

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-34-41

УДК 691.175, 620.172

И. А. ЛЕОНОВИЧ, канд. техн. наук, доц.

Д. Д. АДИНЦОВ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ABS-ПЛАСТИКА И ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению механических характеристик ABS-пластика при его статическом растяжении. При изготовлении образцов методом FFF-печати варьировалось процентное заполнение объема при постоянном стиле заполнения «linear». Адекватность полученных результатов проверялась на конечно-элементной модели в программном комплексе Solid Works Simulation.

Ключевые слова:

FFF-печать, ABS-пластик, аддитивные технологии, испытание на растяжение, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Для цитирования:

Леонович, И. А. Результаты экспериментального определения механических свойств ABS-пластика и их теоретическое подтверждение на компьютерной модели / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 34–41.

Введение

ABS-пластик относится к ударопрочным пластмассам с довольно высокими прочностными свойствами, который широко используется в получении изделий по FFF-технологии.

Изучением механических свойств ABS-пластика исследователи занимаются с 1996 г., выполняя печать и испытания на разном оборудовании, опираясь на стандарты разных стран. В [1–8] исследовались свойства ABS-пластика определенных марок или с добавками [2, 8], причем отмечается большое разнообразие в выборе формы и размеров образцов по разным стандартам. В тех или иных работах фиксировалось положение образцов при печати, стиль и плотность заполнения, количество контурных слоев и т. д. Соответственно и результаты испытаний варьируются в довольно широких пределах.

Например, в [7, 8] определялись свойства ABS-пластика без добавок,

в соответствии с требованиями одного и того же стандарта [9]. Результаты получились разные: в [7] прочностные и упругие свойства на растяжение вполне соизмеримы со свойствами литого материала, в [8] эти же свойства в 2–2,5 раза ниже.

Собственные исследования, проведенные ранее при 100-процентном заполнении объема стилем «linear» [12–14], по показателям прочности были близки к литому материалу [15] и к результатам многих авторов [1–7]. Предел прочности на растяжение в наших исследованиях составил $\sigma_{pm} = 37,78$ МПа [12].

Модуль продольной упругости на растяжение оказался существенно меньше данных других авторов [1, 2, 4, 7]. В приведенных литературных источниках при разном процентном заполнении объема, разном расположении нитей в слоях по отношению к растягивающей силе и разном используемом оборудовании модуль продольной упругости определялся в пределах 1282...2272 МПа.

В наших исследованиях среднее значение модуля продольной упругости составило $E_p = 627,36$ МПа [12], что в 2–3 раза меньше показателя литого материала.

Результаты, аналогичные нашим, были получены в [8], где модуль продольной упругости ABS-пластика определялся в пределах 586...737 МПа при испытании образцов со 100-процентным заполнением. Однако предел прочности на растяжение в этой работе был в пределах 9,36...10,8 МПа, что в 3 и более раза меньше наших показателей (более крупные размеры образца не могли в такой степени повлиять на результат).

Цель работы – сопоставить прочность на растяжение реального образца из ABS-пластика, полученного методом

FFF-печати (Fused Filament Fabrication), и аналогичной цифровой модели, расчет в которой производится с использованием экспериментально полученных характеристик упругости материала.

Сравнение результатов натуральных испытаний с виртуальным расчетом позволит проверить как адекватность модели образца, так и адекватность экспериментальных механических характеристик.

Изготовление образцов и их испытание на растяжение

Исследования проводились на образцах по ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012), тип 1B с разной степенью заполнения (рис. 1).



Рис. 1. Плоские образцы по ГОСТ 11262–2017, тип 1B

Для изготовления образцов по FFF-технологии использовался 3D-принтер VSHAPER PRO с диаметром сопла экструдера 0,4 мм и точностью подачи проволоки 1 мкм [12].

Печать образцов производилась из проволоки ABS Eco (black) от белорусской компании Alfa-Filament с расположением образцов плоской стороной на подложке. По периметру образцов печатался контурный слой, состоящий из трех филаментов.

Для всех образцов постоянными поддерживались следующие параметры печати:

- скорость печати, мм/с – 45...50;
- температура головки экструдера, °C – 235;
- температура нагрева камеры, °C – 60;

– температура нагрева стола, °C – 90.

Образцы формировались стилем «linear» (рис. 2) с разной степенью заполнения.

Испытание на статическое растяжение осуществлялось в соответствии с ГОСТ 11262–2017 и ГОСТ 34370–2017 на универсальной машине Kason WDW-5 при скорости нагружения 1 мм/мин. При испытании автоматически определялись: предел прочности материала при растяжении σ_{pm} , относительное удлинение при разрыве ϵ_{pp} .

