

# Расчет предельно допустимых давлений методом конечно-элементного моделирования в системах интеллектуального заканчивания скважин

Исмаков Р.А., Газизов Р.Р., Чижов А.П.

ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия  
ga3i3ov.renat@yandex.ru

## Аннотация

Разработка интеллектуальных систем контроля притока автономного принципа сопряжена с рядом технических решений, требующих моделирования и расчета, прежде чем их изготовят и протестируют на стендовом оборудовании. Моделирование отдельных узлов механических системкратно сокращает затраты на изготовление лишних деталей, позволяя предельно точно изготовить малое количество изделий и проанализировать изменение геометрии тела и его влияние в динамическом процессе. В статье рассмотрена оценка прочности узлов первого конструкторского решения методом конечно-элементного моделирования предельно допустимых давлений в устройстве контроля притока.

## Материалы и методы

Для разработки оптимальных характеристик интеллектуальных систем заканчивания и оценки возможных рисков потери работоспособности оборудования подготовлен цифровой двойник устройства контроля притока. С помощью метода

конечно-элементного моделирования оценены предельно допустимые условия работы системы в скважине.

## Ключевые слова

устройство контроля притока, конечно-элементное моделирование, скважина с горизонтальным окончанием

## Для цитирования

Исмаков Р.А., Газизов Р.Р., Чижов А.П. Расчет предельно допустимых давлений методом конечно-элементного моделирования в системах интеллектуального заканчивания скважин // Экспозиция Нефть Газ. 2025. № 2. С. 74–77. DOI: 10.24412/2076-6785-2025-2-74-77

Поступила в редакцию: 01.04.2025

OIL PRODUCTION

UDC 622.245 | Original Paper

## Calculation of maximum allowable pressures using the finite element modeling method in intelligent well completion systems

Ismakov R.A., Gazizov R.R., Chizhov A.P.

Ufa state petroleum technological university, Ufa, Russia  
ga3i3ov.renat@yandex.ru

## Abstract

The development of intelligent autonomous inflow control systems involves a series of technical solutions that require modeling and computational analysis prior to manufacturing and bench testing. Simulating individual components of mechanical systems significantly reduces costs associated with producing redundant parts, enabling the high-precision fabrication of a limited number of prototypes and the analysis of geometric deformations in the component body and their impact under dynamic conditions. The article evaluates the structural integrity of components in the initial design iteration using finite element modeling to assess maximum allowable pressures within the inflow control device.

## Materials and methods

To optimize the design parameters of intelligent completion systems and assess potential risks of equipment failure, a digital twin of the inflow control device has been developed. Using the finite element modeling (FEM) method, the maximum allowable operating parameters of the system in the wellbore have been evaluated

## Keywords

inflow control device, finite element modeling, horizontal well completion

## For citation

Ismakov R.A., Gazizov R.R., Chizhov A.P. Calculation of maximum allowable pressures using the finite element modeling method in intelligent well completion systems. Exposition Oil Gas, 2025, issue 2, P. 74–77. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2025-2-74-77

Received: 01.04.2025

Разработка месторождений с применением горизонтальных стволов кратно повышает эффективность извлечения нефти, но массовое применение горизонтальных стволов существенно затруднено в силу негативных процессов, протекающих при их эксплуатации. С ростом количества высокотехнологичных скважин пропорционально растут и проблемы их эксплуатации, среди которых сложности компоновок, применяемых в бурении и заканчивании скважин, высокие технико-технологические требования к персоналу как в процессе строительства, так и в процессах дальнейшей эксплуатации скважин. Среди основных проблем повсеместного применения скважин с горизонтальным окончанием является образование конусов обводненности, приводящих к резкому снижению дебитов по нефти и отсечению остаточных запасов.

Качественное снижение эффективности работы горизонтальных участков и возникновение подобных проблем связано с высокой разницей в вязкости добываемых компонентов флюида в купе с эффектом Heel-Toe – распределение давления в скважине за счет потерь на силы трения. Потери давления за счет трения могут достигать значения величины депрессии, что может ограничивать оптимальную длину горизонтального участка и приводить к значительной разнице в депрессии на пласт в зоне пятки и носка скважины. Основным способом решения описанных проблем является применение устройств контроля притока и интеллектуальных хвостовиков. В последние годы наметилась тенденция в импортозамещении западных аналогов, и разработка собственных уникальных интеллектуальных хвостовиков с возможностью контроля условий пласта обеспечивает решение ряда задач как в нефтегазовом секторе, так и вопрос конкурентоспособности в промышленном секторе.[1]

Разработка устройств контроля притока, основанных на совершенно других физико-математических законах сопряжено с рядом сложностей в связи с его уникальностью. В процессе исследовательской деятельности встали вопросы о целесообразности увеличения толщины шайб вследствие их возможного разрушения при проведении стендовых испытаний, способности внутренних полостей

и резьбовых соединений выдержать возникающие напряжения при перекрытии основного канала.

