



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Расчётная оценка прочности шпильки разрывной взрывного посадочного устройства ВПУ-82

XVII Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»,
19.05.2025 – 23.05.2025

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

Бычков О.А., Доценко В.В., Жабунина О.Ю., Лушина Ю.Ю., Нескин А.Г., Никульшин М.В.,
Малоярославцев А.Н.

Докладчик – Лушина Юлия Юрьевна
Младший научный сотрудник

Введение



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Основные преимущества разрабатываемого взрывного посадочного устройства ВПУ-82 для пакера гидравлического разбуриваемого:



малый габаритный диаметр Ø82 мм для выполнения работ в горизонтальных скважинах с диаметром Ø90÷114 мм;



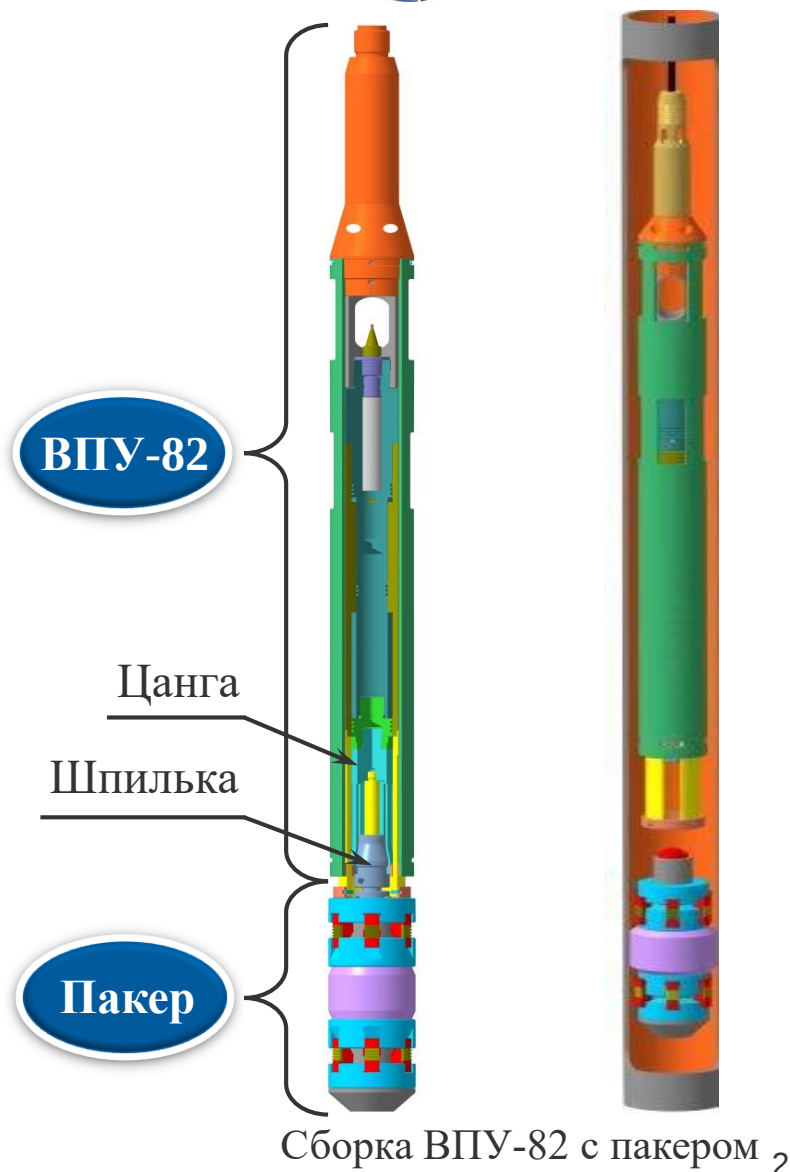
замена импортных технологий многостадийного гидроразрыва пласта и Plug&Perf;



наличие системы отсоединения пакера от устройства ВПУ-82 – сборки шпильки с цангой;



использование пакера шлипсового с лучшими конкурентными характеристиками из всех предложенных на рынке (рабочее давление – 1000 атм., без цементной пробки, время разбуривания – не более четырёх часов.



