



# ПОЛИТЕХ

Научно-исследовательская  
лаборатория «Фасадные конструкции  
зданий и сооружений»

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»

Научно-исследовательская лаборатория «Фасадные  
конструкции зданий и сооружений»

Контактный телефон: +7 (911) 811-07-19

195251, город Санкт-Петербург, вн. тер. г.

муниципальный округ Академическое,

Политехническая улица, дом 29 литера Б

ИНН 7804040077; КПП 780401001

Северо-Западное главное управление Банка России

Р/с 03214643000000017200;

К/с 40102810945370000005; БИК 014030106

**УТВЕРЖДАЮ**

*Проректор по научной работе*

*Ю. В. Фомин*

*«21» июня 2024 года*

## Экспертное заключение

по результатам численного исследования несущей способности  
на сжатие, растяжение и изгиб кронштейнов навесной фасадной  
системы **Hoffmann**

**№ 1-23/01**

Руководитель проекта,  
заведующий НИЛ ФКЗиС

А.В. Галямичев

**Санкт-Петербург  
2024**

Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

## Оглавление

1.	Исходные данные .....	2
2.	Объект исследования.....	2
3.	Цель исследования .....	2
4.	Задачи исследования.....	2
5.	Материал кронштейнов .....	3
6.	Расчетные схемы в ПК SCAD Office .....	6
7.	Результаты статического расчета моделей и анализа ее работы .....	11
7.1.	Конструктивные схемы алюминиевых кронштейнов.....	11
7.2.	Результаты статического расчета кронштейнов на сжатие.....	13
7.3.	Результаты статического расчета кронштейнов на изгиб.....	22
7.4.	Результаты статического расчета кронштейнов на отрыв.....	34
8.	Заключение .....	46

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №						Лист
						Экспертное заключение № 1-23/01	1	
Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подпись	Дата			

## 1. Исходные данные

Экспертное заключение по результатам численного исследования несущей способности на сжатие, растяжение и изгиб несущих кронштейнов навесной фасадной системы Hoffmann, предназначенных для облицовки зданий и сооружений различного назначения, выполнен на основании договора на создание (передачу) научно-технической продукции №1-23/01 от 10 октября 2023 года между федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и товариществом с ограниченной ответственностью «Hoffmann Engineering and Trading».

## 2. Объект исследования

**Объектом исследования** являлись алюминиевые кронштейны навесной фасадной системы «Hoffmann» с различными геометрическими характеристиками.

## 3. Цель исследования

Целью численного исследования являлось определение несущей способности на сжатие, растяжение и изгиб несущих кронштейнов навесной фасадной системы, а также определение характера их статической работы при действии сосредоточенных нагрузок, имитирующих действие собственного веса навесной фасадной системы (изгиб), отрицательного ветрового давления (растяжение/вырыв) и положительного ветрового давления (сжатие).

## 4. Задачи исследования

- Моделирование несущих алюминиевых кронштейнов в ПК SCAD Office согласно заданным типоразмерам;
- Проверка численного моделирования с результатами экспериментального исследования;
- Проведение статического расчета и определение предельно допустимых расчетных усилий на несущие алюминиевые кронштейны от сжимающей, растягивающей и изгибающей нагрузок.

Изн. №подл.	Взам. инв. №
Подпись и дата	

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата

## 5. Материал кронштейнов

Конструкция несущего кронштейна выполнена из алюминиевого сплава AlMg0.7Si 6060 T6 с механическими характеристиками, отвечающими требованиям ГОСТ 22233–2018 «Профили прессованные из алюминиевых сплавов для ограждающих конструкций. Технические условия»:

Таблица 1. Механические показатели алюминиевого сплава

Обозначение системы и марки сплава	Состояние материала	Обозначение сост. мат-ла	Толщина стенки, мм	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести при растяжении $\sigma_{0,2}$ , МПа	Отн. удлинение при растяжении, %
AlMg0.7 Si 6060	Закаленное и искусственно состаренное	T6	Св. 3 до 25 влюч.	170	140	8

Согласно СП 128.13330.2016 «Алюминиевые конструкции. Актуализированная редакция СНиП 2.03.06-85», значение расчетного сопротивления алюминия при растяжении, сжатии и изгибе  $R$  следует принимать равным меньшему из значений расчетного сопротивления по условному пределу текучести  $R_y$  и расчетного сопротивления по временному сопротивлению  $R_u$ . При этом:

$$R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m}; R_u = \frac{R_{un}}{\gamma_m \cdot \gamma_u}$$

где  $R_{yn}$  – нормативное сопротивление алюминия, принимаемое равным значению условного предела текучести сечения  $\sigma_{0.2}$  по государственным стандартам и техническим условиям на алюминий;

$R_{un}$  – нормативное сопротивление алюминия разрыву, принимаемое равным минимальному значению временного сопротивления  $\sigma_b$  по государственным стандартам и техническим условиям на алюминий:

$$\gamma_m = 1,1; \gamma_u = 1,45$$

Расчётное сопротивление алюминиевого сплава AlMg0.7Si 6060 T6 принято:

$$R = 107 \text{ МПа}$$

Инов. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата

Для подтверждения физико-механических характеристик алюминиевого сплава кронштейнов проведены поверочные испытания. Образцы (см. Рис. 1) изготовлены из части алюминиевых кронштейнов с вылетом 270 мм и высотой 150 мм, как показано на Рис. 2.

$$\text{Тип I. } l_0 = 5,65(F_0)^{0,5}$$

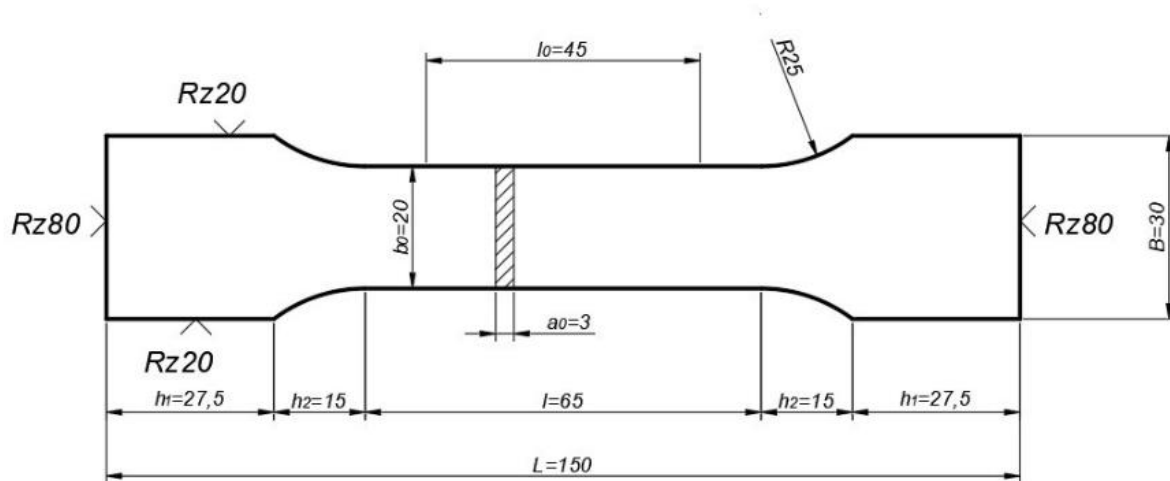


Рис. 1. Образцы для испытаний на растяжение. Геометрические характеристики

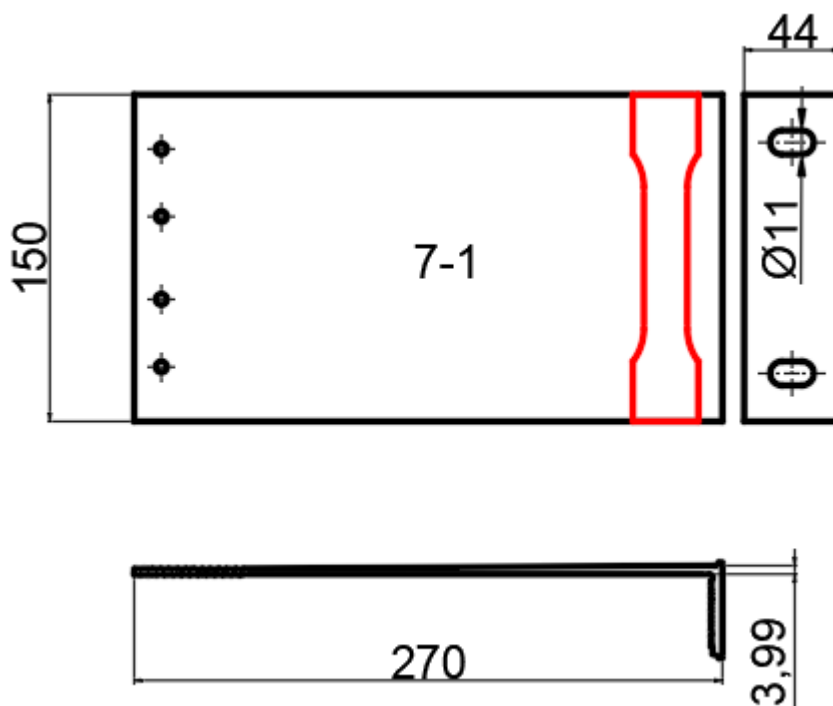


Рис. 2. Образцы для испытаний на растяжение. Расположение заготовки



Испытания образцов проведены на испытательной машине Zwick/Roell Z100 Св. о поверке № С-СП/23-11-2023/297811827.

Результаты представлены на Рис. 3 и Таблица 2.

Инов. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата

Таблица 2. Результаты испытаний на растяжение

Обозначение	№ образца	$a_0$ , мм	$b_0$ , мм	$S_0$ , мм	$L_0$ , мм	$E_{\text{мод}}$ , ГПа	$F_{0,2}$ , МПа	$F_{\text{max}}$ , МПа	dL(пласт.) при раз-руше-нии %
	1	3,11	19,93	61,98	45,00	65,0	140	170	10,1
	2	3,09	19,84	61,31	45,00	66,1	145	172	10,4

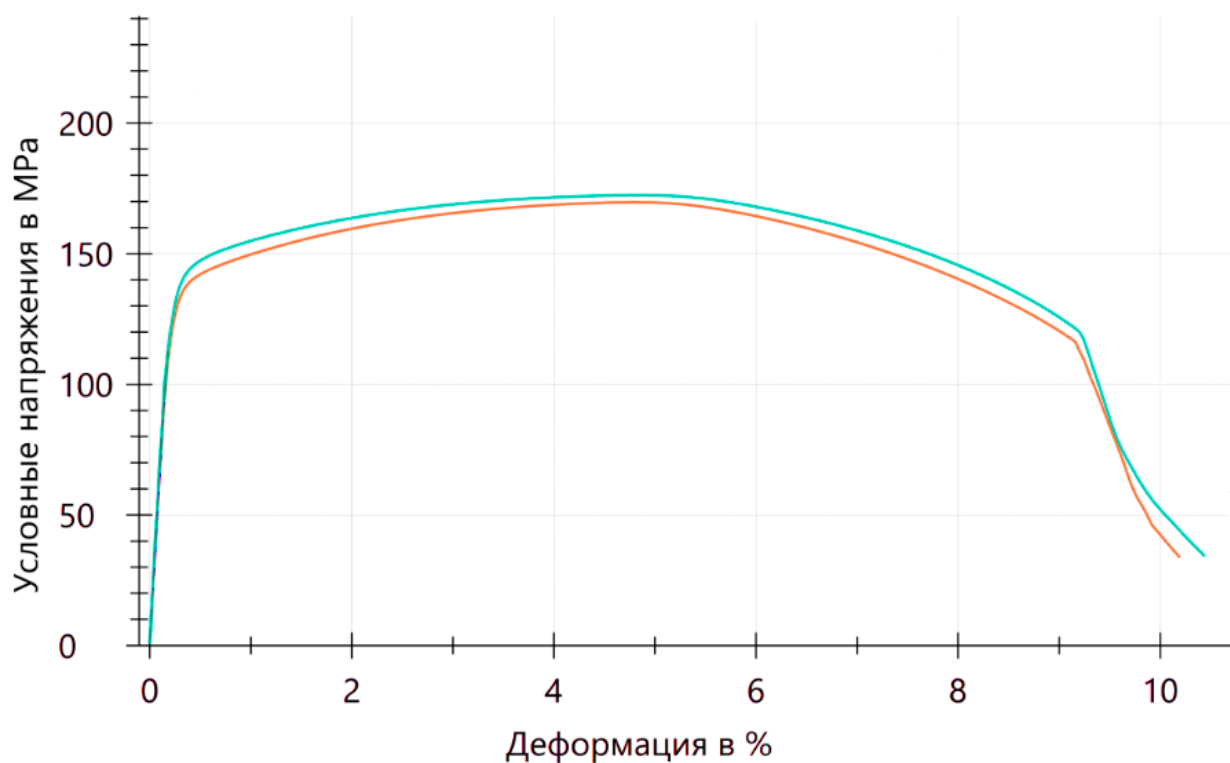


Рис. 3. Результаты испытаний на растяжение

Инв. №подл.	Взам. инв. №
Подпись и дата	

Изм.	Кол.	Лист	№доку	Подпись	Дата

## 6. Расчетные схемы в ПК SCAD Office

Для выполнения поверочного расчета были составлены конечно-элементные модели конструкции несущего кронштейна НФС в программном комплексе SCAD Office версии 21.1.

В основу расчета положен метод конечных элементов (МКЭ) в варианте метода перемещений. В связи с этим идеализация конструкции выполнена в форме, приспособленной к использованию данного метода, а именно: система представлена в виде набора тел стандартного типа (стержней, пластин, оболочек и т.д.), называемых конечными элементами (КЭ), присоединенных к узлам.

Кронштейны моделировались при помощи оболочечных конечных элементов с учетом геометрической нелинейности (см. Рис. 4. и Рис. 5). Вылет кронштейна принимался в соответствии с конструктивными решениями. Крепление кронштейнов с испытательной оснасткой осуществлялось при помощи болтов М5, моделируемые стержневыми конечными элементами. Для обеспечения сопряжения пластин использовались односторонние связи, отключаемые при растяжении. Таким образом, моделировалась контактная задача.

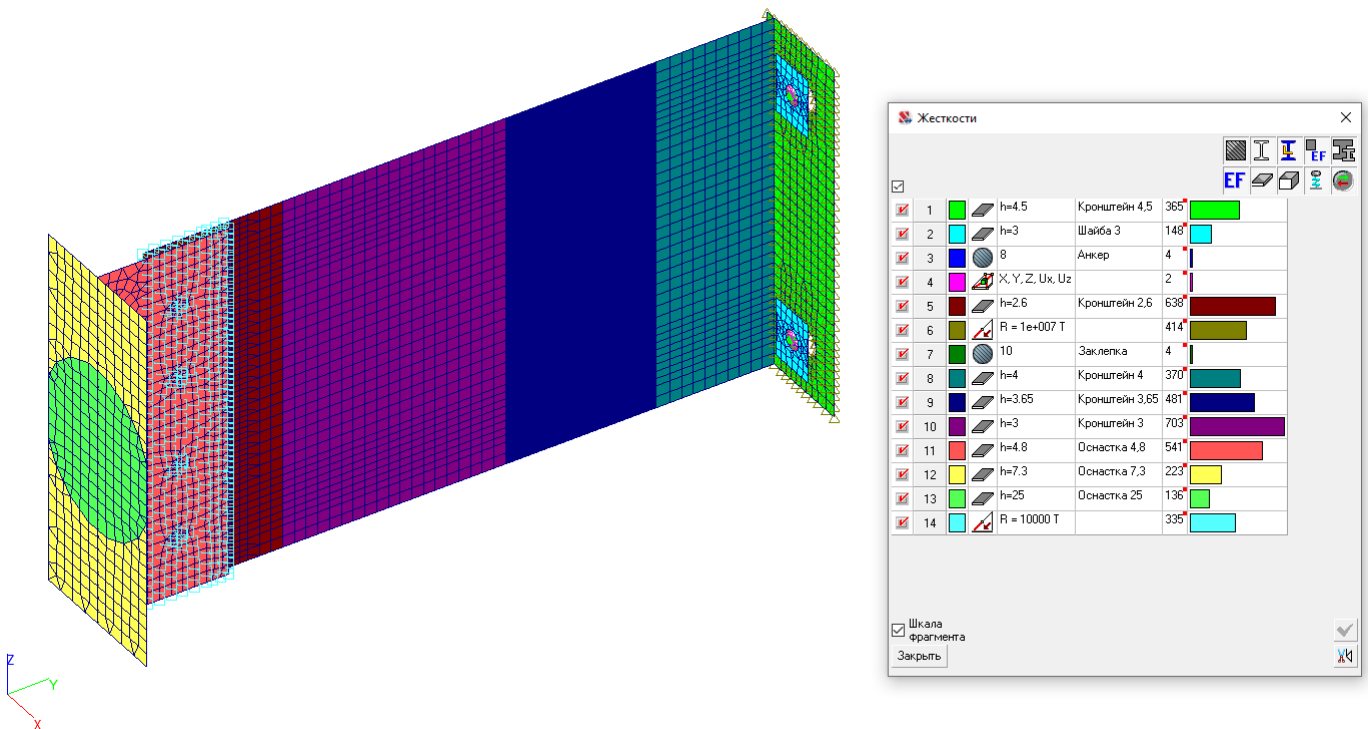


Рис. 4. Расчетная схема конструкции несущего кронштейна в ПК Scad Office

Инва. №подл.	Взам. инв. №
	Подпись и дата

Изм.	Кол.	Лист	Нодок	Подпись	Дата
------	------	------	-------	---------	------

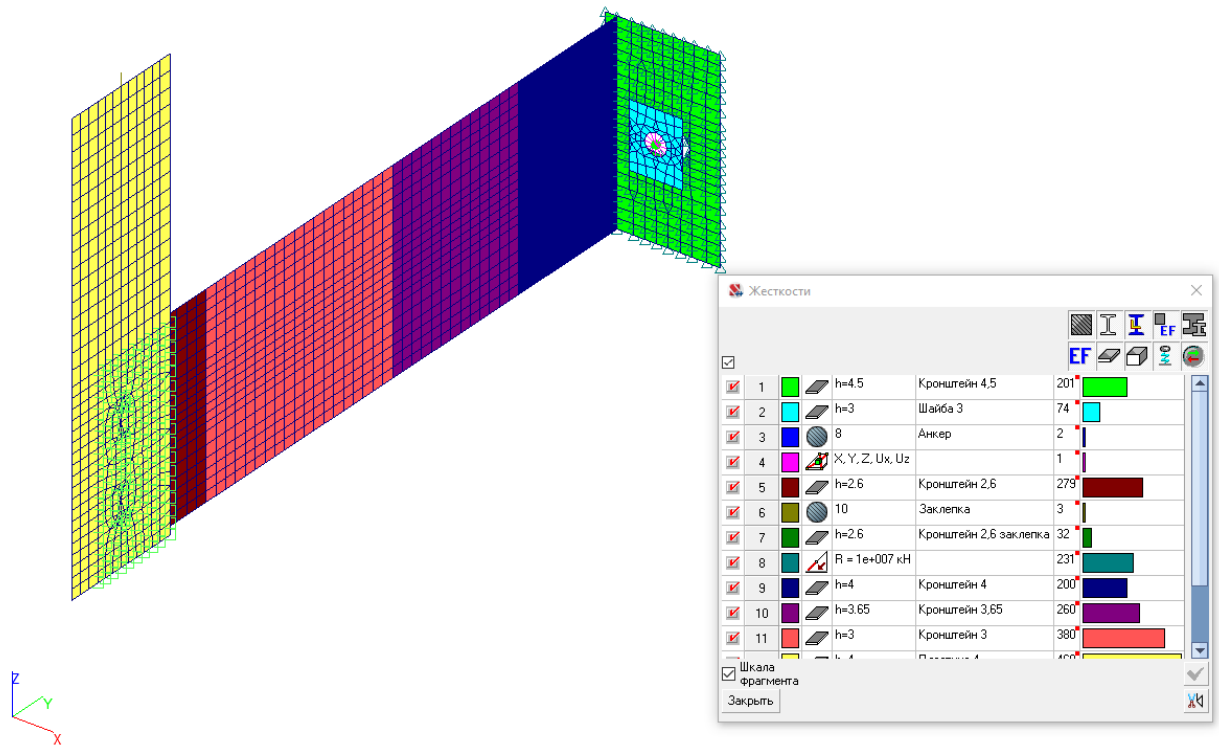


Рис. 5. Расчетная схема конструкции несущего кронштейна в ПК Scad Office

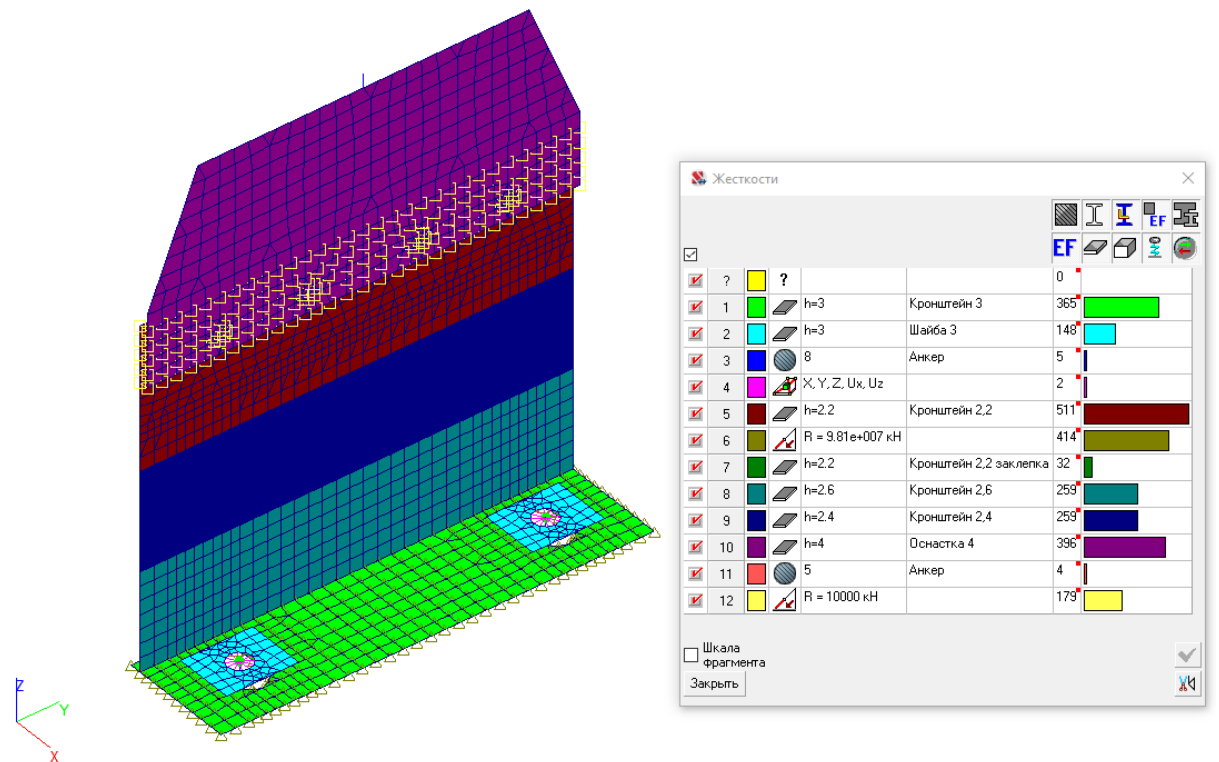


Рис. 6. Расчетная схема конструкции несущего кронштейна в ПК Scad Office

Моделировались шайбы, как показано на Рис. 7.

Инов. №подл.      Подпись и дата      Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата



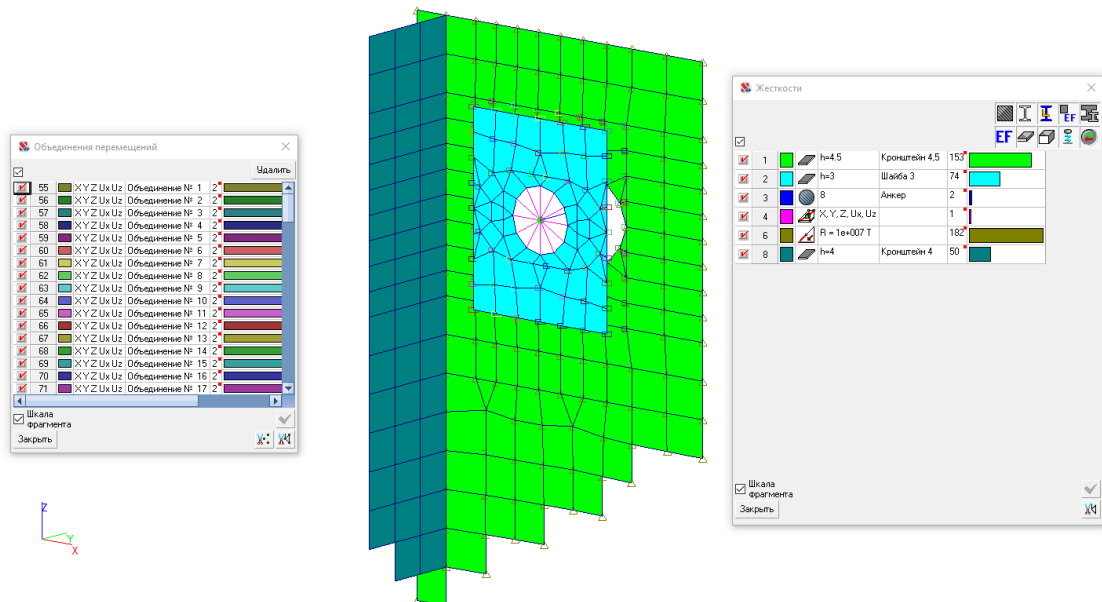


Рис. 7. Моделирование шайбы

Анкерное крепление моделировалось путем задания связей во всех направлениях ( $X, Y, Z, U_x, U_y, U_z$ ), как показано на Рис. 8. По все площади основания кронштейна устанавливались односторонние связи, отключаемые при растяжении.

