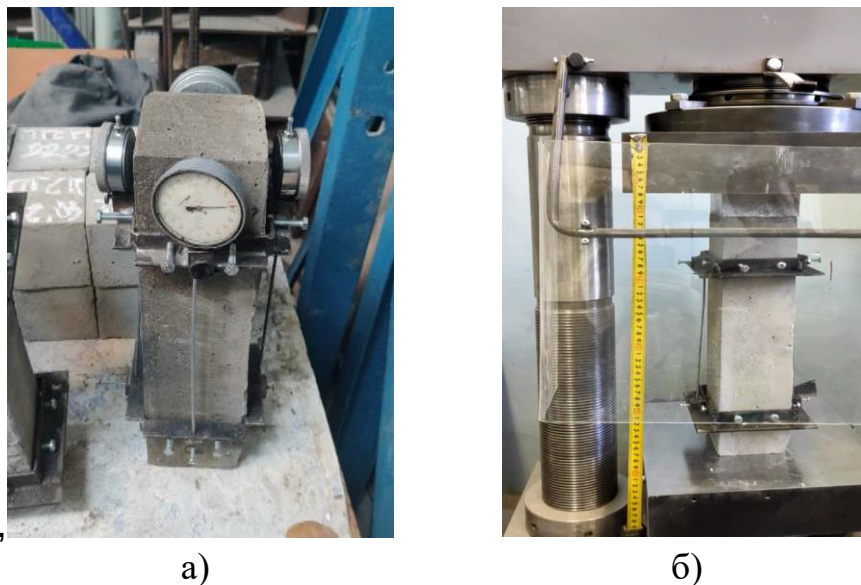


Рис. 1. Измерение усадки (а) и модуля деформации (б).

Сжимающая нагрузка при испытании призм на длительное сжатие принималась порядка 75 % от прогнозируемой нагрузки разрушения призмы, которая в свою очередь принималась равной 0,6 разрушающей нагрузки на образцы-куб. Испытания образцов при постоянной нагрузке проводились на специальных пружинных установках. Фиксация сжимающего усилия поддерживалась с помощью блока пружин в нижней части установки. Перед началом испытания пружины поджимались гидравлическим домкратом на вычисленную величину нагрузки, после чего фиксировались в сжатом положении с помощью верхней пластины гайками.

Теплопроводность материала (коэффициент теплопроводности) оценивалась с использованием прибора ИТП-МГ4.

Результаты и их обсуждение

Номера составов и экспериментальные значения прочности на сжатие, модуля деформации и деформации усадки приведены в таблице 2.

Номера составов и соответствующие расчетные значения коэффициентов теплопроводности и усредненной плотности приведены в таблице 3.

При повышении содержания золы в 2,5 раза в составе НАГБ зафиксировано снижение значения теплопроводности на 13,8 % и усадки на 17,4 %, повышение модуля деформации и предела прочности на сжатие на 22%.

Таблица 2

Номера составов и экспериментальные значения прочности
на сжатие, модуля деформации и усадки

№ состава	Предел прочности на сжатие, $R_{сж}$, МПа	Модуль деформации, E , кН/см ²	Усадка, %
1	7,55 (класс В6)	225	0,23
2	9,3 (класс В7.5)	295	0,19

Таблица 3

Коэффициенты теплопроводности и усредненное значение плотности
двух составов газобетона

№ состава	Теплопроводность λ , Вт/(м×К)	Средняя плотность ρ , кг/м ³
1	0,36	1310
2	0,31	1240

При анализе влияния длительного сжатия на физико-механические характеристики НАГБ установлено следующее. Разрушение призмы состава 1, подвергнутой предварительному длительному обжатию, произошло при нагрузке 88,26 кН, а призмы состава 2 без предварительной выдержки под сжимающей нагрузкой – при 73,55 кН. Таким образом, воздействие длительного сжимающего усилия на образцы порядка 75 % от призмной прочности не ухудшает физико-механические свойства НАГБ, а наблюдается обратный эффект: образец после выдержки под сжимающей нагрузкой разрушается при более высоких значениях нагрузки. Вероятен эффект уплотнения и гомогенизации структуры НАГБ под длительным действием сжимающей нагрузки.

Заключение

Полученные в результате экспериментов данные вполне согласуются с

основной целью работы – получить эффективный НАГБ с комплексом теплотехнических и физико-механических свойств, отвечающих требованиям, предъявляемым к легким бетонам конструкционного назначения.

Оптимизация указанных эксплуатационных свойств газобетона может осуществляться за счет варьирования основных компонентов НАГБ, его модификации химическими и минеральными добавками. В свою очередь, матрица бетона определяет основные его свойства: среднюю плотность и теплопроводность, предел прочности на сжатие, усадку и модуль деформации. В данном случае применение тонкодисперсного компонента – золы в качестве минерального наполнителя улучшает как теплотехнические, так и физико-механические свойства (снижение усадки и повышение значений прочности на сжатие и модуля деформации). Зольная тонкодисперсная добавка способствует снижению усадки НАГБ за счет модификации структурообразования. Показано, что предварительная выдержка образцов-призм из НАГБ под сжимающей нагрузкой порядка 75 % от разрушающей не только не ухудшает физико-механические свойства НАГБ, но и ведет к модификации структуры матрицы через уплотнение и гомогенизацию. Происходит рост прочности и модуля деформации зольного НАГБ. Все это позволяет отнести НАГБ с зольным тонкодисперсным компонентом к энергоэффективным и конструкционным материалам, которые могут при определенных условиях заменить традиционные бетоны в слабонагруженных несущих и самонесущих конструкциях (стенах, перемычках, торцевых участках перекрытий и т.д.) и узлах (стыках элементов), в том числе для ликвидации мостиков, особенно в монолитном строительстве.

Список литературы

1. Басалаев А.А., Горюнов В.Е. Современные методы получения газобетонов с усовершенствованными теплоизоляционными свойствами // Оригинальные исследования. 2024. Т. 14, № 12. С. 214-217.
2. Козлов Е.Е., Левшин Д.Э., Тонконогий Д.А. Реконструкция жилых зданий с применением строительных систем из газобетона // Образование. Наука.

Производство: Сборник докладов XVI Международного молодежного форума, Белгород, 30–31 октября 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. С. 57-62.

3. Сидоренко А.Г. Перспективы применения неавтоклавного газобетона в современном строительстве // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сборник статей по материалам СXXXIII студенческой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 15 января 2024 года. Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью "Сибирская академическая книга", 2024. С. 17-21.

4. Сидоренко А.Г. Преимущества использования неавтоклавных газобетонов в строительстве // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика: Сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции, Уфа, 05 января 2024 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2024. С. 100–103.

5. Дюсембинов Д.С., Сабитов Е.Е. Модифицированные газобетонные изделия неавтоклавного твердения // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Экибастуз, 15–16 мая 2017 года. Экибастуз: Издательство филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2017. С. 347–350.

6. Сидоренко А.Г. Экологические аспекты производства неавтоклавного газобетона // Молодой учёный: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 05 июля 2024 года. Пенза: Наука и Просвещение. 2024. С. 66–68.

7. Лесовик В.С., Абсиметов М.В., Елистраткин М.Ю., и др. К вопросу изучения особенностей структурообразования композиционных вяжущих для неавтоклавных газобетонов // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2, № 3. С. 41–47.

8. Леонтьев С.В., Галкина М.Д. Исследование влияния технологических факторов на процессы формирования структуры неавтоклавного газобетона //

Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2021. Т. 1. С. 314–318.

9. Темный В.Д., Мишин Д.А. Получение полимерцементного вяжущего // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2019 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 2632–2635.

10. Ахметвалиев Н.Н. Прочностные характеристики полимерцементного вяжущего // Студенческий форум. 2019. № 2(53). С. 28–31.

11. Темный В.Д., Богат А.Р., Колчева А.А., и др. Влияние условий твердения портландцемента с добавкой ПВА на его прочностные показатели // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 25–27 мая 2020 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. С. 3464–3468.

12. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Полые микросферы – эффективный заполнитель для высокопрочных легких бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 80–83.

13. Молчанов А.О., Нелюбова В.В., Кузьмина Н.О. Некоторые свойства зол-уноса как компонента бетонных смесей // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8, № 5–1. С. 102–106.

14. Бочарников А.Л., Загороднюк Л.Х. Перспективы применения. Полых стеклянных микросфер // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова, Белгород, 12 апреля 2023 года. Том 2. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 139–142.

15. Трофимов А.Н., Плешков Л.В., Байков А.В., Стогова И.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 1. О размерах промышленных полых стеклянных микросфер // Пластические массы. 2020. № 11–12. С. 15–19.

16. Перфилов В.А., Котляревская А.В., Канавец У.В. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства легких мелкозернистых бетонов // Вестник

Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. № 43(62). С. 93–103.

17. Трофимов А.Н., Белов В.В., Вологин Н.А., и др. Отходы стеклянных микросфер как потенциальное сырье для получения строительных материалов // Техника и технология силикатов. 2024. Т. 31, № 3. С. 237–246.

18. Begum R., Habib A., Mostafa S. Effects of Rice Husk Ash on the Non Autoclaved Aerated Concrete Effects of Rice Husk Ash on the Non Autoclaved Aerated Concrete // International Journal of Engineering Innovation & Research. 2014. No. 3(1). pp. 116121.

19. Chen Y., et al. A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions // Construction and Building Materials. Elsevier Ltd. 153. pp. 622 – 629. doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2017.07.116.

20. Сулейманова Л. А. Газобетон неавтоклавного твердения на композиционных вяжущих: автореф. ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный архитектурностроительный университет». Белгород, 2013. 40 с.

21. Чкунин А.С., Домников И.С., Кодзоев М.Б.Х., Исаченко С.Л. Энергоэффективные неавтоклавные бетоны. / В сборнике: Строительство - формирование среды жизнедеятельности. Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных. 2017. С. 905-907.

22. Векслер М.В., Липилин А.Б. Неавтоклавный пенобетон. Конкуренция с автоклавным газобетоном // Строительная логика: сб. статей. 2013.

23. Славчева Г.С., Афашагова Я.З., Котова К.С. Перспективы применения неавтоклавных цементных поризованных бетонов в современном строительстве // Научные и инженерные проблемы строительно-технологической утилизации техногенных отходов. Сборник трудов конференции. 2014. С. 211 – 217

24. Петровская Ю.В., Фролова А.В. Дисперсное армирование газобетона волокном // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК). 2017. № 2. С. 421-423.

25. Белькова Н.А., Степанова М.П., Курбаков Д.Е., Супрунчик Г.Г. Управление физико-механическими характеристиками неавтоклавно поризованного бетона путем его микроармирования // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2021. №2(47).

References

1. Basalaev A.A., Goryunov V.E. Modern methods for producing aerated concrete with improved thermal insulation properties //Original research. 2024. V. 14. No. 12. Pp. 214 – 217. (in Russian)

2. Kozlov E.E., Levshin D.E. Thin-legged D.A. Reconstruction of residential buildings using aerated concrete construction systems // Education. Science. Production: Collection of reports of the XVI International Youth Pho-Room, Belgorod, October 30-31, 2024. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2024. P. 57 – 62. (in Russian)

3. Sidorenko A.G. Prospects for the use of non-autoclave aerated concrete in modern construction // Scientific community of students of the XXI century. Technical Sciences: a collection of articles based on the materials of the CXXXIII student international scientific and practical conference, Novosibirsk, January 15, 2024. Novosibirsk: Siberian Academic Book Limited Liability Company. 2024. Pp. 17 – 21. (in Russian)

4. Sidorenko A.G. Advantages of using non-autoclave gas tones in construction // Theoretical and practical aspects of the development of time science: theory, methodology, practice: Collection of scientific articles based on materials from the XIII International Scientific and Practical Conference, Ufa, January 05, 2024. Ufa: Limited Liability Company "Scientific and Publishing Center "Bulletin of Science," 2024. Pp. 100 – 103. (in Russian)

5. Dyusembinov D.S., Sabitov E.E. Modified aerated concrete products of non-autoclave hardening // Improving the quality of education, modern innovations in science and production: Collection of works of the International Scientific and Practical Conference, Ekibastuz, May 15-16, 2017. Ekibastuz: Publishing house of the KuzSTU branch in Prokopyevsk, 2017. Pp. 347 – 350. (in Russian)

6. Sidorenko A.G. Environmental aspects of the production of non-autoclave aerated concrete // Young scientist: collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference, Penza, July 05, 2024. Penza: Science and Pro-Lighting. 2024. Pp. 66 – 68. (in Russian)
7. Lesovik V.S., Absimetov M.V., Elistratkin M. Yu., et al. On the issue of studying the features of structure formation of composite binders for non-autoclave aerated concrete // Construction materials and products. 2019. V. 2. No. 3. Pp. 41 – 47. (in Russian)
8. Leontiev S.V., Galkina M.D. Study of the influence of technological factors on the processes of formation of the structure of non-autoclave aerated concrete // Modern technologies in construction. Theory and practice. 2021. V. 1. Pp. 314 – 318. (in Russian)
9. Dark V.D., Mishin D.A. Obtaining polymer-cement binder // International Scientific and Technical Conference of Young Scientists BSTU named after V.G. Shukhov, Belgorod, May 01-20, 2019. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2019. Pp. 2632 – 2635. (in Russian)
10. Akhmetvaliev N.N. Strength characteristics of polymer cement binder // Student Forum. 2019. No. 2(53). P. 28 – 31. (in Russian)
11. Dark V.D., Bogat A.R., Kolcheva A.A., Nishchuk O.P. Influence of portland cement hardening conditions with PVA additive on its strength indicators // International scientific and technical conference of young scientists, Bel-city, May 25-27, 2020. Belgorod: Belgorod State Techno-Logical University named after V.G. Shukhov, 2020. Pp. 3464 – 3468. (in Russian)
12. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Hollow microspheres are an effective filler for high-strength light concrete // Industrial and civil construction. 2013. No. 10. Pp. 80 – 83. (in Russian)
13. Molchanov A.O., Nelyubova V.V., Kuzmina N.O. Some of the evil carry-over as a component of concrete mixtures // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. V. 8. No. 5 – 1. Pp. 102 – 106. (in Russian)
14. Bocharnikov A.L., Zagorodnyuk L.Kh. Application prospects. Next glass microspheres // Science and innovations in construction: Collection of reports of the VII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 170th anniversary of V.G.

Shukhov, Belgorod, April 12, 2023. Volume 2. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. Pp. 139 – 142. (in Russian)

15. Trofimov A.N., Pleshkov L.V., Baikov A.V., Stogova I.V. Morphology and properties of hollow glass microspheres. Part 1. About dimensions of industrial hollow glass microspheres // Plastic masses. 2020. No. 11–12. Pp. 15 – 19. (in Russian)

16. Perfilov V.A., Kotlyarevskaya A.V., Kanavets U.V. The influence of hollow glass microspheres on the properties of light fine-grained concrete // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2016. No. 43(62). Pp. 93 – 103. (in Russian)

17. Trofimov A.N., Belov V.V., Vologin N.A., et al. Waste of glass microspheres as a potential raw material for the preparation of building materials // Technique and technology of silicates. 2024. V. 31. No. 3. Pp. 237 – 246. (in Russian)

18. Begum R., Habib A., Mostafa S. Effects of Rice Husk Ash on the Non Autoclaved Aerated Concrete Effects of Rice Husk Ash on the Non Autoclaved Aerated Concrete // International Journal of Engineering Innovation & Research. 2014. V. 3(1). Pp. 116121. (in Russian)

19. Chen Y., et al. Комплексное исследование по производству автоклавированного газобетона: Влияние кремнеземно-известково-цементного состава и условий автоклавирования, Строительство и строительные материалы. Elsevier Ltd, 153, стр. 622629. doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2017.07.116.

20. Suleymanova L.A. Aerated concrete of non-autoclave hardening on composite binders: abstract. Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Belgorod, 2013. 40 p. (in Russian)

21. Chkunin A.S., Domnikov I.S., Kodzoev M.B.Kh., Isachenko S.L. Energy-efficient non-autoclaved concretes // In the collection: Construction - shaping the environment of life. Electronic resource: proceedings of the XX International Interuniversity Scientific and Practical Conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists. 2017. Pp. 905-907. (in Russian)

22. Veksler M.V., Lipilin A.B. Non-autoclaved foam concrete. Competition with autoclaved aerated concrete // Construction lot: collection of articles. 2013. (in Russian)

23. Slavcheva G.S., Afashagova Ya.Z., Kotova K.S. Prospects for the use of non-autoclaved cement porous concretes in modern construction // Scientific and engineering problems of construction and technological utilization of man-made waste. Proceedings of the conference. 2014. Pp. 211 – 217 (in Russian)

24. Petrovskaya Yu.V., Frolova A.V. Dispersed reinforcement of aerated concrete with a portage // Young scientists for the development of the textile and industrial cluster. 2017. No. 2. Pp. 421 – 423. (in Russian)

25. Belkova N.A., Stepanova M.P., Kurbakov D.E., Suprunchik G.G. Control of the physico-mechanical characteristics of non-autoclave porous concrete by micro-reinforcement // Bulletin of the FEFU School of Engineering. 2021. No. 2(47). (in Russian)

Белов Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Куляев Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Конструкции и сооружения», ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Баркая Темур Рауфович – канд. техн. наук, доцент, зав. каф. «Конструкции и сооружения», ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Шишаев Денис Сергеевич – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

УДК 691.3

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЛУННОГО ГРУНТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОСМИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.М. Усачев*, Е.А. Мильниченко, А.В. Телегина

*Воронежский государственный технический университет, Российская
Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Адрес для переписки: Усачев Александр Михайлович, e-mail: ausachev@cchgeu.ru*

В статье показано, что с целью экономии природных ресурсов Земли, успешного освоения космоса возможно в качестве сырья применять лунный грунт – реголит. Реголит представляет собой зерна размером от 1 мкм до 10 мм. Химический и минералогический состав лунного реголита аналогичен земным горным породам, таким как базальт, диабаз, гранит, габбро.

Показано, что наиболее перспективными методами получения строительных материалов из лунного реголита являются способ плавления электрической дугой и способ получения расплава с использованием энергии светового луча. Получаемые по технологии плавления материалы называют симиналы.

Опираясь на исследования отечественных и зарубежных ученых, приведены основные физико-механические характеристики симиналов, такие как прочность на сжатие и изгиб, твердость, теплопроводность, теплоемкость и теплостойкость.

В космических агрессивных условиях, под воздействием абразивного износа, различной коррозии, резких изменений температур, интенсивных излучений наиболее приемлемыми видятся строительные изделия в виде фундаментных блоков, износостойких плит, труб и желобов.

Ключевые слова: исчерпаемость ресурсов, лунный грунт, технология получения, симиналы, физико-механические свойства, строительные материалы.