Модуль продольной упругости при растяжении E_p рассчитывался вручную в соответствии с [10, 11].

Результаты испытаний и расчетов для образцов серий «Л» показаны в табл. 1.

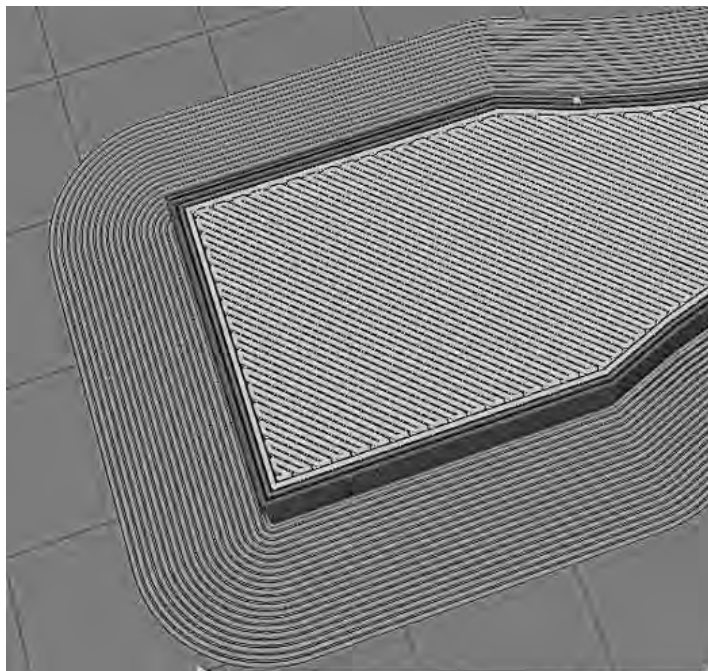


Рис. 2. Стил ь заполнения образцов «linear»

Табл. 1. Результаты испытания образцов серии «Л»

Серия образцов	Заполнение, %	Предел прочности при растяжении σ_{pm} , МПа	Модуль упругости при растяжении E_p , МПа	Относительное удлинение при разрыве ε_{pp} , %
Л1–Л5	100	36,1	739	7,48
Л6–Л10	90	32,68	734,3	8,08
Л11–Л15	80	30,6	714,3	7,38

Испытания подтвердили, что аддитивный ABS-пластик с плотностью заполнения 80 %...100 % обладает высокими прочностными свойствами, соизмеримыми с показателями для литого материала, которые находятся довольно в больших пределах (прочность при растяжении 26...47 МПа при плотности 1,02...1,06 г/см³ [16]). При этом плотность аддитивного материала ниже.

Модуль продольной упругости на растяжение оказался на 14 %...15 % выше, чем ранее определенное значение на малых образцах (тип 1 [10]) в [12].

Особенности формирования этих образцов и последующее исследование структуры материала в разломах показали, что не все слои материала деформировались одинаково при растяжении. Этого недостатка лишены образцы типа 1В в указанном на рис. 2 стиле заполнения.

Существенным результатом исследований является то, что полученные значения модуля упругости в 2–3 раза ниже результатов других авторов, за исключением работы [8].

Статический расчет модели образца

Для проверки адекватности полученных экспериментальных данных была построена виртуальная модель образца и рассчитана на статическое растяжение. За основу модели взят образец типа 1В [10] с изотропными свойствами, приведенными в табл. 1 ($\sigma_{рм}$ и $E_{рр}$). Коэффициент Пуассона в расчетах принят равным 0,36, как в [1].

Конечно-элементная модель образ-

ца разработана в программном комплексе SolidWorks. Параметры сетки конечных элементов показаны в табл. 2.

Статический расчет выполнялся в приложении Simulation, причем средняя максимальная нагрузка для каждой серии образцов уменьшалась пропорционально средней реальной площади поперечного сечения по сравнению с теоретической площадью в 40 мм². В табл. 3 показаны усредненные опытные и откорректированные данные для статического расчета.