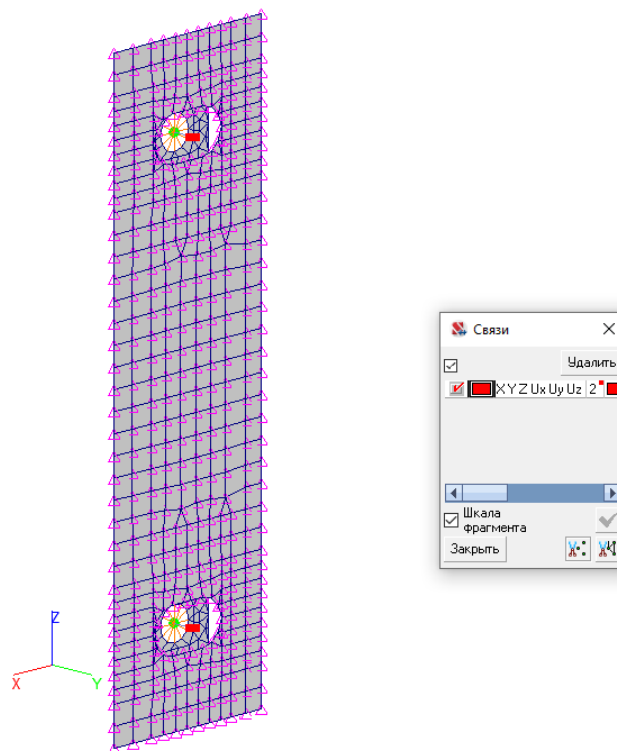


Рис. 8. Закрепление несущих кронштейнов в ПК Scad Office

1. **Сжатие.** Нагрузка при экспериментальном исследовании алюминиевых кронштейнов на сжатие передавалась при помощи динамометра. В расчетном комплексе учитывалась фактическая площадь передачи усилия на испытательную оснастку. Для исключения возможной деформации оснастки была увеличена жесткость (см. Рис. 9).

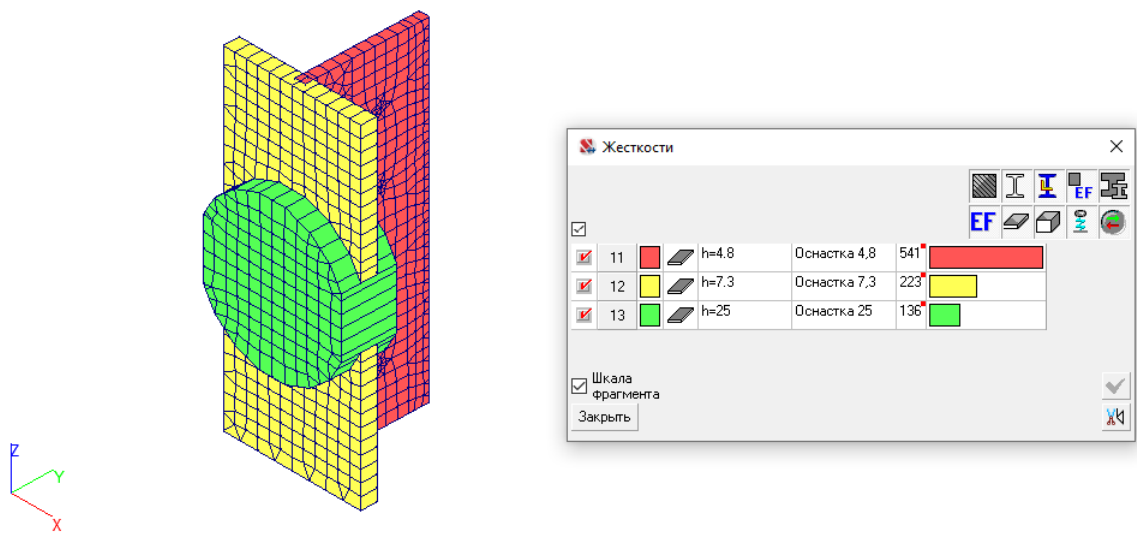


Рис. 9. Моделирование испытательной оснастки (испытания на сжатие)

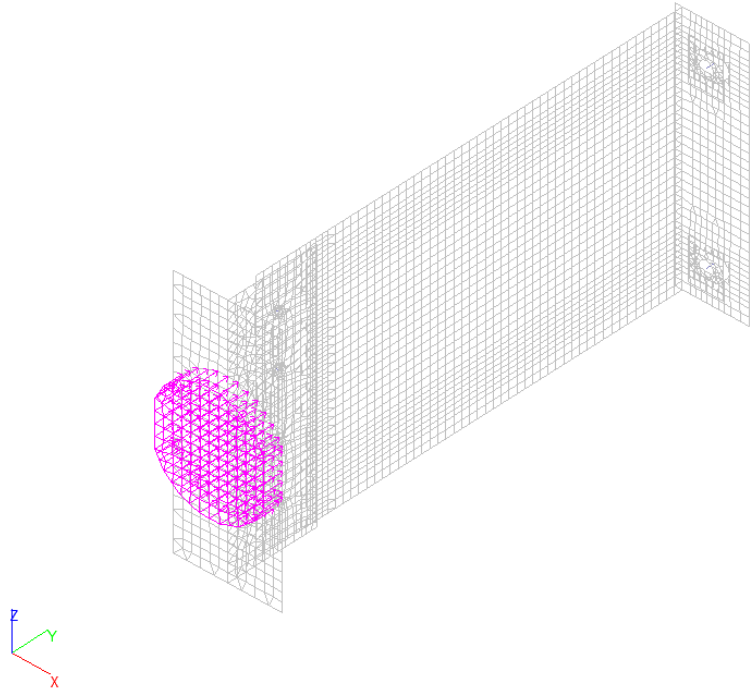


Рис. 10. Приложение единичной сжимающей нагрузки в ПК SCAD Office 21.1

2. **Изгиб.** Нагрузка при экспериментальном исследовании алюминиевых кронштейнов на изгиб передавалась при помощи ПСО-20МГ4АД через пластины испытательной оснастки. В расчетном комплексе учитывалась испытательная оснастка в виде оболочечных КЭ с объединением смежных узлов КЭ кронштейна путем введения двухузловых односторонних. Для обеспечения свободы поворота согласно ТО 1-23/01 введен стержневой КЭ с шарниром, как показано на Рис. 11 и Рис. 12.

Инва. №подл.	Взам. инв. №
	Подпись и дата

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата

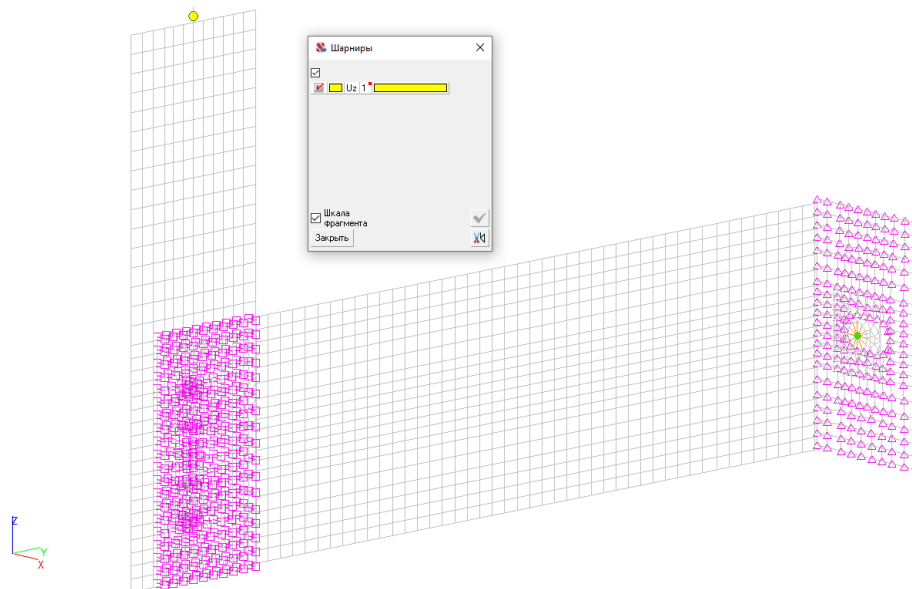


Рис. 11. Моделирование испытательной оснастки (испытания на изгиб)

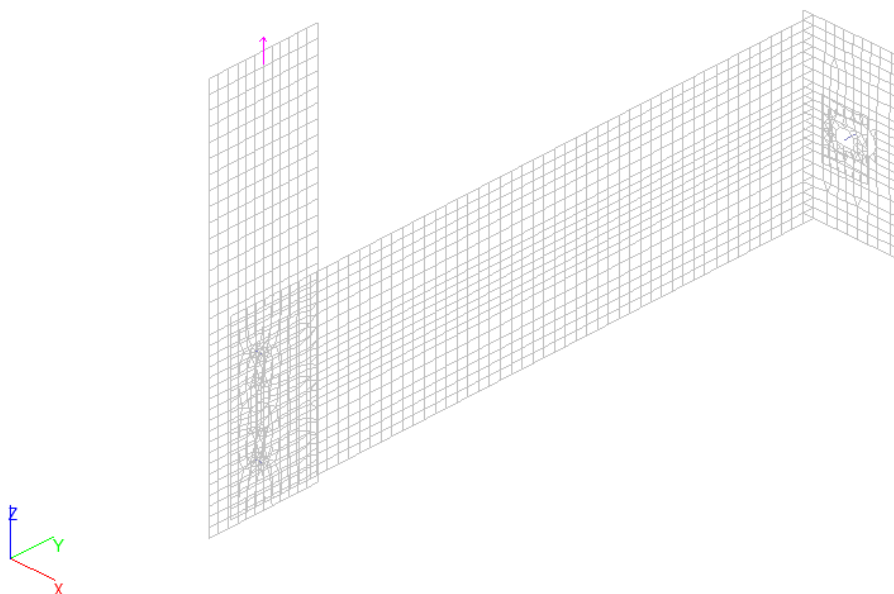


Рис. 12. Приложение единичной изгибающей нагрузки в ПК SCAD Office 21.1

3. **Отрыв.** Нагрузка при экспериментальном исследовании алюминиевых кронштейнов на изгиб передавалась при помощи ПСО-20МГ4АД через пластины испытательной оснастки. В расчетном комплексе учитывалась испытательная оснастка в виде оболочечных КЭ с объединением смежных узлов КЭ кронштейна путем введения двухузловых односторонних. Для обеспечения свободы поворота согласно ТО 1-23/01 введен стержневой КЭ с шарниром, как показано на Рис. 13 и Рис. 14.

Инва. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата

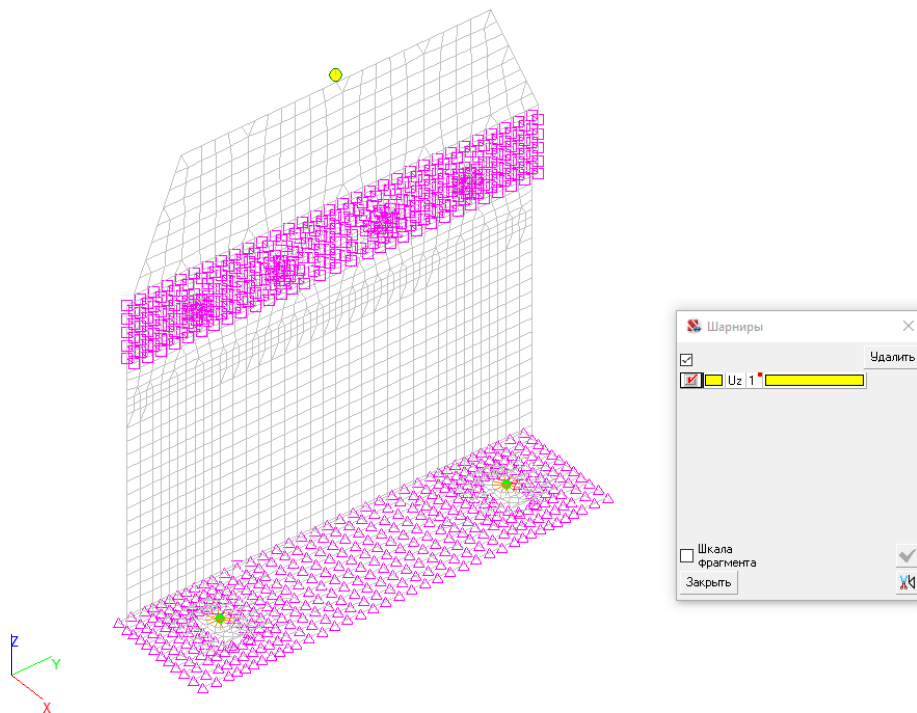


Рис. 13. Моделирование испытательной оснастки (испытания на отрыв)

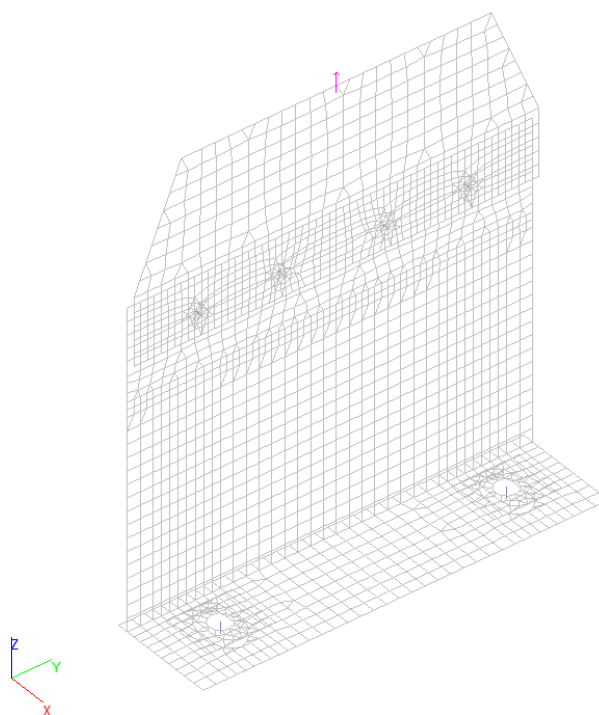


Рис. 14. Приложение единичной отрывающей нагрузки в ПК SCAD Office 21.1

## 7. Результаты статического расчета моделей и анализа ее работы

### 7.1. Конструктивные схемы алюминиевых кронштейнов

В рамках настоящего Экспертного заключения расчеты выполнены для расчетных схем на основании ТО №1-23/01, представленные на Рис. 15 - Рис. 17.

Инов. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата

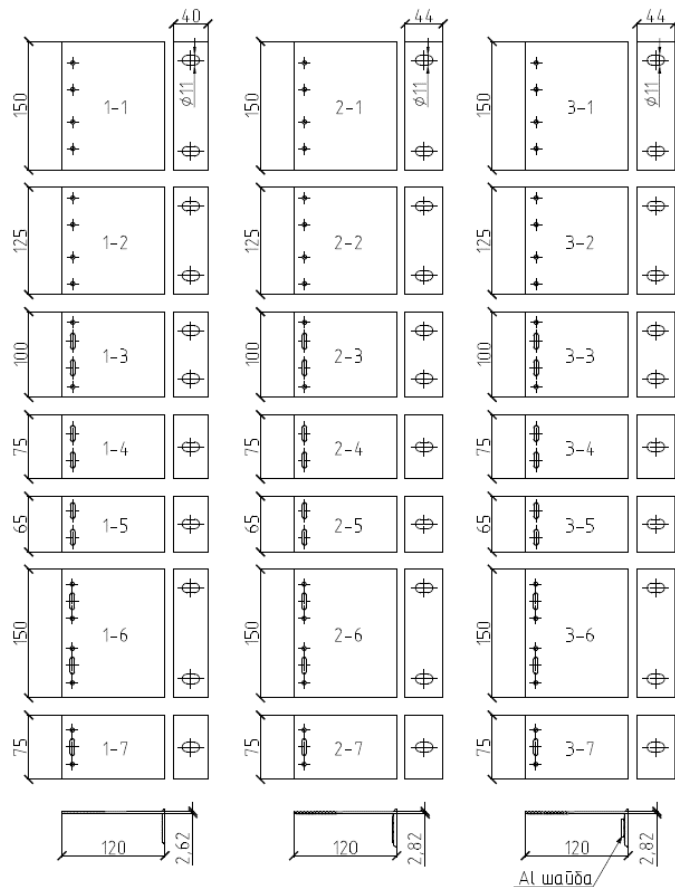


Рис. 15. Конструктивные схемы алюминиевых кронштейнов вылетом 120 мм

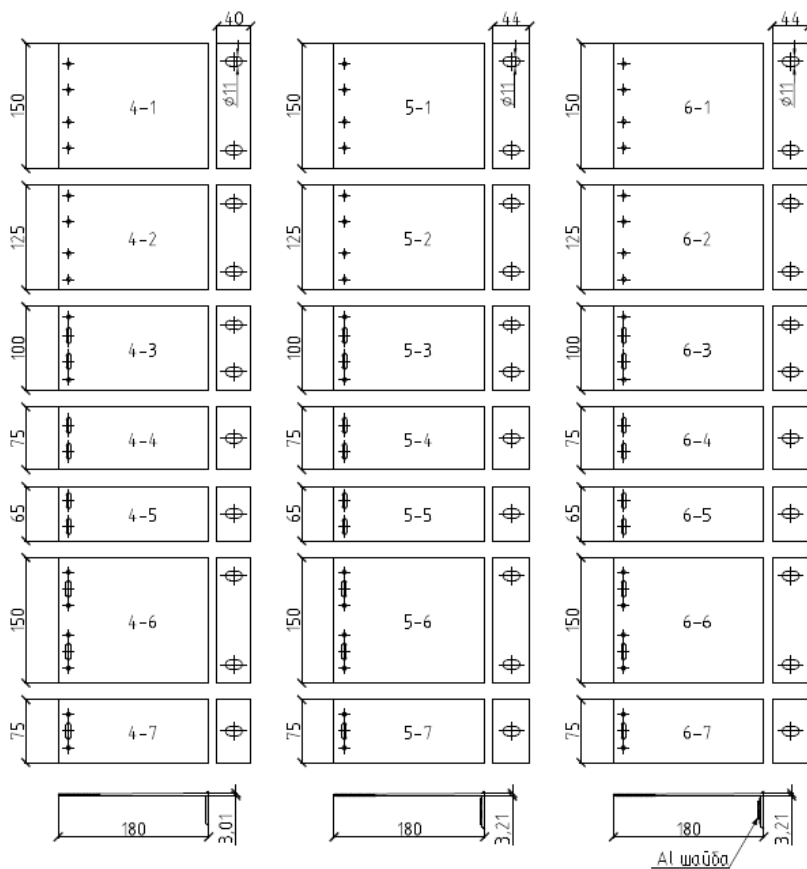


Рис. 16. Конструктивные схемы алюминиевых кронштейнов вылетом 180 мм

Инв. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

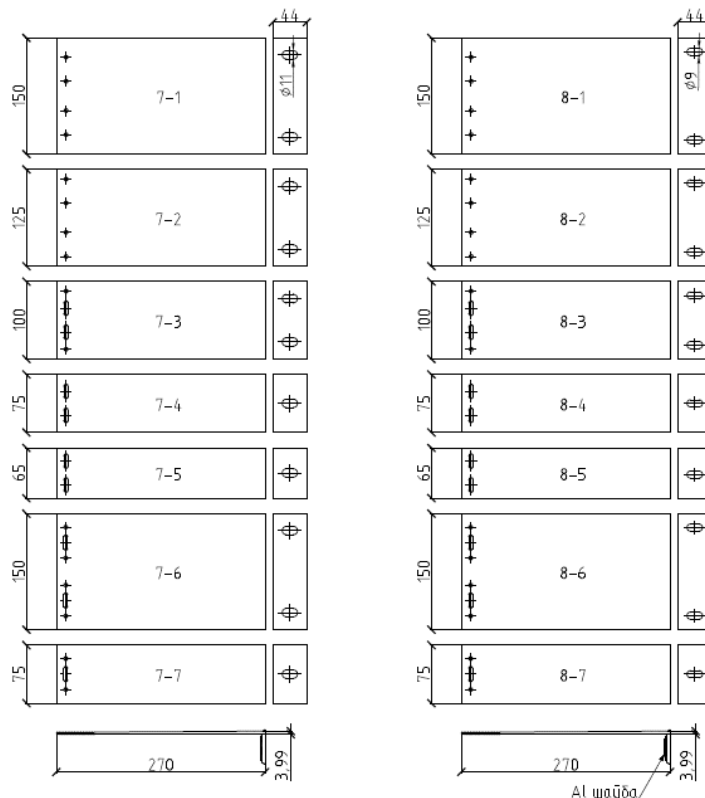


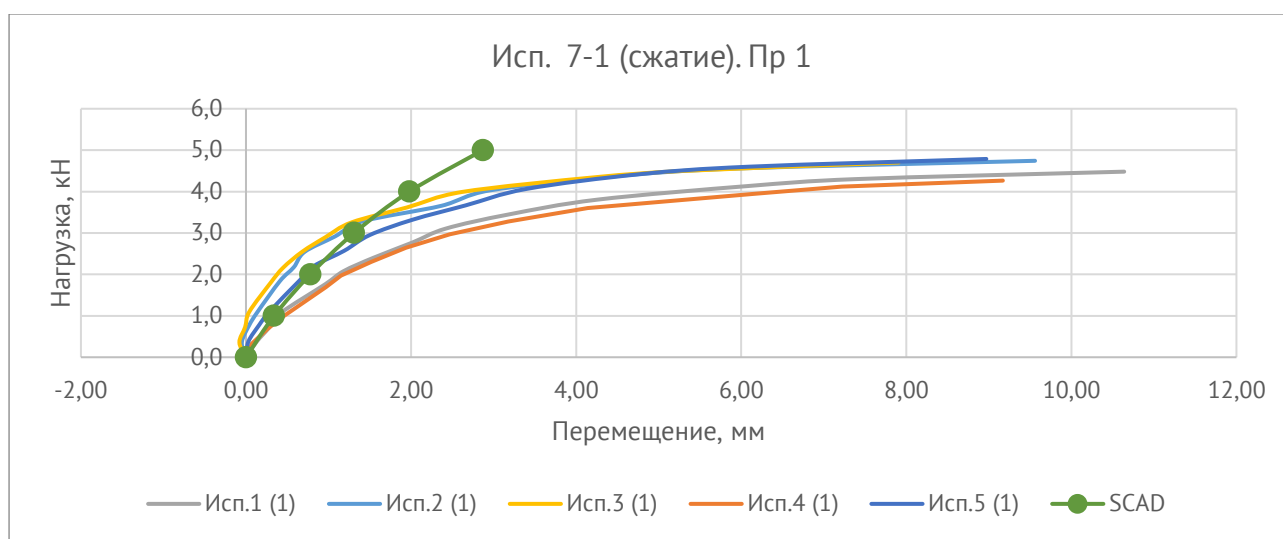
Рис. 17. Конструктивные схемы алюминиевых кронштейнов вылетом 270 мм

## 7.2. Результаты статического расчета кронштейнов на сжатие

Статический расчёт элементов подсистемы НФС выполнен методом конечных элементов в варианте перемещений в нелинейной постановке.

Результаты численного расчета сравнивались с результатами экспериментального исследования.

Далее приведено сравнение результатов для серии испытаний 7-1 – алюминиевый кронштейн 270x150x44 d11.

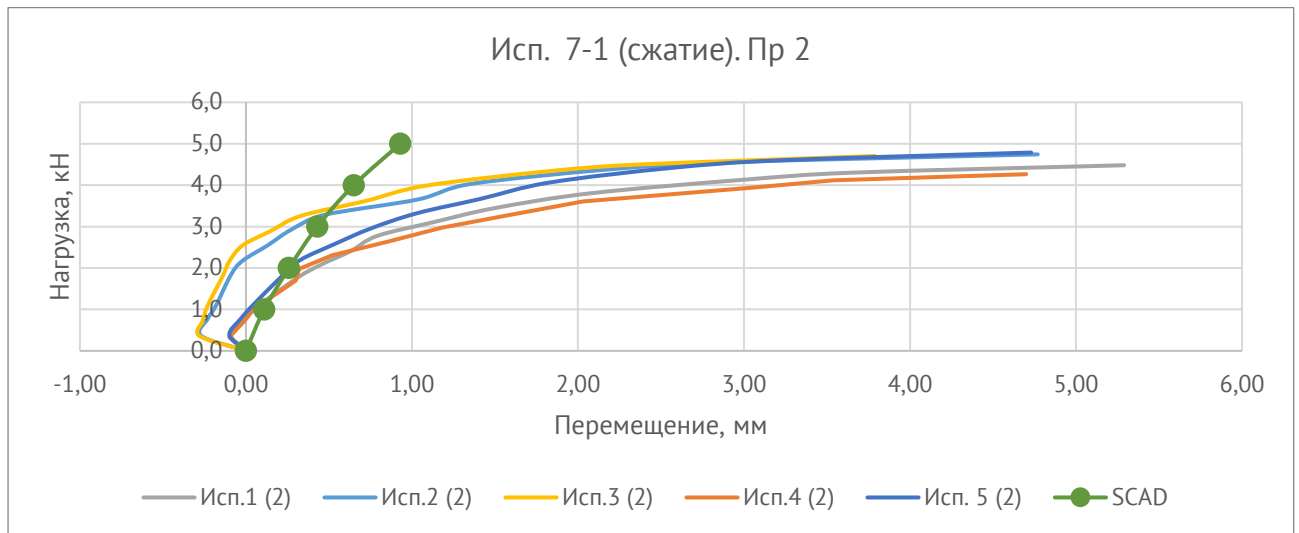


Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата



По результатам сравнения перемещений в характерных точках кронштейнов можно говорить о хорошей сходимости численной модели в ПК SCAD Office в нелинейной постановке с результатами испытаний.

Однако по результатам анализа невозможно определить критическую сжимающую нагрузку, при которой конструкция кронштейна теряет устойчивость.