**STUDY OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF LUNAR SOIL
FOR THE PRODUCTION OF SPACE BUILDING MATERIALS**

A.M. Usachev*, E.A. Milnichenko, A.V. Telegina

*Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktiabria, 84, Voronezh,
394006, Russian Federation*

**Corresponding author: Alexander M. Usachev, E-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru*

The article shows that in order to save the Earth's natural resources and successfully explore space, it is possible to use lunar soil, regolith, as a raw material. Regolith consists of grains ranging in size from 1 micron to 10 mm. The chemical and mineralogical composition of lunar regolith is similar to terrestrial rocks such as basalt, diabase, granite, and gabbro.

It is shown that the most promising methods for obtaining building materials from lunar regolith are the method of electric arc melting and the method of producing a melt using the energy of a light beam. The materials obtained by melting technology are called simials.

Based on the research of domestic and foreign scientists, the main physical and mechanical characteristics of siminals are given, such as compressive and flexural strength, hardness, thermal conductivity, heat capacity and heat resistance.

In aggressive space conditions, under the influence of abrasive wear, various corrosion, sudden temperature changes, and intense radiation, building products in the form of foundation blocks, wear-resistant plates, pipes, and gutters are considered the most acceptable.

Key words: exhaustion of resources, lunar soil, production technology, minerals, physical and mechanical properties, building materials.

Введение

В условиях нарастающих экологических проблем на нашей планете, таких как деградация почв, истощаемость ресурсов, загрязнение окружающей среды различными отходами, человечество сталкивается с необходимостью поиска ресурсов и организации производств в космосе. Для успешного освоения космического пространства нам понадобятся новые строительные материалы, способные работать в условиях высокого вакуума ($10^{-10} \dots 10^{-9}$ Па), повышенной радиации и перепадов температур (от -200 до +120 °C). Еще одной серьезной

проблемой является чрезвычайно высокая стоимость материалов и значительная удаленность. Таким образом, исследование особенностей применения космических строительных материалов становится критически важным для обеспечения будущего человечества в условиях ограниченных ресурсов на Земле и необходимости создания надежных конструкций в космосе [1, 2].

Экспериментальная часть

В качестве сырья для космических строительных материалов вполне пригодным является лунный грунт (реголит), широко распространенный в различных регионах Луны. Визуально выделяют два типа лунного реголита – морской и материковый. Эти разновидности грунта отличаются топологией поверхности участков: моря более гладкие, материки более неровные. В настоящее время состав и морского и материкового реголита достаточно хорошо изучен. Известно, что реголит представляет собой зерна размером от 1 мкм до 10 мм. Химический состав реголита представлен оксидами кремния, алюминия, железа, кальция, магния и др., что практически сопоставимо с составом земных горных пород, таких как базальт, диабаз, габбро, гранит и т.п. [3 – 6].

Ученым известна и структура реголита (рис. 1), которая представляет собой зерна оливина, авгита, плагиоклаза, распределенные среди обломков других основных пород, присутствует также небольшое количество остаточного стекла.

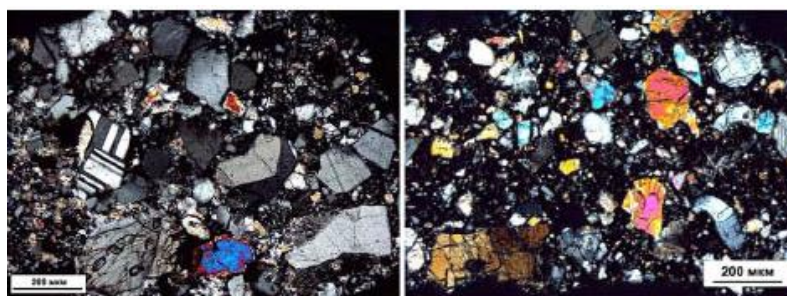


Рис. 1. Структура лунного реголита.

Структура лунной породы очень схожа со структурой земных базальтов (рис. 2), в которой также присутствует оливин, пироксен, роговая обманка и остаточное стекло.



Рис. 2. Структура земного базальта ($\times 200$).

Эти результаты демонстрирует, что земные и лунные породы очень схожи по составу и структуре и, соответственно, технологии обработки представленных земных пород могут быть применимы к лунным.

Существует достаточно много технологических решений по изготовлению строительных материалов из земных горных пород (базальтов, диабазов, гранитов и др.). Их дробят на щебень, добавляют в качестве крупного и мелко-го заполнителя в растворные и бетонные смеси и т.д. Однако, эти способы не приемлемы в лунных условиях исключительно из экономических соображений, ведь это потребует поставку дополнительных материалов, например, вяжущих веществ, арматуры, добавок. Поэтому следует применять технологические методы, подразумевающие наиболее глубокое освоения сырья, предполагающие получение сразу готовой строительной продукции без привлечения других материалов.

Опираясь на исследования отечественных и зарубежных ученых [7, 8], выявлено, что наиболее перспективными способами получения строительных материалов из лунного реголита являются метод плавления электрической дугой и метод получения расплава с использованием энергии светового луча. Данные методы, почти не использующиеся применительно к земным материалам, предполагают использование высокой температуры свыше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ для прямого

спекания мелких частиц реголита в качестве строительных материалов. Сравнительный анализ технологических способов плавления реголита представлен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение способов получения строительных материалов из реголита

Способ плавления	Преимущества	Недостатки
1. Электрической дугой	1. Высокая механическая прочность; 2. Возможность использования местных ресурсов	1. Сложность контроля качества; 2. Простой внешний вид изделий
2. Световым лучом	1. Способность изготавливать сложные конструкции; 2. Возможность использования местных ресурсов; 3. Применение солнечной энергии	1. Низкая механическая прочность; 2. Плохая стабильность при приготовлении

Получаемые по технологии каменного литья материалы, получили название симиналы (синтетические минеральные сплавы).

Результаты и их обсуждение

Учеными в нашей стране и за рубежом [3, 6] получены экспериментальные данные, позволяющие оценить физико-механические свойства лунных симиналов.

В табл. 2 представлены механические свойства плавленных материалов и классического тяжелого бетона.

Таблица 2

Сравнительные механические свойства

Механические свойства	Рядовой тяжелый бетон	Симиналы
Предел прочности на сжатие, МПа	0,9...76,8	2,3...428,1
Предел прочности при изгибе, МПа	2,3...47,8	0,2...129,5
Предел прочности на растяжение, МПа	1,0...4,0	2,3...6,3

Из результатов таблицы 2 видно, что прочностные свойства плавленных образцов значительно лучше, чем у бетонных образцов, что делает их более

подходящими в качестве несущих конструкций.

В табл. 3 приведена твердость симиналов, полученных различными способами плавления.

Таблица 3

Значения твердости симиналов

Способ плавления	Показатель твердости, ГПа
1. Электрической дугой	6,62...8,91
2. Световым лучом	6,44...11,36

Данные таблицы 3 показывают, что способ плавления лунного реголита практически не влияет на твердость получаемых материалов.

Немаловажную роль в понимании температурных условий на Луне играют теплофизические свойства лунного реголита. Основными теплофизическими характеристиками в этом случае выступают теплопроводность, теплоемкость и теплостойкость.

Теплопроводность лунного реголита довольно низкая и составляет $0,1 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{С)}$. Это связано с его пористой структурой и невысокой плотностью. Для сравнения, теплопроводность сухого песка на Земле составляет около $0,25 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{С)}$, что значительно больше. Низкая теплопроводность означает, что теплота плохо передается через слой реголита.

Удельная теплоемкость реголита составляет приблизительно $0,8 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{С)}$. Теплоемкость лунного грунта схожа с земными аналогами, такими как кварцевый песок или базальт.

На поверхности Луны наблюдаются значительные суточные и сезонные изменения температуры. Из-за отсутствия атмосферы, дневные температуры могут достигать $+120^\circ\text{С}$, тогда как ночью температура опускается до -170°С . Эти резкие перепады обусловлены низкой теплопроводностью реголита, который медленно нагревается днем и быстро остывает ночью. Лунный реголит обладает достаточной теплостойкостью и устойчивостью к температурным перепадам благодаря своему минеральному составу, состоящему преимущественно из силикатов и оксидов металлов.

Теплофизические параметры важны для проектирования лунных посадочных модулей, жилых модулей и других инженерных сооружений, поскольку они определяют, как будет распределяться теплота внутри конструкций и насколько эффективно они смогут поддерживать комфортную температуру.

Знание основных прочностных и теплофизических характеристик реголита и симиналов на их основе позволят нам сформировать номенклатуру будущих строительных материалов на Луне. В настоящее время продукция из симиналов весьма разнообразна, она включает в себя фундаментные блоки, отделочные плиты, трубы, желоба, элементы циклонов и мультициклонов и т.п. (рис. 3). В основном изделия из симиналов применяются в агрессивных условиях эксплуатации, например в условиях абразивного износа, в условиях кислотной коррозии, интенсивных излучений, резких сменах температур и т.д. Причем в этих условиях срок их долговечности исчисляется десятилетиями. Следовательно, и в лунных условиях конструкции из симиналов смогут длительное время противостоять всем негативным воздействиям космического пространства.

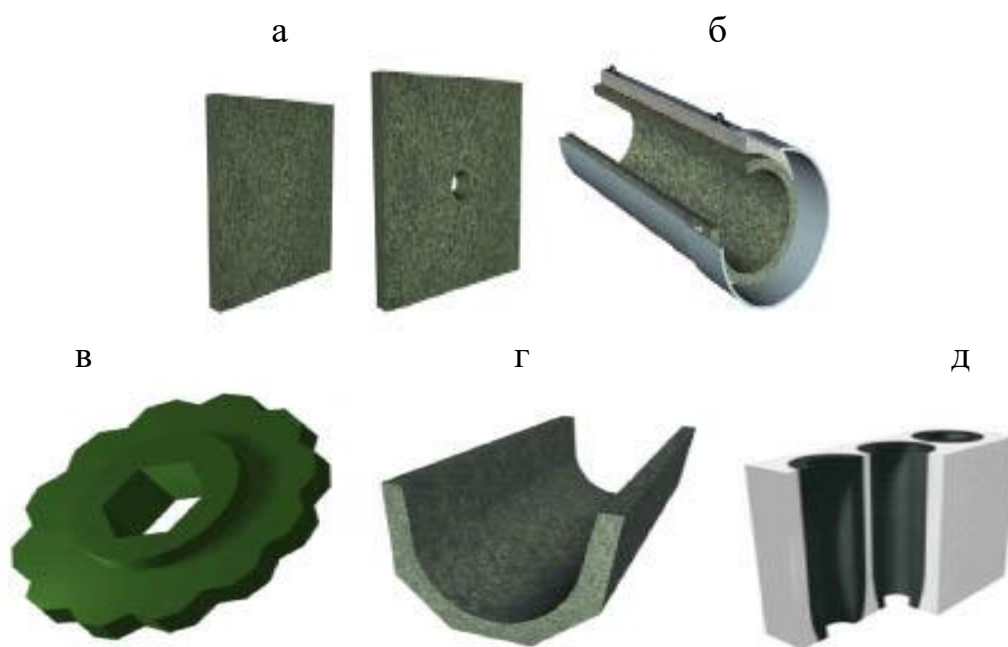


Рис. 3. Виды строительных материалов из лунного реголита:

а – износостойкие плиты; б – трубы; в – колесо грохота;
г – желоб; д – мультициклон.

Изготовление строительных материалов и изделий из реголита обеспечит промышленность сравнительно дешевой продукцией и позволит организовать строительную индустрию в космосе.

Заключение

Перспективы использования космических ресурсов открывают новые горизонты для добычи сырьевых материалов, необходимых человечеству. Строительные материалы на основе реголита, доступного на Луне, представляют собой важный шаг к созданию экономически выгодных и долговечных конструкций. Эти материалы могут значительно снизить затраты на транспортировку ресурсов с Земли и обеспечить автономность будущих миссий.

Однако использование реголита также сталкивается с определенными проблемами, такими как необходимость разработки приемлемых технологий для его переработки и адаптации к специфическим космическим условиям. В аспекте данной проблемы перспективными видятся технологии плавления лунного грунта с применением электрической дуги и светового луча. Важно также учитывать физико-механические свойства получаемых плавленных материалов – симиналов, устойчивость их к экстремальным температурам и к воздействию радиации.

Космическое строительство, технологии плавления реголита и разработка эффективных строительных материалов являются ключевыми элементами успешного освоения космоса. Они не только обеспечивают безопасность и комфорт будущих обитателей внеземных баз, но и способствуют созданию инфраструктуры для добычи ресурсов, необходимых для развития человечества. В конечном итоге, эффективные строительные решения станут основой для рационального использования космических ресурсов, что позволит человечеству сделать следующий шаг в освоении космического пространства.

Список литературы

1. Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974. 331 с.

2. Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М. Об освоении Луны. Планы и ближайшие перспективы // Земля и Вселенная. 2019. № 4. С. 16 – 37.
3. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. Модель 1974 года. М.: Издательство ВИНТИ РАН, 1975. 72 с.
4. Виноградов А.П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16» // Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974. С. 7 – 19.
5. Papike J.J., Simon S.B., Laul J.C. The lunar regolith: chemistry, mineralogy, and petrology // Reviews of Geophysics. 1982. No. 20(4). Pp. 761 – 826.
6. Zheng W., Qiao G. Microstructure, thermophysical, and mechanical properties of bulk glass prepared from molten lunar regolith stimulant // Advances in Space Research. 2022. No. 69(8). Pp. 3130 – 3139.
7. Whittington A., Parsapoor A. Lower cost lunar bricks: energetics of melting and sintering lunar regolith stimulants // New Space. 2022. No. 10(2). Pp. 193-204.
8. Ferguson R.E., Shafirovich E., Mantovani J.G. Combustion joining of regolith tiles for in situ fabrication of launch/landing pads on the moon and Mars // Earth and Space. 2018. Pp. 281 – 288.

References

1. Lunar soil from the Sea of Abundance. Moscow: Nauka, 1974. 331 p. (in Russian)
2. Mitrofanov I.G., Zeleny L.M. On the exploration of the Moon. Plans and immediate prospects // Earth and the Universe. 2019. No. 4. pp. 16-37. (In Russian)
3. Florensky K.P., Bazilevsky A.T., Nikolaeva O.V. Lunar soil: properties and analogues. Model of 1974. Moscow: VINITI RAS Publishing House, 1975. 72 p. (In Russian)
4. Vinogradov A.P. Preliminary data on the lunar soil delivered by the Luna-16 automatic station // Lunar soil from the Sea of Abundance. Moscow: Nauka, 1974. pp. 7-19. (In Russian)

5. Papike J.J., Simon S.B., Laul J.C. The lunar regolith: chemistry, mineralogy, and petrology // *Reviews of Geophysics*. 1982. No. 20(4). Pp. 761 – 826.
6. Zheng W., Qiao G. Microstructure, thermophysical, and mechanical properties of bulk glass prepared from molten lunar regolith stimulant // *Advances in Space Research*. 2022. No. 69(8). Pp. 3130 – 3139.
7. Whittington A., Parsapoor A. Lower cost lunar bricks: energetics of melting and sintering lunar regolith stimulants // *New Space*. 2022. No. 10(2). Pp. 193-204.
8. Ferguson R.E., Shafirovich E., Mantovani J.G. Combustion joining of regolith tiles for in situ fabrication of launch/landing pads on the moon and Mars // *Earth and Space*. 2018. Pp. 281 – 288.

Усачев Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой Технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета.

Мильниченко Евгения Александровна – студент группы БМСО-222 факультета экономики, менеджмента и информационных технологий Воронежского государственного технического университета.

Телегина Анастасия Владимировна - студент группы БМСО-222 факультета экономики, менеджмента и информационных технологий Воронежского государственного технического университета.

УДК 624.131.5:624.044

ДЕФОРМАЦИОННАЯ ПСЕВДОНЕОДНОРОДНОСТЬ ОРТОТРОПНЫХ СЛОЕВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОСТРАНСТВА

А.А. Трещев, В.Г. Теличко, Д.О. Бесстраинов*

*Тульский государственный университет,
Российская Федерация, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92*

**Адрес для переписки: Трещев Александр Анатольевич, E-mail: taa58@yandex.ru*

Предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойного ортотропного полупространства, учитывающая зависимость механических свойств материалов от вида и параметров напряженного состояния (так называемый эффект разносопротивляемости). В основе методики лежат новые усовершенствованные определяющие соотношения для ортотропных материалов. Нагрузка задается воздействием жесткого штампа. Для оценки точности и эффективности разработанной модели проведено сравнение расчетных параметров НДС с результатами, полученными по существующим теоретическим подходам других авторов.

Ключевые слова: слоистое основание, деформационная псевдонеоднородность, структурная ортотропия, метод конечных элементов.

PSEUDO-INHOMOGENEOUS DEFORMATION OF ORTHOTROPIC LAYERS IN HALF-SPACE MODEL

A.A. Treschev, V.G. Telichko, D.O. Besstrashnov*

Tula State University, prospekt Lenina, 92, Tula, 300012, Russian Federation

**Corresponding author: Alexander A. Treschev, E-mail: taa58@yandex.ru*

A method for calculating the stress-strain state of a multilayer orthotropic half-space is proposed, which accounts for the dependence of material mechanical properties on the type and param-

eters of the stress state (the so-called strength differential effect). The method is based on new improved constitutive relations for orthotropic materials. The load is applied by a rigid stamp. To assess the accuracy and effectiveness of the developed model, a comparison was made between the calculated stress-strain state parameters and the results obtained using existing theoretical approaches of other authors.

Key words: layered foundation, deformation pseudo-inhomogeneity, induced inhomogeneity, finite element method.

Введение

Оптимизация строительных процессов, в частности этапа устройства фундаментов, стоимость которого нередко составляет до трети бюджета проекта, является ключевым фактором роста производительности отрасли. Решение этой задачи осложняется растущей сложностью конструкций, неоднородностью грунтов на строительных площадках, необходимостью предельно точного прогнозирования поведения грунтового основания, что диктует потребность в применении передовых вычислительных моделей и методов механики деформируемого твердого тела (МДТТ).

В контексте данной проблемы особую актуальность приобретает учет анизотропии (ортотропии) механических свойств грунтов, их зависимости от параметров НДС, нелинейного деформирования. Согласно данным литературы [1 – 7], грунты и породы, демонстрирующие анизотропию (ортотропию) своих механических свойств, являются весьма широко распространенными. Их поведение характеризуется склонностью к дилатации и зависимостью свойств от параметров напряженного состояния. Данные особенности типичны для ленточных глин, лёсса, торфов, мерзлых и засоленных грунтов. В скальных и полускальных породах анизотропия часто бывает обусловлена текстурными особенностями (слоистость, полосчатость), ориентацией трещин и минеральных зерен, что классифицируется обычно как наведенная анизотропия.

Анализ показал, что большинство моделей деформируемых оснований неточно отражают реальную работу грунта из-за обилия труднореализуемых гипотез. Трехмерные модели, учитывающие физическую нелинейность грунтов

[4, 5, 8], демонстрируют более высокую адекватность и универсализм по сравнению с традиционными моделями Винклера, Пастернака и линейно-деформируемого основания [9, 10]. Комплексный подход на основе трехмерной теории упругости, направленный на непосредственное представление в модели массива грунта со всеми особенностями геометрии [8, 9], является необходимым условием для точного учета работы основания в составе пространственной конструкции. Согласно данным вычислительных экспериментов [4, 5, 9], одним из наиболее подходящих инструментов для моделирования многослойных полупространств служит изопараметрический четырехузловой тетраэдральный конечный элемент (КЭ). На его базе был создан улучшенный вариант КЭ, интегрирующий учет нелинейного деформирования и наведенной анизотропии грунтов (в рамках теории прочности и деформирования разносопротивляющихся материалов) [10, 11].