Рассмотрим конструкторское решение по опытному образцу устройства контроля притока. Объектом расчета на прочность является сборочный узел рисунок 1 представляющий собой корпус с двумя дроссельными пакетами, крышкой и портами для манометров, нагружаемый внутренним статическим давлением.

Целью расчета является определение предельного для конструкции давления, при котором нарушается целостность корпуса и резьбовых соединений. Критерием прочности служит предел текучести материала.

Расчет состоит из четырех этапов, соответствующих разным частям изделия:

- корпус НП703.0424.001 – расчет внутренних полостей;
- шайба дроссельного пакета НП702.0424.004;

Расчет внутренних полостей и резьбовых соединений устройства контроля притока.

С учетом условий агрессивности сред и высоких разнонаправленных давлений выбором материала послужила сталь 40Х. Для упрощения расчетов рассматривается половина корпуса, отделенная по вертикальной плоскости. К внутренним поверхностям модели приложено внутреннее давление  $P$ , значение которого задается путём подбора по критерию минимального запаса прочности.

К внутренним резьбам дополнительно приложены осевые усилия  $F_i = P \times S_i$ , где  $S_i$  – площадь поперечного сечения резьбового отверстия по наружному диаметру. Параметры конечно-элементной сетки модели приведены на рисунке 2, свойства материала задаваемы ручным образом – рисунок 3, граничные условия и общий вид модели – рисунок 4.

Расчет эпюр запаса прочности резьбовых соединений представлен на рисунках 5.

Рассмотрим полученные эпюры напряжения и запаса прочности при критических давлениях. Решая задачу от обратного попытаемся найти критические давления, при достижении которых коэффициент запаса прочности приближается к 1. Коэффициент запаса прочности в наиболее слабых местах (витках резьбы и краях нижнего соединительного отверстия) приближается к 1 при достижении



Рис. 1. Конструкторское решение опытного образца устройства контроля притока [2]  
Fig. 1. Engineering design of the inflow control device (ICD) prototype [2]

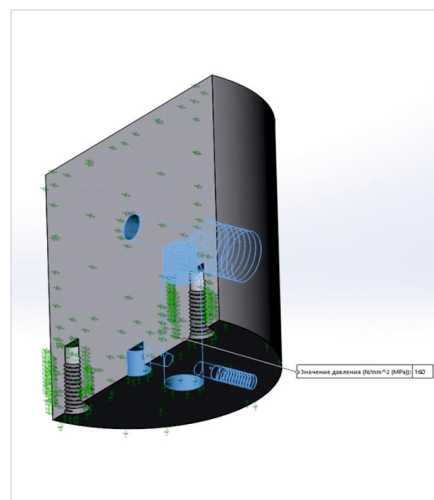


Рис. 4. Общий вид модели и граничные условия  
Fig. 4. Model Geometry and Boundary Conditions

Сетка Детализация	
Имя исследования	Статический 1 (-По умолчанию-)
Детализация/Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Сетка на основе смешанной кривизны
Точки Якобиана для сетки высокого качества	16 точек
Макс. размер элемента	2 mm
Мин размер элемента	0,1 mm
Качество сетки	Высокая
Всего узлов	2067028
Всего элементов	1444237
Максимальное соотношение сторон	60,867
Процент элементов с соотношением сторон < 3	99,6
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0,0128
Процент искаженных элементов	0
Число искаженных элементов	0
Время для завершения сетки (hh:mm:ss)	00:02:40
Имя компьютера	

Рис. 2. Параметры конечно-элементной сетки  
Fig. 2. Finite element mesh parameters

Тип модели:	Линейный упругий изотр.	<input type="checkbox"/> Сохранить тип в библиотеке
Единицы измерения:	СИ - Н/мм <sup>2</sup> (МПа)	
Категория:	Стали легированные	
Имя:	40Х ГОСТ 4543-71	
Критерий разрушения по умолчанию:	Максимальное напряжение	
Описание:		
Источник:		
Sustainability:	Не определено	Выбрать...
Свойство	Значение	Единицы измерения
Elastic Modulus	214000	Н/мм <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.26	Не применимо
Shear Modulus	85000	Н/мм <sup>2</sup>
Mass Density	7850	кг/м <sup>3</sup>
Tensile Strength	980	Н/мм <sup>2</sup>
Compressive Strength		Н/мм <sup>2</sup>
Yield Strength	780	Н/мм <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.18e-05	/K
Thermal Conductivity	41	W/(m·K)
Specific Heat	466	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		Не применимо