В дальнейшем используется формула Эйлера (1) для определения расчетной критической силы потери устойчивости алюминиевых кронштейнов:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{(\mu \cdot L)^2}, \quad (1)$$

где  $P_{cr}$  – критическая сила потери устойчивости по Эйлеру;

$\pi$  – число пи;

$E$  – модуль упругости алюминия ( $E = 70000$  МПа);

$I_{min}$  – минимальный момент инерции вылета кронштейна (рассчитывается для каждого типоразмера несущего кронштейна);

$\mu$  – коэффициент приведенной длины. Для дальнейших расчетов используется схема:



Рис. 18. Коэффициент приведенной длины рассматриваемой конструкции кронштейнов

$L$  – величина вылета несущего кронштейна.

Инов. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	Нодок	Подпись	Дата

Минимальный момент инерции кронштейна считается по формуле 2 – момент инерции прямоугольного сечения.

$$I_{min} = \frac{h \cdot t^3}{12}, \quad (2)$$

где  $h$  – высота алюминиевого кронштейна;

$t$  – минимальная толщина вылета кронштейна.

Результаты расчета сведены в Таблица 3.

Таблица 3. Критическая сжимающая нагрузка

Серия исп.	Вылет $L$ , мм	Высота $h$ , мм	Ширина основания $b$ , мм	$d$ отверстия основания, мм	$I_{min}$ , мм <sup>4</sup>	$P_{cr}$ , кН
1	2	3	4	5	6	7
1-1	120	150	40	11	133,1	6,39
1-2		125			110,92	5,32
1-3		100			88,73	4,25
1-4		75			66,55	3,19
1-5		65			57,68	2,77
1-6		150			133,1	6,39
1-7		75			66,55	3,19
2-1	120	150	44	11	172,8	8,29
2-2		125			144	6,91
2-3		100			115,2	5,53
2-4		75			86,4	4,15
2-5		65			74,88	3,59
2-6		150			172,8	8,29
2-7		75			86,4	4,15
3-1	120	150	44	9	172,8	8,29
3-2		125			144	6,91
3-3		100			115,2	5,53
3-4		75			86,4	4,15
3-5		65			74,88	3,59
3-6		150			172,8	8,29
3-7		75			86,4	4,15
4-1	180	150	40	11	138,62	2,96
4-2		125			115,52	2,46
4-3		100			92,41	1,97
4-4		75			69,31	1,48
4-5		65			60,07	1,28
4-6		150			138,62	2,96
4-7		75			69,31	1,48

Инов. №подл.	Взам. инв. №
	Подпись и дата

Экспертное заключение № 1-23/01

Лист

15

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата
------	------	------	-------	---------	------



Продолжение Табл. 3

Серия исп.	Вылет $L$ , мм	Высота $h$ , мм	Ширина основания $b$ , мм	$d$ отверстия основания, мм	$I_{min}$ , м <sup>4</sup>	$P_{cr}$ , кН
1	2	3	4	5	6	7
5-1	180	150	44	11	174,97	3,73
5-2		125			145,81	3,11
5-3		100			116,65	2,49
5-4		75			87,48	1,87
5-5		65			75,82	1,62
5-6		150			174,97	3,73
5-7		75			87,48	1,87
6-1	180	150	44	9	174,97	3,73
6-2		125			145,81	3,11
6-3		100			116,65	2,49
6-4		75			87,48	1,87
6-5		65			75,82	1,62
6-6		150			174,97	3,73
6-7		75			87,48	1,87
7-1	270	150	44	11	219,7	2,08
7-2		125			183,08	1,74
7-3		100			146,47	1,39
7-4		75			109,85	1,04
7-5		65			95,2	0,90
7-6		150			219,7	2,08
7-7		75			109,85	1,04
8-1	270	150	44	9	219,7	2,08
8-2		125			183,08	1,74
8-3		100			146,47	1,39
8-4		75			109,85	1,04
8-5		65			95,2	0,90
8-6		150			219,7	2,08
8-7		75			109,85	1,04

Полученные расчетные значения критической силы, при которой алюминиевый кронштейн теряет устойчивость сопоставлены с результатами испытаний:

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

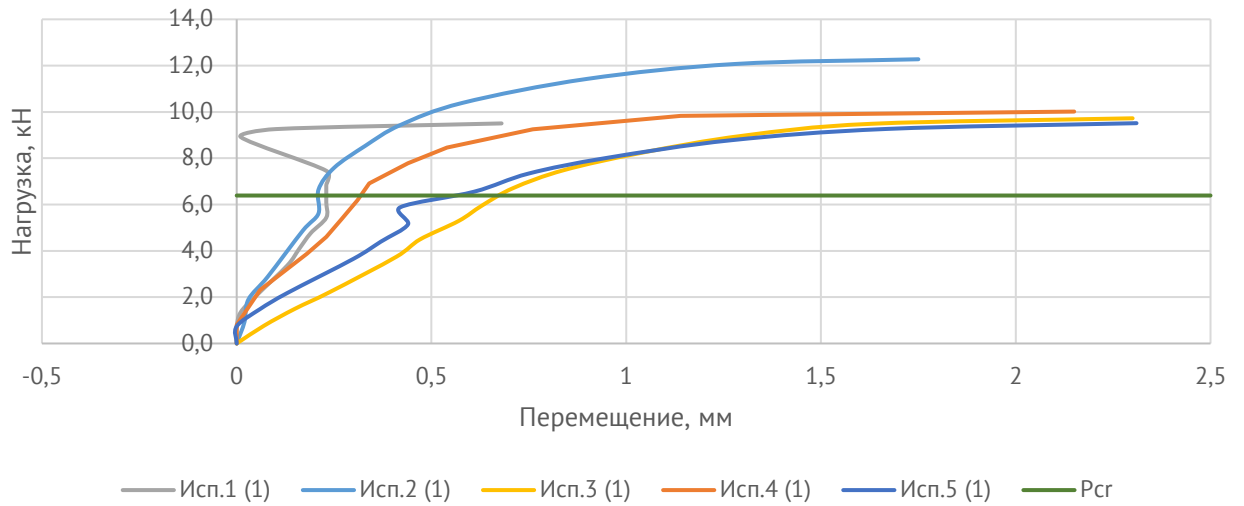
Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подпись	Дата

Экспертное заключение № 1-23/01

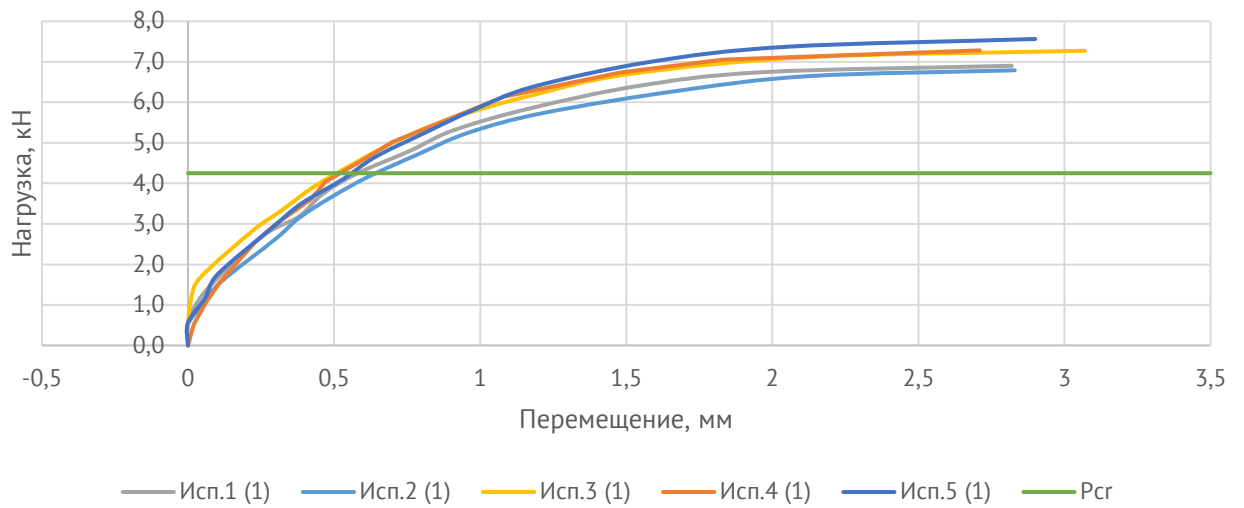
Лист

16

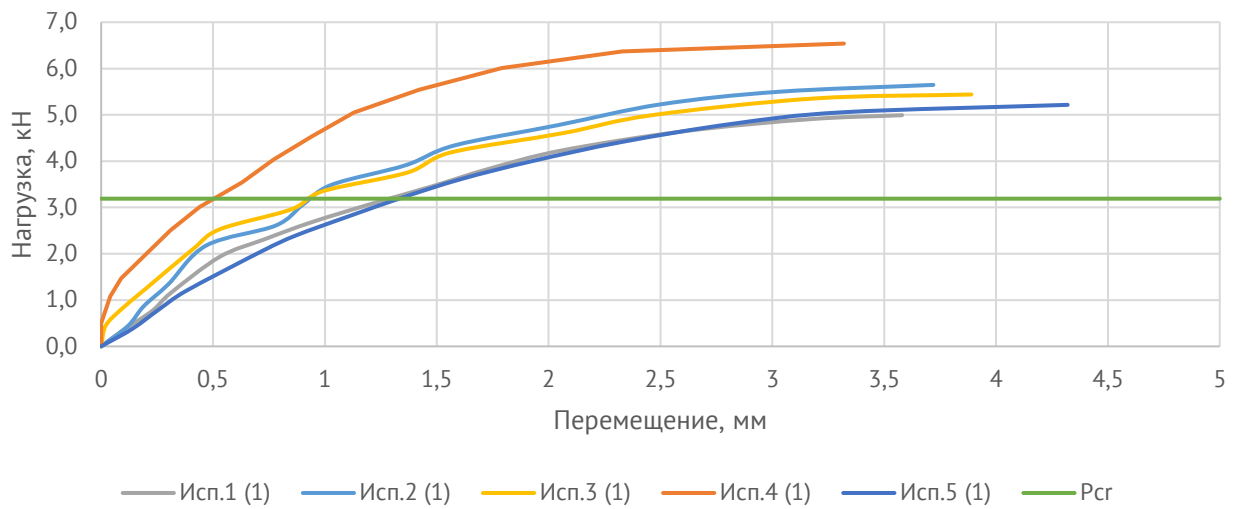
Исп. 1-1 (сжатие). Пр 1



Исп. 1-3 (сжатие). Пр 1



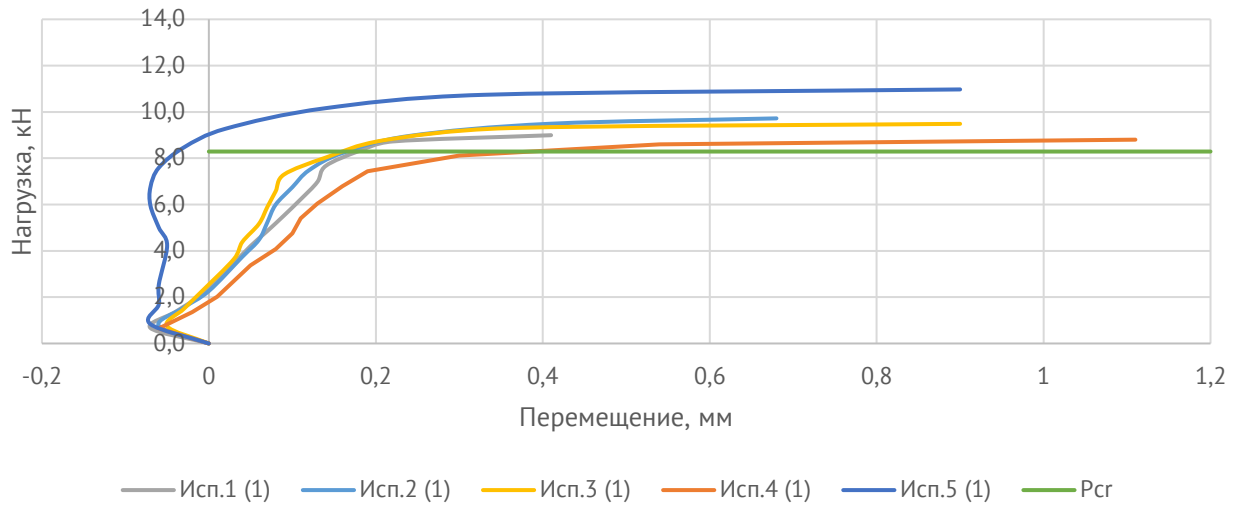
Исп. 1-7 (сжатие). Пр 1



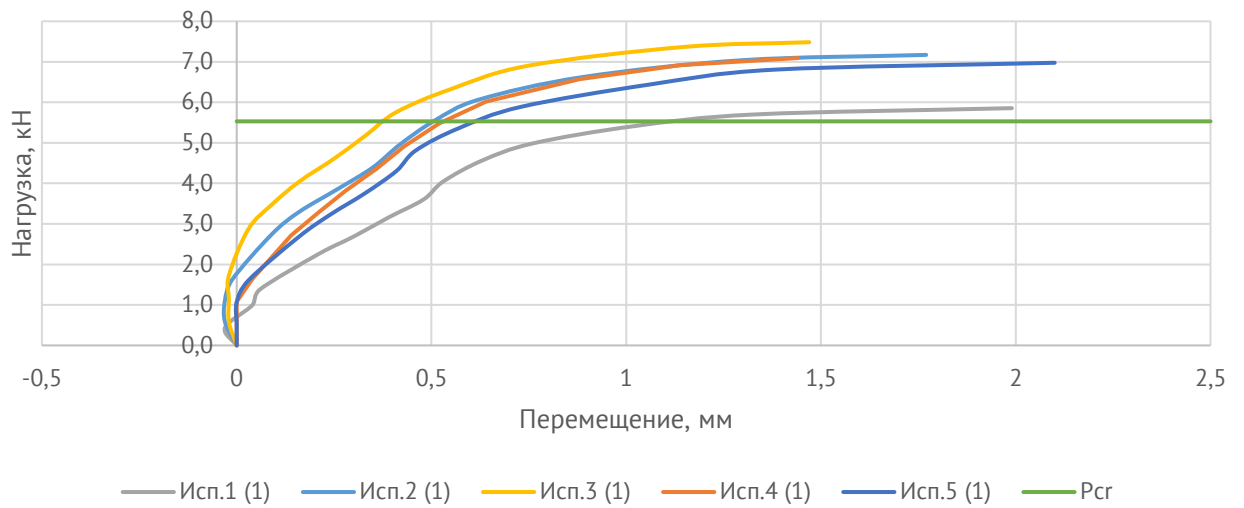
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

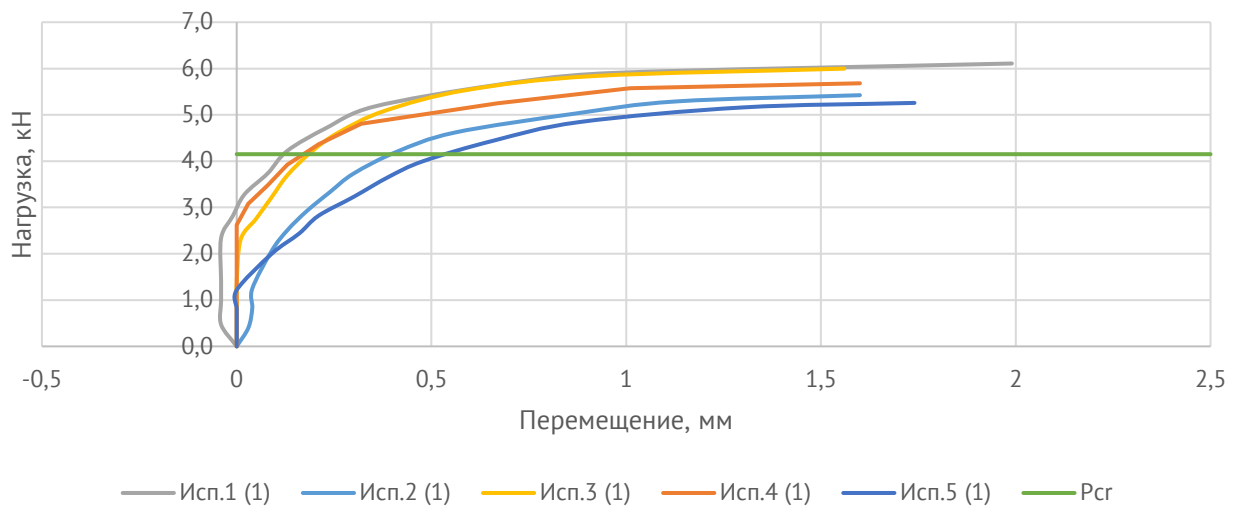
Исп. 2-1 (сжатие). Пр 1



Исп. 2-3 (сжатие). Пр 1



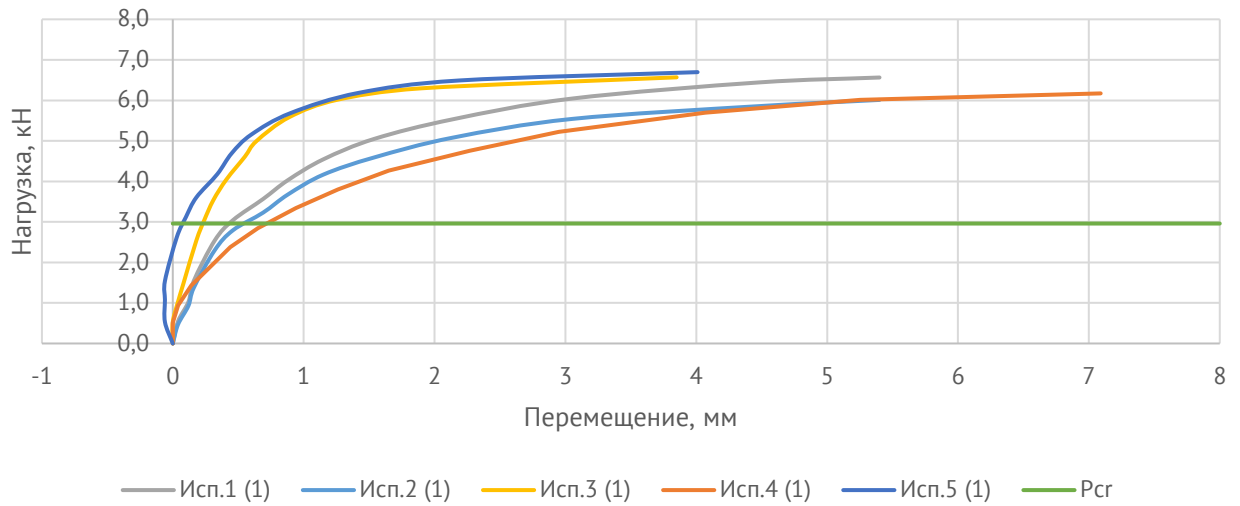
Исп. 2-7 (сжатие). Пр 1



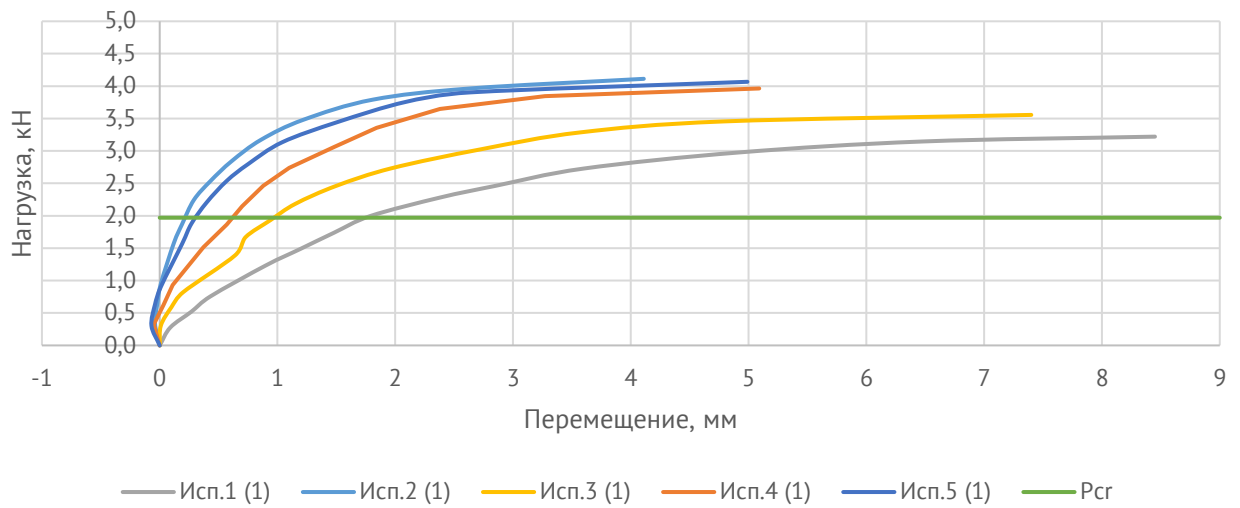
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

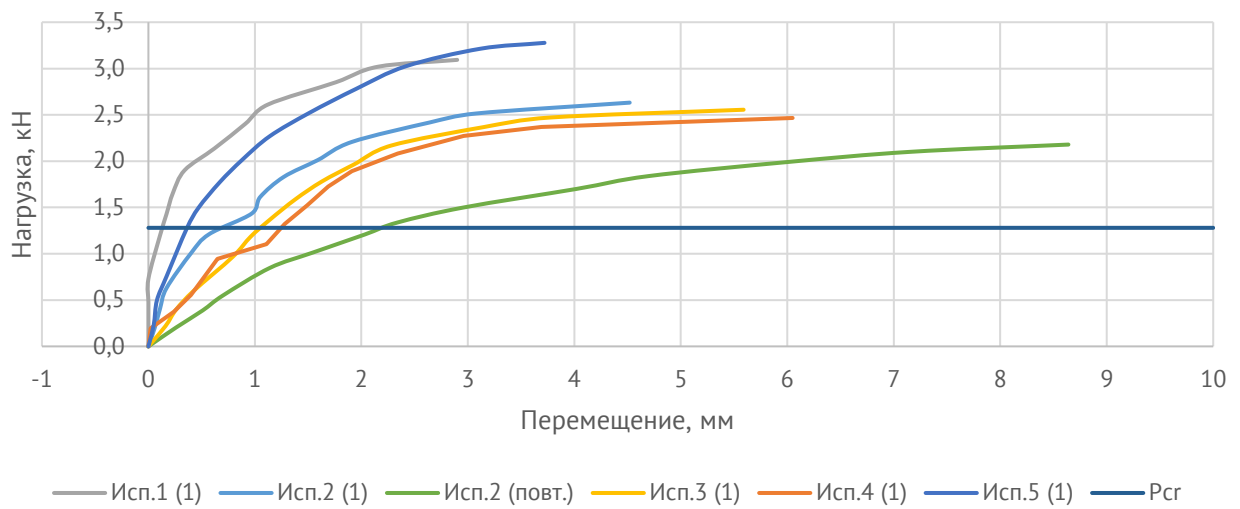
Исп. 4-1 (сжатие). Пр 1



Исп. 4-3 (сжатие). Пр 1



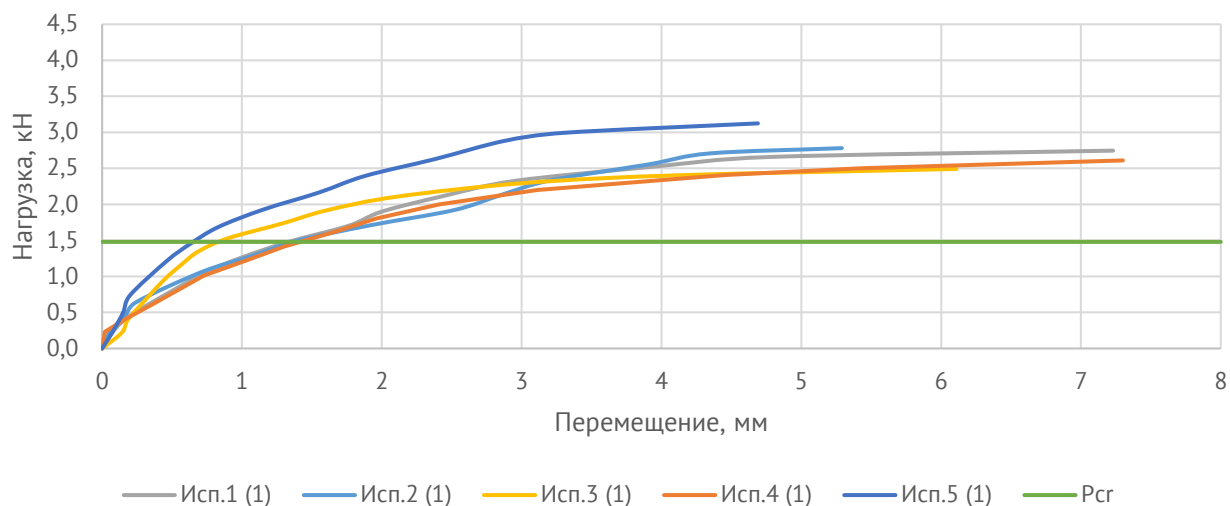
Исп. 4-5 (сжатие). Пр 1



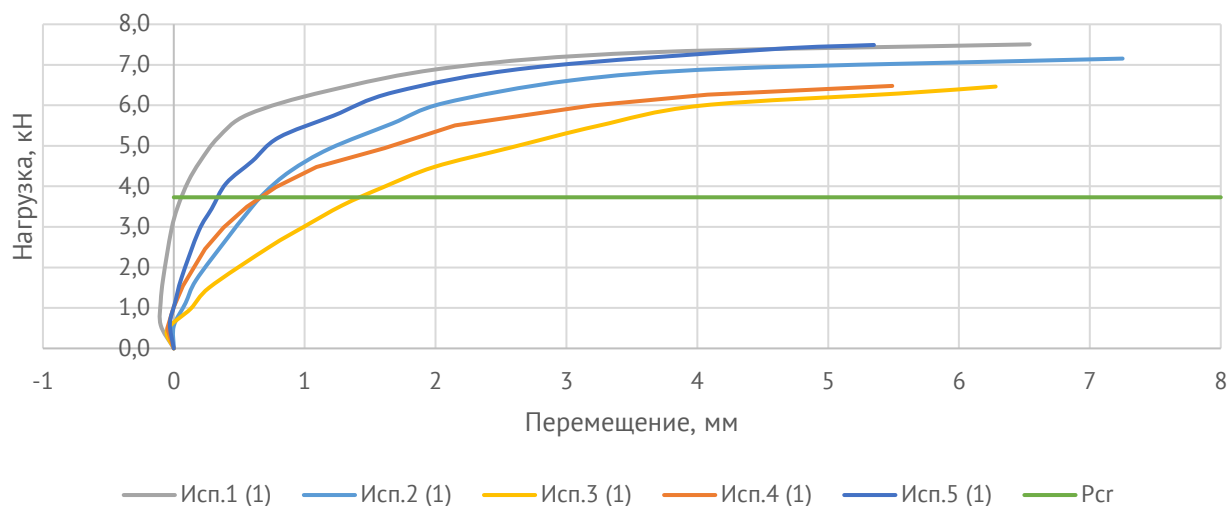
Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

