

Компьютерное моделирование работы пружинных конических шайб

*А.Р. Авраменко,
студ.,
В.А. Василенко,
доц. каф. ИКТ, к.т.н., доц.,
Э.М. Кольцова,
зав. каф. ИКТ, д.т.н., проф., kolts@mustr.ru,
В.Л. Лукьянов,
асс. каф. КХТП,
М.Б. Глебов,
зав. каф. КХТП, д.т.н., проф.,
РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва*

Данная работа посвящена компьютерному моделированию работы пружинной конической шайбы в блоке воспламенения твердотопливного газогенератора, применяемого на нефтяных месторождениях с целью восстановления дебита (извлекаемости) скважин. На основе разработанных в РХТУ им. Д.И. Менделеева эскизов образца газогенератора в САПР APM SWR, конфигурация CAD Premium Research были построены трехмерные модели элементов конструкции аппарата. С использованием модуля SimulationXPress проведен прочностной расчет и анализ деформаций пружинной конической шайбы - ключевой детали газогенератора. Цель прочностного расчёта и анализа деформации - выбор материала, наименее подвергающегося деформации и разрушению при применении его в конической шайбе в блоке воспламенения газогенератора.

This paper is devoted to the computing simulation of the work of a spring conical spacer in the ignition block of solid-fuel gas generator, which applied in oil fields to restore the flow rate (production) of the wells. Three-dimensional models of the apparatus's elements were developed in the CAD software APM SWR on the base of drawings of gas generator laboratory sample developed in Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. With the aid of SimulationXPress module, a strength calculation and deformation analysis of the spring conical spacer was carried out. The purpose of the strength calculation and deformation analysis is the choice of the conical spacer material at least going through deformation and destruction.

Введение

На нефтяных месторождениях происходит постоянный процесс исчерпания скважин. При этом, даже при применении современных технологий добычи, неизвлекаемыми остаются порядка 50-70% ресурсов месторождения. Этот огромный процент неизвлекаемой нефти является объектом пристального внимания как руководства нефтегазовых компаний, так и страны.

Одна из ключевых проблем снижения отдачи скважины - кольматация.

Кольматация – закупоривание пор и трещин вокруг ствола скважины мелкими (главным образом коллоидными, глинистыми и пылеватыми) частицами, парафинами и смолянистыми отложениями. В результате этого процесса снижается эффективность добычи сырьевых ресурсов [1].

Один из эффективных путей решения проблемы - восстановление эксплуатационных характеристик скважин.

В конце 80-х гг 20в. получил распространение термогазохимический метод обработки призабойной зоны пласта. Суть метода - применение энергетических материалов для комплексного термобарического и химического воздействия на призабойную зону пласта. В качестве энергетических материалов чаще всего используют твердые топлива (наиболее часто смесевые). Так как твердые топлива (в частности ракетные) сбалансированы по окислителю, то возможно их использование в жидких средах как источник давления, энергии, а также продуктов химического разложения. Таким образом, при сжигании их на забое нефтяной скважины образуется большое количество газов (и, как следствие, высокое давление), очень высокая температура и химически активные по отношению к горным породам продукты горения [2]. Возникшее в стволе скважины при горении твердотопливного заряда избыточное давление в виде волны распространяется от ствола скважины по радиусу в глубь пласта, приводя к возникновению как радиальных, так и продольных трещин. Образующаяся при горении высокотемпературная парогазовая смесь, проникая в горную породу, приводит к ее разогреву, выплавляя и разлагая в ней асфальтосмолистые компоненты, очищая таким образом призабойную зону скважины от ее загрязнителей. Кислые продукты горения топлива (в случае смесевых топлив - галогеноводороды) реагируют с компонентами горной породы, приводя к расширению пор в ней. В целом происходит синергетический эффект при взаимодействии гидравлического, теплового и химического воздействий на призабойную зону скважины, что определяет высокую эффективность применения метода.

Результаты показали, что при правильно подобранных для обработки скважинах, их дебит возрастает в несколько раз, а продолжительность повышенного дебита вырастает до года и более.

