

# ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БОЛТОВОГО И ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

*И. И. Каныгин, Р. А. Барабанов, Д. Ю. Дьянов, Е. А. Филимонкин,  
К. В. Циберева, Э. А. Быкова, Н. И. Колпаков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время разрабатывается многофункциональный комплекс ЛОГОС для решения широкого круга задач механики деформируемого твердого тела на многопроцессорных вычислительных ресурсах [1, 2]. Одной из составных частей данного комплекса является пакет программ ЛОГОС-Прочность решения задач расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций при квазистатических термосиловых воздействиях, основанный на методе конечных элементов (МКЭ). Этот пакет программ позволяет проводить численное решение задач статической прочности как в линейной, так и в нелинейной постановках.

Во многих инженерных конструкциях болтовые соединения, связывающие разные конструкционные элементы, играют крайне важную роль, обеспечивая общую целостность конструкции. При проектировании болтовых соединений задается не случайная, а вполне конкретная и выверенная сила затяжки (преднатяга/преднатяжения) болта, потому что при слишком малой силе затяжки связывающего крепления повышается вероятность возникновения критических вибраций или сдвигов, что, в свою очередь, может явиться причиной неустойчивости системы или приводить к неплотным соединениям между уплотнительными прокладками. С другой стороны, если сила затяжки будет слишком велика, соединение может получить необратимые механические повреждения, что увеличивает вероятность вывода из строя всей конструкции.

Процесс подбора нужной величины силы затяжки элементов конструкции может быть ресурсозатратным и потребовать большого количества опытных испытаний, в противном случае велик риск конструкционной ошибки. Кроме того, этот процесс затратен и по времени, поэтому для экономии времени и ресурсов в инженерном проектировании применяется компьютерное моделирование для расчета преднапряженных соединений и подбора оптимального усилия затяжки элементов конструкции.

В данной работе приводится описание реализации в пакете ЛОГОС-Прочность функционала, позволяющего моделировать болтовые и заклепочные соединения при решении задач квазистатической прочности.

Для демонстрации работоспособности и эффективности реализованных функциональных возможностей в докладе представлены результаты численного расчета задач, проведенного с использованием пакета программ ЛОГОС-Прочность. Проводится сравнительный анализ полученных результатов с эталонными решениями.

## 1. Методология моделирования болтового соединения

Методология моделирования болтового соединения, реализованная в ЛОГОС-Прочность, основана на работах [3], [4], [5] и состоит в следующем.

Моделирование усилия преднатяга осуществляется при помощи создания дополнительного набора узлов в секции (зоне/области) преднатяжения, дублирующих (т. е. геометрически совпадающих) узлы исходной конечно-элементной сетки. Эти дополнительные узлы определяют дополнительный набор граней элементов, дублирующих грани исходной поверхности преднатяга. Таким образом, исходная поверхность преднатяга искусственно разбивается на 2 поверхности сверху и снизу зоны преднатяжения (верхняя и нижняя поверхности определяются направлением задаваемой нормали к поверхности преднатяга). Все структуры и данные, определенные в расчетной модели для узлов и граней исходной сетки, дублируются на структуры и данные, определенные на дополнительно вводимых узлах и гранях.

В каждой зоне преднатяжения задается определяющий узел (reference node), в котором иницируется направление и модуль нагрузки, приложенной к секции преднатяжения. Определяющий узел связан с исходными и дублированными узлами зоны преднатяга посредством многоточечных ограничений MPC (multi-point constraint), обеспечивающих, во-первых, связность сетки двух поверхностей преднатяга и, во-вторых, передающих усилие преднатяга на все узлы из зоны преднатяга.

Реализация секции преднатяженного состояния в программном модуле ЛОГОС-Прочность сводится к следующим основным процедурам:

- иницирование определяющего узла – задание координат узла, нормали к зоне преднатяга, за-

дание усилия преднатяга (в виде вынуждающей силы или заданного перемещения);

- формирование зоны (поверхности) преднатяжения: дублирование узлов исходной сетки, замена индексов исходных узлов индексами узлов-дубликатов для элементов, расположенных снизу зоны преднатяга, наследование граничных/начальных данных с узлов/граней исходной сетки на дополнительные узлы/грани. Иными словами, процедура формирования зоны преднатяга сводится к созданию двух контактных поверхностей преднатяга с геометрически совпадающими узлами;

- формирование набора многоточечных соединений, выражающих связь между определяющим узлом преднатяга и узлами двух поверхностей преднатяга.