Введение



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Результат предварительных испытаний сборки ВПУ-82 с пакером: разрушение шпильки в области контакта с цангой.

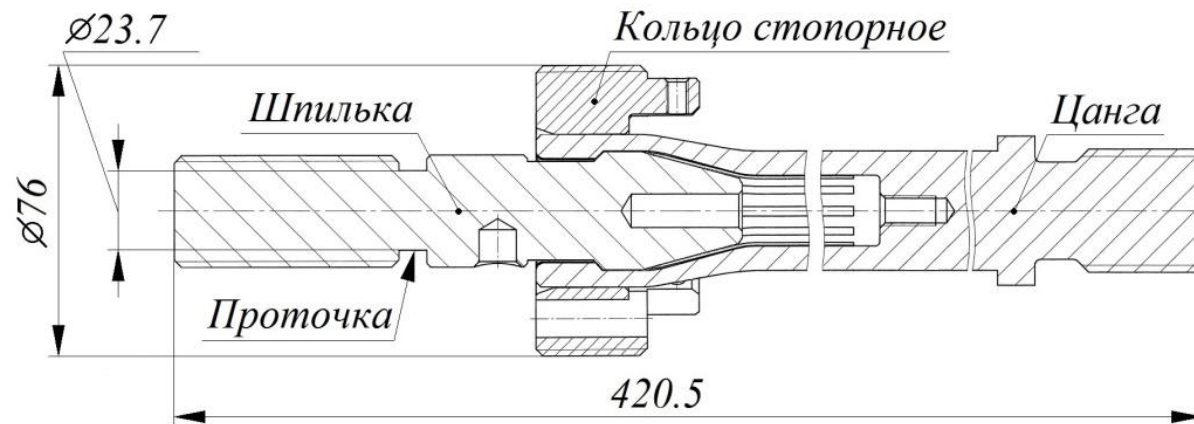


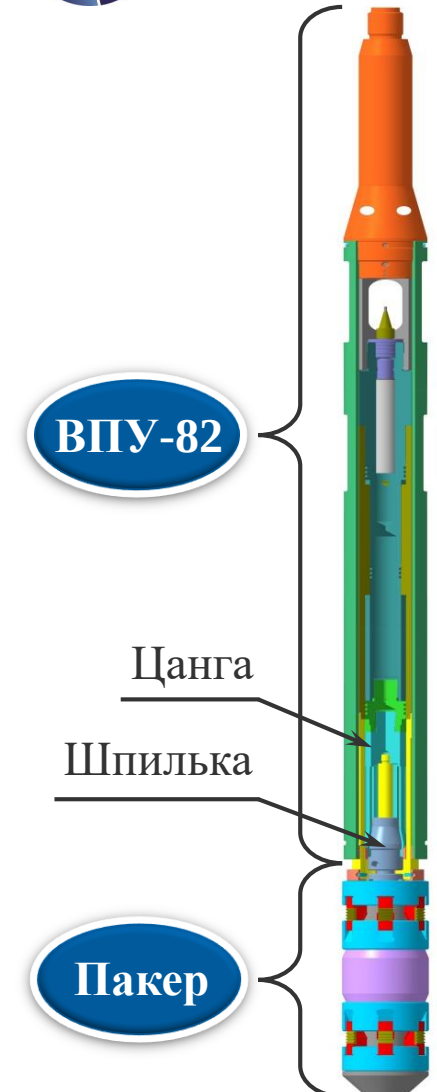
Схема первоначальной конструкции сборки шпильки с цангой

Физико-механические характеристики материалов сборки шпильки с цангой

Деталь	Материал	ρ , г/мм ³	E , МПа	σ_m , МПа	σ_{ϵ} , МПа	δ , %
Шпилька	Сплав Д16 [1]	0.0027	$7 \cdot 10^4$	274	421	10
Цанга, кольцо стопорное	Сталь 40Х [2]	0.0078	$2 \cdot 10^5$	785	980	10

1 ГОСТ 4784-2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.