Рис. 3. Свойства материалов модели (сталь 40Х)  
Fig. 3. Material properties of the model (40kh steel)



давления 160 Мпа, при этом большая часть резьбовых соединений имеет коэффициенты от 1,3 до 1,9, что говорит нам о высокой устойчивости соединений к динамическим нагрузкам в условиях эксплуатации.

Расчёт шайбы дроссельного пакета. Наибольшие опасения при проектировании конструкторского решения и подготовке к стендовым испытаниям вызывали шайбы дроссельного пакета - в их задачу входило

ограничение притока путем создания перепада давления при прохождении каждой шайбы, а при закрытии основного канала существовал риск прорыва всей системы ограничителей. Работа по проектированию системы ограничителей основывалась на условии что при разработке гидросистем часто требуется дроссель, обладающий высоким гидравлическим сопротивлением и стабильной расходной характеристикой при колебаниях

вязкости. Ввиду этого применяются многоступенчатые дроссели из нескольких последовательно расположенных дроссельных шайб, представленных на рисунке 7. Сопротивление такого дросселя регулируется подбором количества шайб в пакете. [3]

Основной причиной опасений служила толщина описываемых объектов. Рассмотрим одностороннее воздействие расчетного предельного давления  $P = 160$  МПа на шайбу дроссельного пакета, ограниченного с двух сторон вставками.

Параметры конечно-элементной сетки модели приведены на рисунок 8, свойства материала — рисунок 3, граничные условия и общий вид модели — рисунок 9.

Результаты расчёта приведены на рисунках 10, 11.

Анализ моделей, представленных на рисунках, позволяет говорить о достаточном потенциале коэффициента запаса прочности в резьбовых соединениях и шайбах дроссельных пакетов, так при критических перепадах давления 160 Мпа коэффициент запаса прочности в них составляет 1,5.

### Итоги

Исследования, проведенные методом конечно-элементного моделирования, показали высокий запас прочности разрабатываемого устройства, наиболее критическими зонами возможного разрушения по итогам моделирования стали шайбы дроссельного пакета и точки резьбовых соединений вторичного канала.

### Выводы

Проведенное исследование методом конечно-элементного моделирования (КЭМ) позволило определить предельное давление, при котором устройство контроля притока (УКП) сохраняет структурную целостность и функциональность.

Результатом проводимых исследований стало выявление критических зон концентраций напряжений, установили зависимость устойчивости устройства от изменения геометрических параметров основных узлов. Результаты моделирования выявили критические зоны концентрации напряжений, а также продемонстрировали зависимость устойчивости устройства от геометрических параметров, свойств материалов и условий эксплуатации. Приведенный расчет позволяет сделать вывод, что при величине давления  $P=160$  МПа