Исп. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

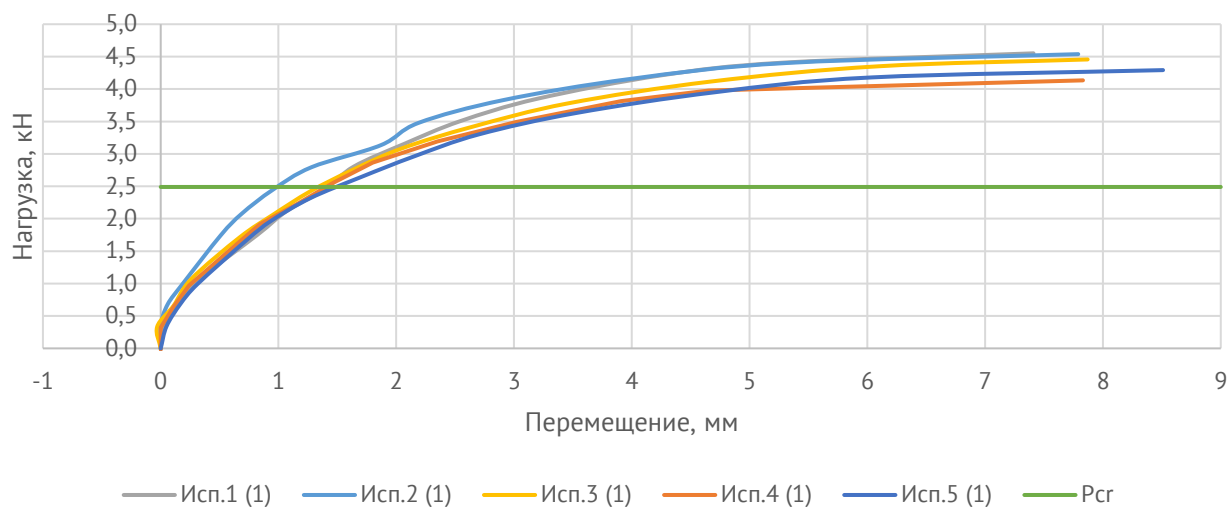
Исп. 4-7 (сжатие). Пр 1



Исп. 5-1 (сжатие). Пр 1



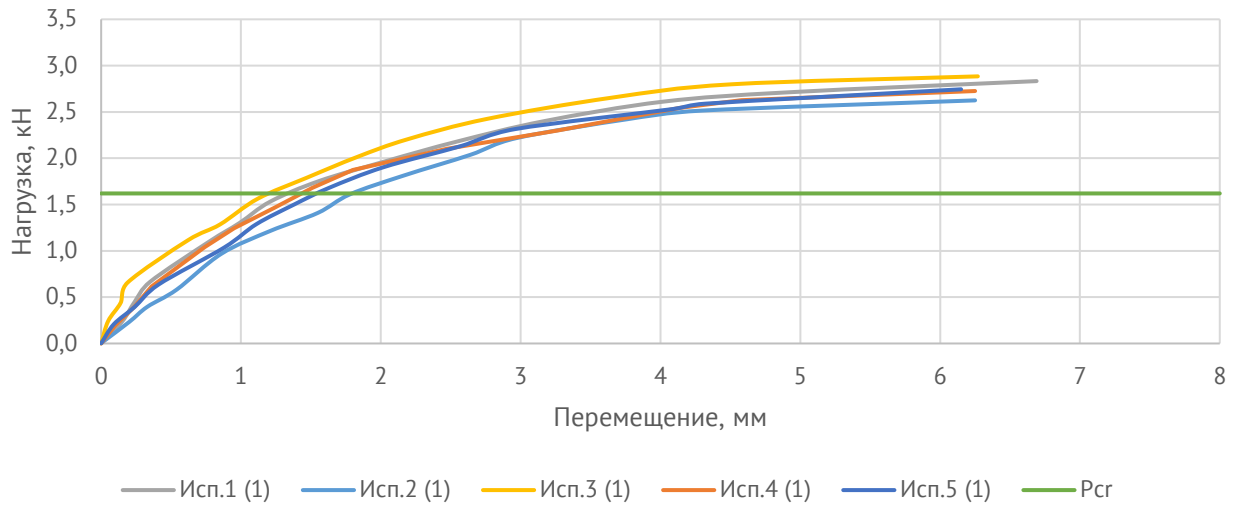
Исп. 5-3 (сжатие). Пр 1



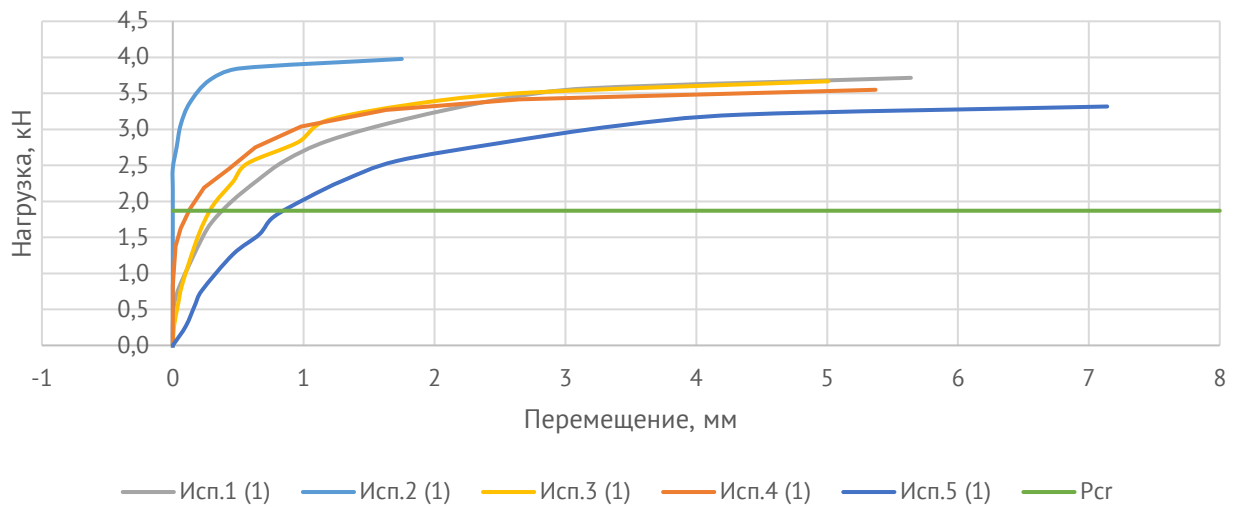
Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

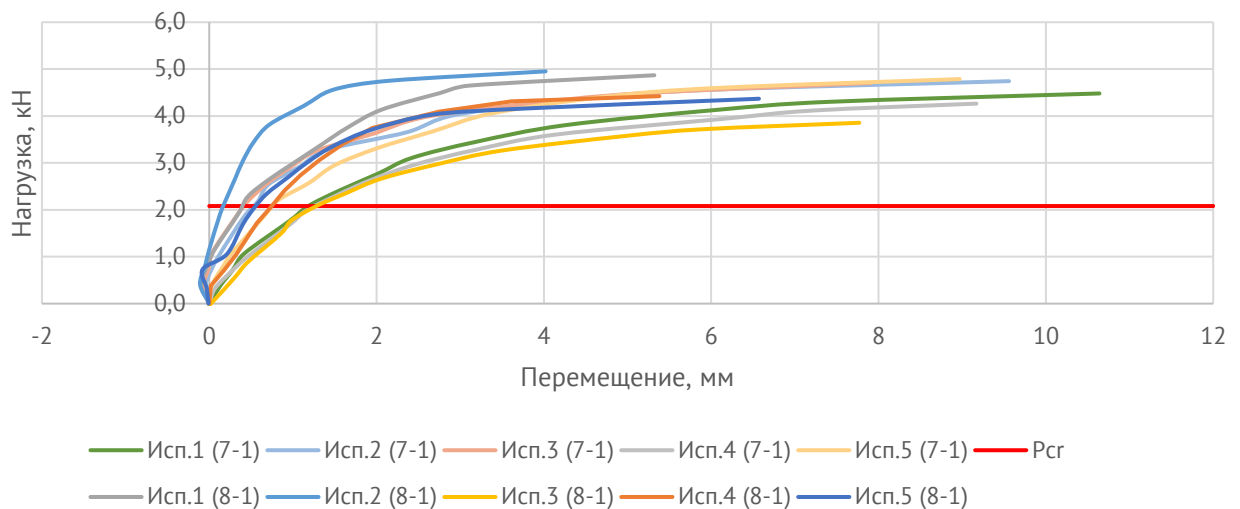
Исп. 5-5 (сжатие). Пр 1



Исп. 5-7 (сжатие). Пр 1



Исп. 7-1 и 8-1 (сжатие). Пр 1

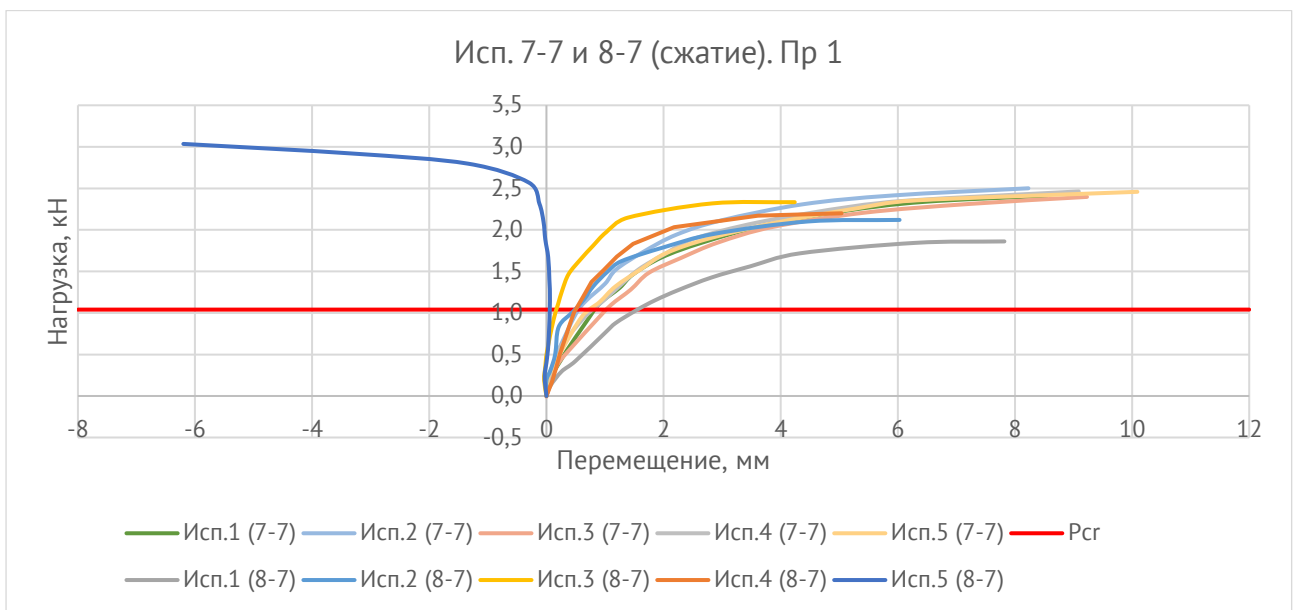
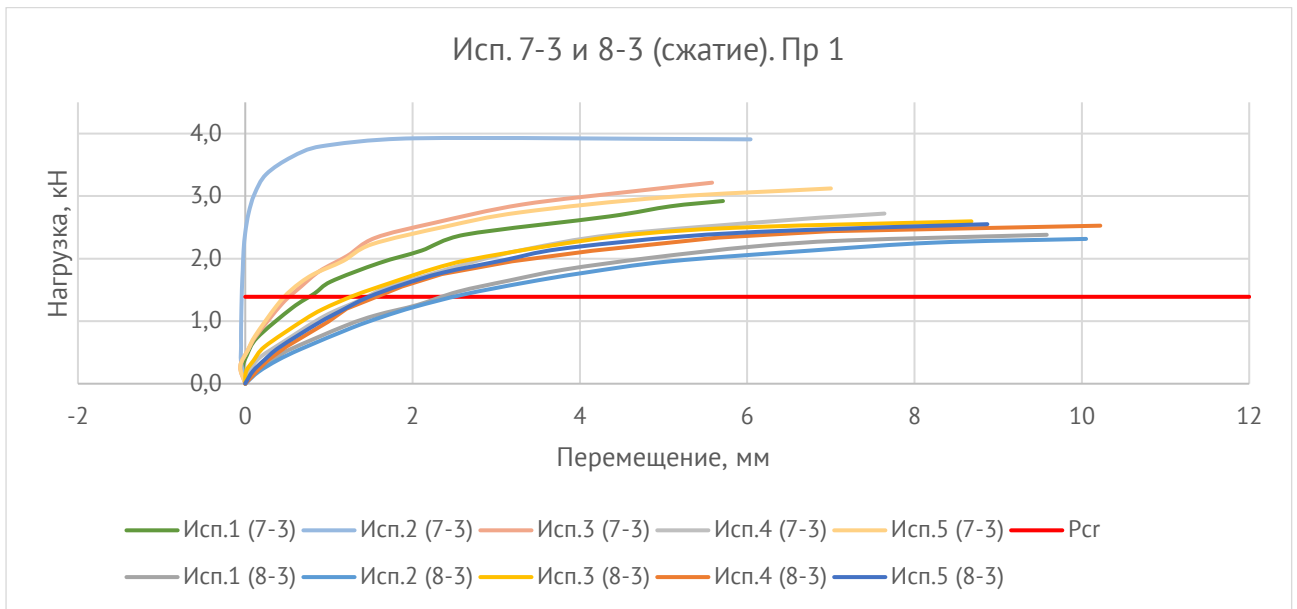


Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. №подл.

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата



### 7.3. Результаты статического расчета кронштейнов на изгиб

Статический расчёт элементов подсистемы НФС выполнен методом конечных элементов в варианте перемещений в нелинейной постановке.

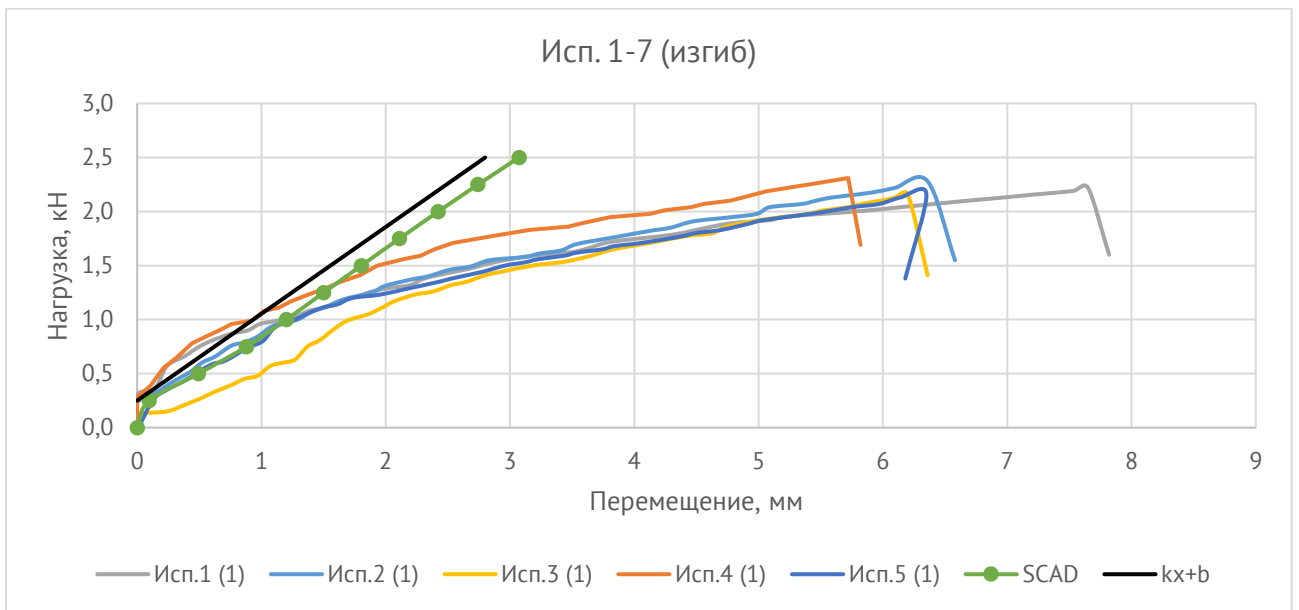
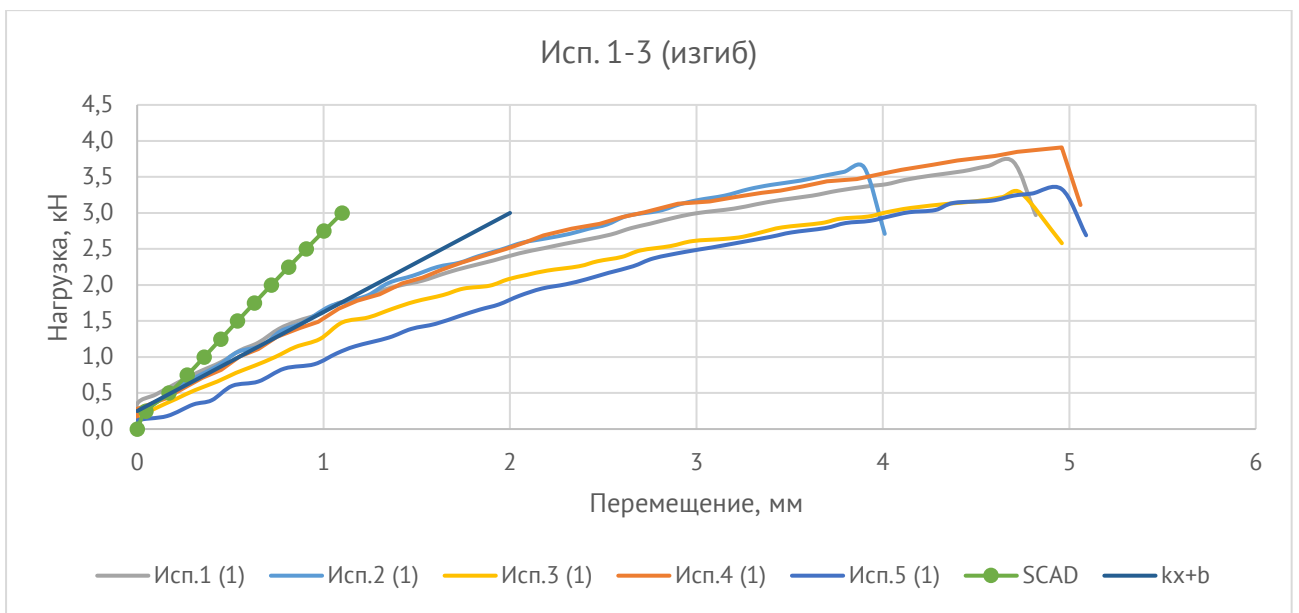
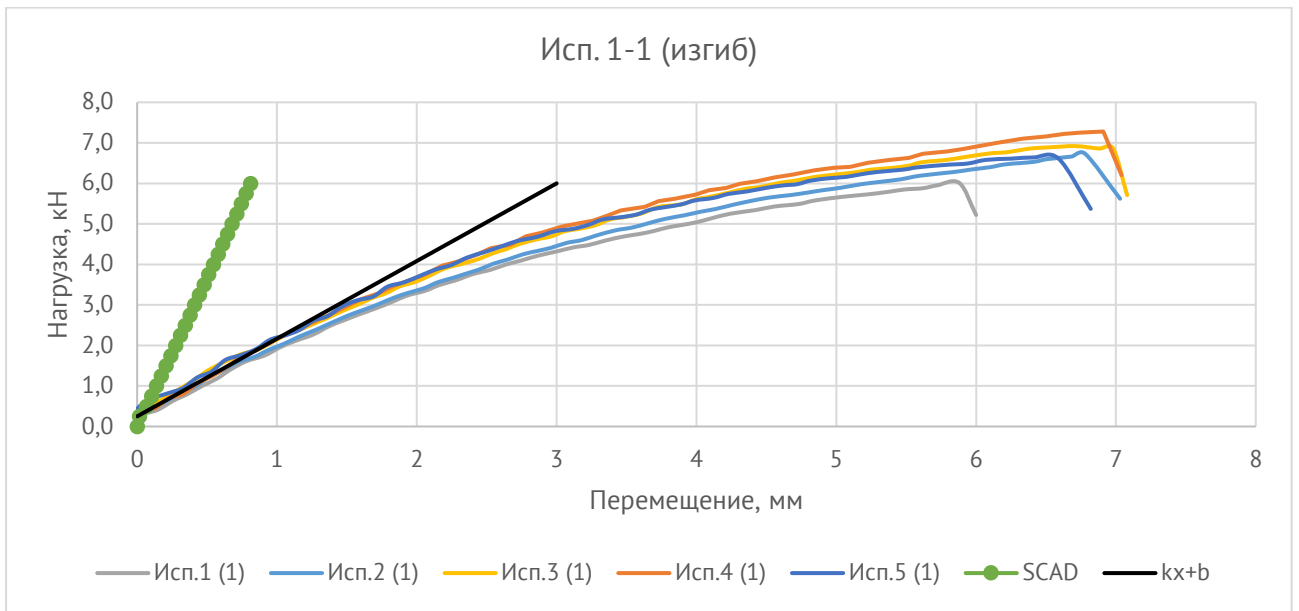
Результаты численного расчета сравнивались с результатами экспериментального исследования. На основании статического расчета в ПК SCAD Office получены значения предельных усилий на изгиб  $P_{scad}$ . Также, на основании визуальной оценки результатов экспериментального исследования получены значения предельной изгибающей силы  $P_{exp}$  с помощью полиномиальной линии тренда степени 2 и прямой  $kx + b$ .

Далее приведены графики сравнения результатов экспериментального и численного исследования.