Табл. 2. Параметры сетки конечных элементов для статического расчета

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки	Выкл.
Включить автоциклы сетки	Выкл.
Точки Якобиана для сетки высокого качества	16 точек
Размер элемента	1,3627 мм
Допуск	0,0681348 мм
Качество сетки	Высокая
Всего узлов	20377
Всего элементов	11774
Максимальное соотношение сторон	3,9679
Процент элементов с соотношением сторон < 3	99,7

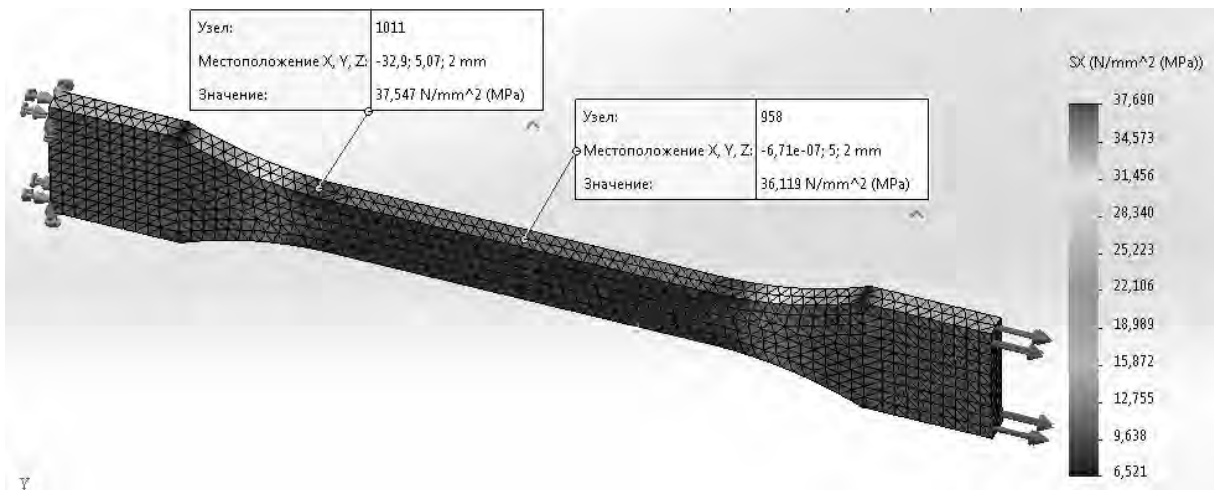
Табл. 3. Исходные данные для статического расчета

Серия образцов	Средняя максимальная сила в серии $F_{рм}$, Н	Средняя площадь поперечного сечения серии A_0 , мм ²	Модуль упругости при растяжении $E_{рр}$, МПа	Теоретическая максимальная сила $F_{рм}$, Н
Л1–Л5	1563,68	43,3	739	1444,5
Л6–Л10	1375,88	42,13	734,3	1306,3
Л11–Л15	1285,46	42,02	714,3	1223,7

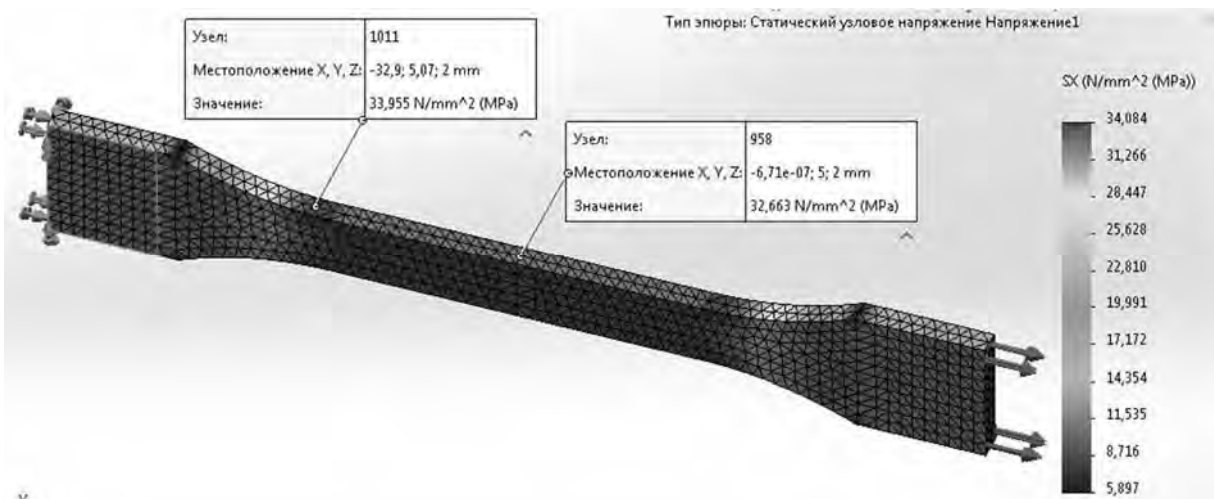
На рис. 3 показаны эпюры нормальных напряжений в моделях, со-

свойствами пластика, определенными экспериментально.