Ключевой целью на стадии проектирования является определение точных параметров НДС. Несмотря на наличие достаточно разработанных и апробированных аналитических методов, их область применения ограничена простейшими случаями анизотропных псевдонеоднородных сред [5]. В этом контексте метод конечных элементов (МКЭ), дискретизирующий континуум на множество элементов, представляется намного более универсальным. Современные КЭ-комплексы, использующие полную трехмерную постановку, позволяют достигать требуемой точности при моделировании сложных объектов практически любой пространственной конфигурации.

В расчетной практике используют специализированные элементы для прогнозирования НДС, учитывающие неклассические физико-механические свойства материалов. Однако большинство стандартных пакетов не поддерживают «усложнённые» свойства [6, 7], поэтому важнейшим направлением остаётся разработка и модификация вычислительных методов, и разработка реалистичных моделей прогнозирования механического поведения материалов.

Постановка задачи и методы

Многослойность грунтового основания, где каждый горизонт обладает уникальными физико-механическими характеристиками, является ключевым фактором, определяющим характер взаимодействия с фундаментом и надземной частью здания, и фактически определяет механическую работу фундамента. Актуальные нормы проектирования (СП 22.13330.2016) безусловно требуют учёта этих особенностей, однако обычно предполагают механическую изотропию или простую неоднородность слоёв.

Эксперименты показывают, что грунты часто демонстрируют свойства, зависящие от вида напряженного состояния, а именно структурную ортотропию и деформационную анизотропию. Данные факторы, как правило, не рассматриваются в реальных расчетах, что может серьезно отразиться на результатах прогноза НДС сооружения (в комбинации с основанием).

В рамках данной работы для устранения указанного несоответствия разработана достаточно эффективная модель прогноза деформирования слоистого основания под жестким штампом как аналога подошвы фундамента, учитывающая структурную ортотропию и деформационную анизотропию. Математическое описание среды строится в нормированном пространстве напряжений на основе потенциала деформаций [12], при этом система координат непосредственно связана с осями ортотропии.

$$\begin{aligned}
 W_1 = & 0,5(A_{1111} + B_{1111}\alpha_{11})\sigma_{11}^2 + 0,5(A_{2222} + B_{2222}\alpha_{22})\sigma_{22}^2 + 0,5(A_{3333} + B_{3333}\alpha_{33})\sigma_{33}^2 + \\
 & + [A_{1122} + B_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11}\sigma_{22} + [A_{2233} + B_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22}\sigma_{33} + \\
 & + [A_{3311} + B_{3311}(\alpha_{33} + \alpha_{11})]\sigma_{33}\sigma_{11} + A_{1212}\tau_{12}^2 + A_{2323}\tau_{23}^2 + A_{3131}\tau_{31}^2, \\
 e_{ii} = & C_{iiii}\sigma_{ii} + C_{ijij}\sigma_{jj} + C_{iikk}\sigma_{jj}; \quad \gamma_{ij} = C_{ijij}\tau_{ij} \quad \text{при } i \neq j;
 \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}
 C_{iiii} = & A_{iiii} + B_{iiii}\alpha_{ii} + 0,5 \left[B_{iiii}\alpha_{ii}(1 - \alpha_{ii}^2) - B_{jjjj}\alpha_{jj}^3 - B_{kkkk}\alpha_{kk}^3 - B_{ijij}\alpha_{ij}^3 - B_{jjkk}\alpha_{jj}^3 - B_{ikik}\alpha_{ik}^3 \right] + \\
 & + B_{ijij}\alpha_{jj}(1 - \alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{jj}) + B_{ijij}\alpha_{kk}(1 - \alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii}\alpha_{kk}) - B_{jjkk}\alpha_{jj}\alpha_{kk}(\alpha_{jj} + \alpha_{kk}); \\
 C_{ijij} = & A_{ijij} + B_{ijij}(\alpha_{ii} + \alpha_{jj}); \quad C_{iikk} = A_{iikk} + B_{iikk}(\alpha_{ii} + \alpha_{kk}); \\
 C_{ijij} = & A_{ijij} - (B_{iiii}\alpha_{ii}^3 + B_{jjjj}\alpha_{jj}^3 + B_{kkkk}\alpha_{kk}^3) -
 \end{aligned}$$

$$-2 \left[B_{ijj} \alpha_{ii} \alpha_{jj} (\alpha_{ii} + \alpha_{jj}) + B_{jjk} \alpha_{jj} \alpha_{kk} (\alpha_{jj} + \alpha_{kk}) + B_{ikk} \alpha_{ii} \alpha_{kk} (\alpha_{ii} + \alpha_{kk}) \right];$$

$$C_{ijkm} = C_{kmij}; (i \rightarrow j \rightarrow k = 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3); \alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S.$$

Здесь: α_{ij} – нормированные напряжения в пространстве главных осей ортотропии; σ_{ij} – компоненты напряжений в этих же осях; $S = \sqrt{\sigma_{ij} \sigma_{ij}}$ – норма тензорного пространства; $\alpha_{ij} \alpha_{ij} = 1$ – условие нормировки пространства; A_{ijk}, B_{ijk} – параметры, вычисляемые по результатам обработки механических испытаний ортотропного материала, которые определяют тензор податливостей 4 ранга.

$$A_{kkkk} = (1/E_k^+ + 1/E_k^-) / 2; B_{kkkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-) / 2;$$

$$A_{ijij} = -(\nu_{ij}^+ / E_j^+ + \nu_{ij}^- / E_j^-) / 2; B_{ijij} = -(\nu_{ij}^+ / E_j^+ - \nu_{ij}^- / E_j^-) / 2; \quad (2)$$

$$A_{ijji} = 1/G_{ij}; \nu_{ij}^+ / E_j^+ = \nu_{ji}^+ / E_i^+; \nu_{ij}^- / E_j^- = \nu_{ji}^- / E_i^-.$$

Здесь: $E_i^\pm, \nu_{ij}^\pm$ – модули упругости, коэффициенты поперечной деформации вдоль соответствующих главных осей ортотропии; G_{ij} – модули сдвига в главных плоскостях.

Распространенный подход к моделированию основания в виде полупространства с единственной дискретной поверхностью не учитывает трехмерные ограничения реальной среды, поэтому, как и было сказано выше, для сложных (особенно геометрически) случаев слоистых оснований более эффективным является применение объемных КЭ.

Поскольку МКЭ непосредственно оперирует дискретными областями, критически важным этапом становится корректное определение границ расчетной области. Её размеры, зависящие от зоны приложения нагрузки, должны быть таковы, чтобы их дальнейшее увеличение не влияло на результаты расчета. Критерием адекватности выбранных размеров является стабилизация значений перемещений и напряжений на границах модели (рис. 1, 2). В научной литературе [4, 5], как правило, рекомендуется использовать расчетную область, превышающую зону приложения давления (штамп на рис. 1) по размерам в плане в 5 – 10 раз (начальное рекомендуемое для численных экспериментов значение). Такое соотношение обеспечивает

достаточно точное моделирование, снижая влияние граничных эффектов на прогноз напряженно-деформированного состояния основания. Механические характеристики материалов заимствованы из более ранней работы [4] и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики слоев

№ п/п слоя	Модули упругости в МПа, коэффициенты поперечной деформации								
1	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	16,00	32,00	10,70	29,00	8,50	25,00	8,72	7,95	7,15
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,20	0,28	0,22	0,31	0,25	0,32	—	—	—
2	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	13,55	40,65	14,05	42,15	8,55	25,65	10,90	8,43	8,80
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,32	0,28	0,25	0,22	0,27	0,24	—	—	—
3	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	26,67	80,00	23,65	70,95	20,15	60,45	19,32	17,90	16,66
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,31	0,26	0,33	0,30	0,29	0,32	—	—	—
4	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	5,95	17,85	4,15	12,45	3,45	10,35	3,80	3,56	2,96
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,28	0,32	0,29	0,34	0,26	0,23	—	—	—
5	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	40,15	120,30	30,40	91,30	22,10	66,55	27,57	23,68	20,82
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,26	0,30	0,30	0,21	0,25	0,23	—	—	—
6	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	20,35	60,65	16,85	50,95	16,40	49,20	14,31	13,88	12,85
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,32	0,30	0,31	0,25	0,35	0,28	—	—	—
7	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	9,65	28,55	8,85	26,75	6,75	20,95	6,91	6,19	5,95
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	—	—	—
	0,31	0,35	0,32	0,36	0,29	0,31	—	—	—

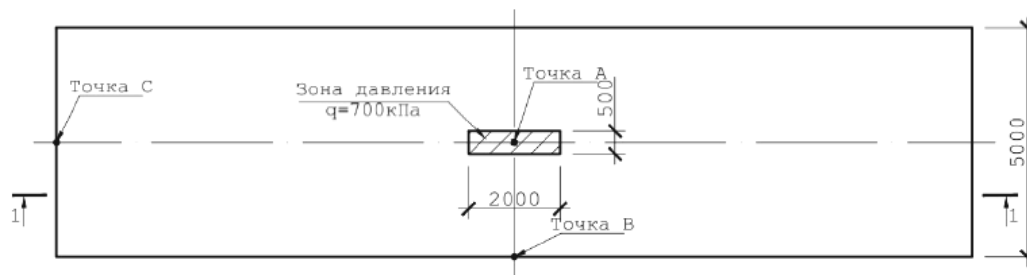


Рис. 1. Вид в плане на исследуемое полупространство.

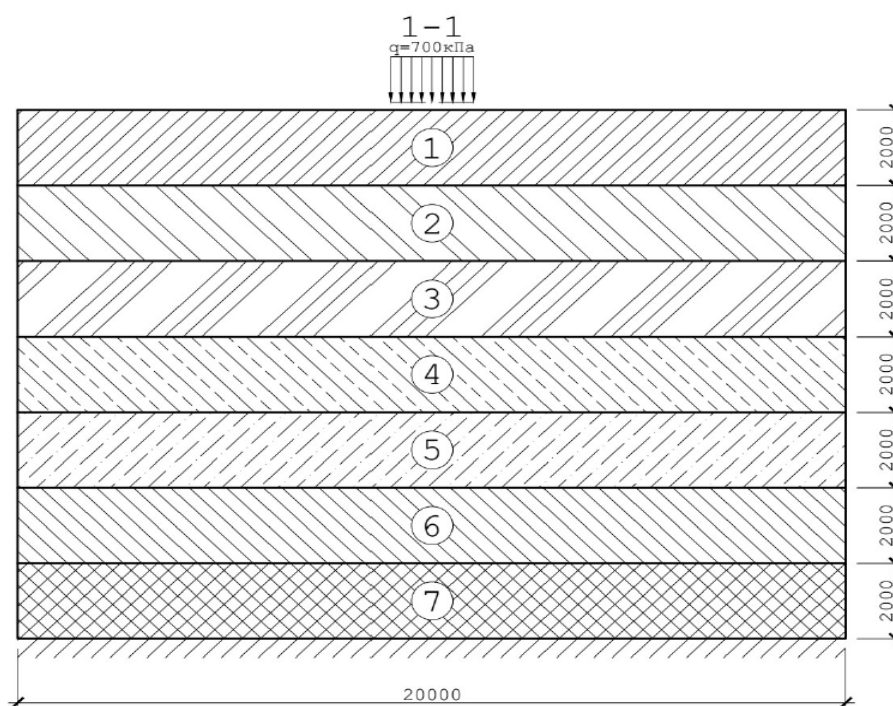


Рис. 2. Разрез 1-1 полупространства.

Модель интерпретирует слои основания как ортотропные среды со свойствами, зависящими от типа напряженного состояния. Решение нелинейных определяющих уравнений осуществлялось итерационно методом переменных параметров упругости. При этом вычислительная процедура, за исключением некоторых модификаций, строится на основе универсального стандартного алгоритма применения МКЭ для трехмерного случая, изложенного в публикации [10].

Результаты и их обсуждение

Анализ наиболее характерных результатов расчетов, представленных на рис. 3 – 5, включает распределение осадок и горизонтальных перемещений,

нормальных напряжений σ_z в характерном вертикальном сечении 1-1 полу-пространства (см. рис. 1).

Сравнительный анализ охватывает различные концепции описания механического поведения материалов: от усовершенствованных определяющих соотношений [12] и модели с усредненными характеристиками до соотношений [4, 9] и известных теорий К.В. Берта – Д.Н. Редди и С.А. Амбарцумяна – А.А. Хачатряна [6, 7, 13].

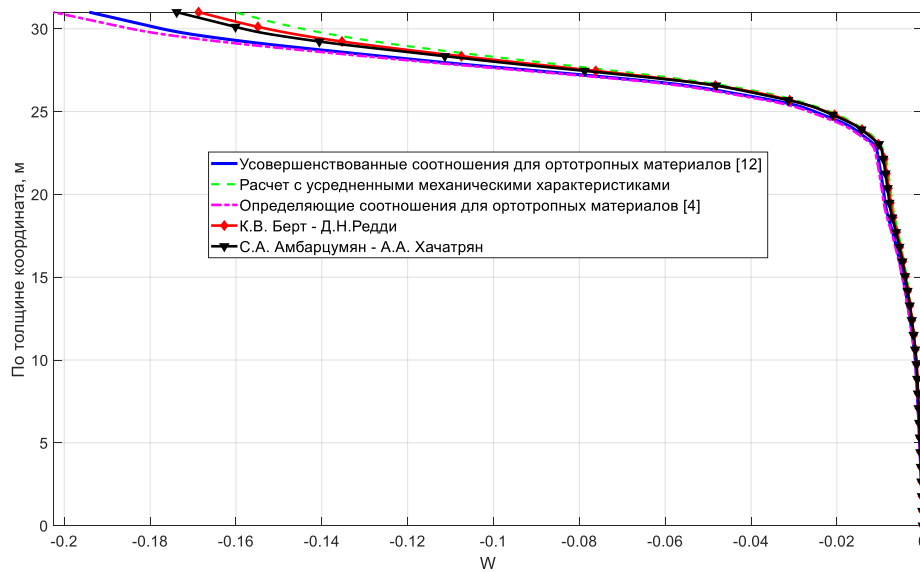


Рис. 3. Изменение вертикальных перемещений по высоте сечения 1-1 в точке А.

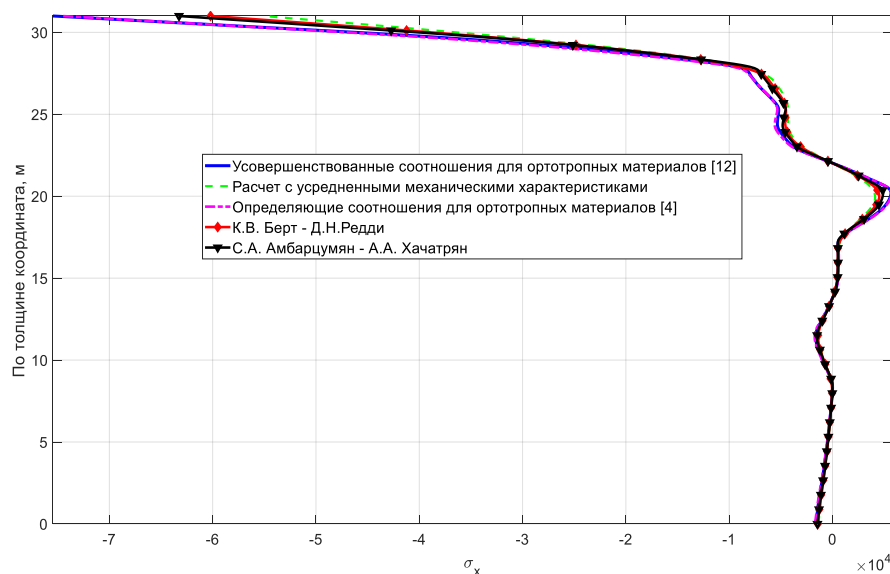


Рис. 4. Изменение горизонтальных перемещений вдоль оси симметрии на поверхности полупространства через точку А.

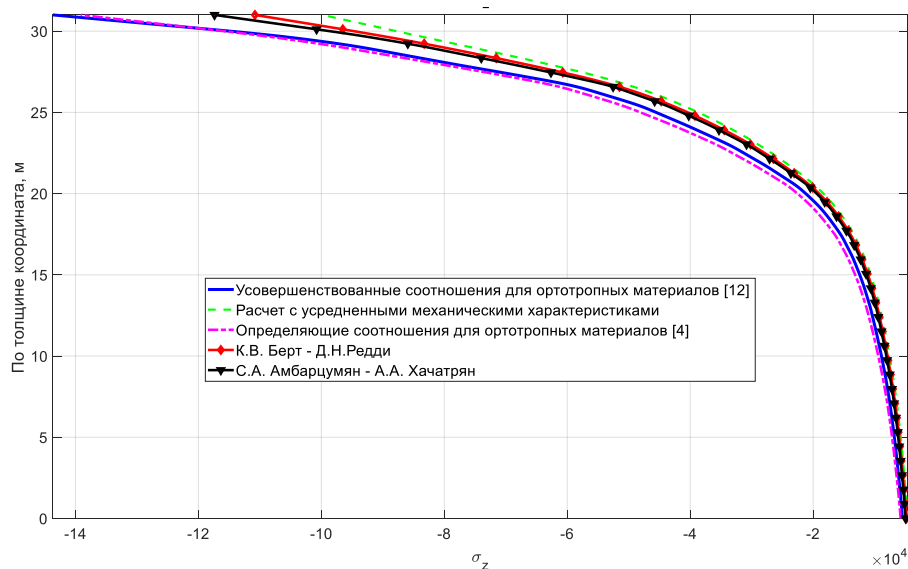
Рис. 5. Изменение напряжений σ_z по высоте сечения 1-1 в точке А.

Таблица 2

Сравнительная оценка результатов расчета
относительно усовершенствованных соотношений [12]

Сравниваемая модель / Расчетный параметр	Вертикальные перемещения	Горизонтальные перемещения	Нормальные напряжения σ_z
Определяющ. соотн.[4]	до 6%	до 24%	до 6%
Теория Амбарцумяна- Хачатряна	до 11%	до 35%	до 25%
Теория Берта-Редди	до 16%	до 82%	до 36%
Усредн. хар-ки материала	до 26%	до 115%	до 45%

Заключение

Проведенные исследования в области моделирования многослойных ортотропных оснований убедительно демонстрируют эффективность разработанного авторами подхода. Комплексное применение модифицированных определяющих соотношений, учитывающих двойную анизотропию и разнсопротивляемость материалов, в сочетании с использованием объемных конечных элементов [12] позволяет достичь высокой точности прогнозирования параметров НДС.