Разработка термогазохимического метода проводилась Российским химико-технологическим университетом имени Д.И. Менделеева в ходе выполнения Государственного контракта [3]. Полученные результаты позволили сформировать направления развития метода: адаптация топлив к обрабатываемой горной породе, использование единичного регулируемого воздействия, разработка метода циклического воздействия, создание новых конструкций газогенераторов.

Основа этого метода - прогрев призабойной зоны, образование трещин и расплавление в закупоренных порах солей, смолянистых отложений и парафинов.

Применение этого метода повышает проницаемость скважин путем очищения порового пространства вокруг ее ствола.

Проведение реальных (полевых) испытаний по подбору эффективной конструкции деталей газогенератора, даже в лабораторных масштабах, выбору материала деталей довольно затруднительно, а в некоторых случаях практически невозможно. Эти задачи могут быть решены с помощью применения современных пакетов CAE/CAD программ для автоматизации инженерного анализа и проектирования, позволяющие визуализировать и моделировать физические процессы, явления, проводить численные эксперименты.

Целью данной работы является компьютерное моделирование работы пружинной конической шайбы в блоке воспламенения твердотопливного газогенератора.

1. Конструкция газогенератора

Модель газогенератора, осуществляющего поджиг заряда твердотопливной композиции, спроектирована в РХТУ им. Д.И. Менделеева [4]. Аппарат позволяет повысить продуктивность нефтяных и газовых скважин. Результатом использования газогенератора является очищение ствола скважины, показывающей низкую проницаемость, термогазохимическим воздействием. Метод показывает высокую стабильность работы и предназначен для работы на различных уровнях глубины технического колодца скважины.

Газогенератор можно условно разделить на три части: 1- верхняя часть, в которую подается скачек давления; 2- цилиндрический корпус, внутри которого проходит плунжер; 3- нижняя часть, где расположен заряд твердого топлива.

Схематично работа газогенератора представлена на рис. 1. Газогенератор погружается на требуемую глубину, после чего в колонне насосно-компрессорных труб применяется резкое повышение давления. Вследствие перепада давления плунжер 2, закрепленный на кольцевом бортике, слетает вниз, и в цилиндрическом корпусе 1, по которому он проходит, происходит сжатие газа (рис. 1а). Воздействие повышенного давления и движения плунжера нагревает газ до температуры, гораздо превосходящую температуру химического разложения активатора, что так же увеличивает уровень нагрева системы. Под действием нагретого сжатого газа происходит разрыв нижней мембраны, после чего плунжер вместе с тепловым активатором попадает в нижнюю часть газогенератора с зарядом твердотопливной композиции. После прохождения в нижнюю часть аппарата 5 через пружинную коническую шайбу 3 поршень раздвигает и деформирует ее. Высоко нагретые частицы температурного промотора, попадая на поверхность твердотопливных элементов, воспламеняют их, инициируя этим воспламенение основного заряда твердого топлива (рис.1б). Под действием давления нагретая смесь газа и температурного промотора выбрасывается в камеру с зарядом твердого топлива 4. Шайба 3 является так же упорным кольцом, не позволяющим плунжеру по инерции отбрасываться обратно в цилиндрический корпус 1 (рис. 1в).

Заряд твердого топлива в блоке воспламенения газогенератора горит с выделением горячих газов (N_2 , HCl , HF , H_2 и др.) [5]. Горячие газы создают давление, которое инициирует образование трещин в призабойной зоне скважины. Горячие газы также плавят находящиеся в порах частицы, образуя колматацию. Благодаря синергетическому эффекту горячих газов в виде давления, термического воздействия и химического взаимодействия значительно снижается колматация, повышая проницаемость колодца скважины.

Подбор габаритных размеров и массовых характеристик плунжера и цилиндра, исходя из имеющихся данных о свойствах скважины и ее глубины, дает возможность регулировать скорость движения первого.