2 ГОСТ 5453-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия.



Сборка ВПУ-82 с пакером



Для реализации разрыва шпильки в зоне проточки проводятся расчётные исследования прочности, в которых рассматриваются различные возможные варианты корректировки конструкции:



уменьшение диаметра шпильки в области проточки;



введение между шпилькой и цангой конического кольца для равномерного распределения нагрузки на шпильку от «лапок» цанги;



увеличение контактной площади путём увеличения диаметров шпильки и цанги в области их соединения;



замена материала шпильки на материал с более высокими механическими характеристиками.

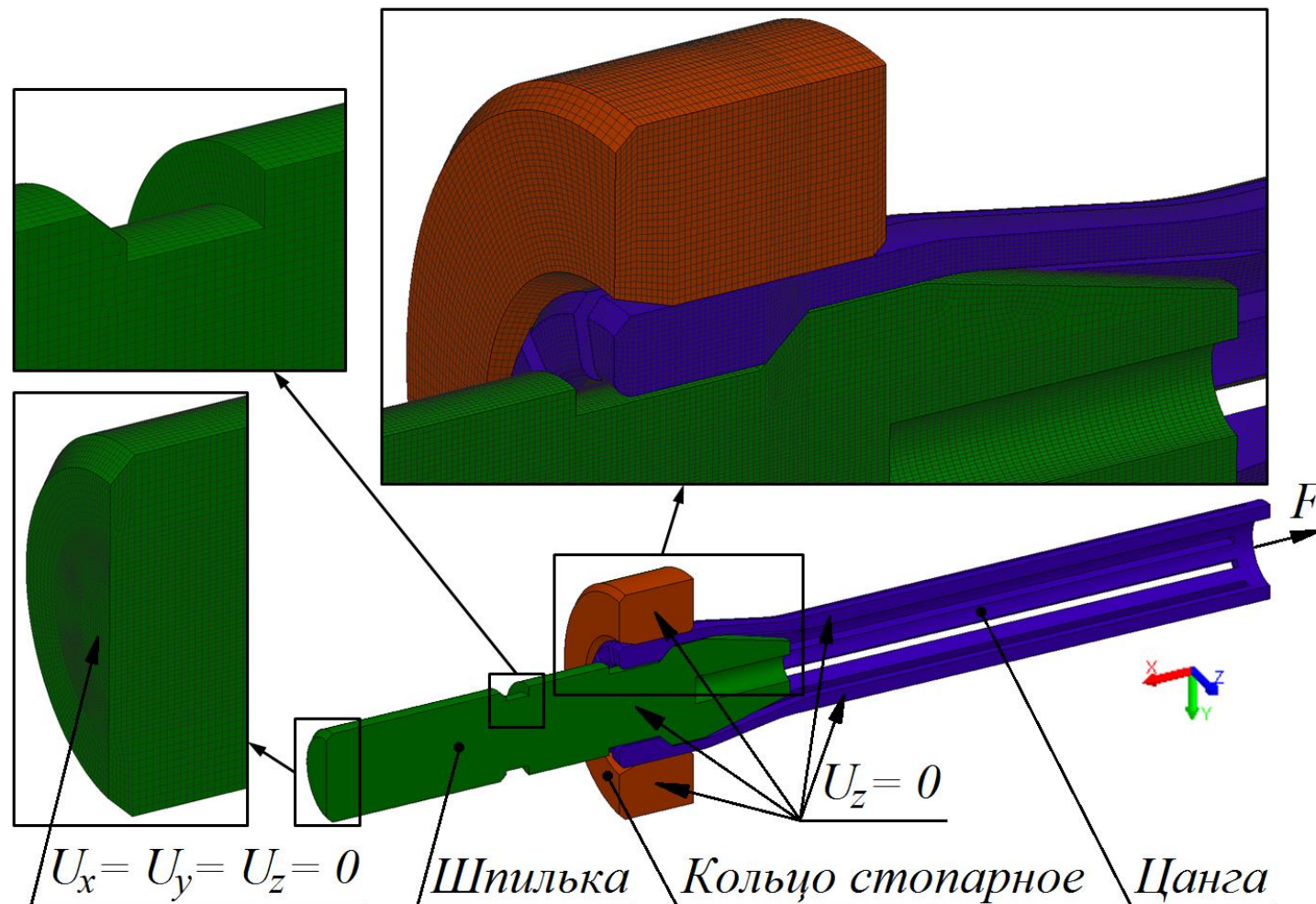


Необходимое усилие разрыва шпильки должно составлять $F_p = (1.7 \div 2) \cdot 10^5 \text{ Н}$.

1 Состояние сборки первоначальной конструкции шпильки с цангой в условиях действия растягивающей силы



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

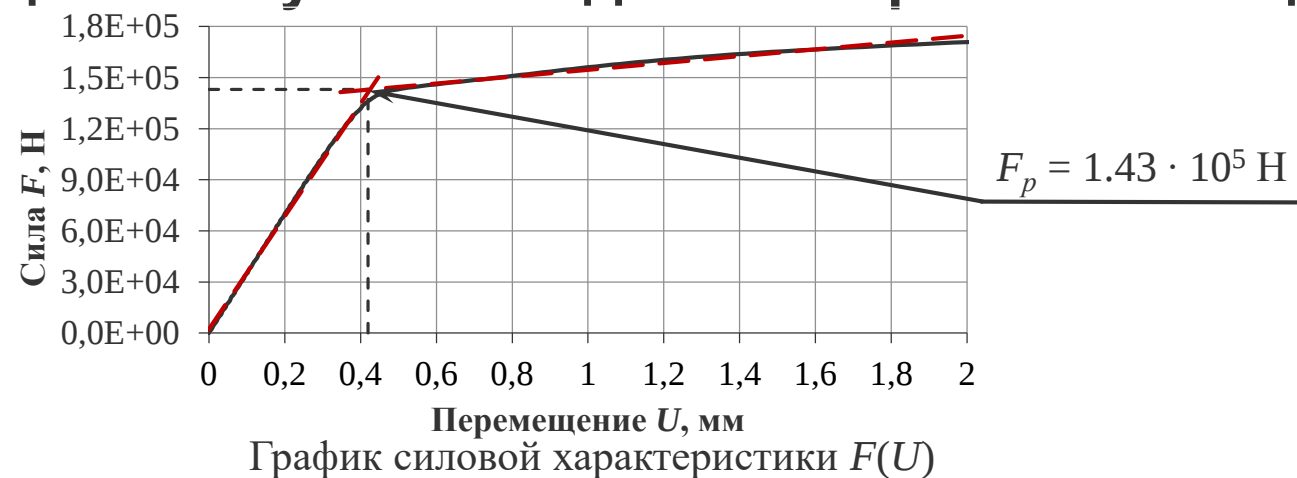


Расчётная модель сборки шпильки с диаметром проточки $d_n = 23.7$ мм и цанги (половина конструкции)

1 Состояние сборки первоначальной конструкции шпильки с цангой в условиях действия растягивающей силы



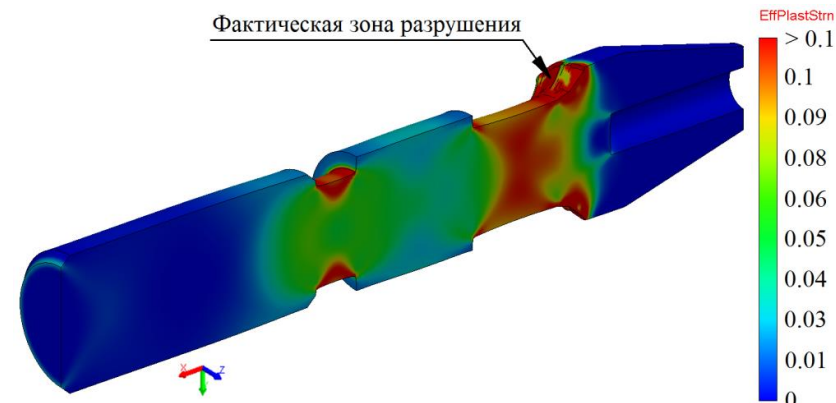
РФАЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