Результаты детальных расчетов подтверждают, что предлагаемая модель выявляет систематические расхождения с решениями, полученными в рамках традиционных теорий [6, 7]. Наиболее существенные отклонения, особенно в

величинах горизонтальных перемещений и нормальных напряжений, наблюдаются при использовании моделей, пренебрегающих зависимостью свойств грунта от вида напряженного состояния. Таким образом, игнорирование эффектов структурной ортотропии и деформационной анизотропии может привести к значительным ошибкам, что подчеркивает ограниченность классических методов и практическую ценность разработанного подхода [8, 10, 11].

Список литературы

1. Бугров А.К., Голубев А.И. Анизотропные грунты и основания сооружений. СПб.: Недра, 1993. 245 с.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
3. Вялов С.С. Вопросы теории деформируемости связанных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1966. № 3. С. 1–4.
4. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запорожье: Изд-во журн. «Світ геотехніки», 2009. 400 с.
5. Семенов В.А. Выбор расчетных моделей пространственных комбинированных систем МКЭ // Пространственные конструкции зданий и сооружений: сб. ст. / под ред. В.В. Шугаева [и др.]. М., 2004. Вып. 9. С. 54–64.
6. Теличко В.Г., Ходорович П.Ю. К расчету оснований методом конечных элементов // Известия ТулГУ. Технические науки: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Ч. 1. С. 341–347.
7. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография. М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. 326 с.
8. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография. М.: Изд-во ТулГУ, 2008. 264 с.

9. Трещев А.А., Завьялова Ю.А., Лапшина М.А. Вариант модели деформирования ортотропных композитных материалов // Эксперт: Теория и практика. 2020. № 3(6). С. 62–68.
10. Трещев А.А., Теличко В.Г., Ходорович П.Ю. К задаче о давлении на грунтовое основание // Вестник отделения строительных наук РААСН. М.: РААСН-МГСУ, 2014. Вып. 18. С. 95–99.
11. Трещев А.А., Теличко В.Г., Царев А.Н., Ходорович П.Ю. Конечно-элементная модель расчета пространственных конструкций из материалов с усложненными свойствами // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 10. С. 106–115.
12. Jones R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression // AIAA Journal. 1977. Vol. 15, № 1. P. 16–25.
13. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th ed. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.

References

1. Bugrov A.K., Golubev A.I. Anisotropic Soils and Foundations of Structures. St. Petersburg: Nedra, 1993. 245 p. (in Russian)
2. Vyalov S.S. Rheological Fundamentals of Soil Mechanics. Moscow: Vysshaya Shkola, 1978. 447 p. (in Russian)
3. Vyalov S.S. Issues of the Theory of Deformability of Cohesive Soils // Bases, Foundations and Soil Mechanics. 1966. No. 3. pp. 1–4. (in Russian)
4. Klovanich S.F. The Finite Element Method in Nonlinear Problems of Engineering Mechanics. Zaporizhzhia: Publishing House of the Journal "Svit Geotekhniky", 2009. 400 p. (in Russian)
5. Semenov V.A. Selection of Calculation Models for Spatial Combined Systems by the Finite Element Method // Spatial Structures of Buildings and Constructions: Collection of Articles / Ed. by V.V. Shugaev [et al.]. Moscow, 2004. Iss. 9. pp. 54–64. (in Russian)

6. Telichko V.G., Khodorovich P.Yu. On the Calculation of Foundations by the Finite Element Method // News of TulGU. Technical Sciences: in 2 parts. Tula: TulGU Publ., 2014. Part 1. pp. 341–347. (in Russian)
7. Treshchev A.A. Theory of Deformation and Strength of Materials with Initial and Induced Sensitivity to the Type of Stress State. Constitutive Relations: monograph. Moscow; Tula: RAASN; Tula State University, 2016. 326 p. (in Russian)
8. Treshchev A.A. Theory of Deformation and Strength of Materials Sensitive to the Type of Stress State. Constitutive Relations: monograph. Moscow: Tula State University Publ., 2008. 264 p. (in Russian)
9. Treshchev A.A., Zavyalova Yu.A., Lapshina M.A. A Variant of a Deformation Model for Orthotropic Composite Materials // Expert: Theory and Practice. 202. No. 3(6). pp. 62–68. (in Russian)
10. Treshchev A.A., Telichko V.G., Khodorovich P.Yu. On the Problem of Pressure on a Soil Base // Bulletin of the Department of Construction Sciences of the RAACS. Moscow: RAACS-MGSU, 2014. Iss. 18. pp. 95–99. (in Russian)
11. Treshchev A.A., Telichko V.G., Tsarev A.N., Khodorovich P.Yu. Finite Element Model for Calculation of Spatial Structures Made of Materials with Complex Properties // News of TulGU. Technical Sciences. Tula: TulGU Publ., 2012. Iss. 10. pp. 106–115. (in Russian)
12. Jones R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression // AIAA Journal. 1977. Vol. 15, No. 1. pp. 16–25.
13. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th ed. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.

Трещев Александр Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительства, строительных материалов и конструкций, ТулГУ

Теличко Виктор Григорьевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, ТулГУ

Бесстрашнов Дмитрий Олегович – аспирант, ассистент кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, ТулГУ

NON-ISOCYANATE POLYURETHANE FOAMS (NIPUFS). PART 1

O. Figovsky^{1*}, N. Hudzenko²

¹*International Nanotechnology Research Center "Polymath",*

Israel, 34750, Haifa, Shimkina str., 3a

²*Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Germany, 67658,*

Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Str. 58

**Corresponding author: Oleg L. Figovsky, e-mail: figovsky@gmail.com*

Polyurethane foams (PUFs) constitute a major class of polymeric materials, widely appreciated for their excellent mechanical strength, chemical resistance, and physical versatility. They are used in a wide variety of applications, such as insulation, cushioning, coatings, and structural parts. Traditionally, PUFs are prepared through polyaddition reactions involving polyols, diisocyanates, and water, where the in-situ generated CO₂ in the reaction mixture serves as the blowing agent. However, there are significant concerns with the use of isocyanates as they are toxic, classified respiratory sensitizers, and contribute to environmental pollution. These issues have directed both researchers and industry experts to search for safer and more sustainable alternative feedstocks.

The polyaddition reaction between cyclic carbonates (CCs) and polyfunctional amines has been one promising alternative. The reaction leads to the formation of non-isocyanate polyurethanes (NIPUs), specifically polyhydroxyurethane foams (PHUFs). Foaming is achieved by using external chemical blowing agents or through self-blowing reactions, where gases are generated directly in the system. The generated foam cells – the structures that give foams their unique properties – depends largely on the gas-forming reactions.

Keywords: biobased polyurethane; blowing agent; non-isocyanate polyurethane; polymeric foams; polyurethane foams; self-blowing

Abbreviations used in this review: CCs – cyclic carbonates; DABCO – 1,4-diazabicyclo [2.2.2] octane; DABCO – 1,4-diazabicyclo [2.2.2] octane; DSTDL – dibutyltin dilaurate; DBU – 1,8-Diazabicyclo[5.4.0]undec-7-en; EC – ethylene carbonate; GC – Glycerol Carbonate; LDI – L-Lysine ethyl ester diisocyanate; MOF – metal-organic framework; NIPUFs – non-isocyanate polyu-

rethane foams; NIPUs – non-isocyanate polyurethanes; PC – propylene carbonate; PHMS – poly(methylhydrogensiloxane); PHUFs – polyhydroxyurethane foams; PHUs – polyhydroxyurethanes; PUs – polyurethanes; PUFs – polyurethane foams; ROP – ring-Opening Polymerization; SDGs – sustainable Development Goals; SOC – spiro-orthocarbonate; TBD – triazabicyclodecene; VOCs – volatile organic compounds

НЕИЗОЦИАНАТНЫЕ ПЕНОПОЛИУРЕТАНЫ (NIPUFS). ЧАСТЬ 1

О. Фиговский^{1*}, Н. Гудзенко²

¹*Международный научно-исследовательский центр нанотехнологий
«Полилат», Израиль, 34750, Хайфа, ул. Шимкина, 3а*

²*Институт композитных материалов GmbH в Лейбнице, Германия, 67658,
Кайзерслаутерн, ул. Эрвина Шредингера, 58*

**Адрес для переписки: Фиговский Олег Львович, e-mail: figovsky@gmail.com*

Пенополиуретаны (ППУ) представляют собой основной класс полимерных материалов, которые широко ценятся за их высокую механическую прочность, химическую стойкость и универсальность. Они находят широкое применение при изготовлении изоляционных материалов, прокладок, покрытий и деталей конструкций. Традиционно ППУ получают в результате реакций полиприсоединения с участием полиолов, диизоцианатов и воды, где образующийся на месте CO₂ в реакционной смеси служит в качестве вспенивающего агента. Однако использование изоцианатов вызывает серьезные опасения, поскольку они токсичны, классифицируются как респираторные сенсибилизаторы и способствуют загрязнению окружающей среды. Эти проблемы побудили исследователей и экспертов отрасли к поиску более безопасного и экологичного альтернативного сырья.

Одной из многообещающих альтернатив является реакция полиприсоединения циклических карбонатов (ЦК) с полифункциональными аминами. Эта реакция приводит к образованию неизоцианатных полиуретанов (НИПУ), в частности полигидроксиуретановых пен (ПГУП). Вспенивание достигается за счет использования внешних химических вспенивателей или за счет реакций самовозгорания, при которых газы образуются непосредственно в системе. Образующиеся ячейки пены – структуры, которые придают пене ее уникальные свойства, – в значительной степени зависят от реакций газообразования.

Ключевые слова: пенополиуретан на биополиуретановой основе; пенообразователь; неизоцианатный полиуретан; полимерные пены; пенополиуретановые пенопласты; самонадувающийся

Introduction

Polyurethanes (PUs) are some of the most versatile and widely used polymers in the world. They're appreciated for their excellent mechanical, chemical, and thermal properties, which can be tailored for a wide range of applications. Since their commercialization in the 1930s, they have become essential in industries like construction, automotive manufacturing, furniture production, and even medical devices. The ability to create materials like flexible or rigid foams, elastomers, adhesives, coatings, or thermoplastics has made PUs a key material in modern manufacturing.

But despite their usefulness, traditional polyurethanes have a major drawback: they're made using isocyanates, which are produced from highly toxic phosgene gas. While isocyanates are critical to formation of the urethane bonds that make up PUs, they're also classified as hazardous substances. Continuous exposure to isocyanates leads to serious health problems like occupational asthma and skin irritation. In addition, the production and disposal of PU materials can lead to environmental issues, such as the release of volatile organic compounds (VOCs) and accumulation of non-degradable waste.

To address these problems, researchers have been exploring the development of non-isocyanate polyurethanes as a safer, more sustainable alternative. Unlike traditional PUs, NIPUs are formed without toxic isocyanates, using safer building blocks like cyclic carbonates and primary or secondary amines to form polyhydroxyurethanes (PHUs). Adoption of this approach not only helps to reduce the health risks but also aligns with global efforts to develop greener materials and lower the environmental impact of industrial chemicals.

It's not just about health and safety. There's also regulatory pressure: laws, like the European REACH directive, have put strict limits on the use of hazardous chemicals such as isocyanates. At the same time, the polymer industry is being pushed to

adopt circular economy principles by using renewable feedstocks and cutting carbon emissions. NIPU chemistry offers a promising way forward as they provide safer synthesis routes, are compatible with bio-based raw materials, and offer the potential to be recycled. That makes them a key innovation in the push for sustainable polymer science.

Recent advances in NIPU material research include the development of new cyclic carbonate monomers, better carbonation processes using CO₂ as the raw material, and more efficient catalysts [Lit]. These breakthroughs open up new possibilities for designing high-performance materials. For example, studies have shown the potential of NIPUs in creating self-healing coatings, bio-based adhesives, and lightweight foams for construction, all with lower environmental impact [1–4].

Overview of Non-Isocyanate Polyurethane Foams

The main difference between NIPUFs and conventional PU foams is how they are made. Traditional foams rely on isocyanates to create urethane bonds, while NIPUFs use safer, non-toxic precursors like cyclic carbonates and amines.

NIPUFs avoid these issues because they are made using safer, non-toxic pathways. This makes them safer to produce, easier to handle, and simpler to recycle. Plus, the fact that CO₂ can be used as a raw material for making cyclic carbonates adds an environmental advantage, helping reduce greenhouse gas emissions. By relying on renewable feedstocks and cutting out toxic intermediates, NIPUFs fit well with global sustainability goals, like the UN's Sustainable Development Goals (SDGs).

Some of the key benefits of NIPUFs compared to traditional PU foams include:

- Environmental advantages: They reduce the need for fossil fuel-based isocyanates and make it possible to use CO₂, helping create materials with a lower carbon footprint.
- Health and safety improvements: By eliminating isocyanates, NIPUFs reduce the health risks for workers, especially in industries like construction and automotive manufacturing, where PU foams are widely used.

- Regulatory compliance: NIPUFs make it easier to follow strict international rules on hazardous chemicals.
- Material performance: Research shows that NIPUFs can match or even exceed the thermal and mechanical properties of traditional PU foams. For example, NIPUFs made from bio-based cyclic carbonates have been found to offer better flame resistance and biodegradability.

Synthesis Methods of Non-Isocyanate Polyurethanes

This part of the review focuses on the main approaches used to synthesize non-isocyanate polyurethanes, explaining how these methods work, what materials are used, and their key advantages and challenges. NIPUs have emerged as a greener alternative to conventional polyurethanes, which are typically produced using toxic isocyanates. As regulations on isocyanates become stricter, the need for scalable, safer alternatives is only growing.

Overview of Synthetic Strategies

There are four main methods for synthesizing NIPUs (table 1).

Table 1

Comparative Overview of Synthesis Methods for NIPUs

Synthesis Method	Reactants	Advantages	Limitations	References
Polycondensation	Polychloroformates, Polyamines, Polycarbamates, Polyols	Versatile, accessible	Uses toxic phosgene, by-products	[5,6]
Ring-Opening Polymerization	Aziridines, Cyclic carbamates	No by-products	Toxic precursors, high temperature	[6]
Rearrangement Reactions	Acyl azides, Hydroxamic acids	Synthetic flexibility	Hazardous intermediates, not green	[6]
Polyaddition	Cyclic carbonates, Amines	No by-products, no isocyanates, tunable properties	Dependence on cyclic carbonate availability	[7]

1) Polycondensation: This method involves reacting polyfunctional compounds, such as polychloroformates with polyamines or polycarbamates with polyols as shown in Fig. 1. While polycondensation can produce NIPUs, it usually requires

toxic chemicals like phosgene, and the reactions generate by-products such as HCl or alcohols. It also tends to involve longer reaction times, extra purification steps, and often the use of catalysts [5,6].

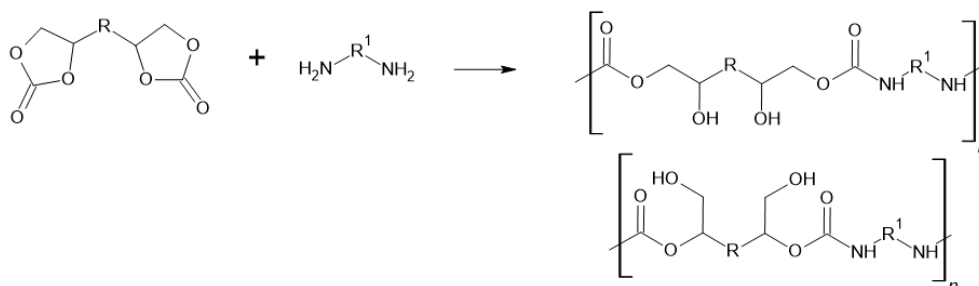


Fig. 1. General polycondensation route to non-isocyanate polyurethanes.

2) Ring-Opening Polymerization (ROP): This method uses cyclic monomers like aziridine or cyclic carbamates. The benefit is that it doesn't create by-products. However, it relies on hazardous precursors that are usually made from phosgene, and the reactions need high temperatures. These safety concerns limit its use on a larger scale [6].

3) Rearrangement Reactions: Isocyanate-based rearrangements (Curtius, Hofmann, Lossen) These include reactions like Curtius, Hofmann, and Lossen rearrangements, where isocyanates are generated in situ from acyl azides or hydroxamic acids. While these methods offer some flexibility in synthesis, they still involve hazardous intermediates, which makes them less appealing for environmentally friendly production [6].

Example – Curtius rearrangement:



Fig. 2. Schematic representation of the Curtius rearrangement [6].

4) Polyaddition (Isocyanate-Free Synthesis of NIPUs): This is the most widely used method for making non-isocyanate polyurethanes. It involves the reaction of cyclic carbonates with amines to produce polyhydroxyurethanes. This method avoids

the use of isocyanates and unwanted by-products, and generally does not require solvents or catalysts. By varying the reactants and their ratios, the properties of the final materials can be tailored [7].

General Reaction:

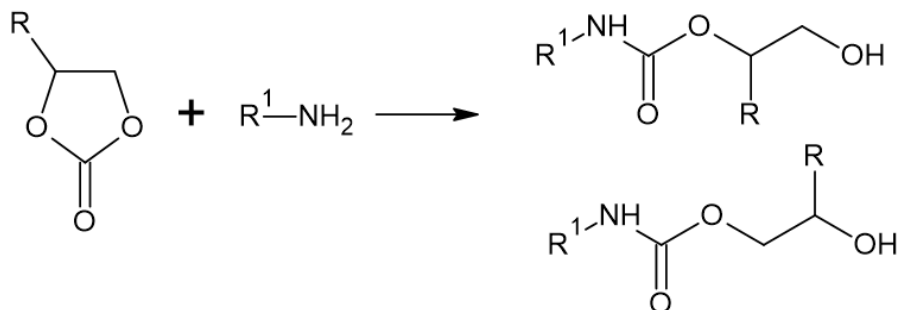


Fig. 3. General polyaddition route to non-isocyanate polyurethanes.

Mechanistic Insights and Innovations

The polyaddition reaction works by a nucleophilic attack, where an amine reacts with the cyclic carbonate ring to form a β-hydroxyurethane structure. Depending on the specific chemical environment, this can lead to the formation of either primary or secondary hydroxyl groups, which affect the material's mechanical properties and the degree of crosslinking.

Mechanistic Equation:

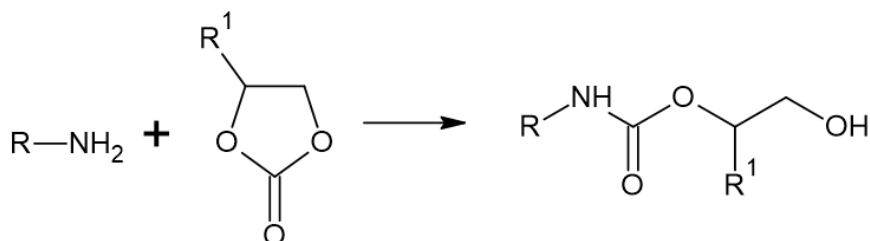


Fig. 4. Polyaddition route to non-isocyanate polyurethanes.