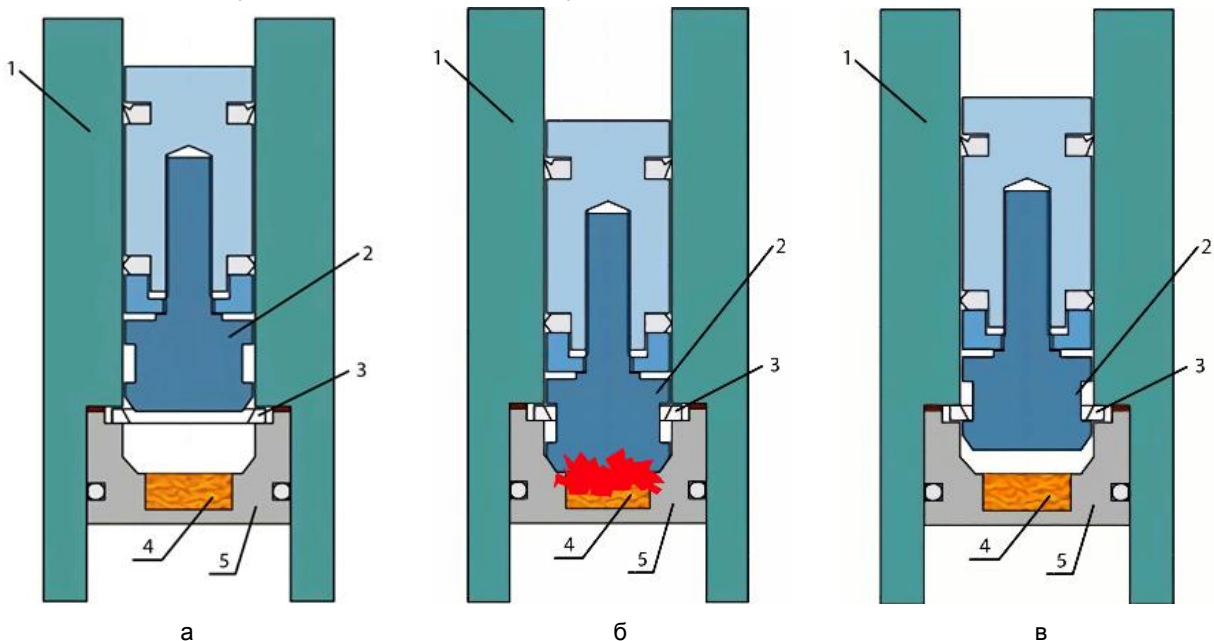


рис.1 Схематичное представление работы газогенератора

2. Результаты компьютерного моделирования шайбы

Ключевая деталь газогенератора - коническая шайба, которая подвергается воздействию ударной нагрузки до 400 атм. Поэтому одна из ключевых задач при разработке газогенератора – выбор конструкции конической шайбы, анализ ее прочностных характеристик с дальнейшим подбором материала, наименее подвергающемуся деформации и напряжению.

Для решения данной задачи был использован продукт САПР APM SWR, конфигурация CAD Premium Research. Были смоделированы трехмерные модели элементов конструкции аппарата. Осуществлена сборка смоделированных деталей в единую конструкцию.

Для проведения прочностного расчета и анализа деформаций пружинной конической шайбы был использован модуль SimulationXPress. Расчеты производились методом конечных элементов (МКЭ), который в настоящее время является стандартом при решении задач механики твердого тела посредством численных алгоритмов.

До начала анализа необходимо назначить исследуемым деталям материал, например, из библиотеки материалов или добавить пользовательский, зная его свойства.

Для статического анализа необходимо закрепить конструкцию (шайбу и мембрану) и выбрать фиксирующие ограничения: корпус нижней мембраны (рис.2а) и внешнюю грань шайбы (рис. 2б).