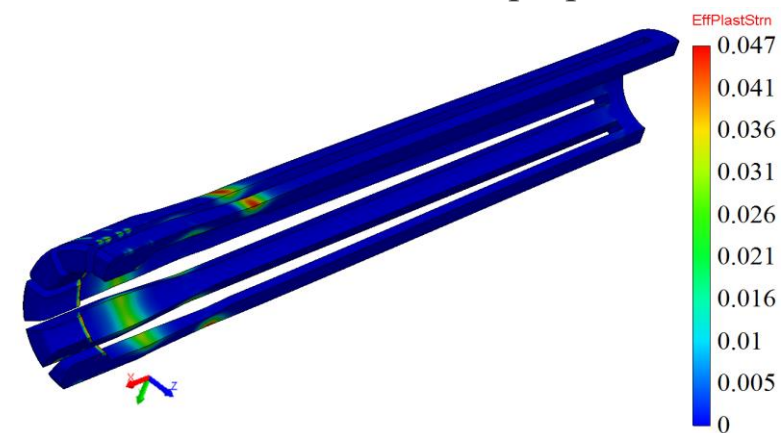
Вид шпильки перед испытанием



Вид шпильки после испытания



Распределение пластических деформаций
в шпильке в момент её разрыва



Распределение пластических деформаций в цанге

Вывод
по расчёту

Разрушение первоначальной конструкции шпильки ожидается при усилии $F_p = 1.43 \cdot 10^5 \text{ Н}$ по конической поверхности в зоне контакта с цангой.

2 Оценка влияния диаметра проточки на состояние шпильки



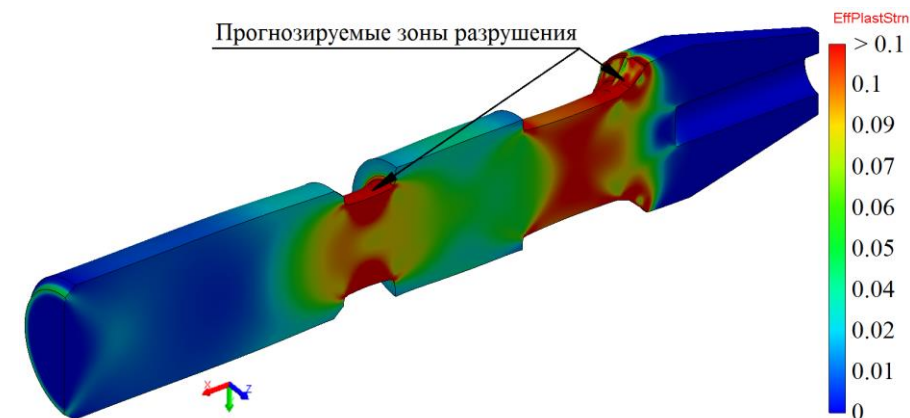
РФАЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Значения усилий, соответствующих потере несущей способности шпильки, в зависимости от диаметра области проточки