Инв. №подл.	Взам. инв. №
	Подпись и дата

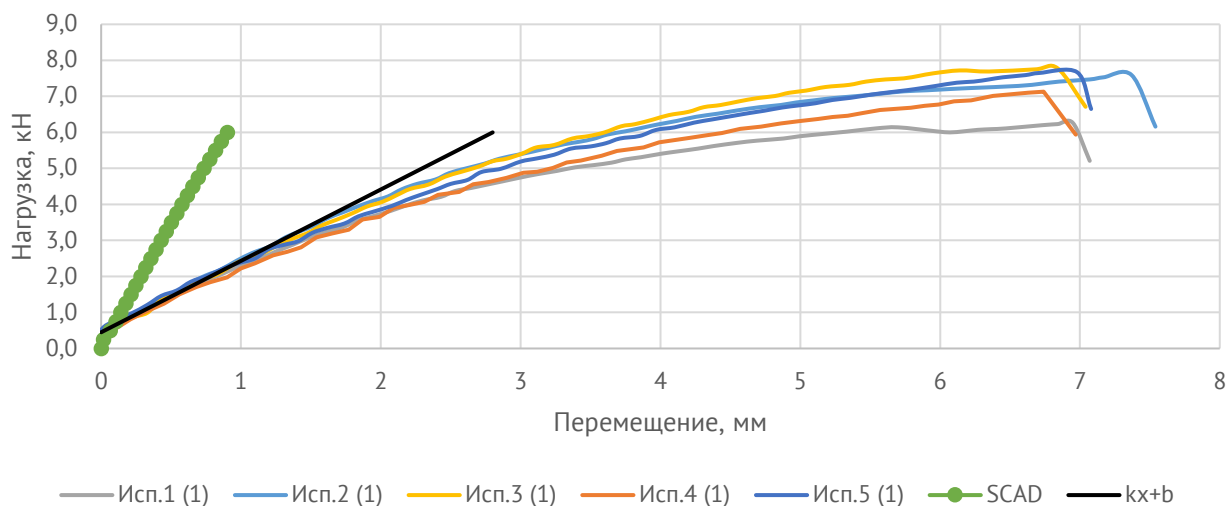
Изм.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата

Инв. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №
Изм.	Кол.	Лист
№доку	Подпись	Дата

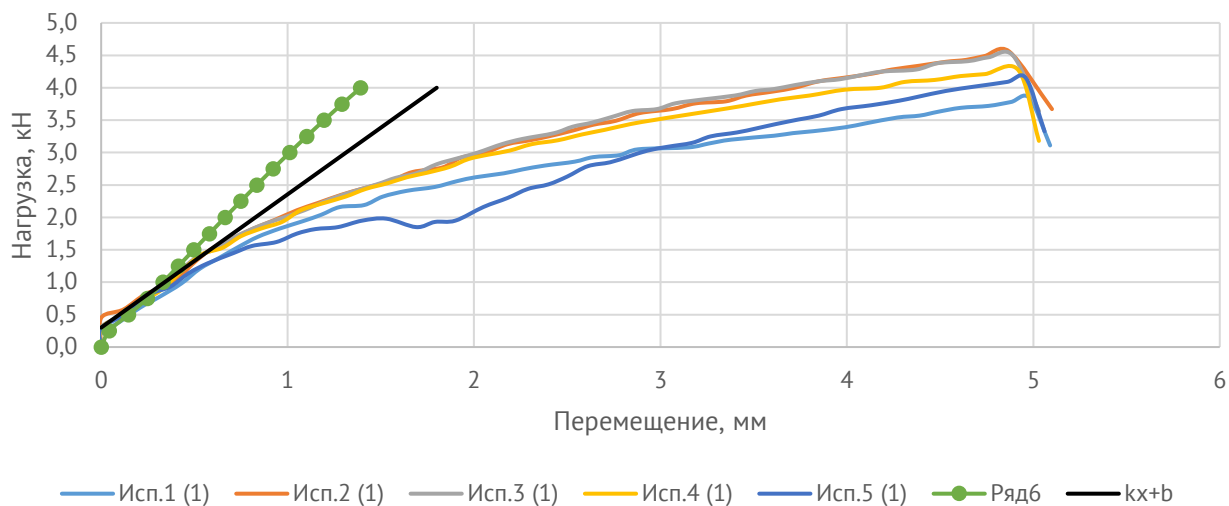




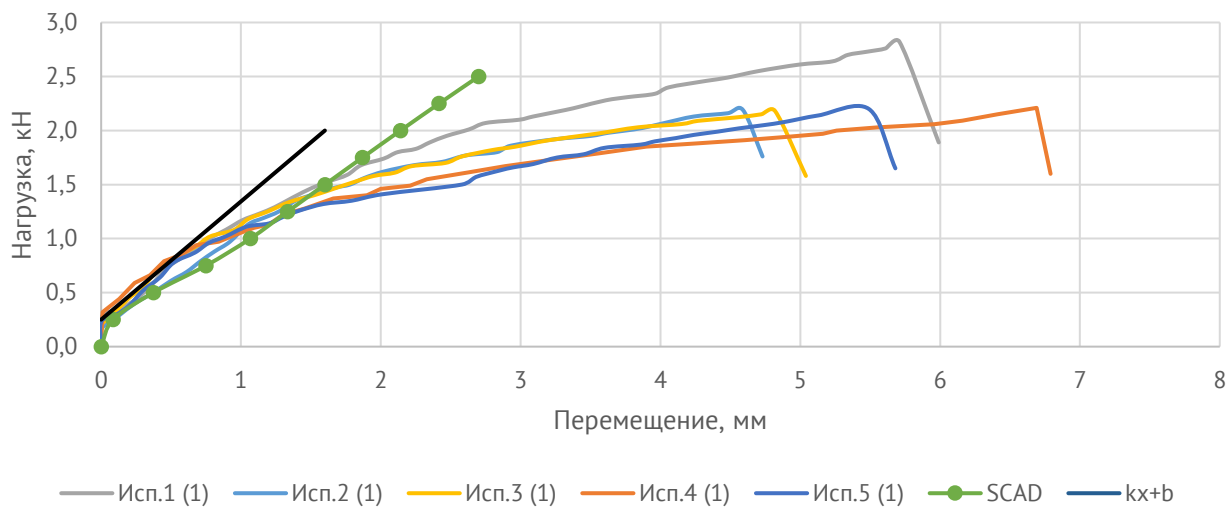
Исп. 2-1 (изгиб)



Исп. 2-3 (изгиб)



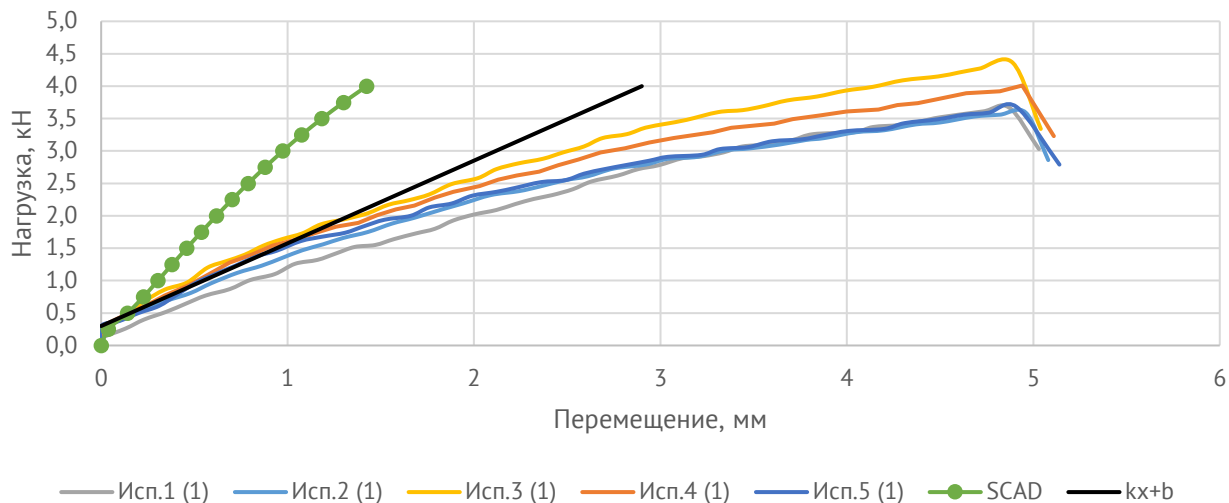
Исп. 2-7 (изгиб)



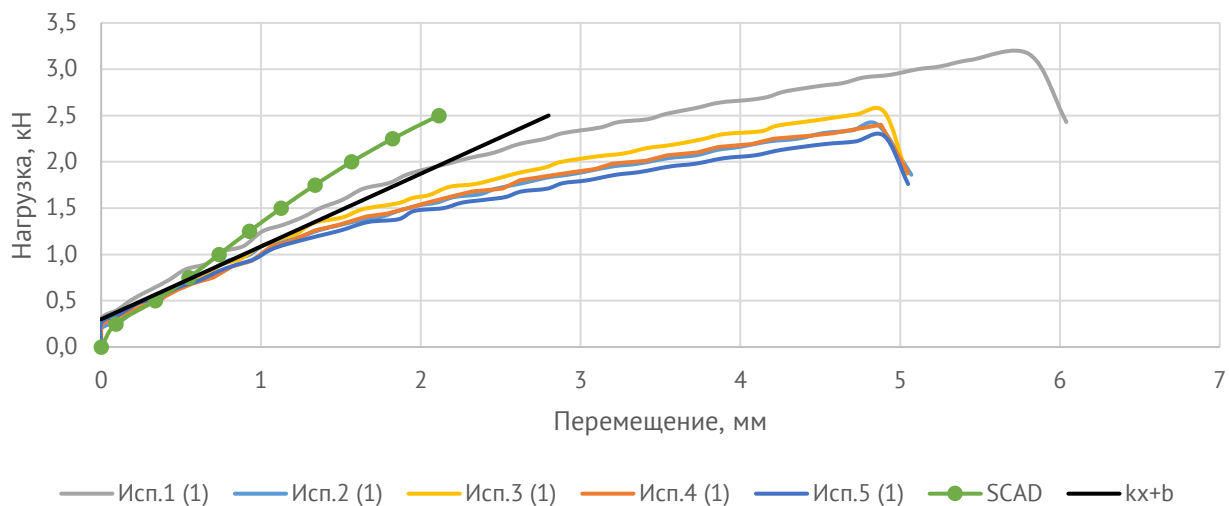
Инв. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	Нодок	Подпись	Дата

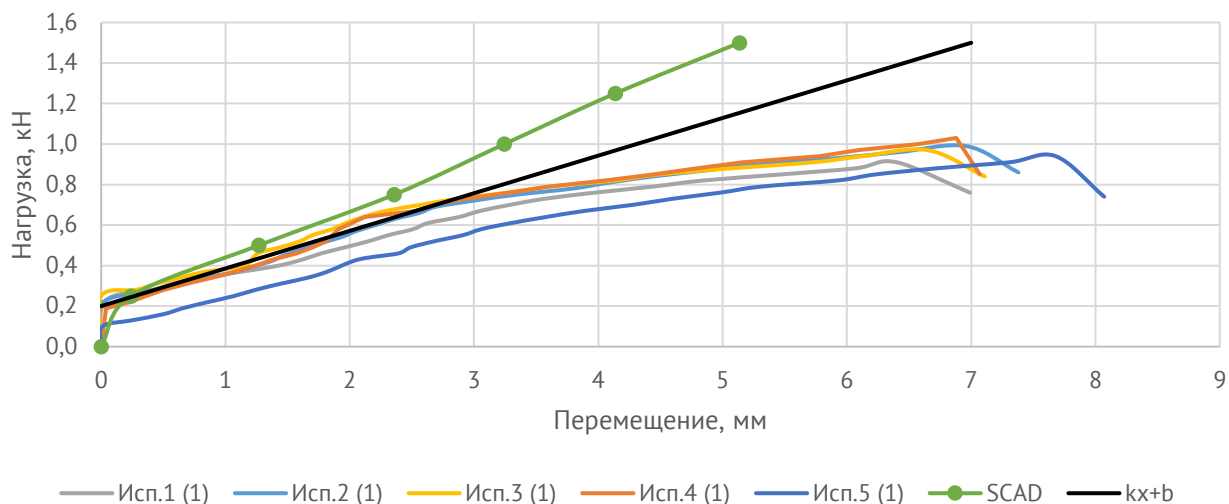
Исп. 4-1 (изгиб)



Исп. 4-3 (изгиб)

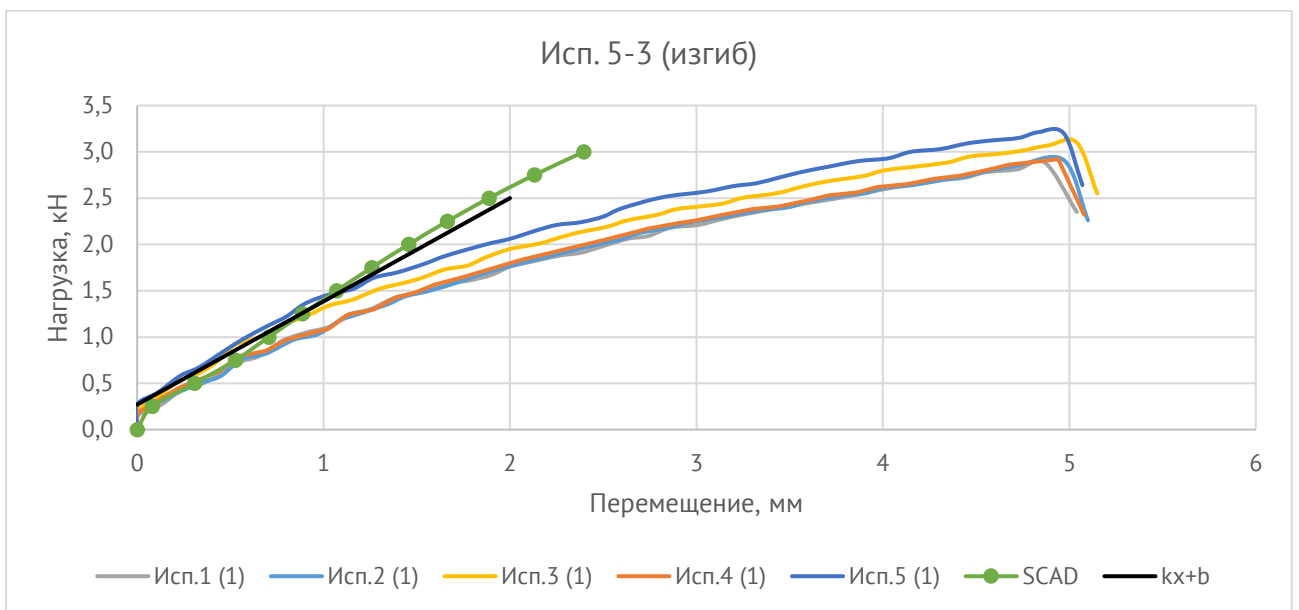
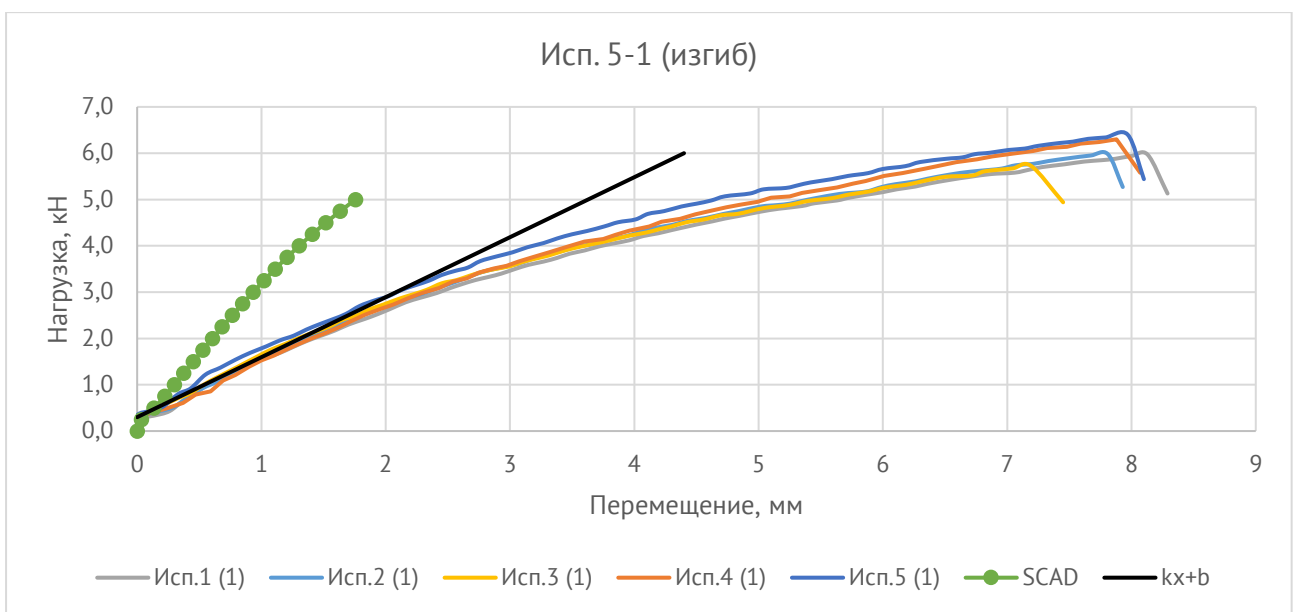
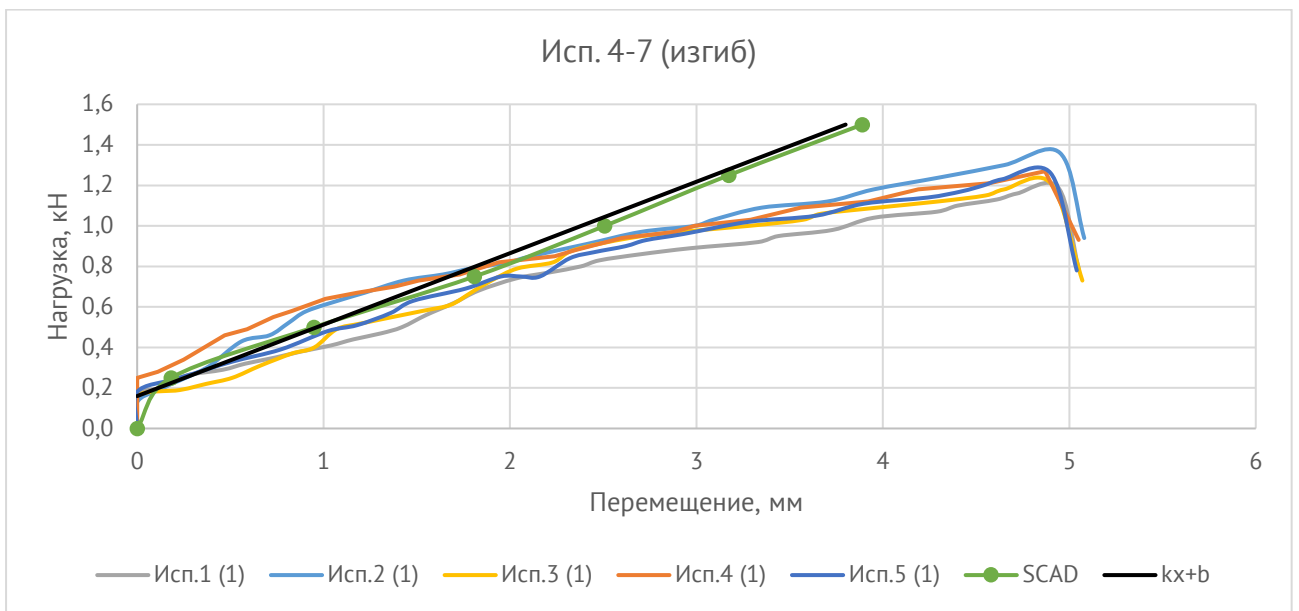


Исп. 4-5 (изгиб)



Инв. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

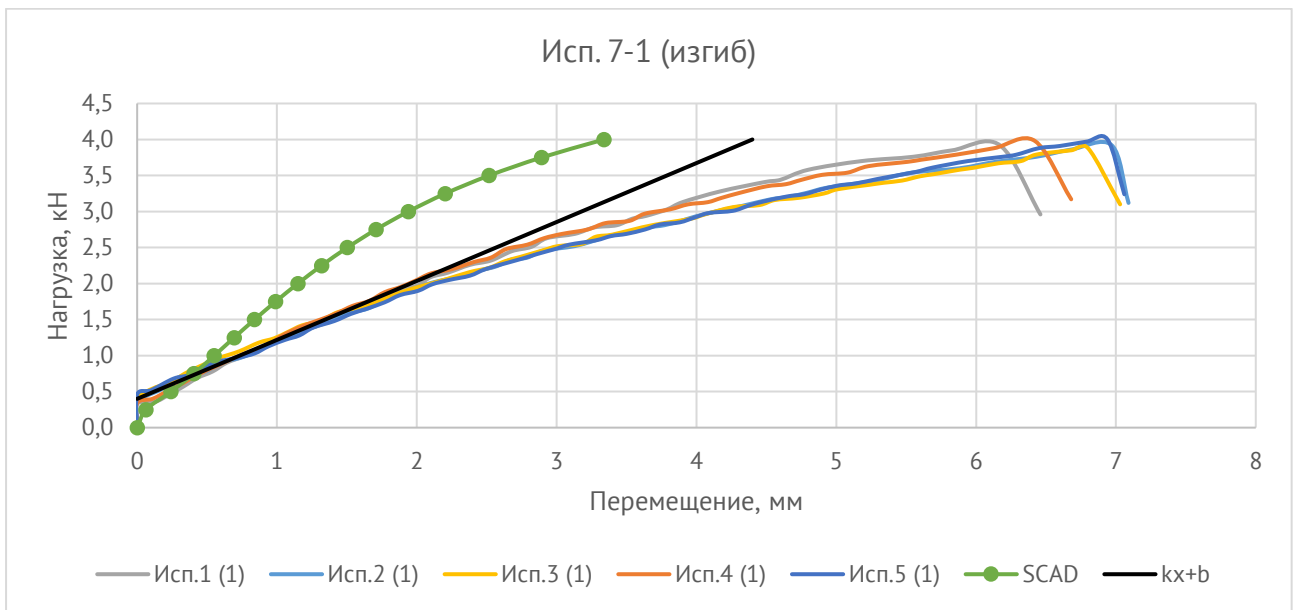
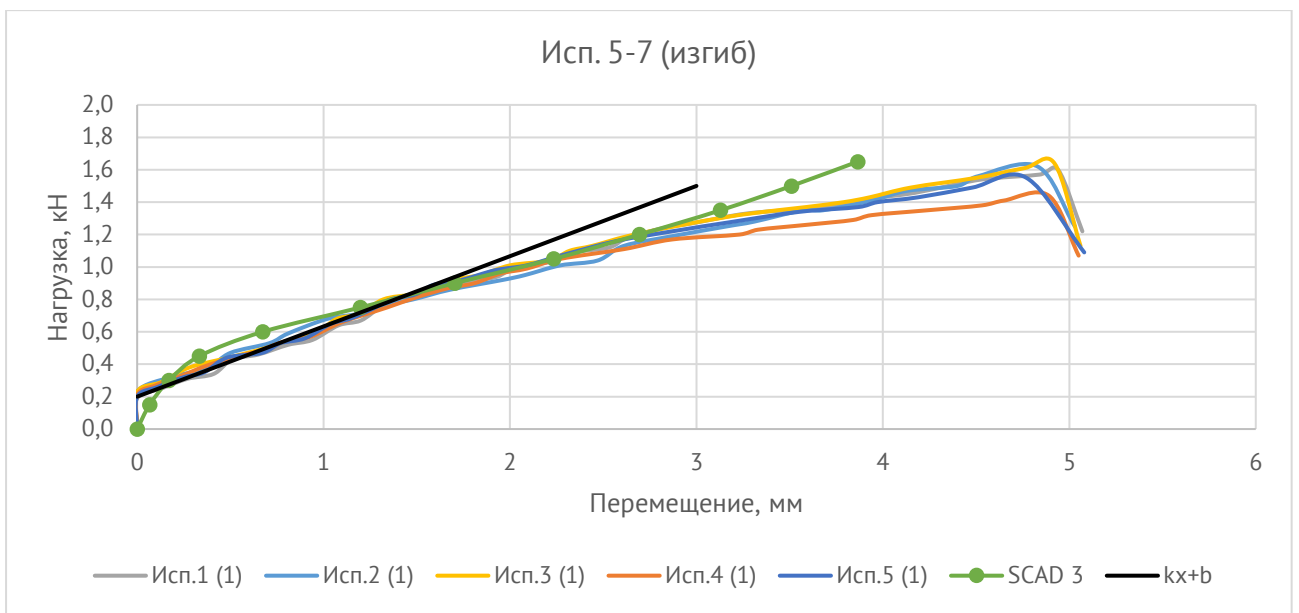
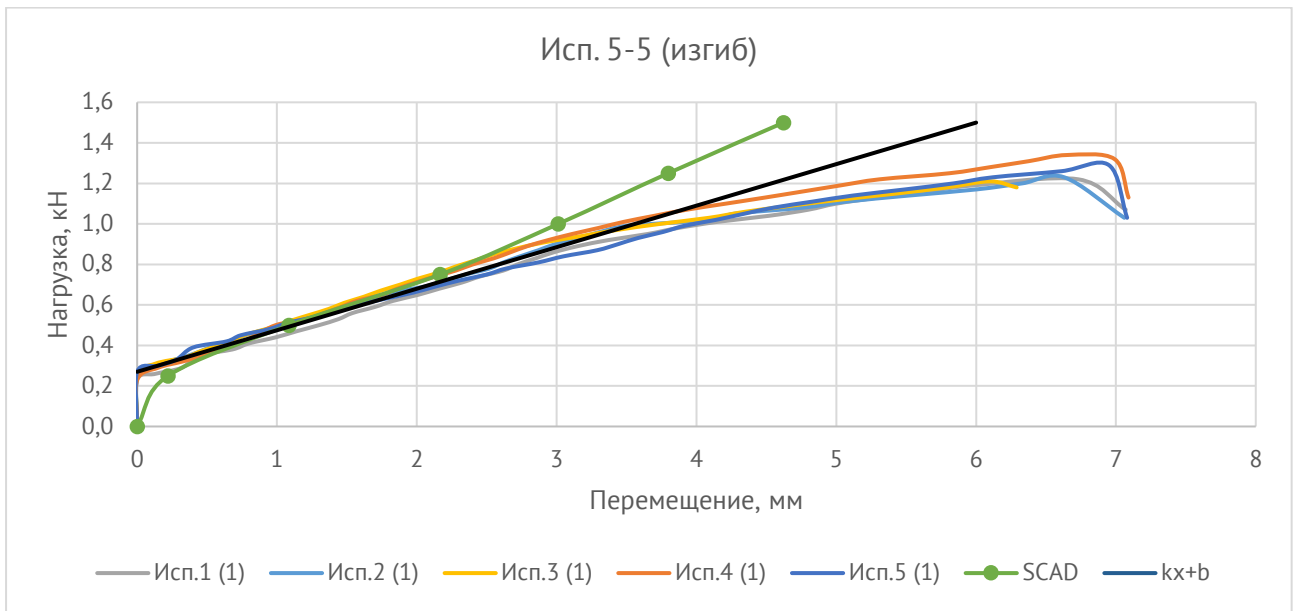
Изм.	Кол.	Лист	Нодок	Подпись	Дата



Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

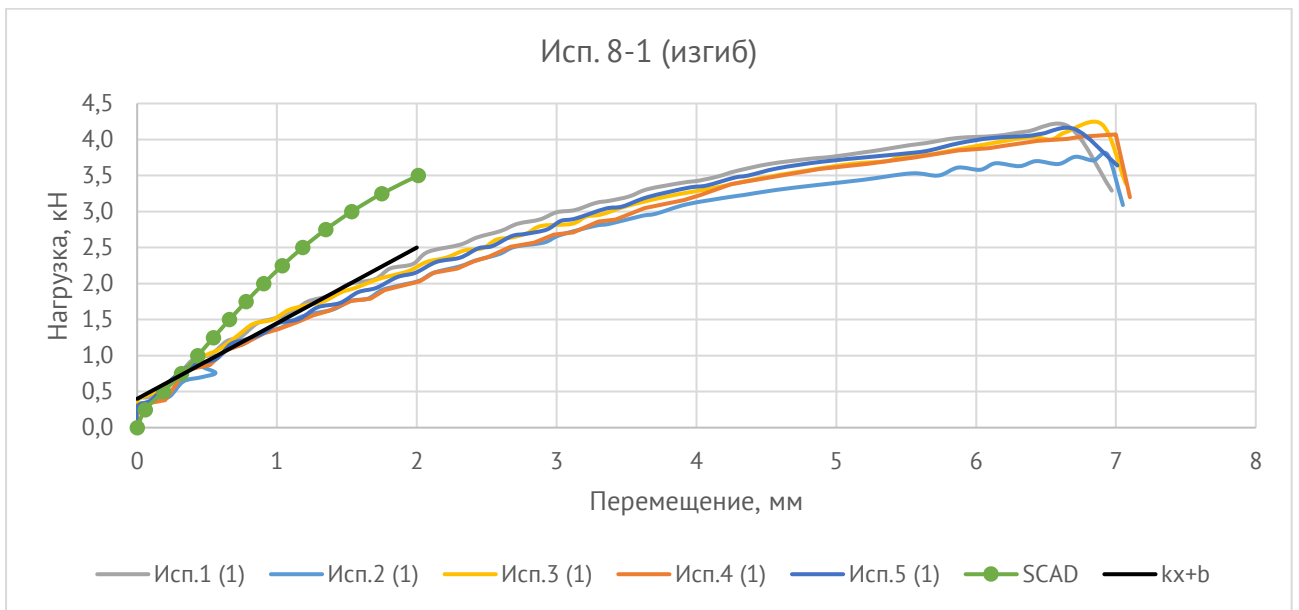
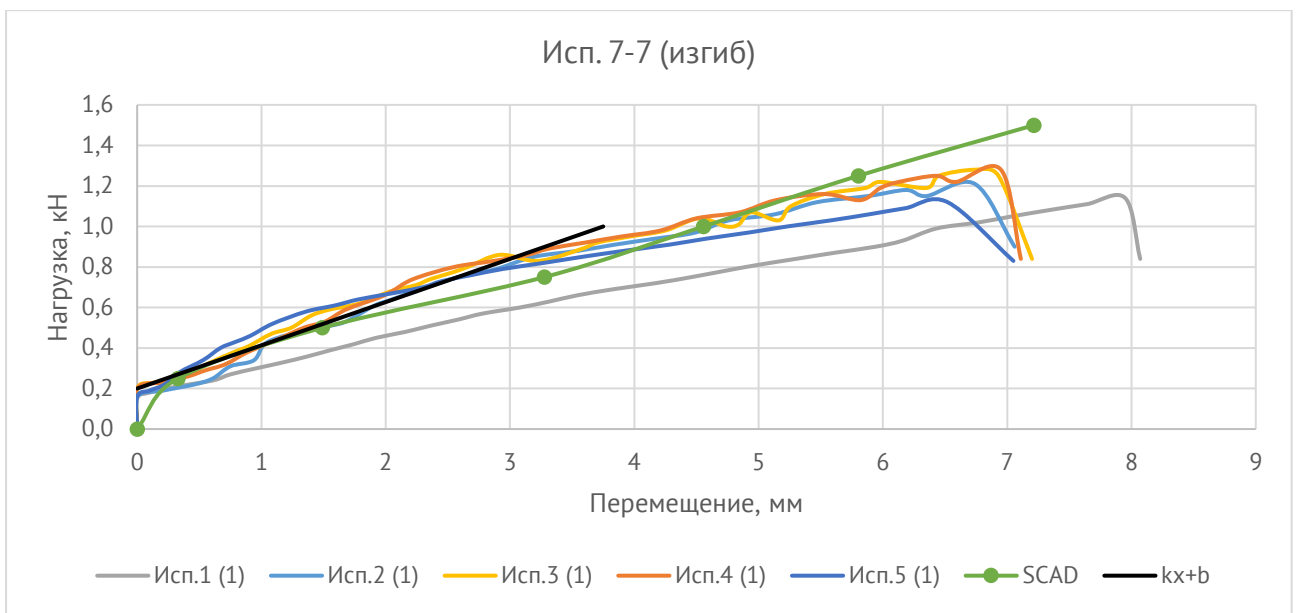
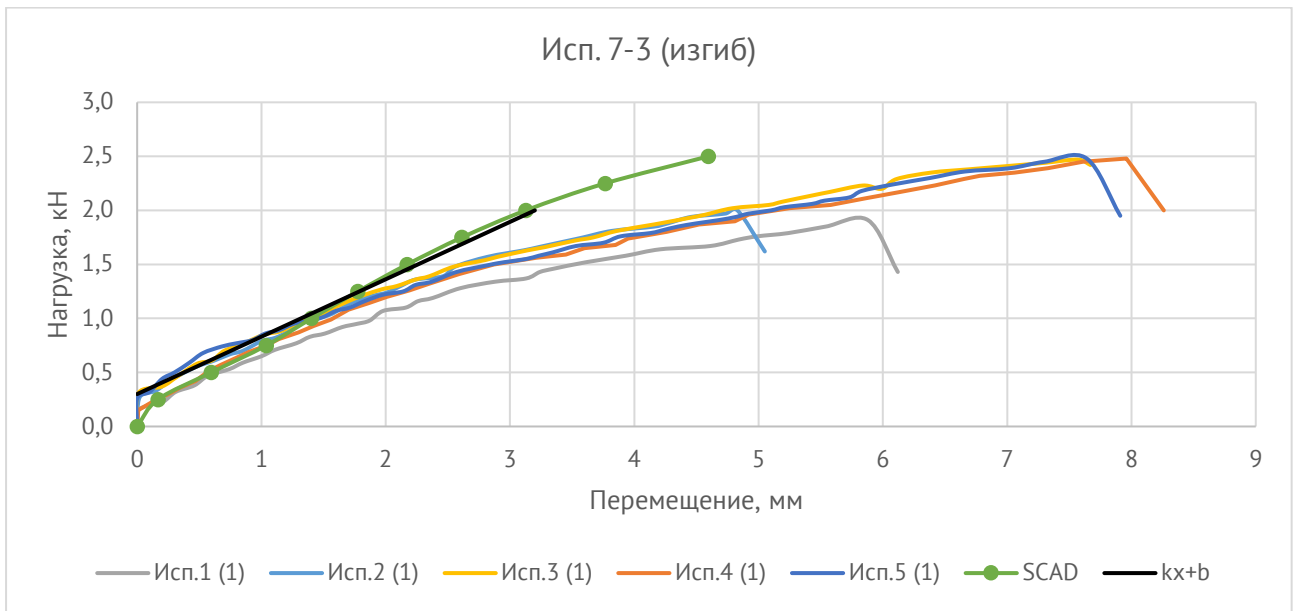
Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата	

Инв. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

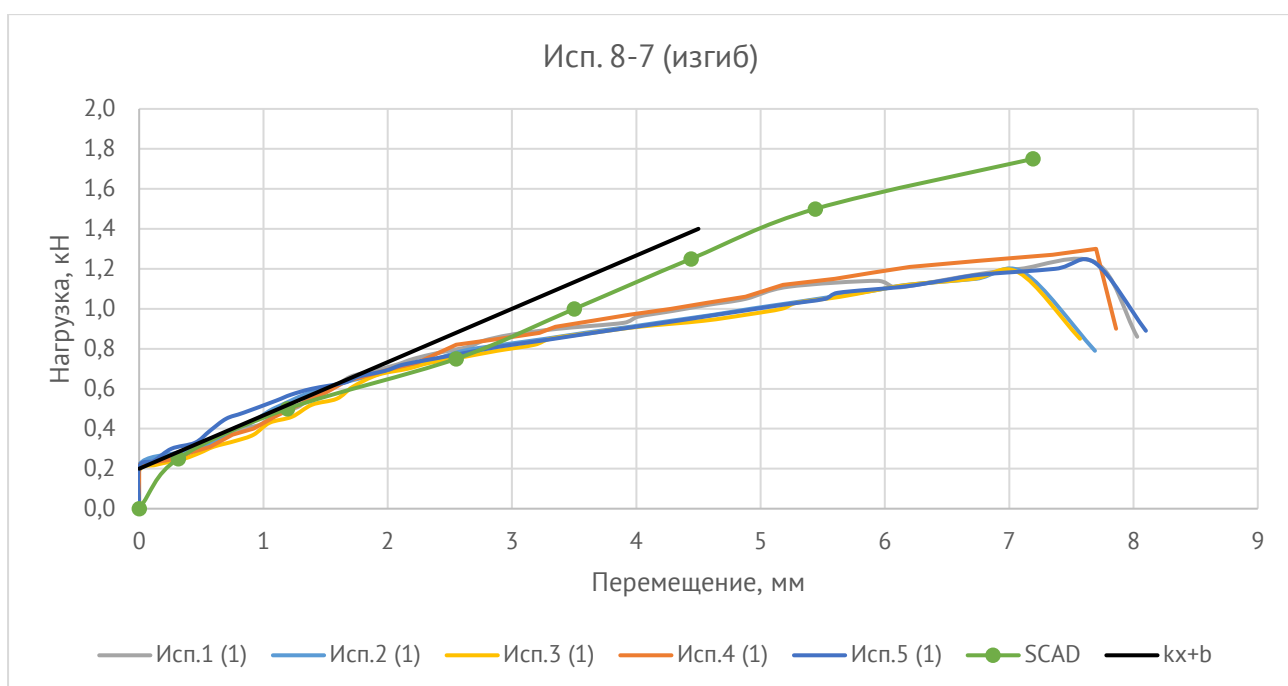
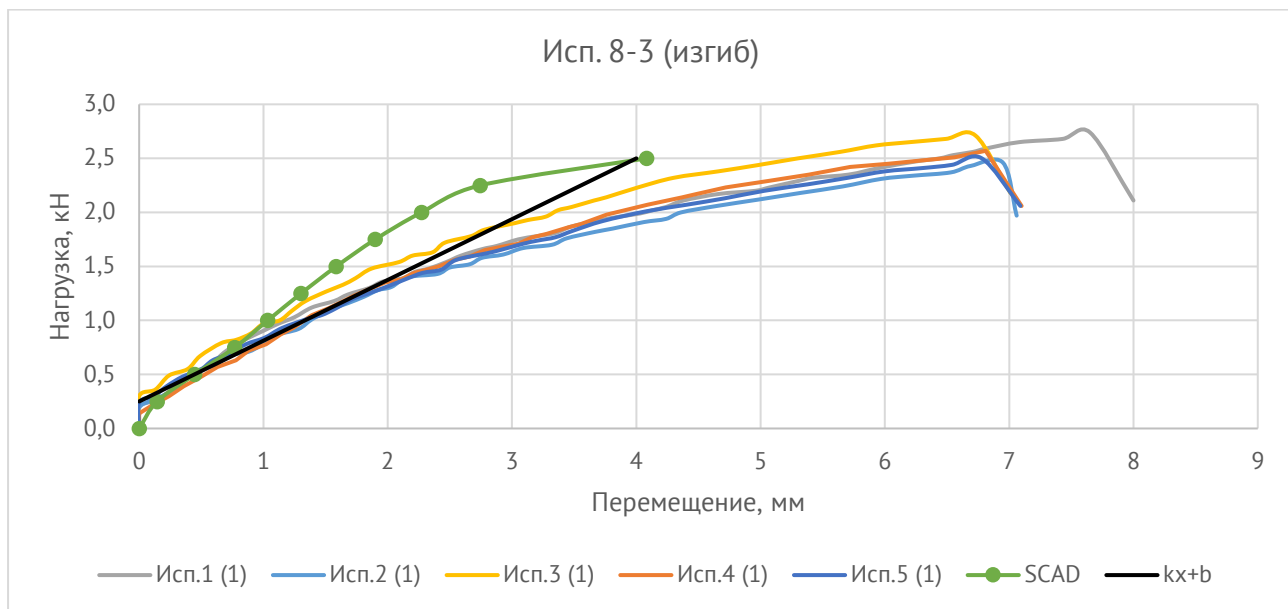


Изм.	Кол.	Лист	Нодок	Подпись	Дата

Инв. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №



Изм.	Кол.	Лист	№доку	Подпись	Дата



Результаты численного моделирования в ПК SCAD Office показывают хорошую сходимость с результатами экспериментального исследования, в особенности:

- при начальных значениях нагружения для всех серий испытаний;
- для серий испытаний с одной точкой крепления к основанию;
- для серий испытаний с двумя точками крепления к основанию и с высотой кронштейна 100 мм.

Численные модели алюминиевых кронштейнов с высотой 150 мм имеют большую жесткость по сравнению с экспериментальными исследованиями, что может быть обусловлено фактической податливостью крепления кронштейнов к основанию.

Результаты расчетов сведены в Таблица 4.

Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. №подл.	

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

Таблица 4. Предельная изгибающая нагрузка

Серия исп.	Вылет $L$ , мм	Высота $h$ , мм	Ширина основания $b$ , мм	$d$ отверстия основания, мм	$P_{exp}$ , кН	$P_{scad}$ , кН
1	2	3	4	5	6	7
1-1	120	150	40	11	2,2	1,71
1-2		125			-	1,35
1-3		100			1,5	1,13
1-4		75			-	0,60
1-5		65			-	0,53
1-6		150			-	1,80
1-7		75			0,8	0,60
2-1	120	150	44	11	2,6	1,95
2-2		125			-	1,65
2-3		100			1,8	1,35
2-4		75			-	0,75
2-5		65			-	0,60
2-6		150			-	1,95
2-7		75			1,0	0,75
3-1	120	150	44	9	-	1,88
3-2		125			-	1,58
3-3		100			-	1,13
3-4		75			-	0,75
3-5		65			-	0,60
3-6		150			-	1,95
3-7		75			-	0,75
4-1	180	150	40	11	1,9	1,43
4-2		125			-	1,43
4-3		100			1,4	1,05
4-4		75			-	0,53
4-5		65			0,6	0,45
4-6		150			-	1,65
4-7		75			0,7	0,53
5-1	180	150	44	11	1,8	1,35
5-2		125			-	1,35
5-3		100			1,3	0,98
5-4		75			-	0,60
5-5		65			0,6	0,45
5-6		150			-	1,65
5-7		75			0,8	0,60

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. №подл.

Изм.	Кол.	Лист	Недок	Подпись	Дата

Экспертное заключение № 1-23/01

Лист

30

Продолжение Табл. 4

Серия исп.	Вылет $L$ , мм	Высота $h$ , мм	Ширина основания $b$ , мм	$d$ отверстия основания, мм	$P_{exp}$ , кН	$P_{scad}$ , кН
1	2	3	4	5	6	7
6-1	180	150	44	9	-	1,50
6-2		125			-	1,28
6-3		100			-	1,13
6-4		75			-	0,68
6-5		65			-	0,53
6-6		150			-	1,50
6-7		75			-	0,68
7-1	270	150	44	11	1,8	1,35
7-2		125			-	0,98
7-3		100			1,1	0,83
7-4		75			-	0,45
7-5		65			-	0,45
7-6		150			-	1,50
7-7		75			0,7	0,53
8-1	270	150	44	9	1,9	1,43
8-2		125			-	1,05
8-3		100			1,2	0,90
8-4		75			-	0,60
8-5		65			-	0,53
8-6		150			-	1,80
8-7		75			0,7	0,53

Полученные расчетные значения предельной изгибающей силы, при которой возникают пластические деформации в районе крепления алюминиевого кронштейна к основанию получены для расчетного сопротивления алюминиевого сплава 107 МПа с учетом концентраторов напряжений.

На Рис. 19 и Рис. 20 показано распределение напряжений на примере кронштейна 120x150x40 d11 (1-1) при значении изгибающей нагрузки в 1,75 кН.

Изн. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

Изн.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата



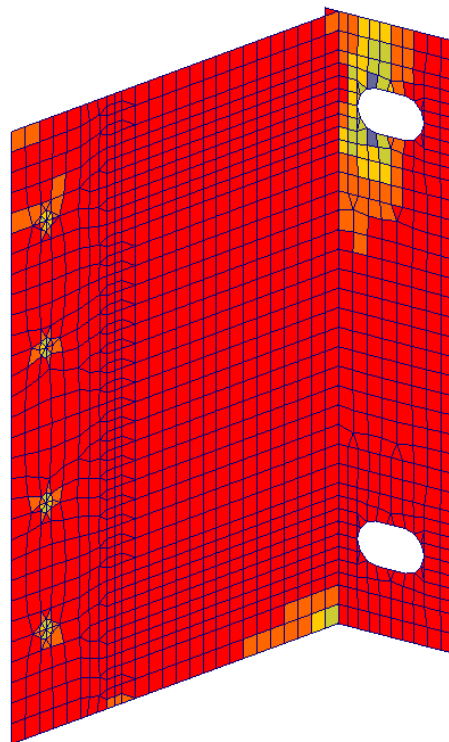
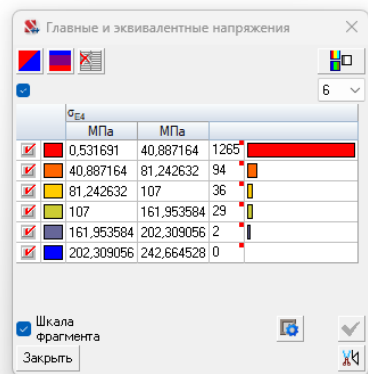


Рис. 19. Распределение эквивалентных напряжений на внутреннем слое алюминиевого кронштейна 120x150x40 d11, МПа

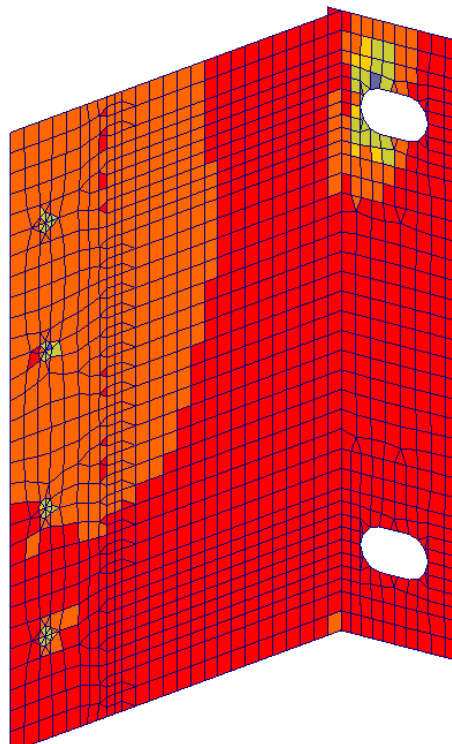
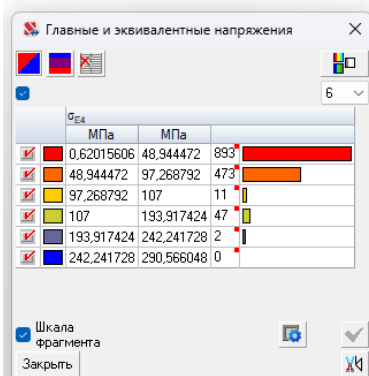


Рис. 20. Распределение эквивалентных напряжений на внешнем слое алюминиевого кронштейна 120x150x40 d11, МПа

На Рис. 21 и Рис. 22 показано распределение напряжений на примере кронштейна 270x150x44 d9 (8-1) при значении изгибающей нагрузки в 1,5 кН.

Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. №подл.	

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

Главные и эквивалентные напряж...			
σ <sub>эк</sub>			
МПа	МПа	МПа	
<input checked="" type="checkbox"/>	0,14	58,88	2563
<input checked="" type="checkbox"/>	58,88	107	141
<input checked="" type="checkbox"/>	107	176,38	43
<input checked="" type="checkbox"/>	176,38	235,13	16
<input checked="" type="checkbox"/>	235,13	293,88	7
<input checked="" type="checkbox"/>	293,88	352,62	4

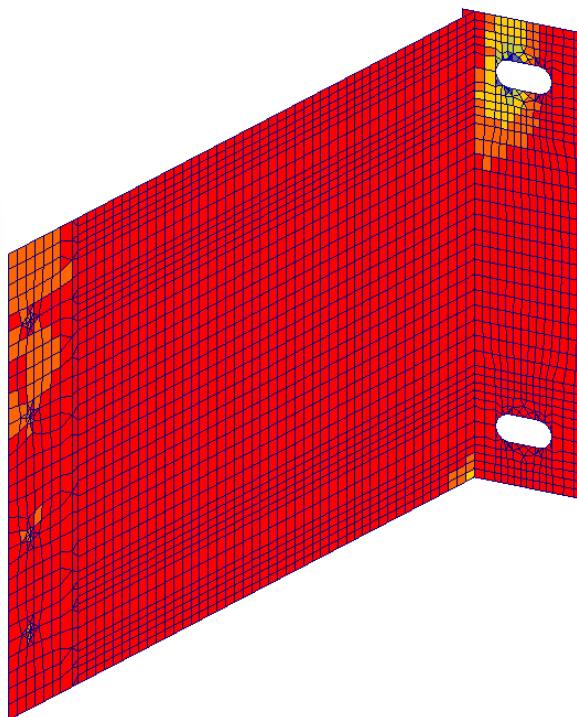


Рис. 21. Распределение эквивалентных напряжений на внутреннем слое алюминиевого кронштейна 270x150x44 d9, МПа

Главные и эквивалентные напряж...			
σ <sub>эк</sub>			
МПа	МПа	МПа	
<input checked="" type="checkbox"/>	0,07	59,4	2070
<input checked="" type="checkbox"/>	59,4	107	612
<input checked="" type="checkbox"/>	107	178,07	65
<input checked="" type="checkbox"/>	178,07	237,4	16
<input checked="" type="checkbox"/>	237,4	296,74	7
<input checked="" type="checkbox"/>	296,74	356,07	4

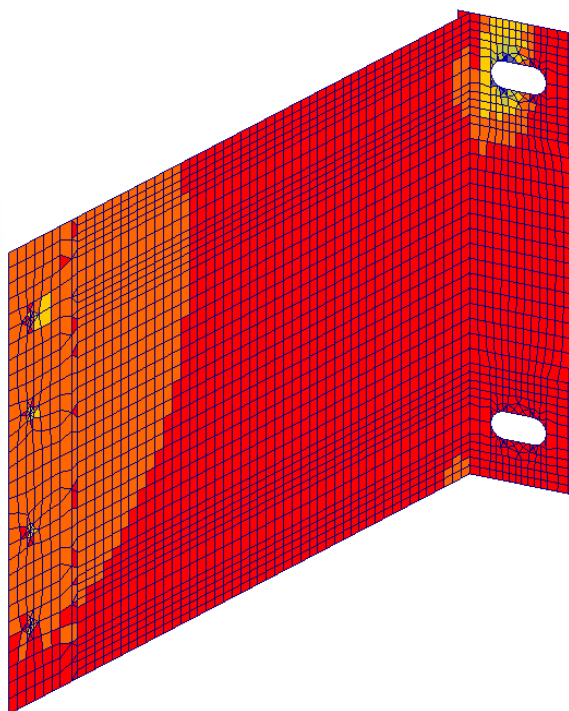


Рис. 22. Распределение эквивалентных напряжений на внешнем слое алюминиевого кронштейна 270x150x44 d9, МПа

На Рис. 23 и Рис. 24 показано распределение напряжений на примере кронштейна 180x75x44 d11 (5-7) при значении изгибающей нагрузки в 0,75 кН.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

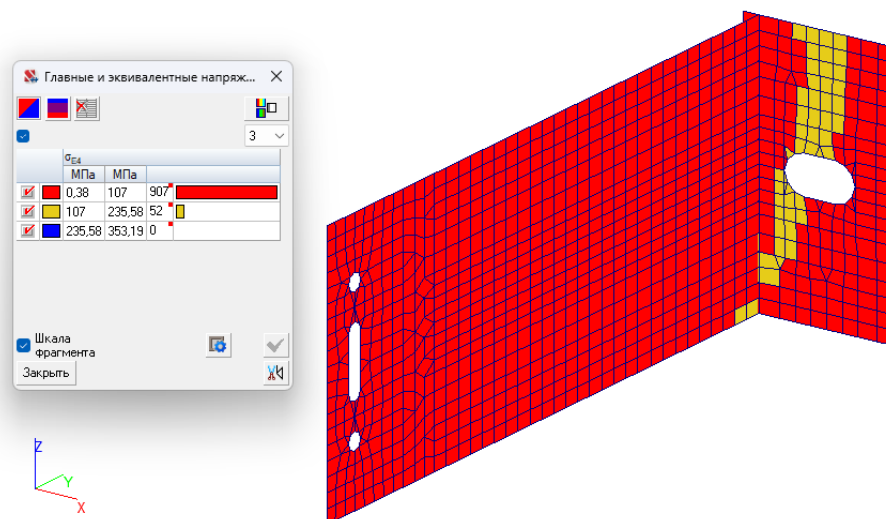


Рис. 23. Распределение эквивалентных напряжений на внутреннем слое алюминиевого кронштейна 180x75x44 d11, МПа

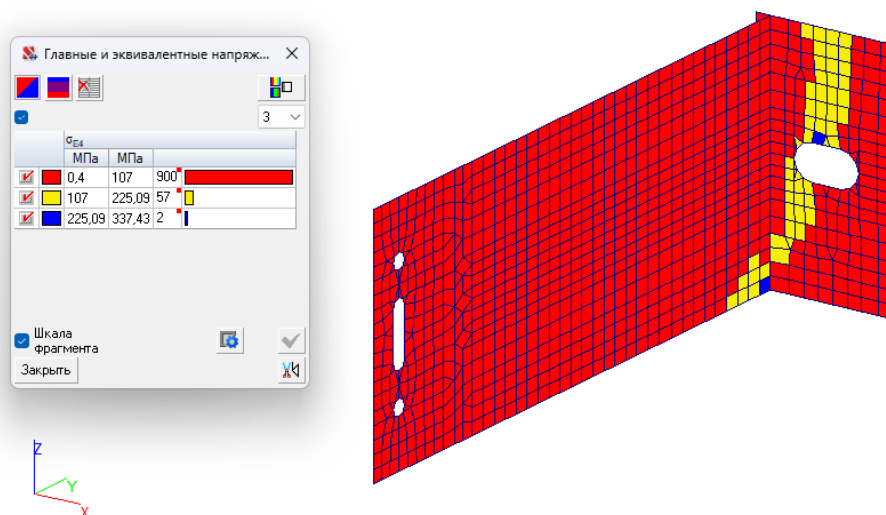


Рис. 24. Распределение эквивалентных напряжений на внешнем слое алюминиевого кронштейна 180x75x44 d11, МПа