Далее описываются иллюстрирующие детали метода расчета преднатяженного болтового соединения в ЛОГОС-Прочность.

Поверхность преднатяжения определяется набором граней, разделяющих два слоя элементов сверху и снизу поверхности преднатяга (рис. 1).



Рис. 1. Зона преднатяжения

В секции преднатяжения (рис. 2) задаются следующие характеристики: определяющий узел, определяющая нормаль к поверхности преднатяга, характеристики приложенной нагрузки (тип, величина, вектор приложения). В расчетной модели может быть определено множество секций преднатяга, каждая из которых соответствует одному соединению.

Построение набора граней, определяющих зону преднатяга, осуществляется средствами программного модуля ЛОГОС-ПреПост следующим образом: строится плоскость, проходящая через определяющий узел перпендикулярно определяющей нормали, и определяется поверхность, состоящая из граней элементов, пересекаемых плоскостью. При этом для каждого пересекаемого плоскостью элемента отбирается единственная грань, нормаль к которой составляет угол с определяющей нормалью, наиболее

близкий к  $0^\circ$  или  $180^\circ$  (условие выражает близость нормалей к параллельности).



Рис. 2. Параметры секции преднатяжения

Как было сказано выше, для каждого исходного узла зоны преднатяжения создается узел-дубликат; набор граней, составленных из узлов-дубликатов, образует дубликат поверхности преднатяжения (рис. 3).



Рис. 3. Дублирование узлов поверхности преднатяжения

Связь между двумя поверхностями преднатяга – исходной и дублированной – обеспечивается путем введения многоточечных ограничений (MPC – multi-point constraint), определяемых уравнением [3]:

$$U_E = U_I + U_R \quad (1)$$

где  $U$  – вектор узлового смещения, индекс «E» означает дополнительный узел (узел-дубликат), индекс «I» – исходный узел, «R» – определяющий узел секции преднатяга.

В программном модуле ЛОГОС-ПреПост предусмотрено несколько режимов задания секции преднатяжения (несколько режимов разбиения, рис. 4):

- Режим автоматического разбиения (детально описан выше, применяется для построения зоны преднатяжения «с нуля»)

- Режим разбиения по граням (применяется в случае, когда поверхности зоны преднатяжения в задаче уже разделены, т. е. проводить процедуру дублирования узлов не требуется)

- Режим разбиения по узлам (применяется при импорте из внешнего формата)

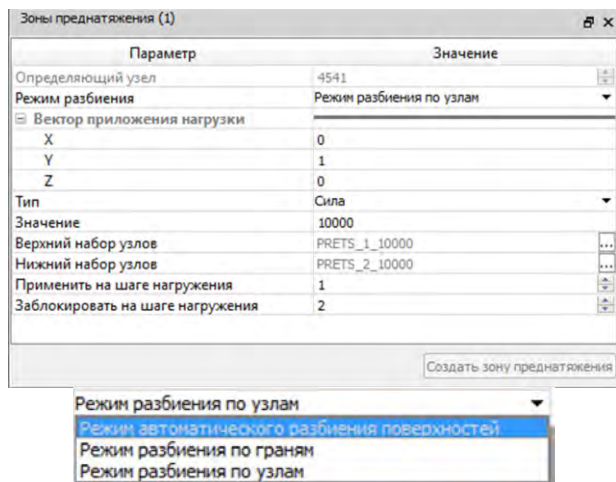


Рис. 4. Режимы разбиения секции преднатяжения

## 2. Методология моделирования заклепочного соединения

Заклепочные соединения, связывающие отдельные элементы конструкции в единое целое, часто используются в конструкционной практике при создании различных образцов техники. В связи с этим возникает необходимость разработки программных средств для численного моделирования поведения таких соединений в рамках прочностного решателя.

Ввиду возможного большого количества заклепочных соединений в расчетной модели моделирование их напрямую, т. е. через детальное описание

тела заклепки с помощью объемных конечных элементов с выставлением соответствующего контактного взаимодействия, может оказаться неприемлемым с точки зрения затрат вычислительных ресурсов для проведения расчета, а также затрат пользователя на подготовку сеточной модели.