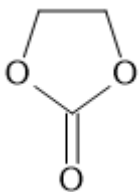
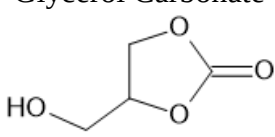
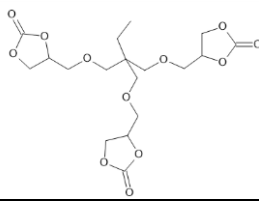
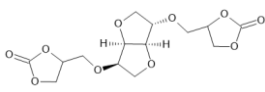
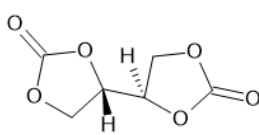
This is a typical ring-opening reaction yielding one urethane group and one hydroxyl group per cycle, without the use of isocyanates.

Recent research has focused on using bio-based raw materials and CO₂-derived reactants as promising feedstocks for NIPUs [8,9]. Some of the latest innovations include:

- Organocatalytic reactions for mild and selective synthesis [10],
- Reductive carbonylation using carbamates and CO₂ [11],
- Amino acid incorporation for functionalization and biocompatibility [12],
- Photopolymerization using spiro-orthocarbonates for improved curing profiles [13].

Table 2

Bio-Based Cyclic Carbonates & Reactivity Time (if available)

Cyclic Carbonate	Source	Structure Type	Reactivity (approx.)	Notes
Ethylene Carbonate 	Petro-based / CO ₂	5-membered	High (few hours, RT–60 °C)	Often used as model substrate
Glycerol Carbonate 	Glycerol (bio-based)	5-membered (mono)	Moderate–High (60–80 °C)	Renewable, biodegradable
Trimethylolpropane Tricarbonate 	Vegetable oils	Multifunctional	Slower (requires heat/catalyst)	Used for crosslinking
Isosorbide Dicarboxylate 	Sorbitol (bio-based)	Rigid, bicyclic	Moderate	Enhances rigidity in PHU network
Erythritol Carbonate 	Sugar alcohols	Multi-cyclic	Slower	Biocompatible, for biomedical use
CO ₂ -derived Cyclic Carbonates	Direct from epoxides + CO ₂	Various	Depends on structure	Green chemistry focus

Green Chemistry and Nanotechnology Approaches

There's been growing interest in making NIPUs more sustainable by using vegetable oil-based monomers, such as epoxidized soybean and linseed oils. These

sources allow for the production of biodegradable and renewable NIPU systems [7,14].

Nanotechnology is also playing a key role. Techniques like ball milling (top-down) and crystallization (bottom-up) help disperse fillers better and improve material properties [15]. Researchers have also explored adding natural nanostructured materials – like extracts from grape seeds, mushrooms, or oats – which can improve biocompatibility, thermal stability, and mechanical strength.

Self-Blowing Strategies

Since cyclic carbonates don't naturally release CO₂ during the reaction, additional blowing agents are needed to create foam. These can include substances like sodium bicarbonate [12], poly(methylhydrogensiloxane) [10], or fluorinated agents [7,16].

A key breakthrough came when Clark et al. [17] showed that sorbitan bis-carbonate can release CO₂ during aminolysis, making it possible to create foams without needing external blowing agents. Monie et al. [11] later improved on this by using thiols and amines together in tandem reactions, which produced self-blowing foams with better mechanical properties.

Challenges and Future Outlook

While NIPUs offer a lot of promise, there are still challenges to overcome:

- Some amines have limited reactivity [3].
- Scaling up the use of bio-based feedstocks for industrial production remains difficult [15,18].
- Optimizing processes to create high molecular weight polymers is still a work in progress [11,14,17].

Recent studies have highlighted several innovative strategies to overcome the low reactivity of certain amines in NIPU systems. For instance, the effect of steric and electronic factors on cyclic carbonate reactivity with amines was also reported by Steblyanko et al. [19], who demonstrated that polymerization efficiency can be improved through structural optimization. In a series of patents, authors [20,21] present-

ed novel formulations based on hybrid cyclic carbonate systems and quaternary ammonium salt catalysis. These approaches not only enhanced the rate of polymer formation but also opened possibilities for using unconventional amines and carbonate precursors, including bio-based components. The proposed systems aim to balance reactivity, environmental safety, and processing ease—fitting within the broader green chemistry agenda. Bähr et al. [22] explored the synthesis of bio-based monomers by reacting epoxidized plant oils with CO₂ to form cyclic carbonates. These monomers were then polymerized with diamines to yield NIPUs with tunable thermal and mechanical properties. Their work highlights both the opportunity and difficulty of using non-petroleum feedstocks, particularly in achieving consistency across industrial-scale batches.

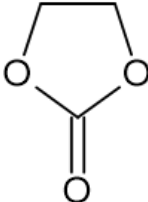
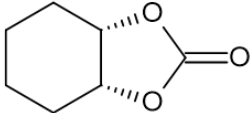
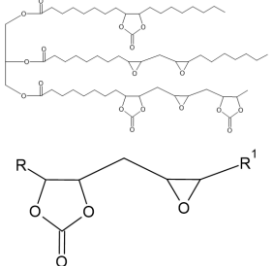
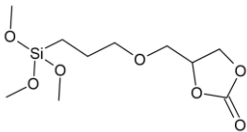
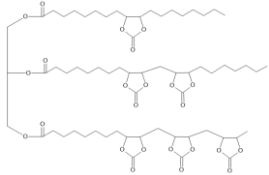
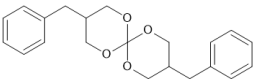
Hong et al. [23] developed a multi-step synthetic route that integrates lignin-derived polyols and propylene carbonate, yielding semi-aromatic NIPU resins. These materials showed improved thermal resistance and lower water uptake compared to fully aliphatic analogs. However, the process required tight control of reaction parameters, indicating that scaling remains a technical bottleneck [23]. Yokawa and Higashihara [24] investigated molecular weight development during the step-growth polymerization of NIPUs. They reported that achieving high molecular weights (>50 kDa) requires precise stoichiometric balance and suppression of premature chain termination. Their study also suggested using reactive diluents and latent curing agents to overcome viscosity and gelation issues during processing [24]. Researchers are also working on improving catalyst systems, such as zinc, tin, and quaternary ammonium salts, to make the reactions faster and more practical for large-scale manufacturing [25–27].

Types of Cyclic Carbonates Used in NIPU Synthesis

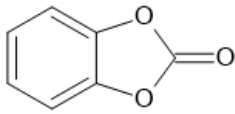
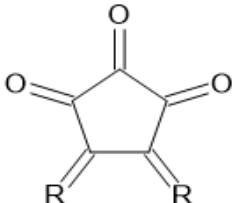
Cyclic carbonates are essential building blocks in NIPU synthesis, and their type plays a big role in the final properties of the material (table 3).

Table 3

Comparative Table of Cyclic Carbonates Used in NIPU Synthesis

Cyclic Carbonate Type	Examples	Key Properties	Applications
Five-Membered Cyclic Carbonates (5CCs)	Ethylene Carbonate, Propylene Carbonate, Glycerol Carbonate (GC) 	High reactivity, widely available, bio-based (GC)	Flexible and rigid NIPUs, adhesives, foams
Six-Membered & Fused-Ring Carbonates	Cyclohexene Carbonate, Fused-ring derivatives 	Thermal stability, mechanical strength, lower reactivity	Engineering plastics, structural composites
Hybrid Carbonates (Epoxy + Cyclic)	Epoxidized soybean oil + cyclic carbonate 	Dual functionality, cross-linking ability	Coatings, adhesives
Organosilicon-Modified Carbonates	Silane-modified carbonates 	Improved flexibility, hydrophobicity	Hydrophobic coatings, adhesives
Bio-Based Carbonates	Rosin-based, POSS-based, vegetable oil-derived 	Renewable, biodegradable, thermomechanical strength	Sustainable foams, coatings, composites
Spiro-Orthocarbonates	Various SOC structures 	Expansion upon polymerization, low stress	3D printing, low-shrinkage resins

Continuation of table 3

Cyclic Carbonate Type	Examples	Key Properties	Applications
Functionalized and Aromatic Carbonates	Aromatic cyclic carbonates 	Enhanced thermal & mechanical properties	Structural composites, insulation foams
Cooperative Catalysis Carbonates	MOF-catalyzed cyclic carbonates	Mild conditions, reusability, efficiency	Green cyclic carbonate synthesis
Bio-Based Innovations	Star-shaped glycerol epoxy-carbonate macromonomers 	Antibacterial, mechanical enhancement	Medical applications, advanced composites

Datta and Włoch [28] conducted a comprehensive review of NIPU synthesis and processing, with a special focus on structure-property relationships. Their analysis highlighted how subtle differences in monomer structure, including ring size and functionality of cyclic carbonates, can influence the thermal, mechanical, and degradation behavior of the resulting polymers. This work laid the foundation for correlating carbonate chemistry with targeted material performance. Wang et al. [29] examined new catalytic strategies to reduce reaction time and improve conversion efficiency in NIPU formulations. Their study focused on environmentally friendly catalysts and reported how variations in cyclic carbonate precursors affected polymerization kinetics and product consistency. Their findings contributed significantly to greener process engineering for polyurethanes.

Qiao et al. [30] emphasized the environmental advantages of using CO₂-derived cyclic carbonates in sustainable polymer design. They investigated different pathways to incorporate captured CO₂ into functional monomers suitable for NIPU synthesis, supporting the growing interest in carbon circularity. Their work also addressed technical and economic challenges associated with CO₂ utilization.

Balla et al. [3] explored the role of molecular structure and reactivity in CO₂-based polymer chemistry, particularly focusing on how different carbonate architectures influence the final properties of NIPUs. Their mechanistic insights helped to better understand how to tailor carbonate structures for specific application needs.

The most commonly used are five-membered cyclic carbonates like ethylene carbonate (EC) and propylene carbonate (PC). These are popular because they react well with primary amines, are easy to make by combining epoxides with CO₂, and are commercially available at large scale [31].

Six-membered and fused-ring carbonates are another group. They offer better thermal stability and mechanical strength but react more slowly than five-membered carbonates. These are often used for engineering plastics or specialty NIPU products [32].

Hybrid carbonates, which combine epoxy and cyclic carbonate structures, are also gaining interest. They allow for both ring-opening and cross-linking at the same time, which can improve adhesion, foam durability, and coating performance. Researchers are exploring these systems for high-performance adhesives and coatings [33].

Organosilicon-modified carbonates are another innovative option. Their silicon content gives the final materials better flexibility, chemical resistance, and surface properties. Patents often describe them for advanced adhesives and water-repellent coatings [34].

Bio-based carbonates are derived from sources like rosin, POSS, or vegetable oils. They offer strong thermomechanical properties, are renewable, and are easier to degrade or recycle [15,35].

Spiro-orthocarbonates are a newer class of carbonates. These compounds undergo double ring-opening polymerization, which causes them to expand instead of shrink. That makes them ideal for applications like 3D printing and low-stress structural materials [36].

Functionalized and aromatic cyclic carbonates add even more versatility. Aromatic versions, in particular, can boost thermal and mechanical strength, making them useful for structural composites and insulation foams [37].

On the green chemistry side, *cooperative catalysis and eco-friendly synthesis* are growing areas of research. For example, metal-organic frameworks (MOFs) are being studied as catalysts for turning CO₂ into cyclic carbonates, mimicking enzyme-like behavior. These systems lower the energy needed for reactions and are more reusable and efficient under mild conditions [38].

Finally, *bio-based innovations* include star-shaped glycerol-based epoxy macromonomers, which are epoxidized and then carbonated to create NIPUs. These materials show promising antibacterial properties and strong mechanical performance [39–41].

Conclusion

This review focuses on the different blowing agents used in NIPUF synthesis, such as poly(methylhydrogensiloxane) (PHMS) and liquid fluorohydrocarbons. It also looks at recent advances in self-blowing techniques, which eliminate the need for external agents and make the process more sustainable. Special emphasis is placed on NIPUFs derived from renewable feedstocks, as these align with global trend towards green chemistry and circular materials. The review provides an overview of both externally blown and self-blown biobased NIPUFs, detailing their synthesis, performance, and potential industrial applications.

References

1. Kathalewar M.S., Joshi P.B., Sabnis A.S., et al. Non-isocyanate polyurethanes: From chemistry to applications // RSC Advances. 2013. No. 3. pp. 4110–4129. <https://doi.org/10.1039/c2ra21938g>.
2. Jiang R., Zheng X., Zhu S., et al. Recent Advances in Functional Polyurethane Chemistry: From Structural Design to Applications // Chemistry Select. 2023. No. 8. <https://doi.org/10.1002/slct.202204132>.
3. Balla E., Bikiaris D.N., Pardalis N., et al. Toward Sustainable Polyurethane Alternatives: A Review of the Synthesis Applications, and Lifecycle of Non-Isocyanate Polyurethanes (NIPUs) // Polymers (Basel). 2025. No. 17. pp. 1364. <https://doi.org/10.3390/polym17101364>.

4. Chen X., Li L., Jin K., et al. Reprocessable polyhydroxyurethane networks exhibiting full property recovery and concurrent associative and dissociative dynamic chemistry via transcarbamoylation and reversible cyclic carbonate aminolysis // *Polymer Chemistry*. 2017. No. 8. pp. 6349–6355. <https://doi.org/10.1039/C7PY01160A>.
5. Chaib M., Thakur S., Ben H., et al. Achieving rapid foaming in self-blown non-isocyanate polyurethane foams via controlled epoxy functionality in cyclic carbonates // *European Polymer Journal*. 2025. V. 229. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2025.113843>.
6. Ozimek J., Pielichowski K. Sustainability of Nonisocyanate Polyurethanes (NIPUs) // *Sustainability*. 2024. No. 16. p. 9911. <https://doi.org/10.3390/su16229911>.
7. Rayung M., Ghani N.A., Hasanudin N. A review on vegetable oil-based non isocyanate polyurethane: towards a greener and sustainable production route // *RSC Advances*. 2024. No. 14. pp. 9273–9299. <https://doi.org/10.1039/d3ra08684d>.
8. Guifeng L., Zhenwu K., Guomin W., et al. POSS modified rosin nonisocyanate polyurethane and preparation method of nonisocyanate polyurethane. CN105504272 (A), n.d. [https://patents.google.com/patent/CN105504272A/en?q=CN105504272+\(A\)](https://patents.google.com/patent/CN105504272A/en?q=CN105504272+(A)) (accessed January 22, 2016).
9. Bizet B., Grau E., Cramail H., et al. Crosslinked isocyanate-free poly(hydroxy urethane)s – Poly(butyl methacrylate) hybrid latexes // *European Polymer Journal*. 2021. V. 146. P. 110254. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.110254>.
10. El Khezraji S., Gonzalez Tomé S., Thakur S., et al. Fast synthesis of cross-linked self-blowing poly(β -hydroxythioether) foams by decarboxylative-alkylation of thiols at room temperature // *European Polymer Journal*. 2023. V. 189. P. 111960. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2023.111960>.
11. Monie F., Grignard B., Thomassin J.M., et al. Chemo- and Regioselective Additions of Nucleophiles to Cyclic Carbonates for the Preparation of Self-Blowing Non-Isocyanate Polyurethane Foams // *Angewandte Chemie - International Edition*. 2020. No. 59. Pp. 17033–17041. <https://doi.org/10.1002/anie.202006267>.

12. Booyesen J., Marx S., Muller L., et al. Synthesis of Novel Non-Isocyanate Polyhydroxyurethane from L-Lysine and Its Application // 7th International Conference on Latest Trends in Engineering and Technology (ICLTET'2015) Nov. 26-27, 2015 Irene, Pretoria (South Africa), International Institute of Engineers, 2015. <https://doi.org/10.15242/IIE.E1115053>.
13. Acosta Ortiz R., Duarte M.L.B., Gómez A.G.S., et al. Novel diol spiro orthocarbonates derived from glycerol as anti-shrinkage additives for the cationic photopolymerization of epoxy monomers // Polymer International. 2010. No. 59. pp. 680–685. <https://doi.org/10.1002/pi.2755>.
14. Orabona F., Recupido F., Lama G.C., et al. Cutting-edge development of non-isocyanate polyurethane (NIPU) foams: from sustainable precursors to environmental impact evaluation // Green Chemistry. 2025. No. 27. pp. 7403–7444. <https://doi.org/10.1039/D4GC05796A>.
15. Furtwengler P., Avérous L. Renewable polyols for advanced polyurethane foams from diverse biomass resources // Polymer Chemistry. 2018. No. 9. pp. 4258–4287. <https://doi.org/10.1039/c8py00827b>.
16. Liu Y., Liu H., Qin G., et al. Study of novel nonlinear optical material based on Poly(aryl ether ketone) and its application in SHG imaging // Optical Materials. 2017. V. 72. Pp. 392–396. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.06.032>.
17. Clark J.H., Farmer T.J., Ingram I.D. V., et al. Renewable Self-Blowing Non-Isocyanate Polyurethane Foams from Lysine and Sorbitol // European Journal of Organic Chemistry. 2018. pp. 4265–4271. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201800665>.
18. El Khezraji S., Ben youcef H., Belachemi L., et al. Recent Progress of Non-Isocyanate Polyurethane Foam and Their Challenges // Polymers (Basel). 2023. No. 15. P. 254. <https://doi.org/10.3390/polym15020254>.
19. Steblyanko A., Choi W., Sanda F., et al. Addition of five-membered cyclic carbonate with amine and its application to polymer synthesis // Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry. 2000. No. 38. pp. 2375–2380. [https://doi.org/10.1002/1099-0518\(20000701\)38:13<2375::AID-POLA100>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1099-0518(20000701)38:13<2375::AID-POLA100>3.0.CO;2-U).

20. Liu G., Kong Z., Wu G., et al. POSS modified rosin nonisocyanate polyurethane and preparation method of nonisocyanate polyurethane. CN105504272A, 2016.
21. Zhao J., Wang G., Zhang J., et al. Method for preparing biodegradable thermoplastic polyurethane with benzene ring structure through nonisocyanate method. CN106317406A, 2015.
22. Bähr M., Bitto A., Mülhaupt R. Cyclic limonene dicarbonate as a new monomer for non-isocyanate oligo- and polyurethanes (NIPU) based upon terpenes // *Green Chemistry*. 2012. No. 14. P. 1447. <https://doi.org/10.1039/c2gc35099h>.
23. Hong H., Li Z., Wu H., et al. Polyphenol lignin derived non-isocyanate polyurethane with mechanically robust and photothermal conversion performances // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. V. 310. P. 143259. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143259>.
24. Yokawa K., Higashihara T. Recent progress in nonstoichiometric step-growth polymerization // *Polymer Chemistry*. 2025. No. 16. pp. 11–26. <https://doi.org/10.1039/D4PY01091D>.
25. Bhattacharjee S., Chongdar S., Modak A., et al. Synthesis of isocyanate-free polyurethane concocting multiple cyclic carbonates catalysed by a new microporous zinc phosphonate *via* CO₂ fixation // *Green Chemistry*. 2022. No. 24. pp. 8853–8862. <https://doi.org/10.1039/D2GC02959F>.
26. Tran C.-H., Lee M.-W., Lee S.-J., et al. Highly Active Heterogeneous Double Metal Cyanide Catalysts for Ring-Opening Polymerization of Cyclic Monomers // *Polymers* (Basel). 2022. No. 14. P. 2507. <https://doi.org/10.3390/polym14122507>.
27. Storey R.F., Mullen B.D., Desai G.S., et al. Soluble tin(II) macroinitiator adducts for the controlled ring-opening polymerization of lactones and cyclic carbonates // *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*. 2002. No. 40. pp. 3434–3442. <https://doi.org/10.1002/pola.10448>.
28. Datta J., Włoch M. Progress in non-isocyanate polyurethanes synthesized from cyclic carbonate intermediates and di- or polyamines in the context of structure–

properties relationship and from an environmental point of view // *Polymer Bulletin*. 2015. <https://doi.org/10.1007/s00289-015-1546-6>.