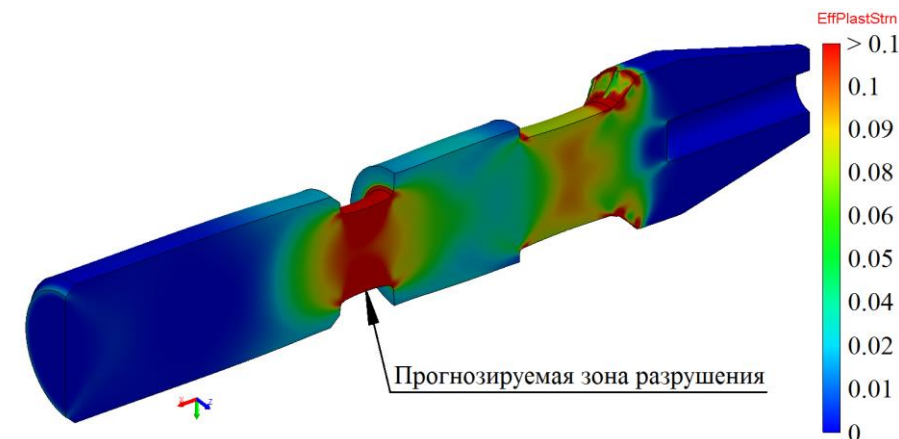
d_n , мм	F_p , Н	
	Область контакта с цангой	Область проточки
23.7 (первоначальная величина)	$1.43 \cdot 10^5$	—
22.6	$1.39 \cdot 10^5$	
21.5	—	$1.31 \cdot 10^5$
20.4	—	$1.2 \cdot 10^5$

Вывод
по расчёту

Уменьшение диаметра проточки способствует смещению зоны разрушения шпильки в область проточки. Но требование по необходимому значению усилия разрыва шпильки $F_p = (1.7 \div 2) \cdot 10^5$ Н не выполняется. Введение конического кольца между шпилькой и цангой и увеличение их диаметров в области соединения не привело к изменению результатов по сравнению с полученными.



Распределение пластических деформаций в шпильке с диаметром $d_n = 22.6$ мм в момент её разрыва



Распределение пластических деформаций в шпильке с диаметром $d_n = 21.5$ мм в момент её разрыва

3 Оценка влияния замены материала шпильки на её состояние



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Величина необходимого диаметра проточки шпильки для обеспечения разрыва в данной области оценивается по формуле [3]:

$$d_n = \sqrt{\frac{4 \cdot F_p}{\pi \cdot \sigma_b}}$$

После подстановки требуемого усилия разрыва $F_p = (1.7 \div 2) \cdot 10^5$ Н получено, что диаметр области проточки шпильки, например, из стали 40Х, должен составлять $d_n = 14.9 \div 16.1$ мм.

Вывод
по расчёту

В шпильке из стали 40Х потеря несущей способности ожидается в области проточки при усилии $F_p = 1.74 \cdot 10^5$ Н, что удовлетворяет требованию по значению усилия разрыва шпильки.

3 Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993 г.