Учитывая данный факт, в текущей версии модуля ЛОГОС-Прочность предложена модель заклепочного соединения, которая с одной стороны описывает основные особенности деформирования данного соединения, а с другой является менее затратной с точки зрения ресурсов, чем прямое моделирование. Методология моделирования заклепочного соединения, реализованная в ЛОГОС-Прочность, основана на работах [6], [7] и состоит в следующем.

Тело заклепки моделируется балочными элементами с характеристиками поперечного сечения (площадь, моменты инерции, коэффициент сдвига), соответствующими сечению данного крепежного элемента. Со всеми деталями стягиваемого данным крепежом пакета балочные элементы соединяются элементами жесткой связи. Данные элементы жесткой связи связывают степени свободы узла на теле заклепки со степенями свободы узлов деталей по периметру отверстия заклепки, обеспечивая тем самым условия совместности деформирования соединения. При этом пользователь по своему усмотрению может использовать любые типы конечных элементов для описания конструкции деталей, скрепляемых заклепочным соединением. На рис. 5 в качестве примера представлено заклепочное соединение двух оболочечных частей, смоделированное по данной технологии.

## 3. Результаты расчетов

В качестве иллюстрации применения пакета программ ЛОГОС-Прочность для численного моделирования болтового и заклепочного соединений при решении задач квазистатической прочности в данном разделе представлены результаты расчетов некоторых задач.

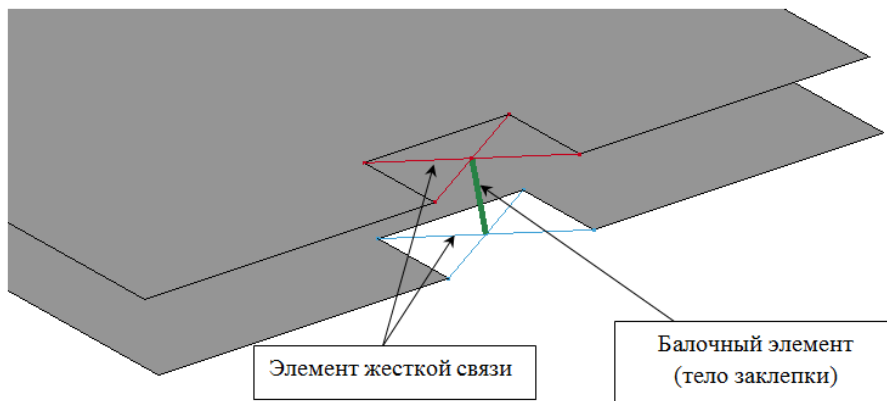


Рис. 5. Моделирование заклепочного соединения оболочечных частей

### 3.1. Численное моделирование процесса статического деформирования заклепочного соединения

Решается задача статического деформирования конструкции, состоящей из нескольких частей, скрепленных двумя заклепочными соединениями, под действием внешней нагрузки в виде предписанного перемещения, приложенного к части узлов модели.

Начальная геометрия задачи приведена на рис. 6. Расчетная модель включает в себя три подобласти, состоящие из оболочечных элементов, одну подобласть из балочных элементов и 6 элементов жесткой связи. Балочные элементы в сочетании с элементами жесткой связи образуют заклепочные соединения, которые скрепляют разделенные в пространстве оболочечные подобласти в единую деформируемую конструкцию.

Расчет проводился с использованием модели упругого материала. Физико-механические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики материала

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , Па	$\nu$
7850	$2 \cdot 10^{11}$	0.3

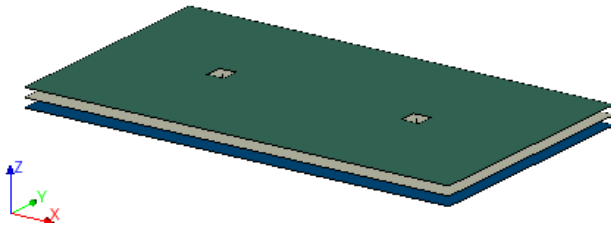


Рис. 6. Начальная геометрия

Узлы по кромкам оболочек соответствующим образом закреплены, а для набора узлов рис. 7 задано предписанное перемещение по оси  $X$ .