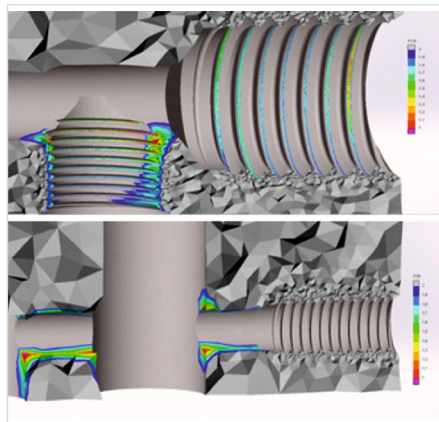


Рис. 5. Эпюры запаса прочности  
Fig. 5. Factor of Safety (FoS) Contour Plots

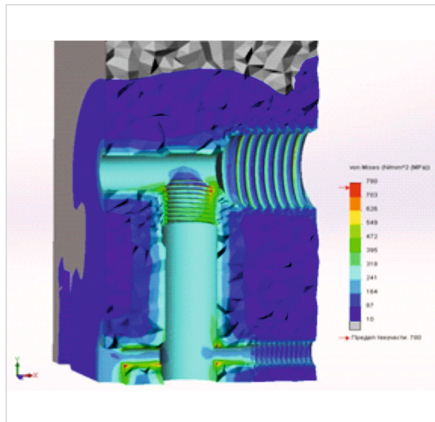


Рис. 6. Эпюра напряжений  
Fig. 6. Stress diagram

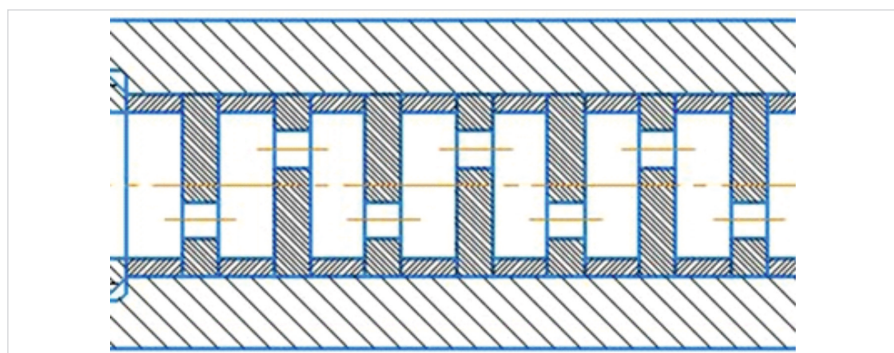


Рис. 7. Схема расположения дроссельного пакета  
Fig. 7. Layout of the throttle package

Сетка Детализация	
Имя исследования	Статический 1 (-Default-)
Детализация/Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Сетка на основе смешанной кривизны
Точки Якобиана для сетки высокого качества	16 точек
Макс. размер элемента	0,2 mm
Мин размер элемента	0,0122849 mm
Качество сетки	Высокая
Всего узлов	817391
Всего элементов	578113
Максимальное соотношение сторон	183,21
Процент элементов с соотношением сторон < 3	99,7
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0,0119
Процент искаженных элементов	0
Число искаженных элементов	0
Заново создать независимую сетку из неудавшихся деталей	Выкл
Время для завершения сетки (hh:mm:ss)	00:00:35
Имя компьютера	

Рис. 8. Параметры конечно-элементной сетки  
Fig. 8. Finite element mesh parameters

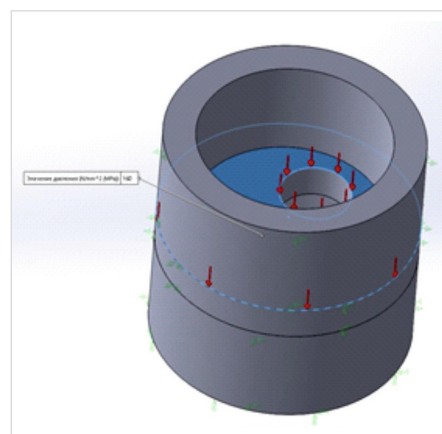


Рис. 9. Общий вид модели и граничные условия  
Fig. 9. General model view and boundary conditions

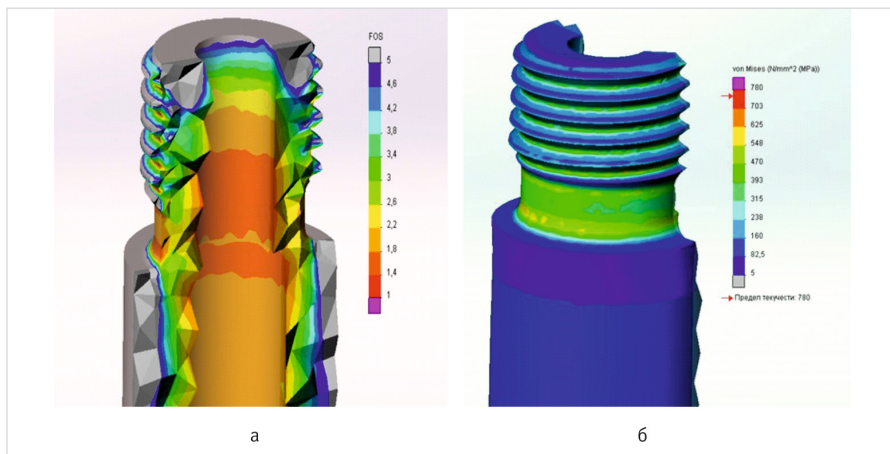


Рис. 10. Расчет: а – эюра запаса прочности; б – эюра напряжений  
Fig. 10. Calculation a – safety factor curve; б – stress diagram