а)



б)



в)

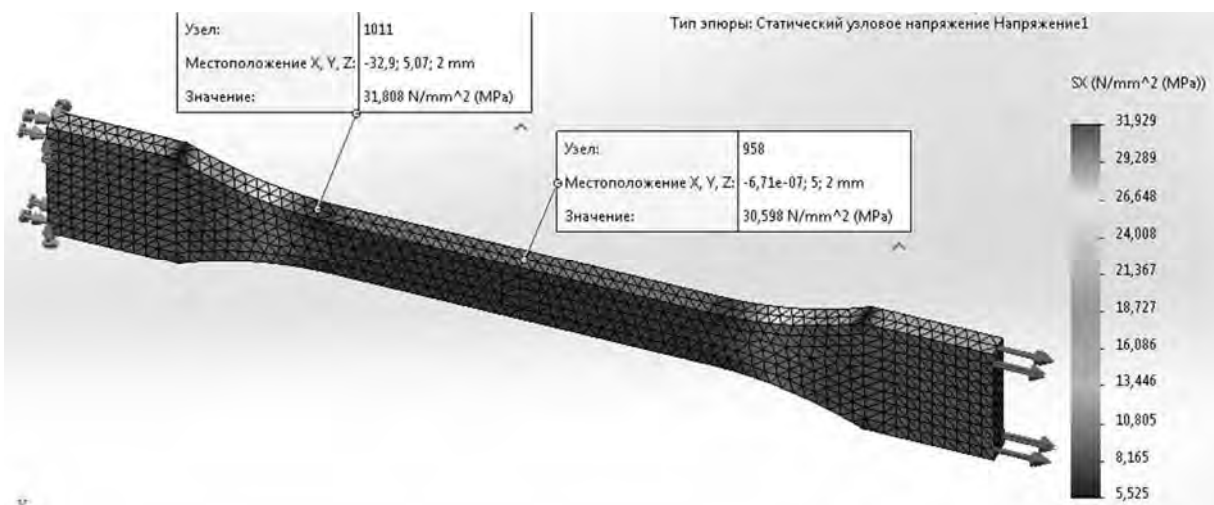


Рис. 3. Эпюры напряжений для ABS-пластика со свойствами: а – образцов серии Л1–Л5; б – образцов серии Л6–Л10; в – образцов серии Л11–Л15

На эпюрах указаны значения напряжений посередине образца и максимальные напряжения по месту перехода от прямого участка к радиусу закругления.

В качестве расчетного предела прочности на растяжение будем принимать напряжение в средней части

модели, т. к. подавляющее большинство образцов разрушалось в пределах контрольной длины.

В табл. 4 показаны результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных по виртуальной модели.

Табл. 4. Результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных

Серия образцов	Предел прочности при растяжении $\sigma_{рм}$, МПа	Напряжение посередине длины модели σ , МПа	Расхождение теоретических и опытных данных, %
Л1–Л5	36,1	36,119	0,05
Л6–Л10	32,68	32,663	0,05
Л11–Л15	30,6	30,598	0,03

Расхождение между теоретическим напряжением и экспериментальным пределом прочности практически отсутствует. Следовательно, модуль продольной упругости для ABS-пластика, полученного наплавлением нитей, действительно находится в заявленных нами пределах.

Виртуальная модель показала, что стандартный образец в месте перехода от прямого участка к радиусу закругления обладает максимальным напряжением, приблизительно на 4 % превышающем номинальные напряжения в средней части образца. Это объясняет тот факт, что некоторые образцы разрушились за пределами контрольной длины. Учитывая незначительное расхождение центрального и максимального напряжений, можно утверждать, что значение предела прочности при растяжении также подтверждается и за пределами контрольной длины.

Заключение

Представлены результаты экспериментального определения механических характеристик ABS-пластика (ABS Eco),

полученного наплавлением нитей (FFF-печать) при его статическом растяжении: предел прочности при растяжении, модуль продольной упругости, относительное удлинение при разрыве. Пополнена база экспериментальных данных по свойствам ABS-пластика, увязанная со степенью заполнения при печати образцов в стиле «linear». Значение предела прочности на растяжение варьировалось в пределах от 30,6 до 36,1 МПа, модуля продольной упругости – от 714,3 до 739 МПа при изменении степени заполнения от 80 % до 100 %.

Подтверждено, что прочность ABS-пластика, полученного наплавлением нитей, соизмерима с прочностью литого (сплошного) материала, а модуль продольной упругости значительно ниже (в 2–2,8 раза). В большинстве источников литературы [1–7] модуль продольной упругости на растяжение в аддитивном пластике ниже показателя для литого материала максимум на 40 %...50 %, что не подтвердилось нашими исследованиями.