#### 7.4. Результаты статического расчета кронштейнов на отрыв

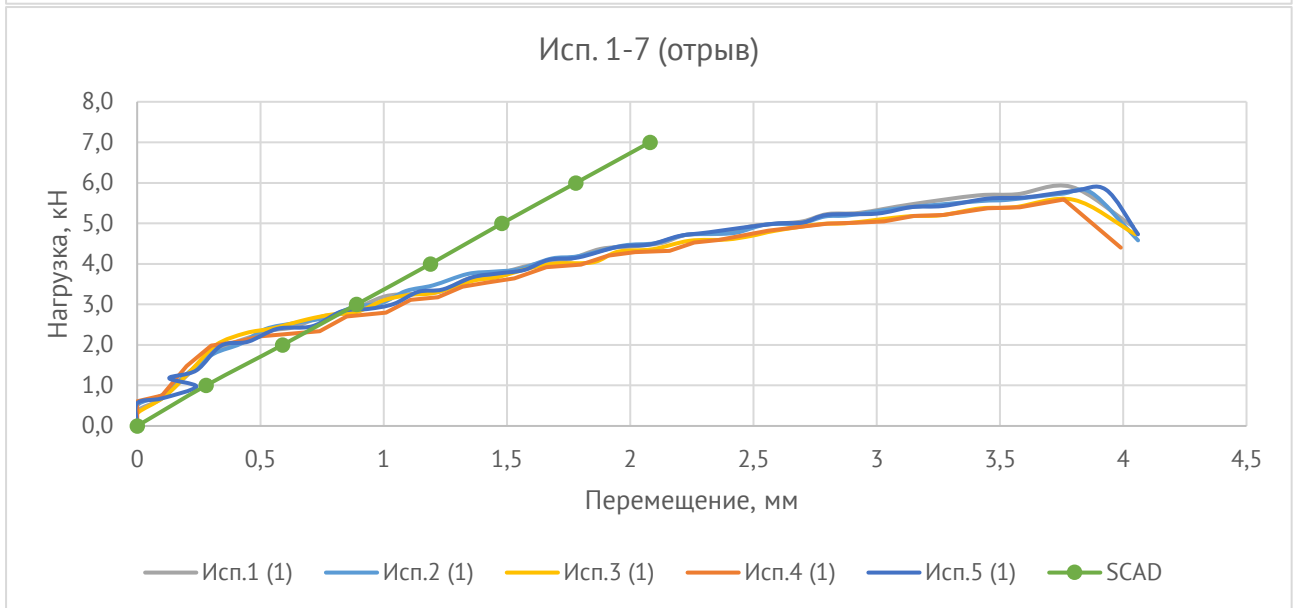
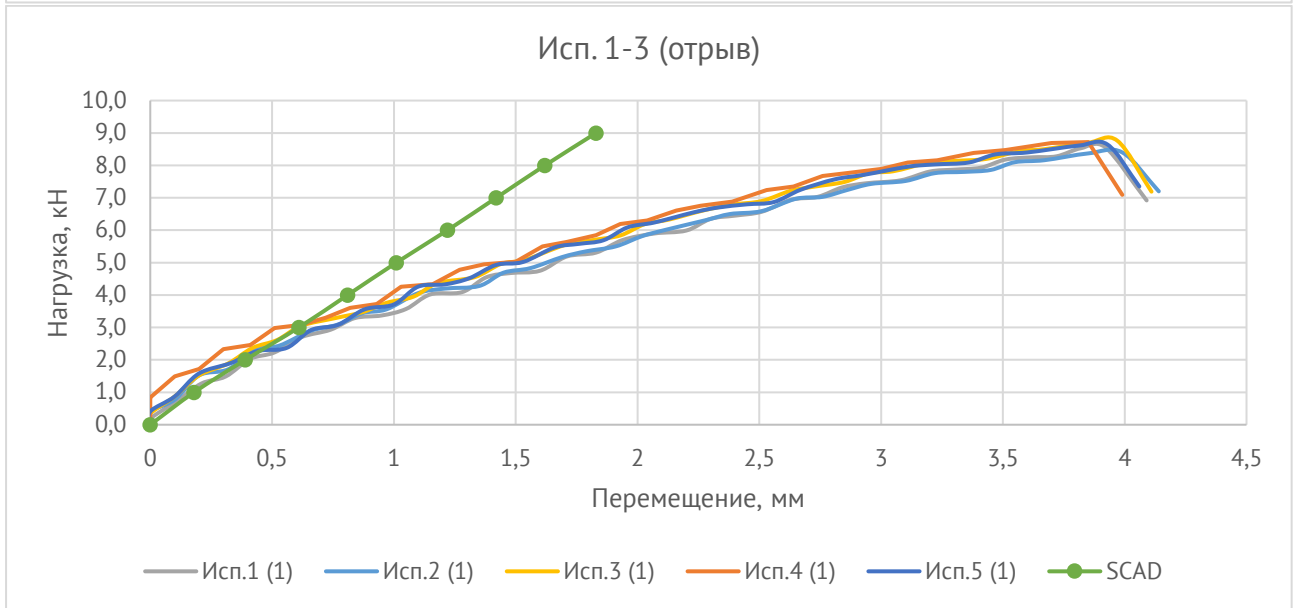
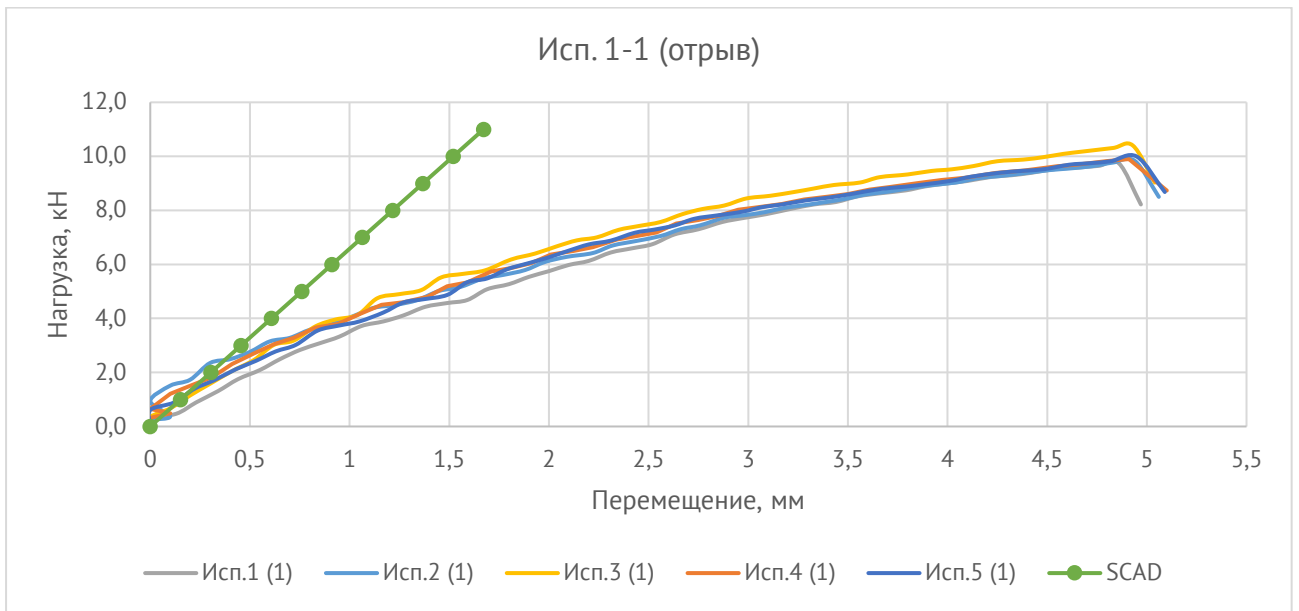
Статический расчёт элементов подсистемы НФС выполнен методом конечных элементов в варианте перемещений в нелинейной постановке.

Результаты численного расчета сравнивались с результатами экспериментального исследования. На основании статического расчета в ПК SCAD Office получены значения предельных усилий на отрыв  $P_{scad}$ .

Далее приведены графики сравнения результатов экспериментального и численного исследования.

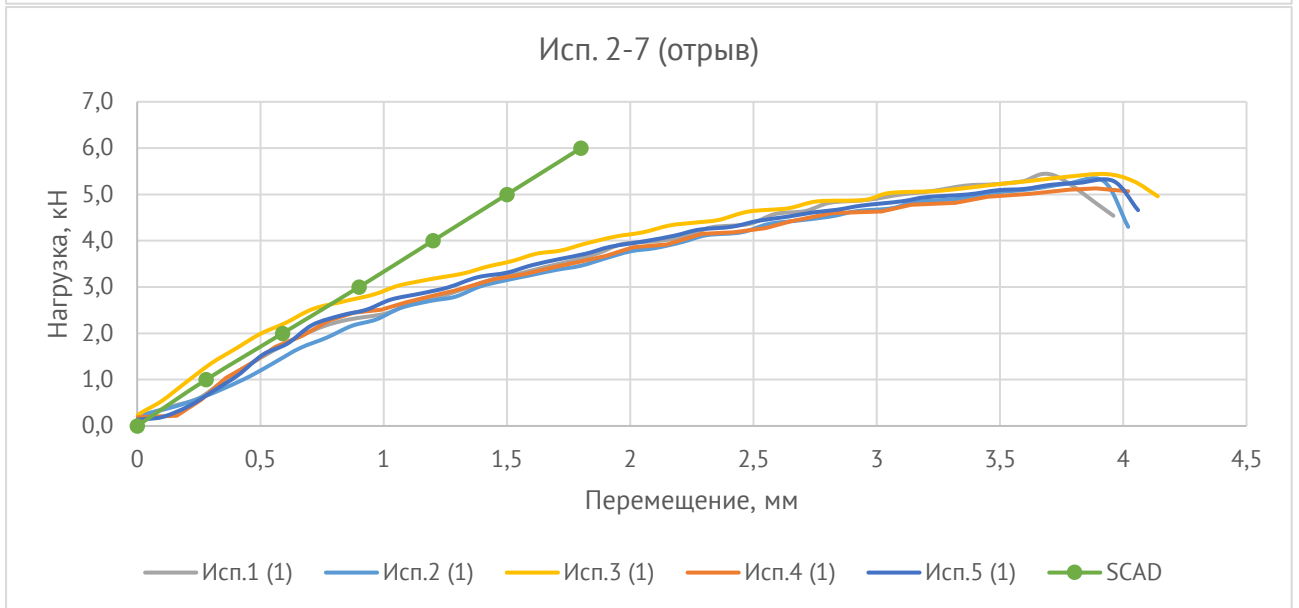
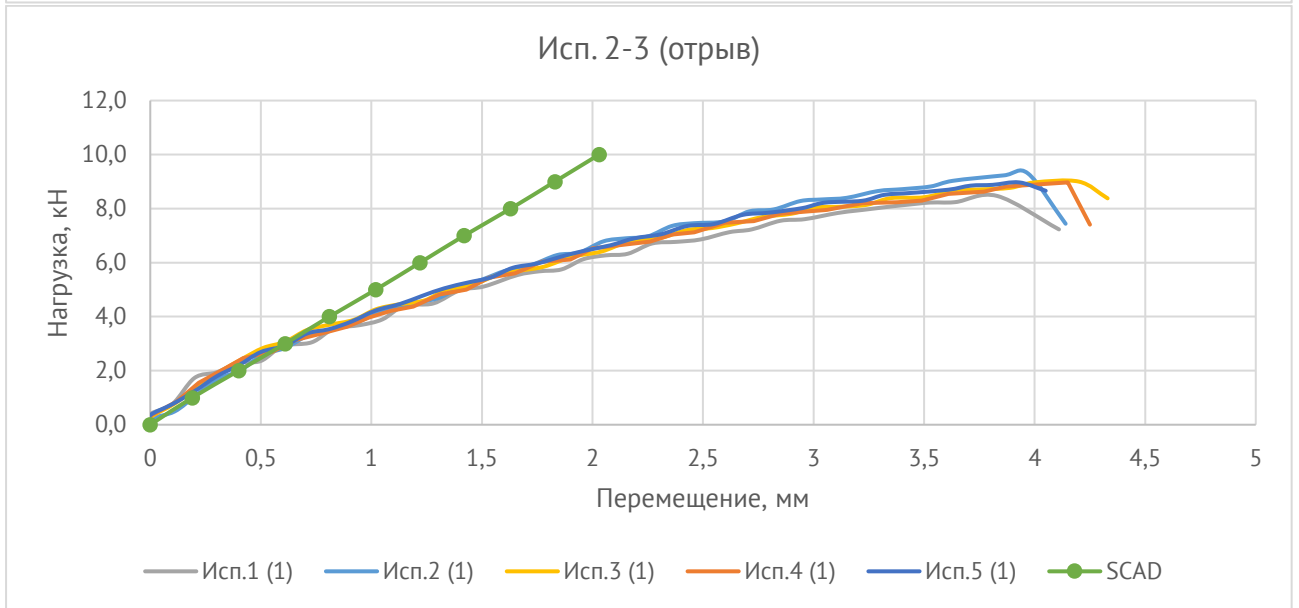
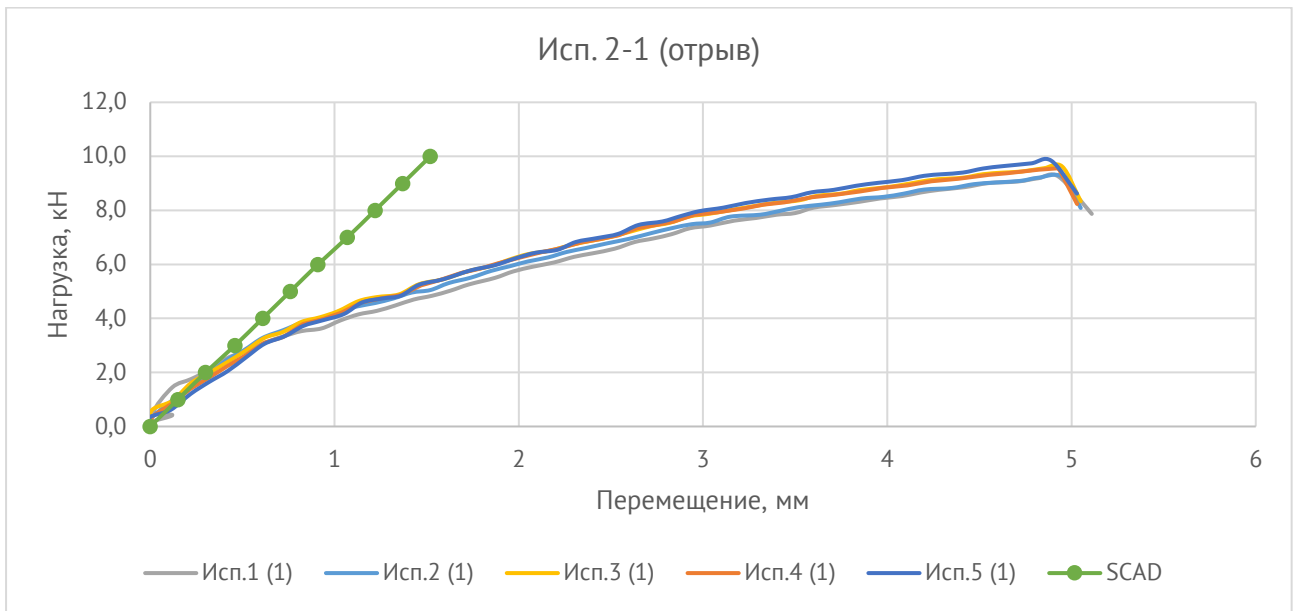
Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. №подл.	

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата



Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

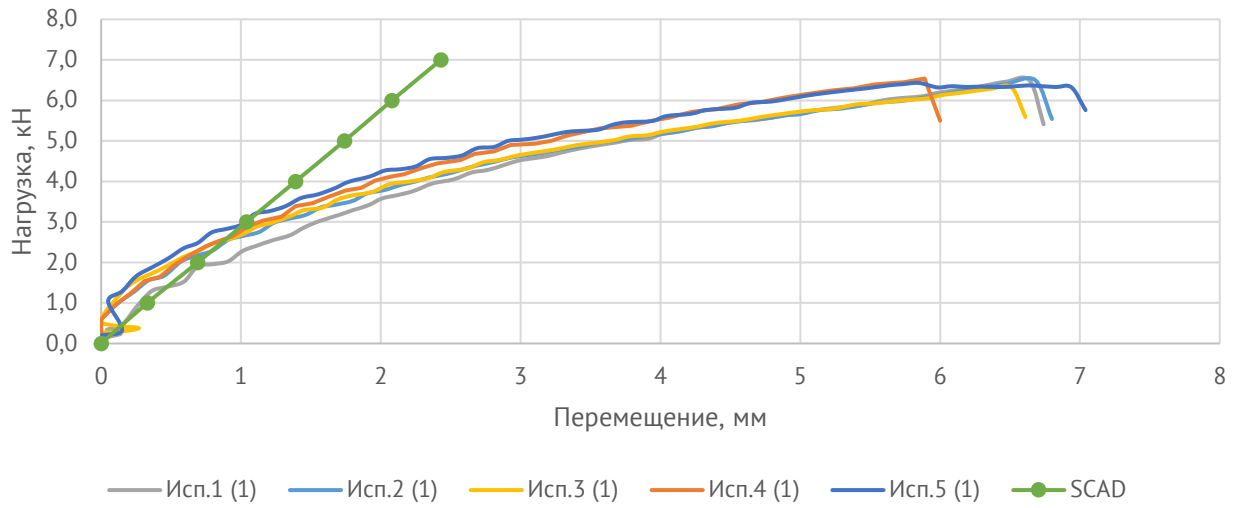


Взам. инв. №	
Подпись и дата	
Инв. № подл.	

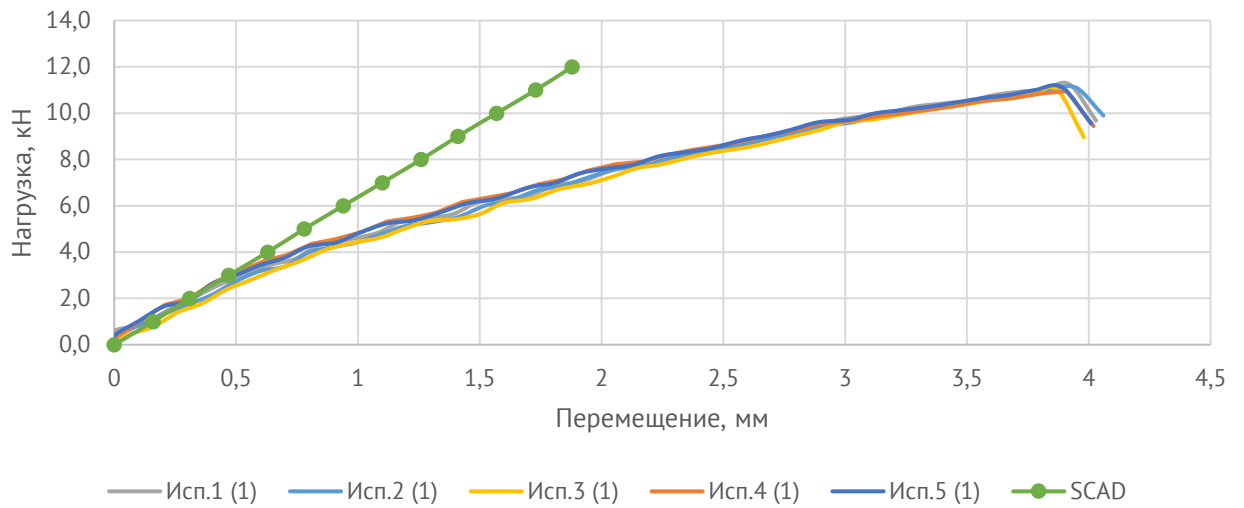
Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата



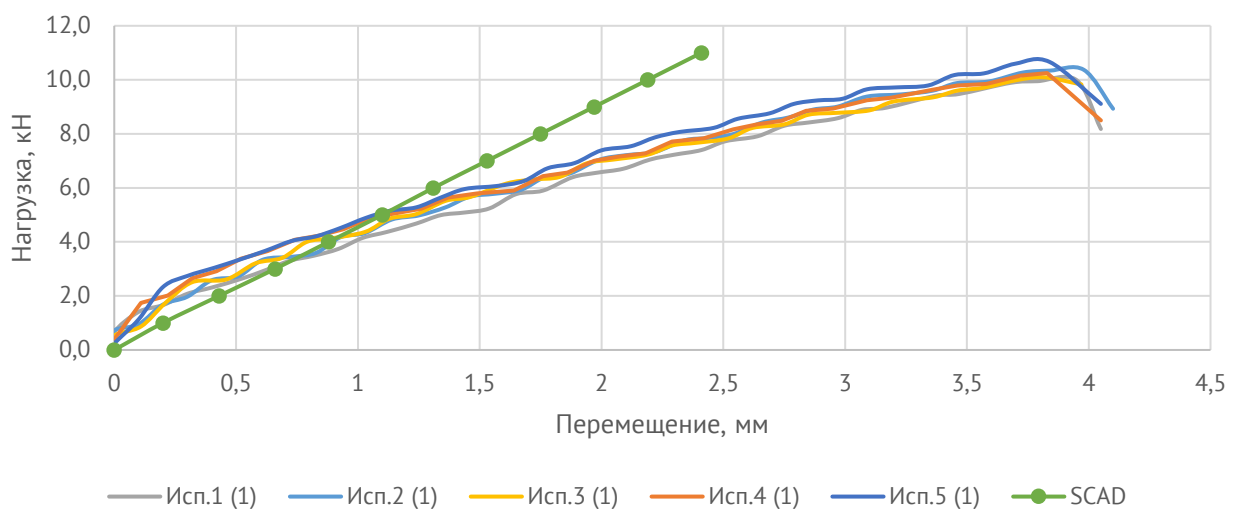
Исп. 4-7 (отрыв)



Исп. 5-1 (отрыв)



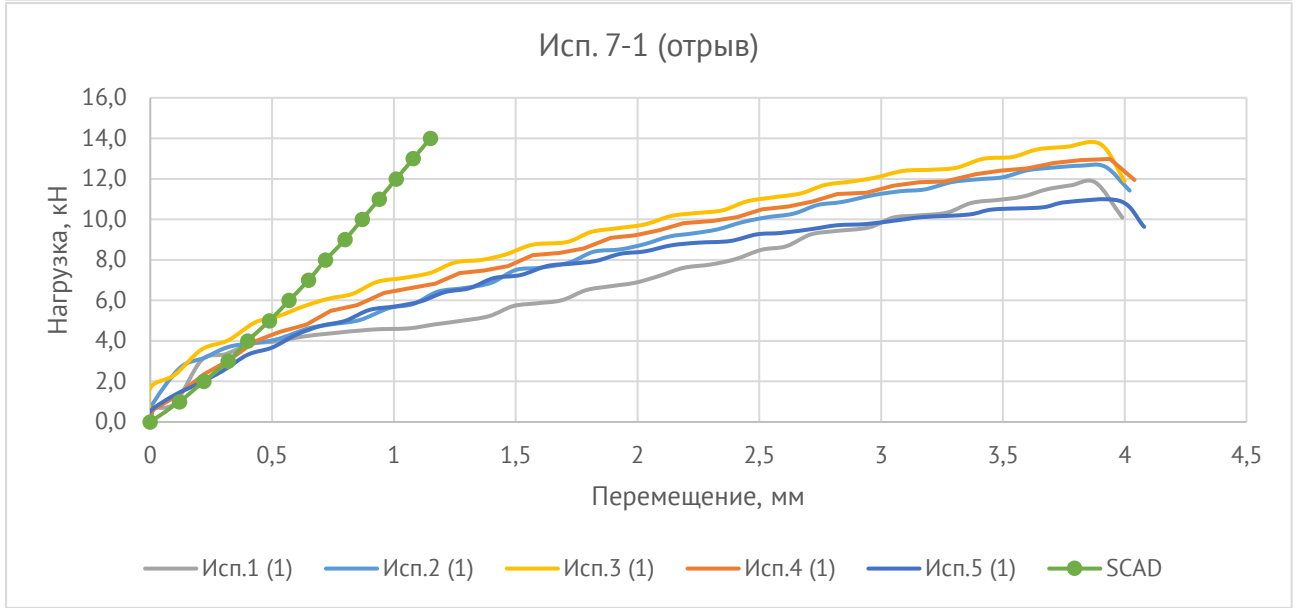
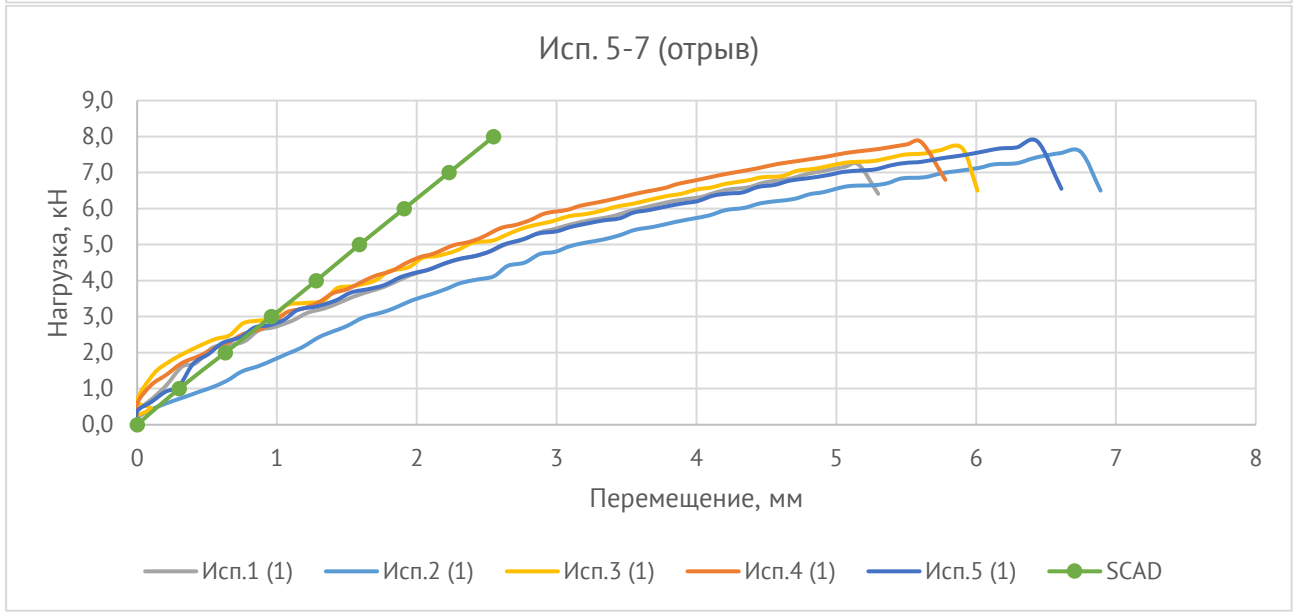
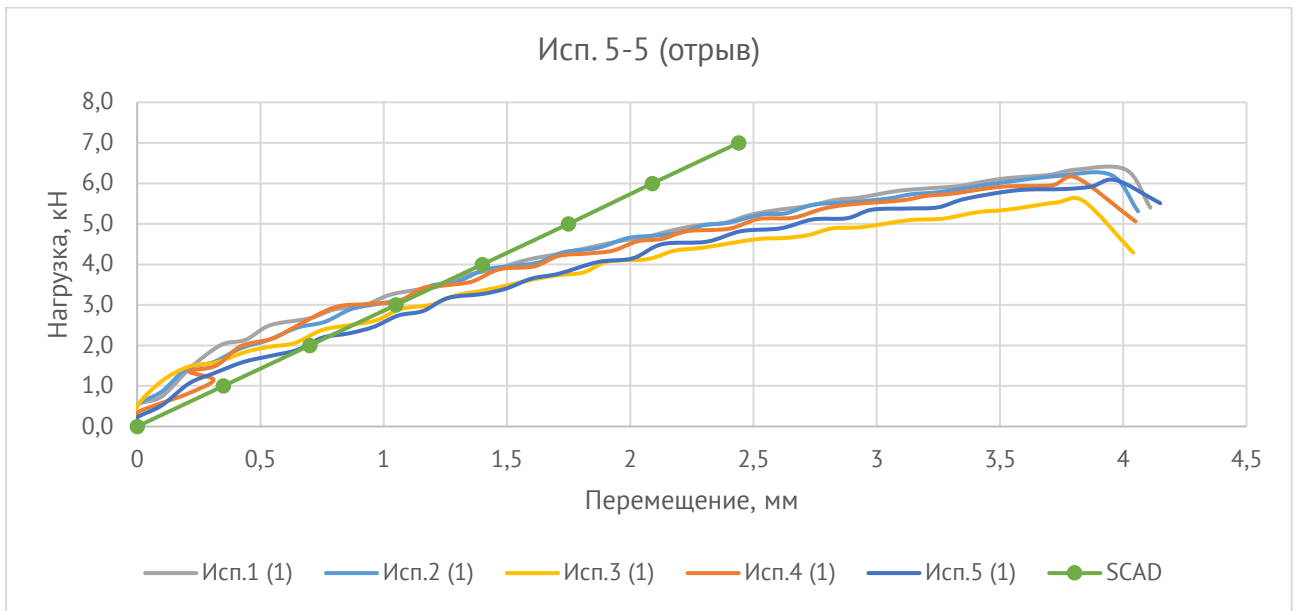
Исп. 5-3 (отрыв)



Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №

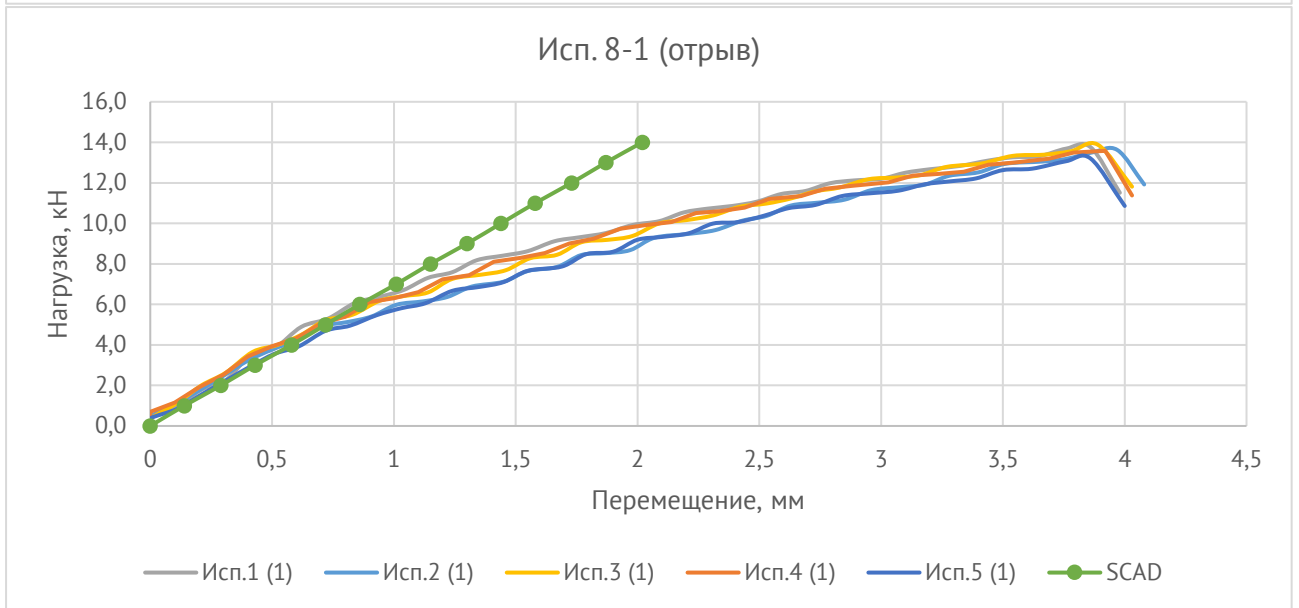
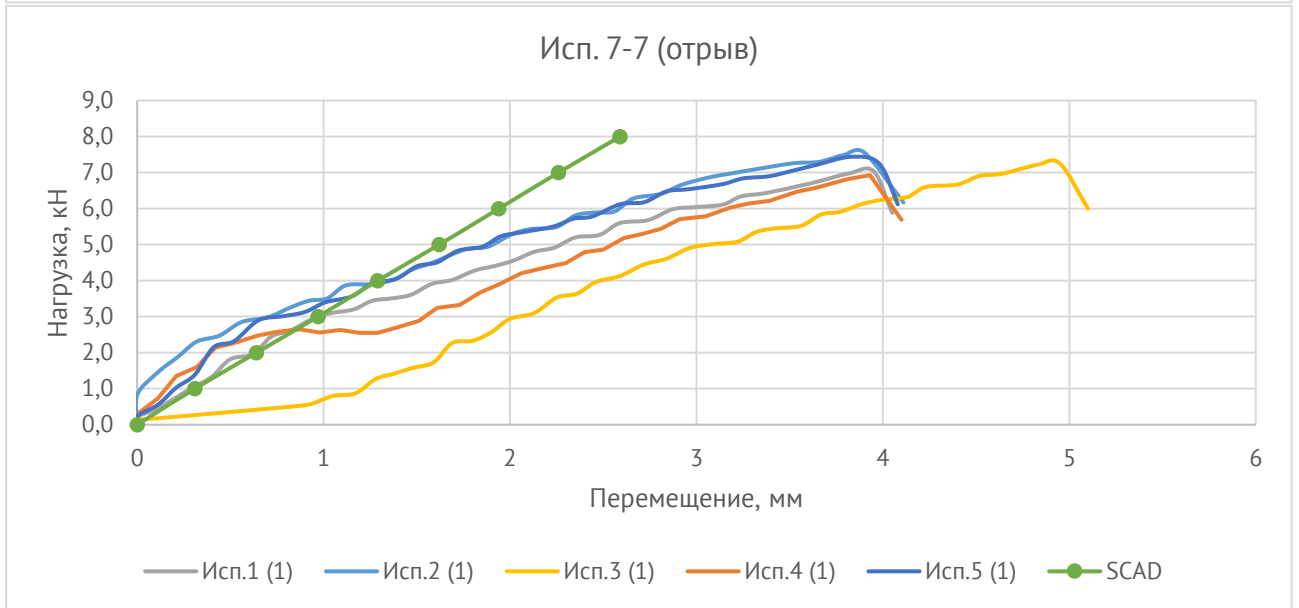
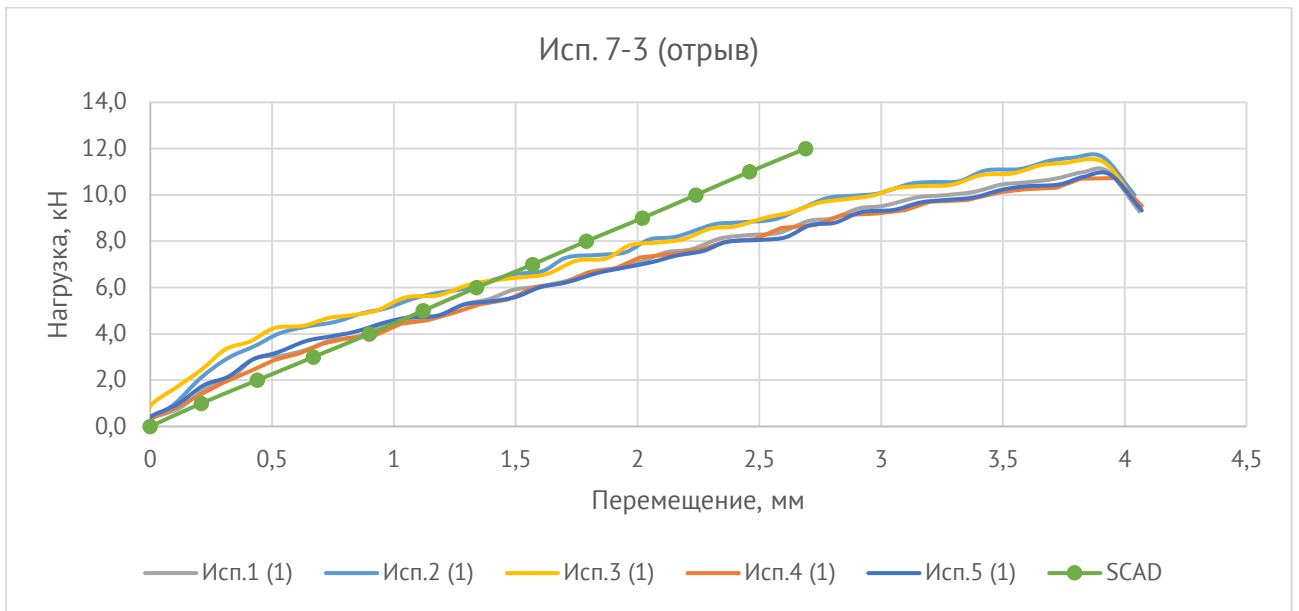
Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

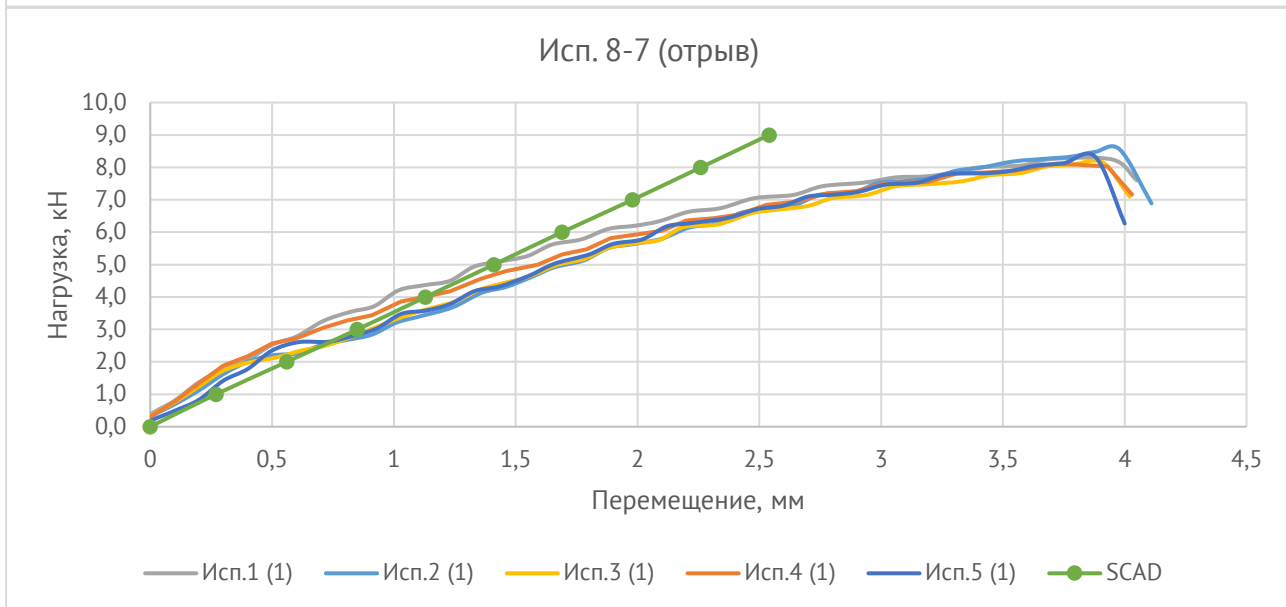
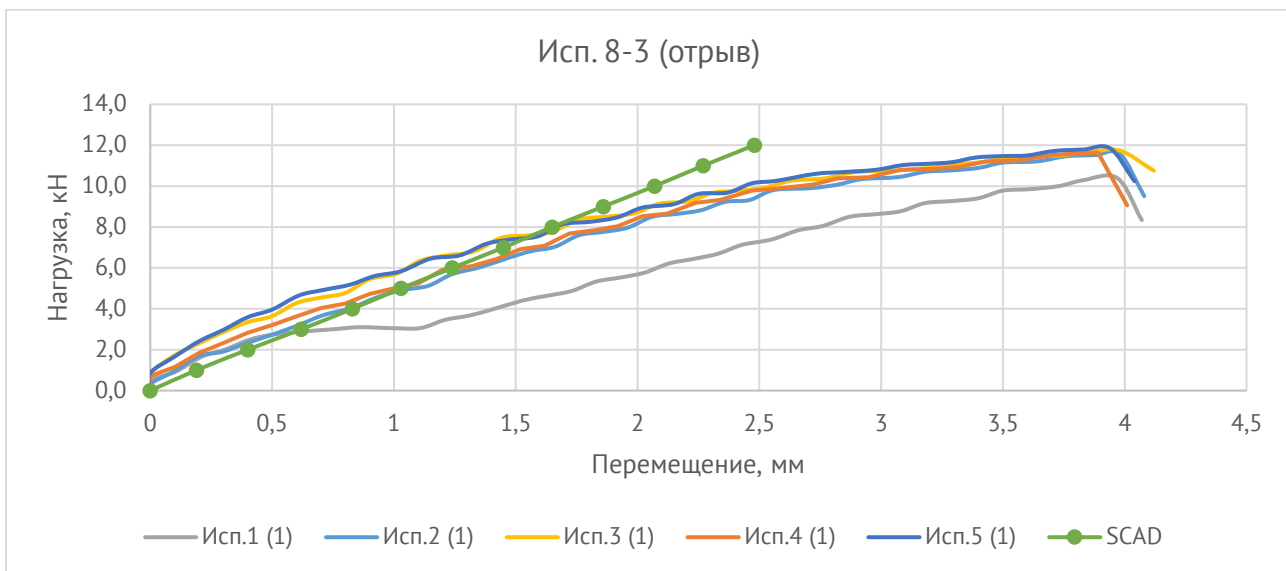
Инв. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №
Изм.	Кол.	Лист
№док	Подпись	Дата





Инв. №подл.	Подпись и дата		Взам. инв. №	
Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись





Результаты численного моделирования в ПК SCAD Office показывают хорошую сходимость с результатами экспериментального исследования.

Результаты расчетов сведены в Таблица 5.

**Таблица 5. Предельная нагрузка на отрыв**

Серия исп.	Вылет $L$ , мм	Высота $h$ , мм	Ширина основания $b$ , мм	$d$ отверстия основания, мм	$P_{scad}$ , кН
1	2	3	4	5	6
1-1	120	150	40	11	2,85
1-2		125			3,00
1-3		100			2,39
1-4		75			1,85
1-5		65			1,69
1-6		150			2,85
1-7		75			1,85

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

Серия исп.	Вылет $L$ , мм	Высота $h$ , мм	Ширина основания $b$ , мм	$d$ отверстия основания, мм	$P_{scad}$ , кН
1	2	3	4	5	6
2-1	120	150	44	11	3,13
2-2		125			3,30
2-3		100			2,63
2-4		75			2,03
2-5		65			1,86
2-6		150			3,13
2-7		75			2,03
3-1	120	150	44	9	3,29
3-2		125			3,47
3-3		100			2,76
3-4		75			2,13
3-5		65			1,96
3-6		150			3,29
3-7		75			2,13
4-1	180	150	40	11	2,56
4-2		125			2,70
4-3		100			2,15
4-4		75			1,66
4-5		65			1,52
4-6		150			2,56
4-7		75			1,66
5-1	180	150	44	11	2,82
5-2		125			2,97
5-3		100			2,36
5-4		75			1,83
5-5		65			1,68
5-6		150			2,82
5-7		75			1,83
6-1	180	150	44	9	2,96
6-2		125			3,12
6-3		100			2,48
6-4		75			1,92
6-5		65			1,76
6-6		150			2,96
6-7		75			1,92

Инв. № подл.

Подпись и дата

Инв. № подл.

Взам. инв. №

Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подпись	Дата

Серия исп.	Вылет $L$ , мм	Высота $h$ , мм	Ширина основания $b$ , мм	$d$ отверстия основания, мм	$P_{scad}$ , кН
1	2	3	4	5	6
7-1	270	150	44	11	2,54
7-2		125			2,68
7-3		100			2,13
7-4		75			1,65
7-5		65			1,51
7-6		150			2,54
7-7		75			1,65
8-1	270	150	44	9	2,67
8-2		125			2,81
8-3		100			2,23
8-4		75			1,73
8-5		65			1,58
8-6		150			2,67
8-7		75			1,73

Полученные расчетные значения предельной изгибающей силы, при которой возникают пластические деформации в районе крепления алюминиевого кронштейна к основанию получены для расчетного сопротивления алюминиевого сплава 107 МПа с учетом концентраторов напряжений.

На Рис. 25 и Рис. 26 показано распределение напряжений на примере кронштейна 120x150x40 d11 (1-1) при значении изгибающей нагрузки в 3 кН.

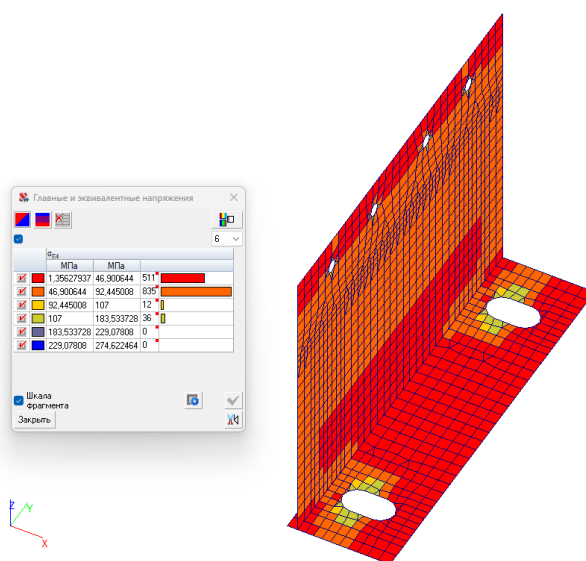


Рис. 25. Распределение эквивалентных напряжений на внутреннем слое алюминиевого кронштейна 120x150x40 d11, МПа

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. №подл.

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата

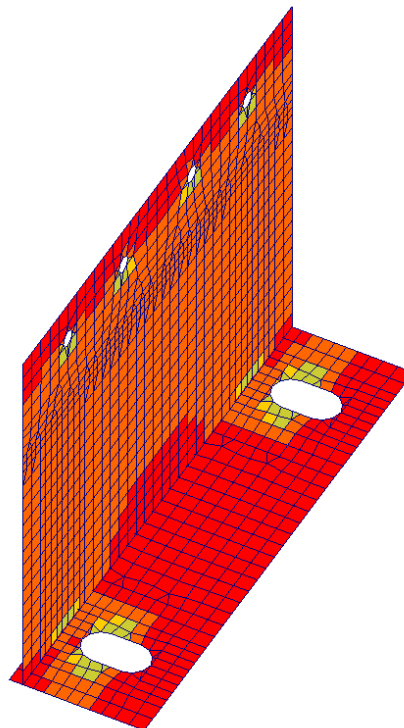
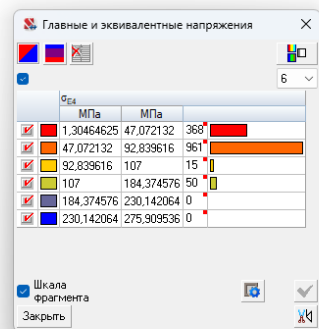


Рис. 26. Распределение эквивалентных напряжений на внешнем слое алюминиевого кронштейна 120x150x40 d11, МПа

На Рис. 27 и Рис. 28 показано распределение напряжений на примере кронштейна 270x150x44 d9 (8-1) при значении изгибающей нагрузки в 3 кН.

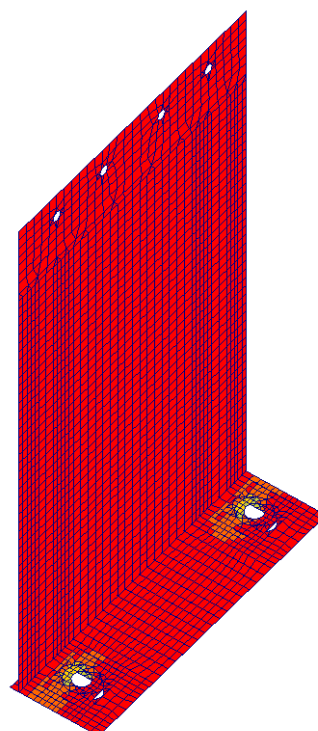
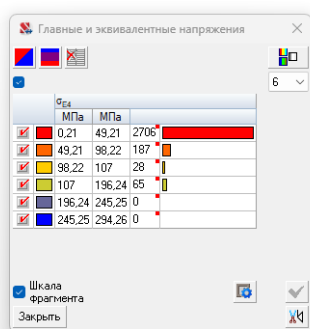


Рис. 27. Распределение эквивалентных напряжений на внутреннем слое алюминиевого кронштейна 270x150x44 d9, МПа

Инов. № подл.	Взам. инв. №
	Подпись и дата

Изм.	Кол.	Лист	Подок	Подпись	Дата
------	------	------	-------	---------	------

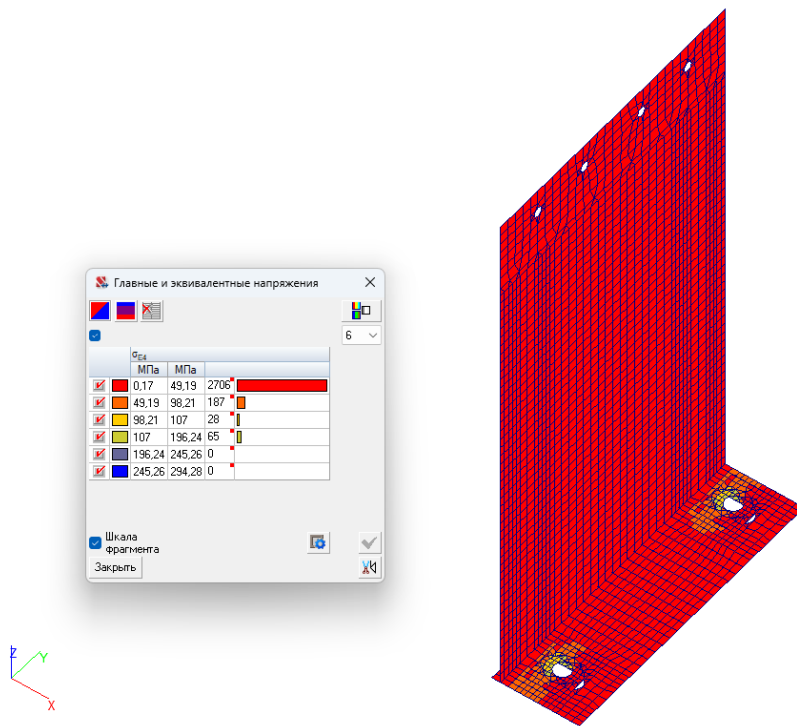


Рис. 28. Распределение эквивалентных напряжений на внешнем слое алюминиевого кронштейна 270x150x44 d9, МПа

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №					Лист
			Экспертное заключение № 1-23/01				
Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подпись	Дата	45	

## 8. Заключение

1. В результате анализа численного моделирования установлено, что оценка потери устойчивости расчетных схем с применением оболочечных конечных элементов в нелинейно поставке (использование геометрической и конструктивной нелинейности) является сложной задачей, требующая дальнейшего исследования.

Использование формулы Эйлера с коэффициентом приведенной длины, равной единице (с одной стороны запрет по всем перемещениям, с другой запрет на поворот) дает достаточно точное решение задачи устойчивости алюминиевых кронштейнов. На основании формул (1) и (2) вычислены предельные расчетные нагрузки на сжатие, при которых несущий алюминиевый кронштейн потеряет устойчивое положение. Результаты приведены в Таблица 3

2. В результате анализа численного моделирования и результатов экспериментального исследования установлено, что оценка потери несущей способности на действие изгибающей нагрузки с применением оболочечных конечных элементов в нелинейной постановке имеет хорошую сходимость результатов.

Значения предельных изгибающих усилий для алюминиевых кронштейнов получены с помощью ПК SCAD Office приведены в Таблица 4 для расчетного сопротивления алюминиевого сплава 107 МПа.

3. В результате анализа численного моделирования и результатов экспериментального исследования установлено, что оценка потери несущей способности на действие отрывающей нагрузки с применением оболочечных конечных элементов в нелинейной постановке имеет хорошую сходимость результатов.

Значения предельных усилий на отрыв для алюминиевых кронштейнов получены с помощью ПК SCAD Office приведены в Таблица 5 для расчетного сопротивления алюминиевого сплава 107 МПа.

Руководитель проекта,  
заведующий НИЛ ФКЗиС

Контактный телефон: +7 (911) 811-07-19

А.В. Галямичев

Изн. №подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №
-------------	----------------	--------------

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подпись	Дата
------	------	------	------	---------	------