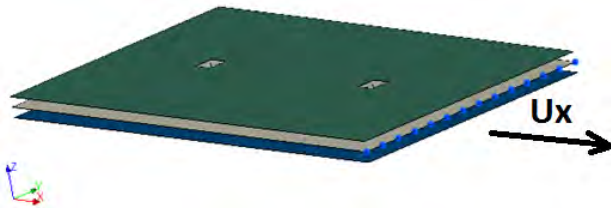


Рис. 7. Набор узлов с предписанным перемещением по оси  $X$

Ниже приведены (рис. 8) поля полных смещений на конечный момент времени, полученные по модулю ЛОГОС-Прочность.

Ниже схематично изображено (рис. 9) деформированное состояние конструкции, полученное для расчета в схожей постановке по коммерческому пакету (КПО) [8].

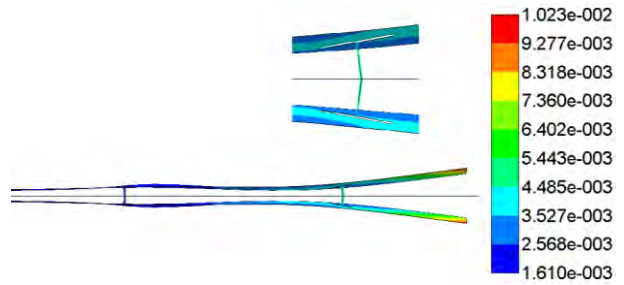


Рис. 8. Результирующие смещения в расчете по ЛОГОС-Прочность

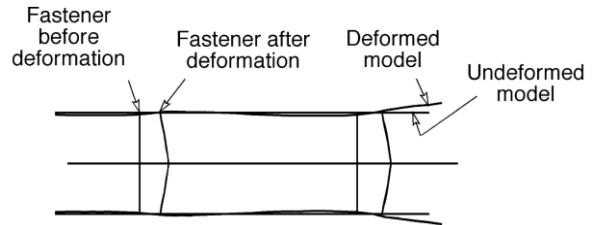


Рис. 9. Схематичное отображение деформированного состояния по КПО

Анализ результатов показывает, что одной из характерных особенностей деформирования конструкции является присутствие деформаций, выводящих верхнюю и нижнюю оболочки из плоскости. Как видно из приведенных рисунков, деформированные состояния конструкции, полученные численным моделированием по ЛОГОС-Прочность и КПО, показывают качественное согласие.

### 3.2. Численное моделирование процесса статического деформирования типового фрагмента болтового соединения

Решается задача статического деформирования конструкции, представляющей из себя четверть болта с выставлением соответствующих граничных условий на плоскостях симметрии. Начальная геометрия задачи приведена на рис. 10. Постановка является многошаговой: на первом шаге нагружения происходит затяжка болтового соединения под действием нагрузки в виде приложенной силы затяжки в центральной части модели, на втором шаге к верхней шайбе прикладывалось давление.

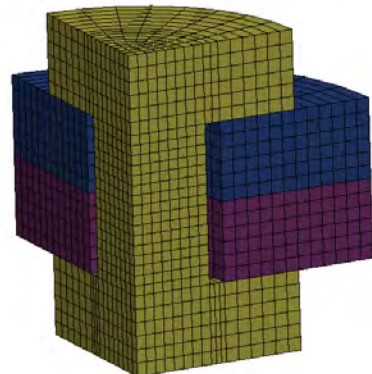


Рис. 10. Начальная геометрия

Расчет проводился с использованием модели упругого материала. Физико-механические характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические характеристики материала

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , Па	$\nu$
7850	$2 \cdot 10^{11}$	0,3

На рис. 11 приведены картины распределения полей перемещения на момент окончания расчета, а на рис. 12 – картины распределения полей напряжений, полученные при решении данной задачи по ЛОГОС-Прочность и по одной из конечно-элементных методик, чей результат рассматривается в качестве эталонного.