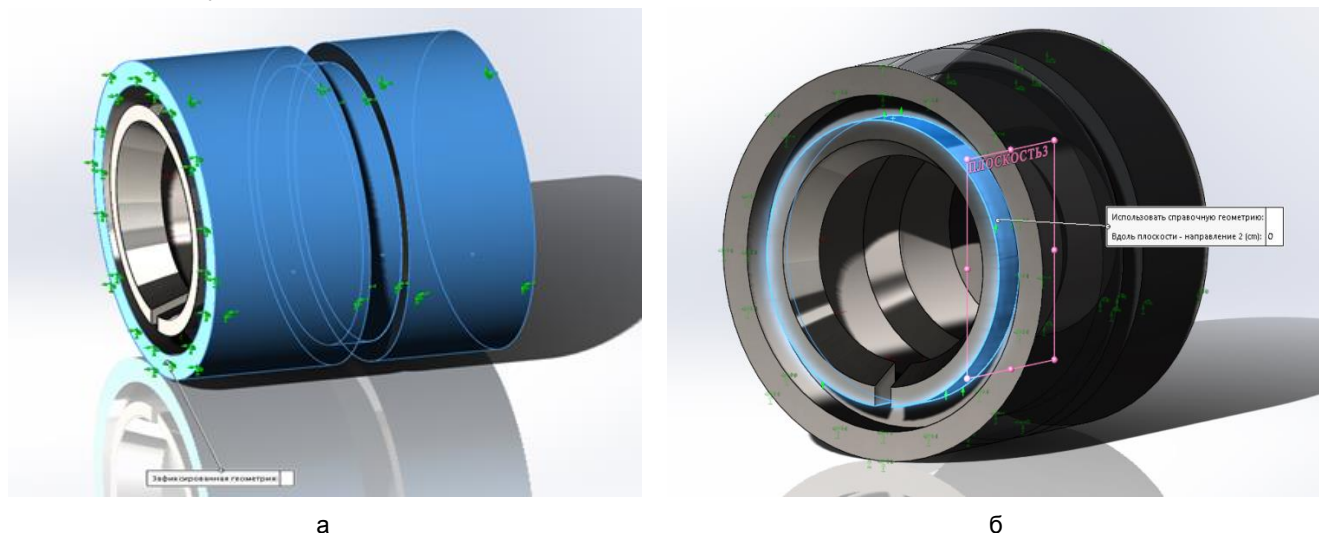


рис. 2 Назначение фиксирующих ограничений

Конечно-элементная расчетная сетка шайбы (рис. 3) для текущего исследования строится автоматически.



рис. 3 Конечно-элементная расчётная сетка

Для задания внешней нагрузки, в первую очередь необходимо определить массовые характеристики плунжера с помощью инструмента «Массовые характеристики» модуля «Анализировать». Исходя из данных о скорости хода плунжера после срыва его с фиксирующего кольцевого бортика из-за перепада давления, можно рассчитать силу, с которой плунжер действует на пружинную коническую шайбу.

Исследования проводили при задании различных материалов шайбы с целью выбора материала, наименее подвергающегося деформации и разрушению.

После того как заданы модель с сеткой и набор ограничений перемещения и нагрузок, программа линейного статического анализа модуля Simulation составляет и решает систему линейных совместных уравнений равновесия конечных элементов для вычисления составляющих перемещения в каждом узле, далее использует результаты по перемещениям для расчета составляющих деформации. Затем программа использует результаты расчета деформации и отношение напряжение-деформация для вычисления напряжений. В таблице 1 приведено сравнение прочностных характеристик шайбы при использовании различных материалов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики материалов

Материал	Деформация, безразмерная	Перемещение, мм	Напряжение, Па
Ст4пс	$1,950 \cdot 10^{-6}$	$1,167 \cdot 10^{-5}$	$2,278 \cdot 10^5$
20ХН2М	$1,221 \cdot 10^{-6}$	$7,563 \cdot 10^{-6}$	$2,973 \cdot 10^5$

16ХГН	$7,315 \cdot 10^{-7}$	$6,185 \cdot 10^{-6}$	$3,271 \cdot 10^5$
30ХН2МА	$6,865 \cdot 10^{-7}$	$5,277 \cdot 10^{-6}$	$3,051 \cdot 10^5$

Из таблицы 1 видно, что наименее подвергающимся деформации является сталь 30ХН2МА. Ниже приведены результаты компьютерного моделирования для данного материала.

Напряжение по вон Мизесу показано на рисунке 4. Наибольшее напряжение составляет $3,051 \cdot 10^5$ Па.