29. Wang T., Deng H., Li N., et al. Mechanically strong non-isocyanate polyurethane thermosets from cyclic carbonate linseed oil // *Green Chemistry*. 2022. No. 24. pp. 8355–8366. <https://doi.org/10.1039/D2GC02910C>.

30. Qiao C., Shi W., Brandolese A., et al. A Novel Catalytic Route to Polymerizable Bicyclic Cyclic Carbonate Monomers from Carbon Dioxide // *Angewandte Chemie International Edition*. 2021. V. 61. <https://doi.org/10.1002/anie.202205053>.

31. Rokicki G., Piotrowska A. A new route to polyurethanes from ethylene carbonate, diamines and diols // *Polymer*. 2002. No. 43. pp. 2927–2935. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00071-X).

32. Gregory G.L., Ulmann M., Buchard A. Synthesis of 6-membered cyclic carbonates from 1,3-diols and low CO₂ pressure: a novel mild strategy to replace phosgene reagents // *RSC Advances*. 2015. No. 5. pp. 39404–39408. <https://doi.org/10.1039/C5RA07290E>.

33. Lambeth R.H. Progress in hybrid non-isocyanate polyurethanes // *Polymer International*. 2021. V. 70. pp. 696–700. <https://doi.org/10.1002/pi.6078>.

34. Ecochard Y., Leroux J., Boutevin B., et al. From multi-functional siloxane-based cyclic carbonates to hybrid polyhydroxyurethane thermosets // *European Polymer Journal*. 2019. V. 120. P. 109280. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109280>.

35. Liu W., Hang G., Mei H., et al. Nanocomposites of Polyhydroxyurethane with POSS Microdomains: Synthesis via Non-Isocyanate Approach, Morphologies and Reprocessing Properties // *Polymers (Basel)*. 2022. No. 14. P. 1331. <https://doi.org/10.3390/polym14071331>.

36. Krutskikh D.V., Shapagin A.V., Plyusnina I.O., et al. Modification of Epoxy Coatings with Fluorocontaining Organosilicon Copolymers // *Polymers (Basel)*. 2024. No. 16. P. 1571. <https://doi.org/10.3390/polym16111571>.

37. Alves M., Grignard B., Gennen S., et al. Organocatalytic synthesis of bio-based cyclic carbonates from CO₂ and vegetable oils // *RSC Advances*. 2015. No. 5. pp. 53629–53636. <https://doi.org/10.1039/C5RA10190E>.

38. Gamal Mohamed M., Tsai M.-Y., Wang C.-F., et al. Multifunctional Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS) Based Hybrid Porous Materials for CO₂ Uptake and Iodine Adsorption // *Polymers* (Basel). 2021. Vol. 13. P. 221. <https://doi.org/10.3390/polym13020221>.

39. Stansbury J.W. Synthesis and Evaluation of New Oxaspiro Monomers for Double Ring-opening Polymerization // *Journal of Dental Research*. 1992. V. 71. pp. 1408–1412. <https://doi.org/10.1177/00220345920710070901>.

40. Hedrick J.L., Piunova V., Park N.H., et al. Simple and Efficient Synthesis of Functionalized Cyclic Carbonate Monomers Using Carbon Dioxide // *ACS Macro Letters*. 2022. No. 11. pp. 368–375. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00060>.

41. Song J., Zhang Z., Hu S., et al. MOF-5/n-Bu₄NBr: an efficient catalyst system for the synthesis of cyclic carbonates from epoxides and CO₂ under mild conditions // *Green Chemistry*. 2009. No. 11. P. 1031. <https://doi.org/10.1039/b902550b>.

Фиговский Олег Львович – д-р техн. наук, специалист в области создания новых композиционных материалов, Академик ЕАС, РИА и РААСН, почётный доктор КНИТУ, почетный профессор КГТУ, ВГТУ и WSG

Гузенко Наталья – ведущий научный сотрудник института композитных материалов в Лейбнице

УДК 69.07

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ФУНДАМЕНТА**

А.М. Усачев*, В.В. Власов, С.П. Козодаев

*Воронежский государственный технический университет, Российская
Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Адрес для переписки: Усачев Александр Михайлович, e-mail: ausachev@cchgeu.ru*

В статье представлена информация по оценке технического состояния существующего фундамента с целью определения возможности дальнейшего строительства на нем жилого частного дома.

Техническое обследование проводилось сотрудниками ВГТУ и состояло из трех этапов: подготовительная работа, визуальный осмотр и инструментальное обследование. На подготовительном этапе был проведен сбор и анализ имеющейся проектно-технической документации, изучены конструктивные решения и составлена программа работ. По результатам визуального обследования не выявлено каких-либо значительных дефектов (осадки, прогибов, трещин) и критических повреждений, снижающих несущую способность фундамента.

Геометрические размеры обследуемого объекта измерялись с помощью лазерного дальномера CONDROL XP2. Оценка прочности бетона проводили неразрушающим способом при помощи прибора «Пульсар-1». Наличие и расположение стальной арматуры в теле монолитной части фундамента проводилось прибором Ферроскан PS200.

Результаты технического состояния железобетонного фундамента позволяют сделать вывод о пригодности существующей конструкции для возведения частного жилого дома.

Ключевые слова: техническое состояние, обследование, фундаменты, прочность, арматурные элементы.

**ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION
OF THE REINFORCED CONCRETE FOUNDATION**

A.M. Usachev, V.V. Vlasov, S.P. Kozodaev*

*Voronezh State Technical University, ul. 20-letia Oktabria, 84, Voronezh,
394006, Russian Federation*

**Corresponding author: Alexander M. Usachev, E-mail: ausachev@cchgeu.ru*

The article provides information on the assessment of the technical condition of the existing foundation in order to determine the possibility of further construction of a residential private house on it.

The technical examination was conducted by VSTU staff and consisted of three stages: preparatory work, visual inspection and instrumental examination. At the preparatory stage, the collection and analysis of the available design and technical documentation was carried out, constructive solutions were studied and a work program was drawn up. According to the results of the visual inspection, there were no significant defects (precipitation, deflections, cracks) and critical damages that reduce the bearing capacity of the foundation.

The geometric dimensions of the object under study were measured using a CONDROL XP2 laser rangefinder. The strength of concrete was assessed in a non-destructive manner using the Pulsar-1 device. The presence and location of steel reinforcement in the body of monolithic concrete was carried out with a Ferrosan PS200 device.

The results of the technical condition of the reinforced concrete foundation allow us to conclude that the existing structure is suitable for the construction of a private residential building.

Key words: technical condition, inspection, foundations, strength, reinforcement elements.

Введение

Анализ технического состояния существующих зданий, сооружений и конструкций является важным вопросом в современной строительной практике так как на основании его осуществляются дальнейшие работы по строительству, реконструкции, капитальному ремонту или демонтажу зданий и сооружений. Нормативные документы [1, 2] устанавливают требования к работам и их составу для получения информации, необходимой для оценки технического состояния зданий и его отдельных элементов.

Как правило, работы по обследованию и выявлению технического состояния зданий и сооружений проводят в три этапа:

- подготовка к проведению обследования;
- предварительное визуальное обследование;
- детальное инструментальное обследование.

Подготовительные работы включают в себя следующий перечень операций: ознакомление с объектом обследования, его объемно-планировочным и конструктивным решениями; сбор и анализ имеющейся проектно-технической документации; составление программы дальнейших работ и ее согласование.

Предварительное визуальное обследование проводят с целью предварительной оценки технического состояния строительных конструкций по внешним признакам, определения необходимости в проведении детального инструментального обследования и уточнения программы работ [1, 2].

Детальное инструментальное обследование заключается в определении параметров эксплуатационных качеств зданий (сооружений) и включает в себя (табл. 1): измерение геометрических параметров зданий, сооружений и конструкций, их элементов; определение основных физико-механических характеристик материалов несущих конструкций и их элементов; определение эксплуатационных нагрузок и воздействий, воспринимаемых обследуемыми конструкциями с учетом влияния деформаций несущих конструкций и грунтов основания; измерение параметров эксплуатационной среды и др.

Таблица 1

Основные параметры оценки эксплуатационных качеств зданий (сооружений) и способы их определения [3]

Основные параметры эксплуатационных качеств	Способы определения	Приборы для определения
1. Геометрические размеры, толщина защитного слоя в ж/б конструкции, толщина лакокрасочных покрытий	Инструментальный замер	Толщиномеры, дальномеры, магнитный измеритель толщины покрытий
2. Прочность конструкций	Взятие проб, механическое или неразрушающее определение прочности	Гидравлические прессы, ультразвуковые приборы, молотки Физделя, Кашкарова, Шмидта

Основные параметры эксплуатационных качеств	Способы определения	Приборы для определения
3. Допустимые деформации	Замер деформаций, смещений	Прогибомеры, геодезические приборы: теодолит, нивелир, тензометры
4. Сопротивление теплопередаче конструкций	Замер теплового потока через конструкцию	Потенциометр, тепломер, инфракрасный термометр
5. Герметичность конструкций: кровли, стыков панелей и др.	Заливка поверхности водой, замер воздухопроницаемости стыков	Электронный влагомер, жидкокристаллический термоиндикатор
6. Звукоизоляция ограждений от воздушного и ударного шума	Замер уровня шума в смежных помещениях	Динамик, шумомер, ударная (топальная) машина
7. Температурно-влажностный режим в помещении	Замеры температуры и влажности воздуха	Психрометр Ассмана, термометр, анемометр, термограф, гигрограф
8. Влажность материала конструкции	Взятие проб материала, использование влагомеров	Сушильный шкаф, влагомеры, , термомощуны

На основе визуального и инструментального обследования эксплуатационных качеств зданий составляют общую оценку технического состояния объекта (табл. 2) [3].

Таблица 2

Оценка технического состояния

Процент износа, %	Признаки износа	Состояние конструкций, сооружений	Характер повреждений конструкций, сооружений	Приблизительный состав восстановительных работ
0...10	Мелкие повреждения, выбоины, трещины	Хорошее	Незначительные	Расшивка трещин, заделка выбоин
11...20		Вполне удовлетворительное	Слабые	
21...30	Трещины, сколы, выпадение отдельных камней	Удовлетворительное	Средние	Заделка трещин, ремонт кладки
31...40		Не вполне удовлетворительное	Сильные	
41...60	Перекосы, выпучивание, выпадение камней	Не удовлетворительное	Аварийные	Замена, ремонт
61...80	Искривление горизонтальных стен, осадка отдельных участков, перекосы оконных и дверных проемов, нарушение монолитности кладки	Ветхое	Разрушение	Полная замена конструкции
81...100		Негодное	Полное разрушение	Разборка, снос

При обследовании бетонных и железобетонных строительных конструкций, расположенных в различных местах и в различных зданиях и сооружениях зачастую приходится выполнять работы и получать результаты обследований, так сказать, в «полевых» условиях, когда отсутствует весь комплекс необходимого испытательного оборудования и приходится обходиться минимумом имеющихся в наличии средств измерений.

В данной работе как раз и приведен пример обследования существующего строительного объекта с использованием минимального комплекса оборудования.

Экспериментальная часть

Объектом настоящих исследований являлся строительный объект, представляющий собой сборно-монолитный фундамент, возведенный для дальнейшего строительства частного жилого дома. Внешний вид объекта представлен на рис. 1.

Целью исследований было проведение обследований технического состояния конструктивных элементов сборно-монолитного фундамента для определения их фактической прочности, позволяющей или не позволяющей дальнейшее возведение частного жилого дома на этом фундаменте, а также выявлялась схема армирования монолитной части фундамента.

Для достижения поставленной цели выполнялся визуальный осмотр и инструментальное обследование объекта с минимумом имеющихся инструментов.

Детально обследовались монолитная и сборная часть фундамента. Монолитная часть расположена ниже уровня и на уровне земли, а сборная часть расположена выше уровня земли поверх монолитной части и состоит из смонтированных фундаментных блоков.

При визуальном осмотре основными критериями оценки технического состояния фундамента являются: неравномерная осадка; крены, прогибы и кривизна; трещины в конструкциях; оголение арматуры и повреждения защитного слоя; вывалы бетона, каверны, раковины и пр.



Рис. 1. Внешний вид объекта обследования.

Визуальный осмотр фундамента объекта не выявил видимых дефектов и значительных повреждений в его конструкции как подземной, так и надземной части. Выявлена общая сохранность тела конструкции.

Обследование монолитной части фундамента проводилось на четырех выбранных участках и на пороге гаража, а сборной части – на угловых и средних фундаментных блоках. Размеры фундамента в плане определяли натурными обмерами при помощи лазерного дальномера CONDROL XP2. Схемы обозначения выбранных участков на плане объекта приведены на рис. 2 и 3.

Для контроля прочностных свойств бетона монолитной и сборной части фундамента применялся неразрушающий метод ультразвукового поверхностного прозвучивания; использовался измеритель времени распространения ультразвука «Пульсар-1».

При этом число и расположение контролируемых участков при испытании элементов конструкции фундамента соответствует требованиям СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений». Число испытаний на одном участке, расстояние между местами испытаний на участке и от края конструкции фундамента соответствуют требованиям ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» [4].

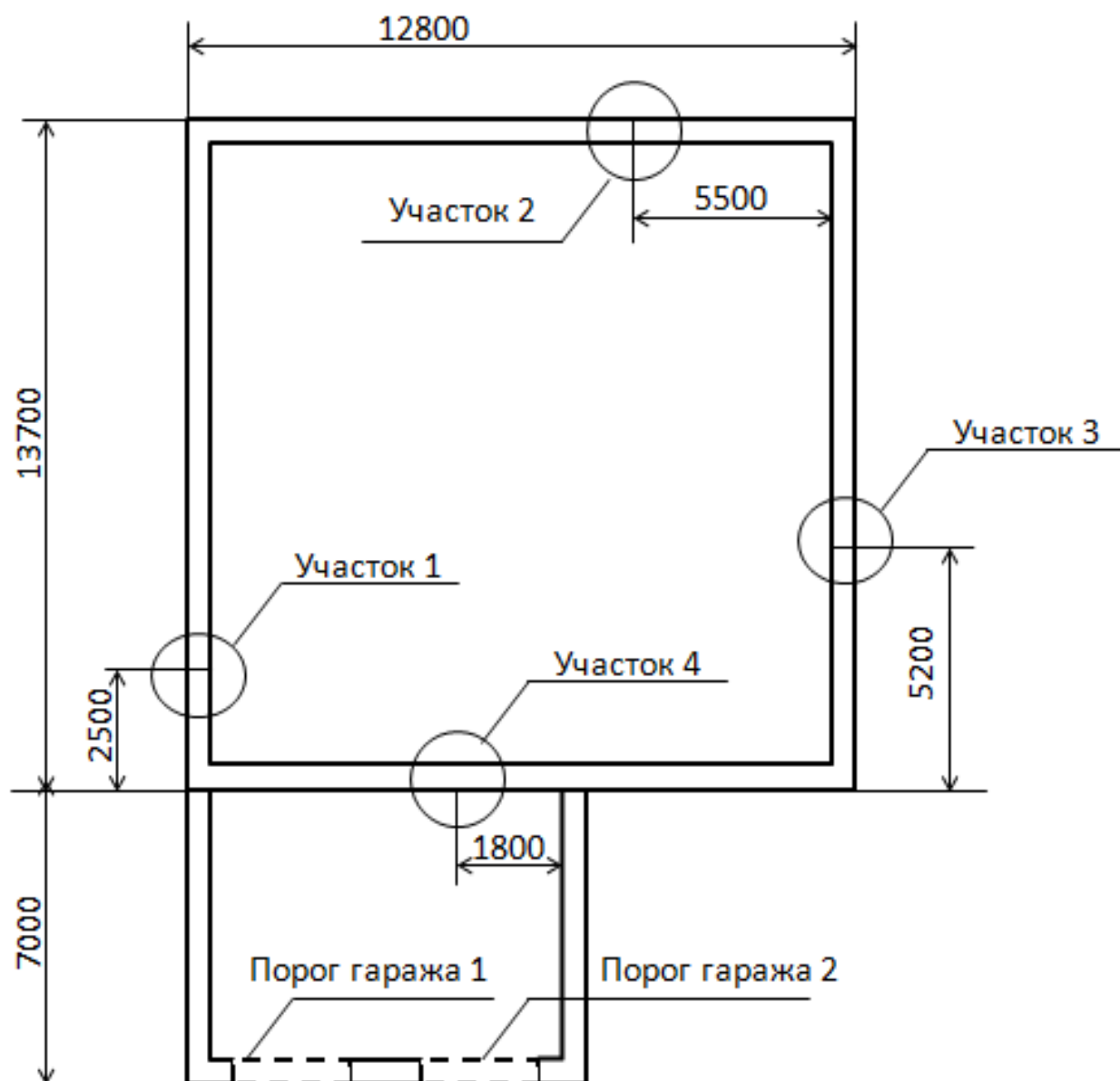


Рис. 2. План объекта и обозначение исследуемых участков монолитной части фундамента и порога гаража.