Адекватность полученных экспериментальных данных подтверждена на конечно-элементной модели образца,

построенной в программном комплексе SolidWorks. Статический расчет, выполненный в приложении Simulation, при откорректированной максимальной силе и экспериментальном модуле

упругости показал получение нормальных напряжений при осевом растяжении модели, практически не отличающихся от экспериментального предела прочности материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шмелев, А. В.** Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати [Электронный ресурс] / А. В. Шмелев, В. И. Ивченко, А. В. Талалуев // Наука и инновации: электрон. науч.-техн. изд. – 2021. – Вып. 4 (112). – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2070>. – Дата доступа: 14.04.2022.
2. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) [Электронный ресурс] / С. В. Кондрашов [и др.] // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2019. – № 10 (82). – С. 34–49. – Режим доступа: <http://www.viam-works.ru>. – Дата доступа: 05.06.2022.
3. **Бурлов, В. В.** Особенности процесса свободного наслаивания расплавов аморфных термопластов и его влияние на свойства изделий, получаемых по 3D-технологии / В. В. Бурлов, К. Н. Спиров, В. К. Крыжановский // Изв. СПбГТИ(ТУ). – 2016. – № 36 (62). – С. 52–57.
4. Механические свойства ABS-пластика, полученного по FDM-технологии. Современный взгляд на проблемы технических наук / Е. С. Костина [и др.] // Современный взгляд на проблемы технических наук: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2014. – С. 42–46.
5. Свойства изделий из АБС-пластиков и полиамида, получаемых методом 3D-печати / К. С. Беседина [и др.] // Изв. СПбГТИ (ТУ). – 2018. – № 45. – С. 60–63.
6. **Балашов, А. В.** Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью [Электронный ресурс] / А. В. Балашов, М. И. Маркова // Инж. вестн. Дона. – 2019. – № 1. – Режим доступа: ivdon.ru/magazine/archive/nly2019/5618. – Дата доступа: 14.04.2022.
7. Experimental determination of the tensile strength of fused deposition modeling parts Proceedings of the ASME 2014 [Electronic resource] / K. Savvakis [et al.] // International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2014 November 14-20, 2014, Montreal, Quebec, Canada. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/283498079>. – Date of access: 15.09.2023.
8. Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling [Electronic resource] / R. Hernandez [et al.] // Ingram School of Engineering, Texas State University, San Marcos, Texas 78666. – Mode of access: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2016/076>. – Date of access: 15.09.2023.
9. **ASTM D638–14.** Стандартный метод испытаний свойств пластмасс на растяжение // ASTM International. – 2014. – Р. 17.
10. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012). – Введ. 01.10.2018. – Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 24 с.
11. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Ч. 1: Общие принципы: ГОСТ 34370–2017 (ISO 527–1:2012). – Введ. 01.10.2018. – Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 27 с.
12. **Леонович, И. А.** Исследование свойств ABS-пластика в образцах, полученных по технологии FFF-печати / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 1. – С. 13–21.
13. **Леонович, И. А.** Механические испытания ABS-пластика и структура образцов, полученных наплавлением нитей / И. А. Леонович, Д. Д. Адинцов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 143.
14. **Адинцов, Д. Д.** Сравнение результатов натурных и виртуальных испытаний на растяжение образцов из ABS-пластика / Д. Д. Адинцов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: тез. докл. Междунар. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 48.
15. **Барвинский, И. А.** Справочник по литевым термопластичным материалам [Электронный ресурс] / И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская. – Режим доступа: <http://barvinsky.ru/guide/guide-materials.htm>. – Дата доступа: 01.08.2021.

Статья сдана в редакцию 29 апреля 2024 года

Контакты:

loleonia@gmail.com (Леонович Ирина Анатольевна);
adintsov.daniil@mail.ru (Адинцов Даниил Дмитриевич).

I. A. LEANOVICH, D. D. ADZINTSOU

RESULTS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ABS-PLASTIC AND THEORETICAL CONFIRMATION OF THEM ON A COMPUTER MODEL

Abstract

The paper presents the results of the experimental studies to determine mechanical characteristics of ABS-plastic under its static tension. In the manufacture of samples by FFF-printing method, the percentage of volume filling varied with a constant «linear» filling pattern. The adequacy of the results obtained was tested on a finite element model in the Solid Works Simulation software package.

Keywords:

FFF-printing, ABS-plastic, additive technologies, tensile testing, computer modeling, finite element method.

For citation:

Leanovich, I. A. Results of experimental determination of mechanical properties of ABS-plastic and theoretical confirmation of them on a computer model / I. A. Leanovich, D. D. Adzintsou // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 34–41.