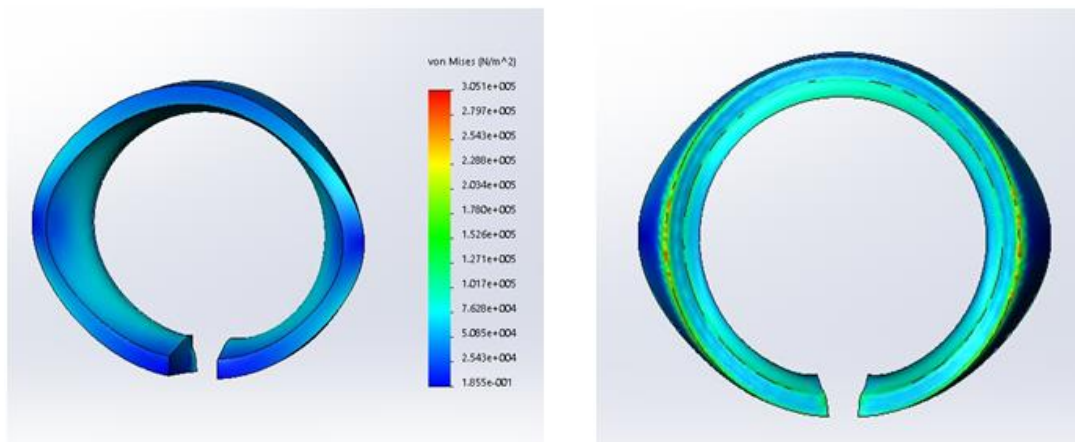


рис. 4 Статический анализ напряжения: а) – вид спереди; б) – вид сзади

На рис. 5 представлена эпюру перемещений, максимальное значение которой составило $5,277 \cdot 10^{-6}$ мм.

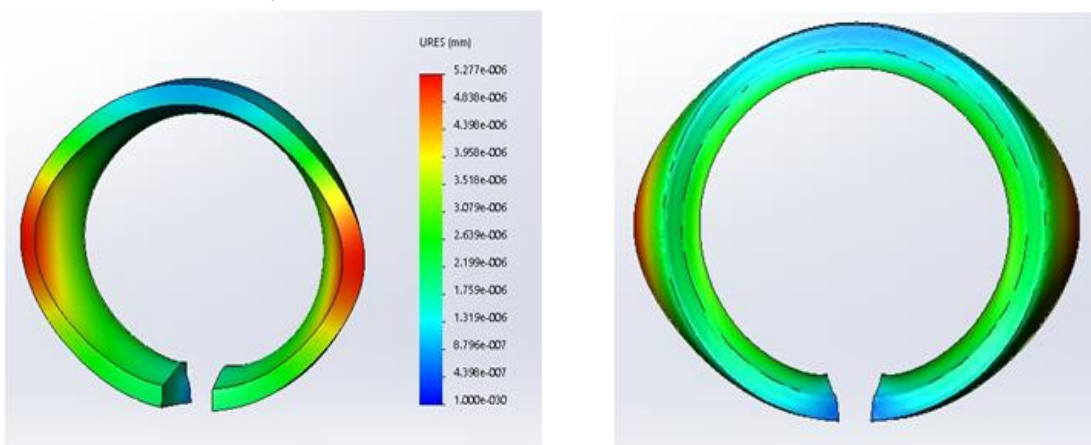


рис. 5 Диаграмма перемещений: а) – вид спереди; б) – вид сзади

Относительная деформация конической шайбы отображена на рис. 6. По шкале видно, что максимальное значение деформации равно $6,865 \cdot 10^{-7}$.