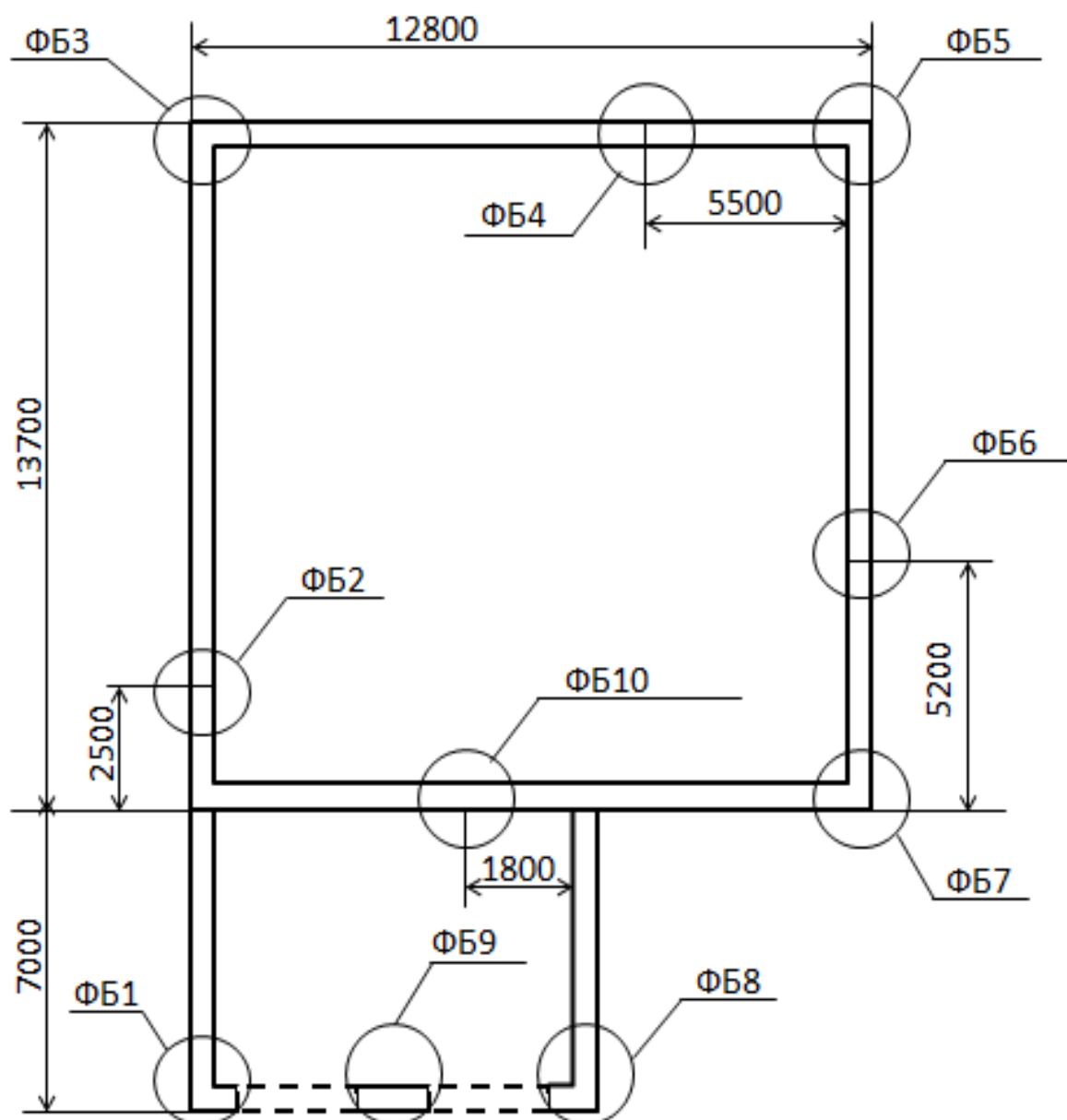


Рис. 3. План объекта и обозначение исследуемых участков сборной части фундамента.

Результаты и их обсуждение

Прочностные характеристики обследуемых частей конструкции фундамента представлены в табл. 3.

Обследованный фундамент состоит из сплошной монолитной части армированного бетона со средней прочностью 33,8 МПа, что соответствует классу бетона по прочности на сжатие В25 и сборной части (фундаментных блоков), прочность которой варьируется от 9,4 до 32,3 МПа. Средняя прочность сборной

части (фундаментных блоков) составляет 21,0 МПа, что соответствует классу бетона по прочности на сжатие В15. Монолитная часть фундамента (порог гаража) имеет среднюю прочность 7,5 МПа, что соответствует классу бетона по прочности на сжатие В5.

Таблица 3

Прочностные характеристики конструктивных элементов фундамента

Обозначение участка	Единичные измерения неразрушающим методом (ультразвуком) прочности бетона участков конструкции, МПа	Средняя прочность бетона, МПа, определенная неразрушающим методом			Коэффициент совпадения для неразрушающего ультразвукового метода	Средняя фактическая прочность бетона в конструкции, МПа	Фактическая прочность бетона, МПа
Монолитная часть фундамента							
Участок 1	43,7	40,2	42,0	41,9	0,87	36,5	33,8
Участок 2	42,5	41,4	44,7	42,8		37,2	
Участок 3	36,0	41,2	37,4	38,2		33,2	
Участок 4	33,5	35,1	29,6	32,7		28,4	
Монолитная часть фундамента (порог гаража)							
1	8,3	7,7	11,6	9,2	0,87	8,0	7,5
2	9,5	8,1	7,8	8,1		7,0	
Сборная часть фундамента (фундаментные блоки)							
ФБ1	11,7	9,6	11,2	10,8	0,87	9,4	21,0
ФБ2	27,3	25,6	22,2	25,0		21,8	
ФБ3	27,7	27,1	29,5	28,1		24,4	
ФБ4	19,4	23,4	19,9	20,9		18,2	
ФБ5	27,9	32,0	30,5	30,1		26,2	
ФБ6	36,2	37,3	37,8	37,1		32,3	
ФБ7	11,4	13,2	14,8	13,1		11,4	
ФБ8	12,0	10,7	14,4	12,4		10,8	
ФБ9	39,8	34,3	36,9	37,0		32,2	
ФБ10	26,3	24,1	30,1	26,8		23,3	

Изучение схемы армирования монолитной части фундамента проводилось с помощью прибора Ферроскан PS 200. Выявленные схемы армирования обследованных участков монолитной части фундамента представлены на рис. 4-8.

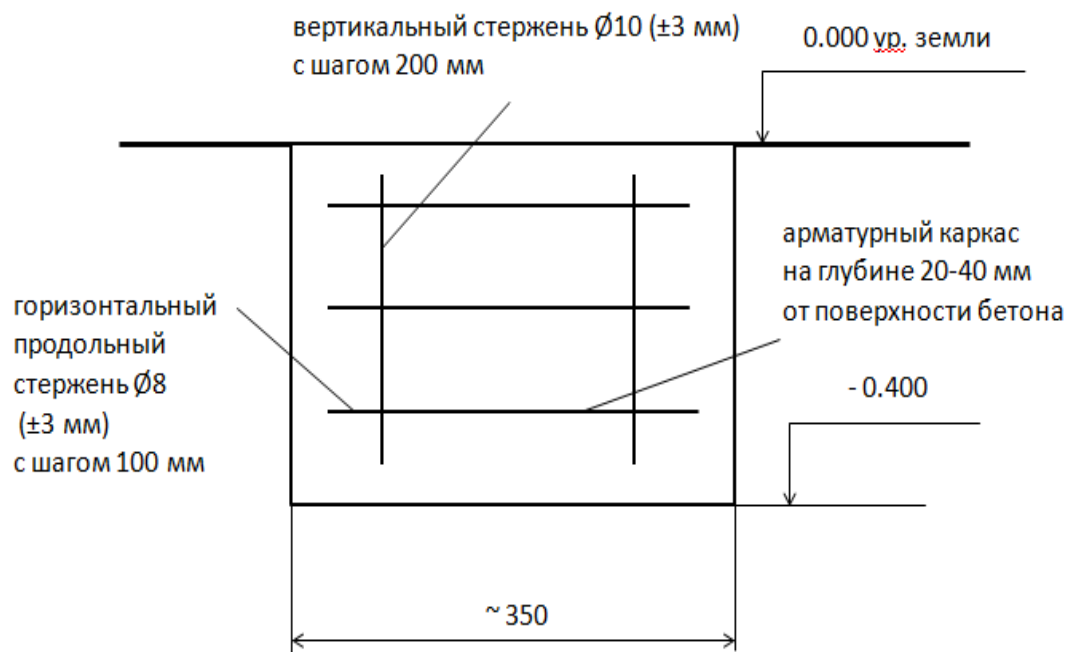


Рис. 4. Внешний вид и схема армирования монолитной части фундамента на участке 1.

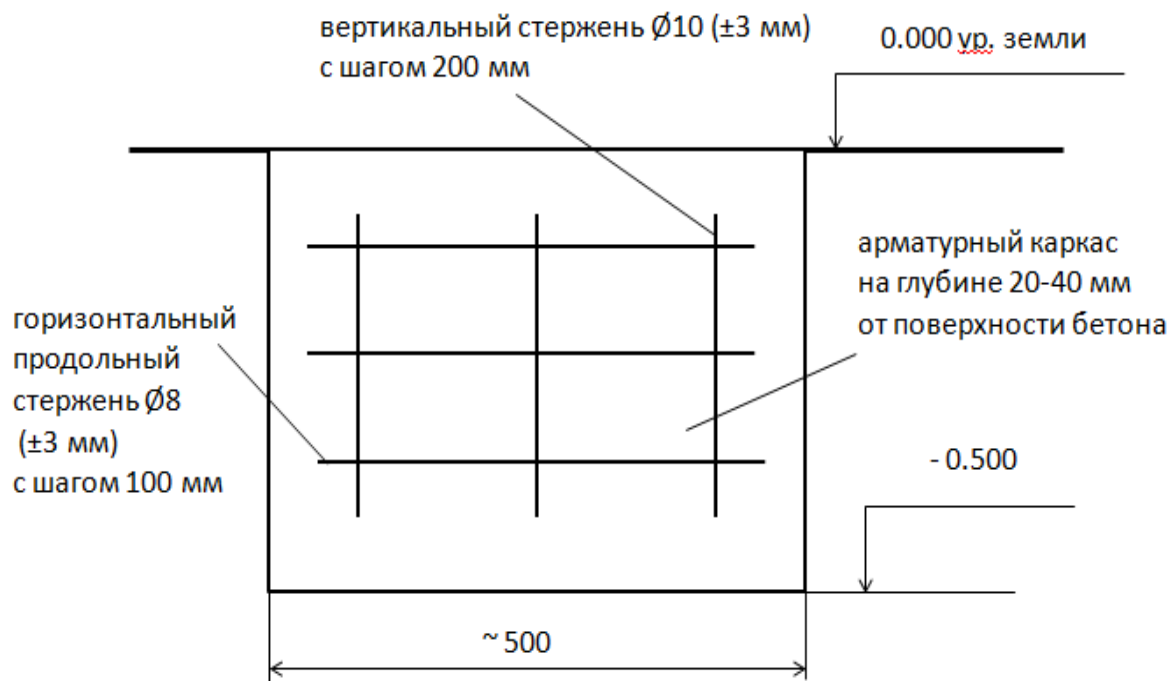


Рис. 5. Внешний вид и схема армирования монолитной части фундамента на участке 2.

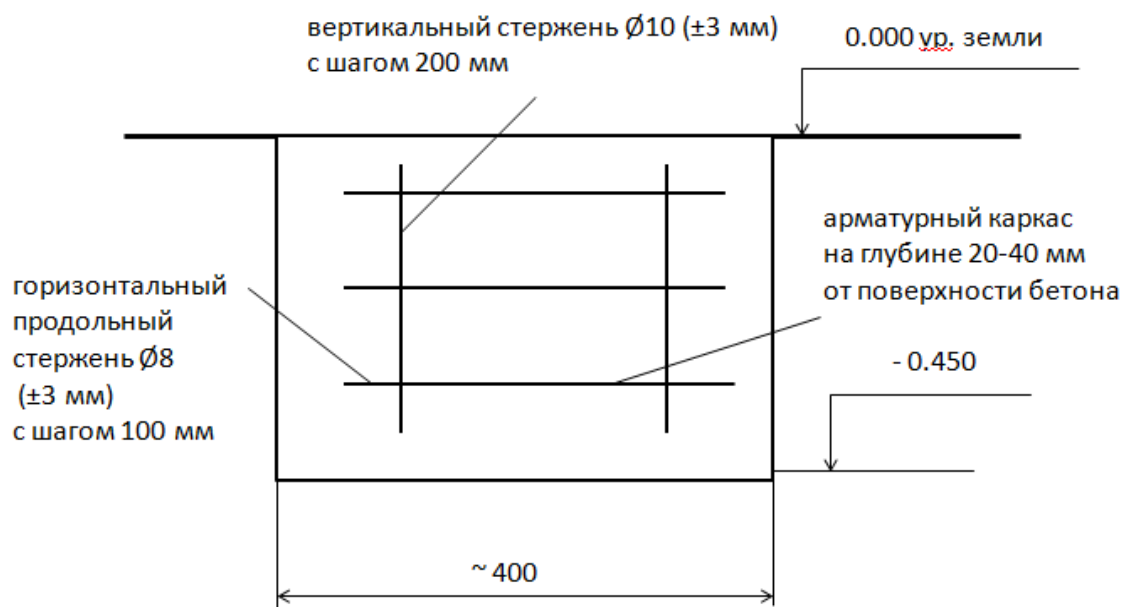


Рис. 6. Внешний вид и схема армирования монолитной части фундамента на участке 3.

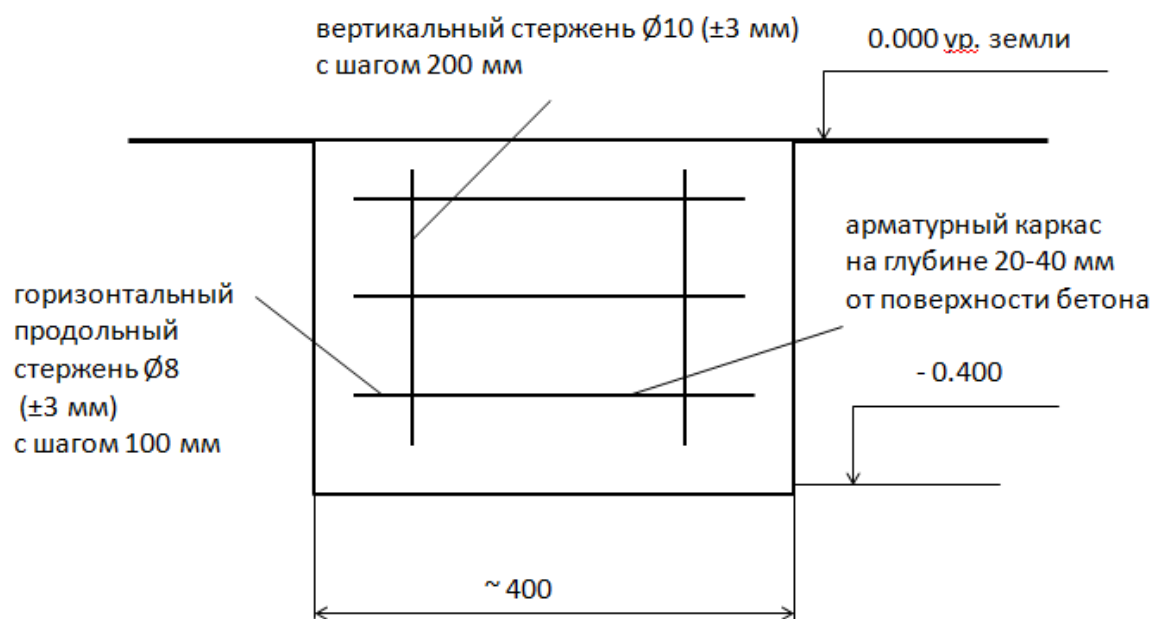


Рис. 7. Внешний вид и схема армирования монолитной части фундамента на участке 4.

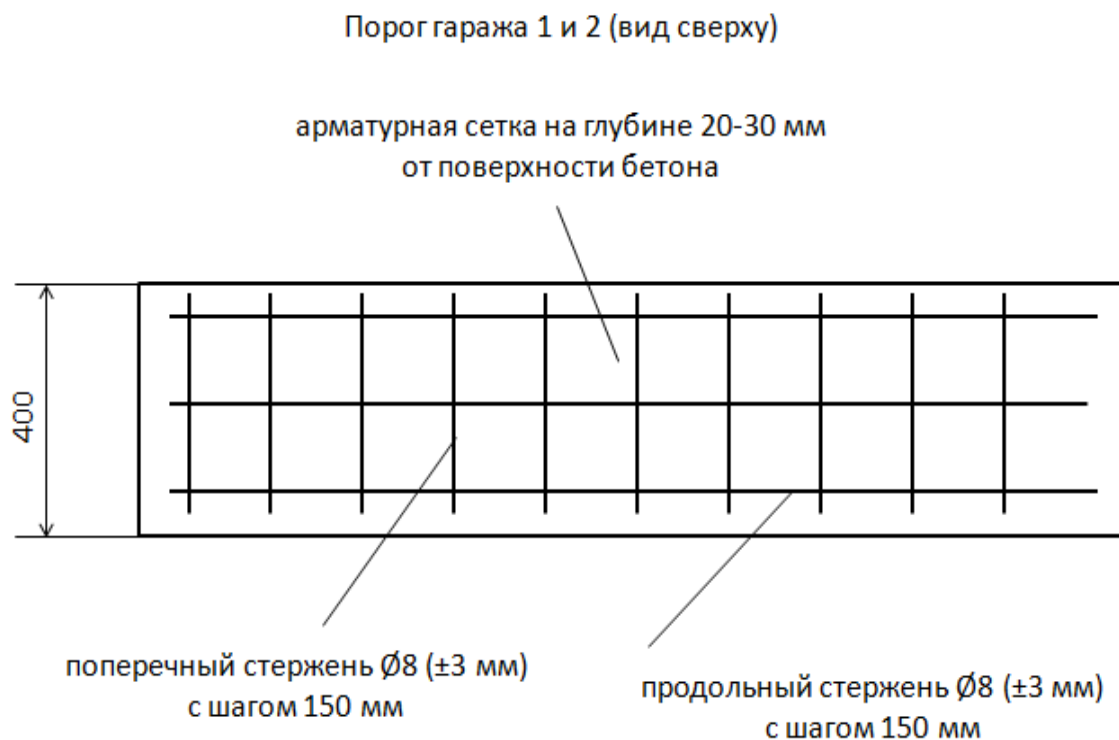


Рис. 8. Схема армирования порога гаража (поз. 1 и 2).

Заключение

При визуальном осмотре фундамента объекта выявлено, что процент износа не превышает 10 %, характер повреждений – незначительный, общее состояние конструкции – хорошее.

Обследованный фундамент состоит из сплошного монолитного армированного бетона со средней прочностью 33,8 МПа, что соответствует классу В25 и сборных фундаментных блоков, прочность которых варьируется от 9,4 до 32,3 МПа. Средняя прочность блоков составляет 21,0 МПа, что соответствует классу бетона В15.

Монолитный порог гаража армирован стальной сеткой и имеет среднюю прочность 7,5 МПа, что соответствует классу бетона В5.

Таким образом, обследованный сборно-монолитный фундамент имеет достаточные прочностные показатели и армирование монолитной части для того, чтобы можно было на нем возводить частный жилой дом.

Список литературы

1. ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».
2. ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».
3. Усачев А.М. Конструкционные, функциональные и специальные строительные материалы: учеб. пособие для магистрантов направления «Строительство» / А.М. Усачев, О.А. Чернушкин; 2-е издание, доп. и перераб.; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. Воронеж, 2010. 245 с.
4. ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля».
5. Mangushev R.A., Nikitina N.S. Evaluation and analysis of bearing capacity of bored piles and deep-laid pile-barrette for high-rise building on loose ground based on calculations and field tests // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. V. 14(2). Pp. 109 – 116.
6. Manjriker G. The Foundation Engineering Handbook. CRC Press Taylor&Francis Group, 2006. 608 p.