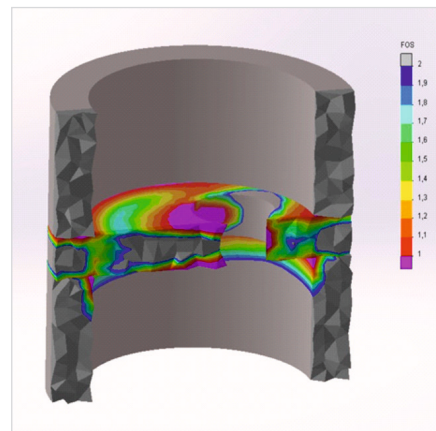


Рис. 11. Эюра запаса прочности  
Fig. 11. Safety factor diagrams

материал шайбы имеет минимальный запас прочности в. Так, превышение расчетного предельного давления приводит к необратимым деформациям в геометрии устройства и снижает его эффективность, что подтверждает необходимость строгого соблюдения проектных ограничений при проведении стендовых испытаний и последующем применении в ОПИ. При этом стоит отметить довольно высокий потенциал давления при проведении оценки забойных давлений в скважинах нефтяных месторождений, с учетом этого

можно уверенно говорить о возможности применения устройства контроля притока в различных геолого-промысловых условиях.

#### Литература

1. Исмаков Р.А., Газизов, Р.Р., Носов Н.А. К вопросу о применении устройств контроля притока в горизонтальных и многоствольных скважинах // Бурение и нефть. 2022. № 10. С. 20–24.
2. Патент № 2798005 С1 Российская Федерация, МПК E21B 34/08, E21B 43/12,

- F16K 31/12. Устройство контроля притока флюида в скважине: № 2022132204; заявл. 08.12.2022; опубл. 13.06.2023 / А.А. Прокофьев, Р.А. Исмаков, А.П. Чижов, Р.Р. Газизов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Уфимский государственный нефтяной технический университет.
3. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. М.: Машиностроение, 1972. 321 с.

## ENGLISH

### Results

Finite element modelling studies showed a high margin of safety for the developed device, with the most critical areas of potential failure being the throttle package washers and the secondary channel threaded connection points, according to the modelling results.

### Conclusions

The study conducted using the finite element modeling (FEM) method allowed for determining the ultimate pressure at which the inflow control device (ICD) maintains structural integrity and functionality. The results of the research revealed critical stress concentration zones and established the dependence of the device's stability on changes in the geometric parameters of its key components. The simulation

results identified critical stress concentration zones and demonstrated the device's resilience dependence on geometric parameters, material properties, and operational conditions.

The presented calculations conclude that at a pressure of  $P = 160$  MPa, the washer material exhibits a minimal safety margin. Exceeding this calculated ultimate pressure leads to irreversible deformations in the device's geometry and reduces its efficiency, confirming the need to strictly adhere to design constraints during bench testing and subsequent application in field operations (ОПИ).

It is also worth noting the significant pressure potential observed during the evaluation of bottomhole pressures in oil field wells. Given this, the inflow control device can be confidently recommended for use in various geological and operational conditions.

### References

1. Ismakov R. A., Gazizov R. R., Nosov N. A. On the issue of the use of inflow control devices in horizontal and multilateral wells. *Drilling and Oil*, 2022, issue 10, P. 20–24. (In Russ).
2. Patent RU 2798005 C1. (2023, June 13). Device for Controlling Fluid Inflow in a Well (IPC E21B 34/08, E21B 43/12, F16K 31/12). Applicants: Prokofyev A.A., Ismakov R.A., Chizhov A.P., Gazizov R.R.; Assignee: Ufa State Petroleum Technological University. Filed: December 8, 2022; Published: June 13, 2023.
3. Bashta T.M. (1972). *Hydraulic drives and hydropneumatic automation*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1972, 321 p. (In Russ).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Исмаков Рустэм Адипович**, доктор технических наук, профессор кафедры БНГС, ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Россия

**Ismakov Rustem Adipovich**, doctor of engineering sciences, professor, BNGS Department, USPTU, Ufa, Russia

**Газизов Ренат Рустамович**, аспирант, ассистент кафедры БНГС, ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Россия  
Для контактов: [ga3i3ov.renat@yandex.ru](mailto:ga3i3ov.renat@yandex.ru)

**Gazizov Renat Rustamovich**, post-graduate student, assistant of BNGS department, USPTU, Ufa, Russia  
Corresponding author: [ga3i3ov.renat@yandex.ru](mailto:ga3i3ov.renat@yandex.ru)

**Чижов Александр Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры ГиРНГМ, ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Россия

**Chizhov Alexander Petrovich**, ph.d. of engineering sciences, associate professor, GIRNGM Department, USPTU, Ufa, Russia