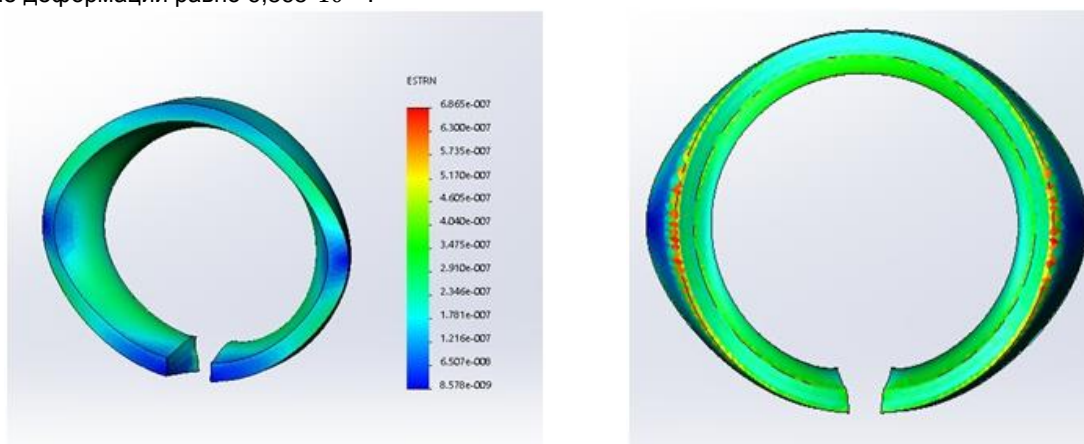


рис. 6 Эпюра относительной деформации: а) – вид спереди; б) – вид сзади

Проведён анализ деформации шайбы при движении плунжера в обратном направлении под давлением 400 атм. Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 7.

Наибольшее напряжение по вон Мизесу составляет $2,451 \cdot 10^8$ Па (рис. 7а), значение максимального перемещения составило $7,054 \cdot 10^{-3}$ мм (рис. 7б), максимальное значение деформации равно $6,426 \cdot 10^{-4}$ (рис. 7в)

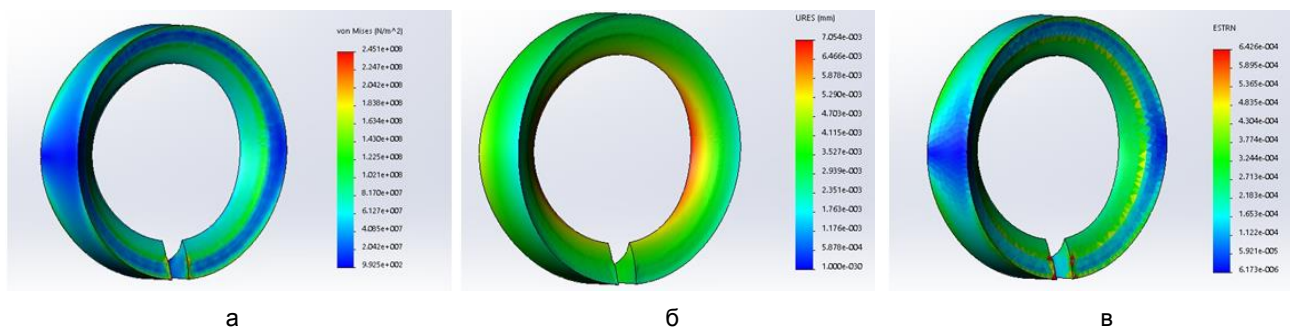


рис. 7 Результаты компьютерного моделирования

Заключение

В САПР APM SWR, конфигурация CAD Premium Research, построены трехмерные модели элементов конструкции аппарата. Осуществлена сборка смоделированных деталей в единую конструкцию. С использованием модуля SimulationXPress проведен прочностной расчет и анализ деформаций пружинной конической шайбы, проведены исследования по выбору её материала, наименее подвергающегося деформации и разрушению. Получены эпюры, характеризующие деформацию, перемещение и напряжение. Наилучшее результаты (наименьшие значения по деформации, перемещению) показала сталь марки 30ХН2МА.

Одним из продолжением работы является проведение вычислительных экспериментов при различных значениях давления и температуры, а также оптимизация конструкции шайбы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ соглашение № 14.583.21.0064, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI58317X0024..

Литература

1. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 01.09.2018).
2. Сучков Б. М. Интенсификация работы скважин. – Ижевск: ИКИ, 2007. – 612 с.
3. Разработка научных основ термогазохимического воздействия на нефтяные и газоконденсатные скважины с целью повышения компонентоотдачи и новых технологий утилизации попутных нефтяных газов: отчёт о НИР (заключ.) / РХТУ им. Д.И.Менделеева; рук. Кольцова Э.М.; исполн: Женса А.В. [и др.]. – М. 2013.– 727с. № ГР 01201373924. – Инв. № 0097/1.
4. Пат. 2363840 РФ, МКИ Е 21 В 34/263. Газогенератор для повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин
5. Струнин В.А., Манелис Г.Б. Механизм горения смесевых твёрдых топлив // ФГВ. – 1979. – Т.15. – С.24-33.