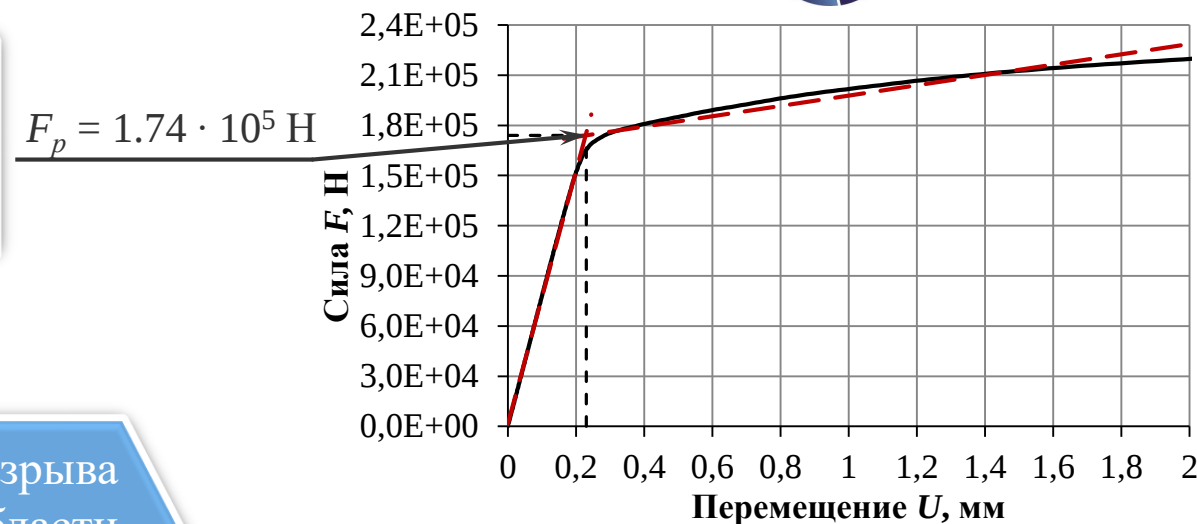
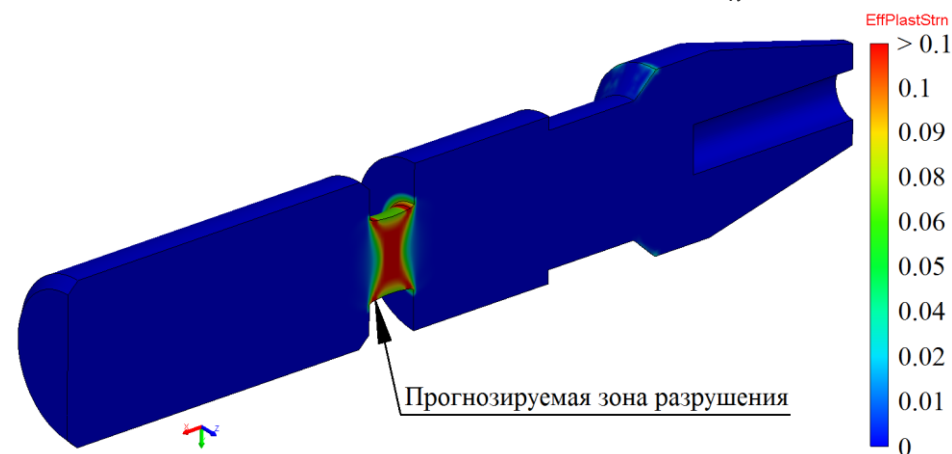


График силовой характеристики $F(U)$ для шпильки из стали 40Х с $d_n = 15.3$ мм



Распределение пластических деформаций в шпильке из стали 40Х в момент её разрыва

4 Испытания модернизированной конструкции



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



ВПУ-82 с имитатором пакера перед взрывом



ВПУ-82 с имитатором пакера в момент разрыва шпильки



Шпилька из стали 40Х перед испытанием



Фрагмент шпильки из стали 40Х с имитатором пакера после разрыва

Испытания устройства ВПУ-82 с установленной шпилькой из стали 40Х с диаметром проточки $d_n = 15.3$ мм подтвердили расчётные результаты.

В ходе выполненных расчётных исследований первоначальной конструкции сборки шпильки с цангой в условиях растягивающего усилия и оценок влияния внесённых доработок в сборку получено следующее:

при использовании шпильки из сплава Д16 с диаметром проточки $d_n < 22.6$ мм разрыв шпильки происходит в области проточки, но усилие потери несущей способности составляет $F_p < 1.39 \cdot 10^5$ Н, что ниже требуемого усилия разрыва $F_p = (1.7 \div 2) \cdot 10^5$ Н. При диаметре проточки $d_n \geq 22.6$ мм разрушение шпильки происходит в области контакта с цангой;

применение конического кольца между шпилькой и цангой и незначительное увеличение их диаметров в области соединения не приводит к возрастанию несущей способности шпильки;

при замене материала шпильки на более прочный материал, например, на сталь 40Х, и снижении диаметра проточки до $d_n = 15.3$ мм разрыв шпильки обеспечивается в области проточки при требуемом усилии разрыва.

Следовательно, одновременное выполнение требований по разрыву шпильки в области проточки и по значению усилия разрыва достигается при замене материала шпильки на сталь 40Х и уменьшении диаметра проточки до $d_n = 15.3$ мм.

Спасибо за внимание!

Лушина Юлия Юрьевна

19.05.2025 – 23.05.2025