References

1. GOST 31937-2024 «Buildings and structures. Rules of inspection and monitoring of technical condition». (in Russian)
2. GOST R 53778-2010 «Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition». (in Russian)
3. Usachev A.M. Structural, functional and special building materials: textbook. manual for undergraduates in the field of "Construction" / A.M. Usachev, O.A. Chernushkin; 2nd edition, additional and revised; Voronezh State Architectural Institute.-builds. un-T. Voronezh, 2010. 245 p. (in Russian)
4. GOST 22690-2015 «Concretes. Determination of strength by mechanical methods of non-destructive testing». (in Russian)
5. Mangushev R.A., Nikitina N.S. Evaluation and analysis of bearing capacity

of bored piles and deep-laid pile-barrette for high-rise building on loose ground based on calculations and field tests // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. V. 14(2). P. 109-116.

6. Manjriker G. The Foundation Engineering Handbook. CRC Press Taylor&Francis Group, 2006. 608 p.

Усачев Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций ВГТУ

Власов Виктор Васильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций ВГТУ

Козодаев Сергей Петрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций ВГТУ

ПЕРСОНАЛИИ

АКАДЕМИКУ МЯСОЕДОВУ БОРИСУ ФЕДОРОВИЧУ 95 ЛЕТ!



Борис Федорович Мясоедов родился 2 сентября 1930 года в Рязани, то есть он отметил 95 годовщину со дня рождения. Напомним о вехах жизненного пути и достижениях этого великого химика и материаловеда.

В 1948 году он поступил на Факультет органической химии Московского химико-технологического института (ныне — Российский химико-технологический университет) им. Д.И. Менделеева, но затем был переведён на вновь образованный Физико-химический факультет, в 1953 году окончил его по специальности «Технология редких и рассеянных элементов». Далее он работал в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Академии наук СССР (ныне ГЕОХИ РАН). В 1998-2007 гг. — заместитель главного ученого секретаря Президиума РАН. Научный руководитель ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН. С 2007 года — советник Президиума РАН. Член-корреспондент РАН с 1991 года, академик РАН с 1994 года по Отделению химии и наук о материалах.

Б.Ф. Мясоедов - Председатель Межведомственного научного совета по радиохимии при президиуме РАН и Государственной корпорации по атомной

энергии «Росатом», Многие годы он принимал участие в заседаниях Генеральной Ассамблеи Международного союза по теоретической и прикладной химии (ИЮПАК), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

Во времена, когда Б.Ф. Мясоедов приступил к исследовательской деятельности, над страной нависла реальная угроза — разрабатывались планы ядерного удара на Советский Союз. В 1954 году, едва он устроился в ГЕОХИ, его на шесть лет откомандировали в Лабораторию измерительных приборов АН СССР (ныне Российский научный центр «Курчатовский институт») для участия в начинающихся работах по синтезу и изучению свойств новых сверхтяжелых элементов конца Периодической системы Д.И. Менделеева. Задачей группы сотрудников ГЕОХИ была разработка экспрессных методов выделения и идентификации синтезируемых на циклотроне короткоживущих элементов с атомными номерами 100-104.

Когда он вернулся в ГЕОХИ — в то время у ученых возник интерес к ториевой ядерной энергетике: основой топлива является природный торий, при облучении которого образуется короткоживущий изотоп протактиний 233, а при его распаде получается делящийся изотоп уран-233. Таким образом, в связи с проблемами гомогенного ядерного реактора во многих странах возник интерес к протактинию, тогда малоизученному и почти недоступному естественному радиоактивному элементу. Наибольший опыт в изучении химии протактиния был у профессора М. Гайсинского в Институте радия в Париже. Б.Ф. Мясоедова направляют в этот Институт для стажировки и знакомства с работами по радиохимии во Франции. Поездка дала импульс научной карьере: вернувшись домой, Б.Ф. Мясоедов защитил кандидатскую диссертацию по протактинию, в ГЕОХИ разработали методы выделения этого элемента, и на их основе в Глазове получили около 3 г чистого протактиния из 20 т урановой смолки — это был значимый результат.

Далее основная научная деятельность Б.Ф. Мясоедова связана с изучением химико-аналитических свойств естественных и техногенных радиоактивных элементов, с фундаментальными исследованиями по химии актиния, протакти-

ния, нептуния, плутония и трансплутониевых элементов, прежде всего в необычных состояниях окисления, и разработкой новых методов их выделения и определения. Он внес весомую лепту в развитие современных методов аналитической химии и создание высокочувствительных анализаторов для определения приоритетных загрязнителей в окружающей среде; в разработку новых аналитических приборов и сенсоров, новых подходов к решению проблемы переработки облученного ядерного топлива, фракционированию высокорadioактивных отходов; в создание минералоподобных матриц для долговременного экологически безопасного хранения радионуклидов. Таким образом, его научные труды относятся к области радиохимии, аналитической химии радиоактивных элементов и радиационной экологии. Широкое признание получили его достижения в изучении химических свойств актинидов, разработке методов их выделения, концентрирования и разделения, в создании средств контроля за поведением радионуклидов в биосфере.

С 2019 года Б.Ф. Мясоедов — научный руководитель приоритетного направления научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом» «Переработка ОЯТ и мультирециклирование ЯМ». Б.Ф. Мясоедов — организатор и участник многих крупных научных конференций, в том числе и международных, неоднократно приглашался пленарным докладчиком, читал лекции в известных научно-исследовательских центрах по атомной энергии США, Франции, Японии, Китая. В течение ряда лет он являлся организатором совместных научных симпозиумов с Японией и Финляндией. Читал лекции в университетах, научных центрах и крупных химических компаниях Франции, Германии, Бельгии, США, Японии, Китая, Вьетнама и других стран.

Им опубликовано около 1000 научных работ, 8 монографий, получено более 40 авторских свидетельств и патентов. Специалистам известны его труды, написанные индивидуально или в соавторстве: «Protactinium», «Nanostructured actinide compounds», «Аналитическая химия протактиния», «Аналитическая химия трансплутониевых элементов», «Аналитическая химия актиния», «Plutonium in Higher Oxidation States in Alkaline Media», «Experi-

mental Data Points to Existence of Plutonium (VIII) in Alkaline Solutions», «Химические сенсоры», «New methods of transplutonium element separation and determination», «Основные этапы развития радиохимических исследований», «Радиоактивное загрязнение окружающей среды и возможности современной радиохимии в области мониторинга», «Analytical control for destruction of weapons», «Актиний».

Борис Федорович - главный редактор журнала «Радиохимия» РАН, заместитель главного редактора журналов «Успехи химии» и «Журнала аналитической химии» РАН, член редколлегий и редсоветов журналов «Solvent Extraction and Ion Exchange», «Mendeleev Communications», «Radioanalytical and Nuclear Chemistry», «Analytical Sciences», «Сорбционные и хроматографические процессы», главный редактор серии монографий «Проблемы аналитической химии».

Б.Ф. Мясоедов - Почетный профессор РХТУ им. Д.И. Менделеева, Почетный профессор Краснодарского государственного университета, Почетный член Японского общества по аналитической химии. С 1999 года он в течение многих лет был членом Президиума РАН, избирался членом Бюро Отделения химии и наук о материалах РАН, членом Бюро Научного совета РАН по глобальным экологическим проблемам, был заместителем академика-секретаря Отделения химии и наук о материалах — руководителем Секции химических наук ОХНМ, руководителем НТС №5 ГК Росатом, заместителем председателя Научного совета РАН по научным проблемам уничтожения химического оружия, заместителем председателя Национального комитета российских химиков, председателем экспертной комиссии Президиума РАН по присуждению премии им. В.Г. Хлопина, председателем Межведомственного научного совета по комплексным проблемам физики, химии и биологии при Президиуме РАН, заместителем председателя научного совета РАН по комплексной проблеме «История Российской академии наук», членом бюро Объединенного научного совета РАН по проблемам экологии, заместителем

председателя Совета старейшин РАН, руководителем диссертационными советами при ГЕОХИ РАН и ФГУП «Маяк».

За труд на благо отечественной науки, за достижения в своей работе Б.Ф. Мясоедов награжден орденом «Знак Почета», орденом Трудового Красного Знамени, орденом «Дружбы народов» (за участие в работе по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС), орденом Почета, орденом «За заслуги перед Отечеством» IV и III ст., орденом Александра Невского. Он является Лауреатом Государственной премии СССР, дважды Лауреатом Премий Правительства РФ. Ему вручена Почетная грамота Президента РФ, Благодарственное письмо Президента РФ В. В. Путина в связи с 300-летием Академии, отмечен юбилейной медалью «300 лет Российской академии наук».

Он удостоен Золотой медали имени Д.И. Менделеева РАН, премии им. В.Н. Ипатьева РАН, премии им. В.Г. Хлопина, награжден медалью Джорджа Хевеши — ведущей международной наградой за достижения в радиоаналитической и ядерной химии (The Hevesy Medal Award 2012) в знак признания выдающегося вклада в радиохимию и фундаментальные исследования по химическим свойствам актинидов.

Друзья, сотрудники, ученики, члены редакционной коллегии журнала «Химия, физика и механика материалов» сердечно поздравляют Бориса Федоровича с замечательным Юбилеем, желают ему крепкого здоровья и дальнейших достижений в его академической деятельности, благополучия в личной жизни.

Хамизов Р.Х., Рудаков О.Б., Селеменев В.Ф., Рудакова Л.В.

Хамизов Руслан Хажсетович — д-р хим. наук, член-корр. РАН, директор ГЕОХИ РАН им. Вернадского В.И.

Рудаков Олег Борисович — д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов ВГТУ

Селеменев Владимир Федорович — д-р хим. наук, профессор кафедры аналитической химии ВГУ

Рудакова Людмила Васильевна — д-р хим. наук, зав. кафедрой фармацевтической химии и фармацевтической технологии ВГМУ им. Бурденко Н.Н.

70 ЛЕТ РУСЛАНУ ХАЖСЕТОВИЧУ ХАМИЗОВУ



3 августа 2025 г. исполнилось 70 лет Руслану Хажсетовичу Хамизову, доктору химических наук, члену-корреспонденту РАН, директору Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), заведующему лабораторией сорбционных методов, известному ученому в области теории и практики сорбционных процессов, рентгено-флюоресцентного анализа и ионообменного извлечения и концентрирования ценных элементов.

Р.Х. Хамизов родился в 1955 г. в Кабардино-Балкарии. В 1977 г. окончил химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, и до 1982 года учился в аспирантуре, а затем работал в лаборатории стабильных изотопов на Химическом факультете МГУ под руководством проф. В.И. Горшкова. В 1982 году успешно защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Ионообменные свойства иммобилизованной ДНК». С 1983 года и по настоящее время работает в лаборатории сорбционных методов ГЕОХИ РАН, куда был приглашен проф. М.М. Сенявиным.

В 1998 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Физико-химические основы комплексного освоения минеральных ресурсов вод океана».

С 2004 г. по настоящее время Руслан Хажсетович Хамизов возглавляет Лабораторию сорбционных методов ГЕОХИ РАН, а начиная с 2022 года — директор ГЕОХИ РАН. В 2023 году был избран членом-корреспондентом РАН.

Область научных интересов Р.Х. Хамизова - теория и практика сорбционных процессов концентрирования и разделения веществ. Он соавтор цикла работ по кинетике и динамике ионообменных процессов в многофазных многокомпонентных системах. Хамизовым Р.Х. развиты теоретические подходы для описания этих систем с учетом возникающих при обмене неоднородных электрических полей. Им была разработана теория процессов, идущих в неизотермических условиях при изменении свойств компонентов в ходе ионного обмена. Вместе с соавторами он обнаружил и теоретически описал новое явление «Изотермическое пересыщение растворов в ионообменных процессах», цитируемое в литературе как IXISS-effect. Р.Х. Хамизов является автором концепции и цикла работ, в которых показана принципиальная возможность осуществления циклических самоподдерживающихся процессов умягчения-опреснения, не требующих использования химических реагентов. Предложены новые эффективные сорбционные методы, основанные на организации массообменных процессов в субмикронных динамических пленках. Под его руководством созданы действующие прототипы новых аналитических приборов, основанных на использовании сорбционно-мембранных микросистем, в том числе рентгено-флуоресцентный анализатор с высокой чувствительностью на базе поликапиллярной оптики, а также электрокинетический микронасос для дозирования жидкостей на уровне нл/мин.

Как научный руководитель Руслан Хажсетович подготовил 5 кандидатов наук. Он имеет несколько десятков патентов, включая патенты в США, европейских странах, Японии и Израиле, более 250 публикаций, зарегистрированных в РИНЦ.

В 1985-1993 гг. на базе Института химии ДВНЦ АН СССР, и Сахалинской ГРЭС Р.Х. Хамизовым были организованы экспедиции в г. Владивосток и

на о. Сахалин, в ходе которых были проведены испытания созданных в ГЕОХИ опытных установок по извлечению ценных компонентов из морской воды.

Р.Х. Хамизов выполняет большую научно-организационную работу: член НСАХ, член редколлегии «Журнала аналитической химии», «Журнала прикладной химии», журналов «Сорбционные и хроматографические процессы», «Вода и водоочистные технологии. Научно-технический вестник».

Р.Х. Хамизов пользуется неизменным авторитетом, и поддерживает процесс творческого научного обмена с наиболее авторитетными учеными в области сорбционных методов концентрирования и разделения. Он является участником престижных международных конференций как в России, так и в ряде зарубежных стран, по приглашению коллег выступает с докладами перед научными коллективами в Германии, США, Испании, Турции и др. По его приглашению известные ученые из этих стран не раз выступали на научных семинарах лаборатории сорбционных методов ГЕОХИ РАН с докладами о важных достижениях в применении сорбционных методов в аналитической химии и химической технологии.

Работы Р.Х. Хамизова имеют большое практическое значение. Достаточно упомянуть предложенный им и испытанный в условиях реального производства метод сорбционной очистки экстракционной фосфорной кислоты, позволяющий получать этот продукт практически свободным от примесей, а в качестве побочного продукта – концентрат соединений редкоземельных элементов.

Р.Х. Хамизов – первоклассный руководитель научных проектов, умело направляющий коллективы своей лаборатории и всего института в деле выполнения важнейших научных задач, справедливо решающий организационные вопросы.

Руслан Хажсетович очень интересный человек и вне науки: он пишет стихи, переводит великих поэтов на кабардинский язык, его перевод поэмы «Евгений Онегин» Пушкина А.С. высоко оценили работники культуры, интеллигенция Кабардино-Балкарии. Он любит и умеет собирать друзей вокруг себя, а их у него много: в Москве и в Воронеже, на Кавказе и на Дальнем Востоке.

*Редакция журнала «Химия, физика и механика материалов»,
его воронежские друзья и коллеги от всего сердца поздравляют
Руслана Хажсетовича с Юбилеем и желают ему здоровья и долгих лет
плодотворной научной деятельности!*

Рудаков О.Б., Рудакова Л.В., Селеменев В.Ф., Хохлов В.Ю.

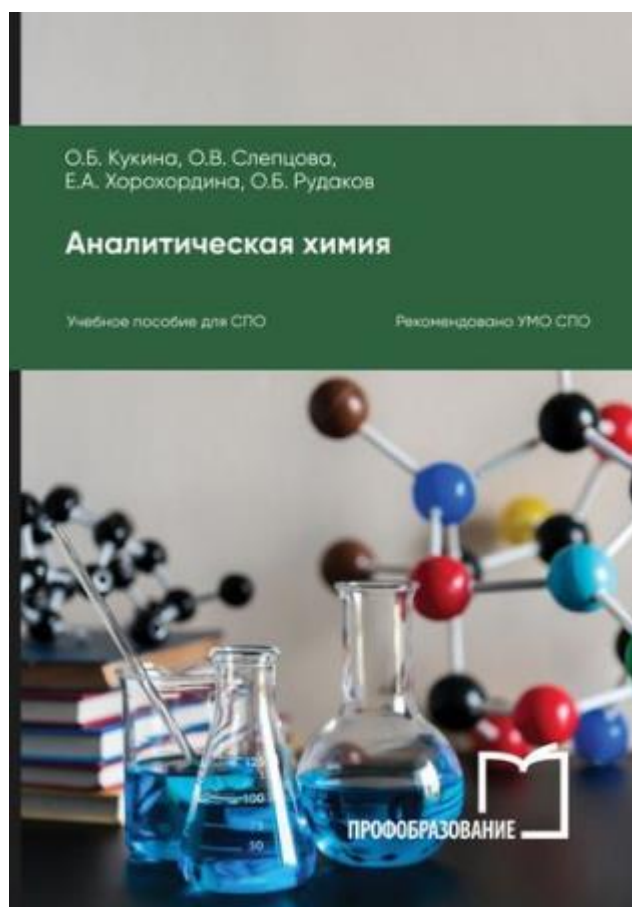
Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, профессор, главный редактор журнала Химия, физика и механика материалов, ВГТУ

Рудакова Людмила Васильевна - д-р хим. наук, доцент, зав. кафедрой фармацевтической химии и фармацевтической технологии, ВГМУ им. Бурденко Н.Н.

Селеменев Владимир Федорович – д-р хим. наук, профессор кафедры аналитической химии, ВГУ

Хохлов Владимир Юрьевич - д-р хим. наук, профессор кафедры аналитической химии, ВГУ

БИБЛИОГРАФИЯ



Уважаемые коллеги!

В 2025 г. издательство Профобразование выпустило в свет учебное пособие «Аналитическая химия» для студентов среднего профессионального образования. Его авторы – преподаватели кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета канд. хим. наук, доцент Кукина О.Б., канд. хим. наук, доцент Хорохордина Е.А., д-р хим. наук, профессор Рудаков О.Б. и преподаватель кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии Воронежского государственного университета канд. хим. наук, доцент Сlepцова О.В.

В учебном пособии представлен теоретический материал по наиболее важным разделам аналитической химии и методам химического анализа. Даны лабораторные работы и задания для самостоятельного решения. Учебное пособие предназначено для студентов всех специальностей и профессий среднего

профессионального образования, учебными планами которых предусмотрено изучение дисциплины «Аналитическая химия». В электронном виде с книгой можно ознакомиться на сайте PROФобразование <https://profspo.ru/books/149349?ysclid=mguj2v9ovl379861143>.

Ссылка для цитирования: Кукина О.Б., Слепцова О.В., Хорохордина Е.А., Рудаков О.Б. Аналитическая химия. (Аналитическая химия [Электронный ресурс]: учебное пособие для СПО/ О.Б. Кукина [и др.].— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Профобразование, 2025.— 162 с.— Режим доступа: <https://profspo.ru/books/149349>.— ЭБС PROФобразование, по паролю).

Шведова М.А.

Шведова Мария Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Научное издание

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Выпуск № 3(46), 2025

Научный журнал

В авторской редакции

*Дата выхода в свет: 31.10.2025.
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 13,6. Уч.-изд. л. 9,5.
Тираж 25 экз. Заказ № 256
Цена свободная*

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84