Результаты численного решения задачи приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты численного решения задачи

Величина	ЛОГОС-Прочность	Эталонное решение	Относительное отклонение, %
Максимальное результирующее перемещение, мм	0,07155	0,07155	0
Максимальное напряжение по Мизесу, кгс/мм <sup>2</sup>	1070,58	1070,58	0

Сравнивая полученные данные, можно сделать вывод о качественном и количественном согласии результатов по ЛОГОС-Прочность с эталонным решением.

### 3.3 Численное моделирование процесса статического деформирования болтового соединения (трубка)

Решается задача статического деформирования конструкции, начальная геометрия которой представлена на рис.13. Нижняя плоскость болта закреплена от перемещений; постановка является многошаговой: на первом шаге нагружения происходит затяжка болтового соединения под действием нагрузки в виде приложенной силы затяжки в центральной части модели, на втором шаге к верхней части трубки прикладывалось давление.

Расчет проводился с использованием модели упругого материала. Физико-механические характеристики приведены ниже (табл. 4).

Таблица 4

Физико-механические характеристики материала

	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Болт	$1,1 \cdot 10^5$	0,3
Шайба		
Трубка	$2,1 \cdot 10^5$	

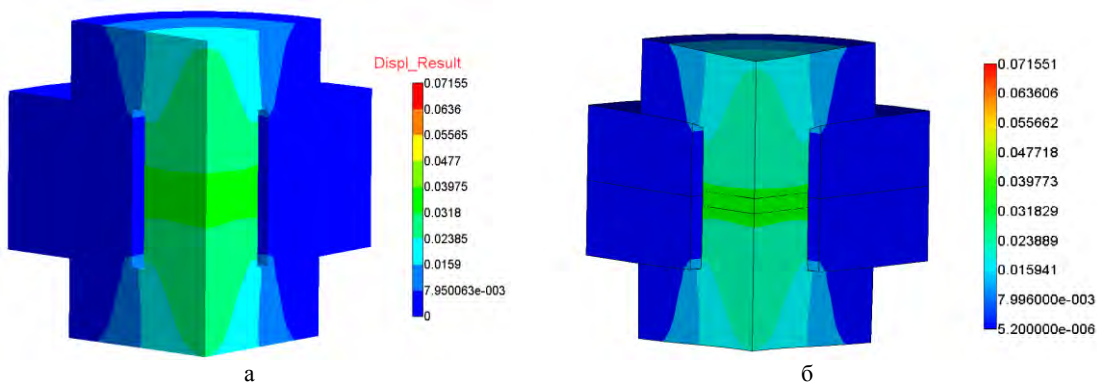


Рис. 11. Поля полных перемещений на конечный момент: а – ЛОГОС-Прочность, б – эталонное решение

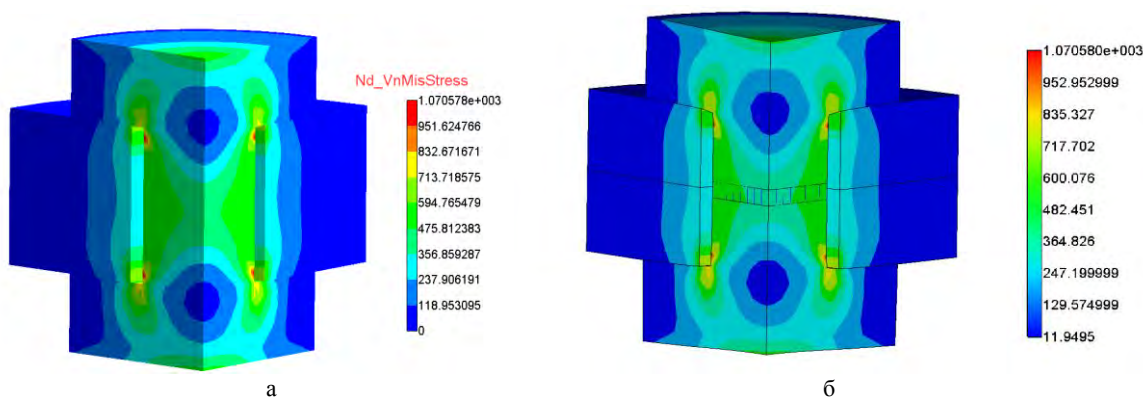


Рис. 12. Поля напряжений на конечный момент: а – ЛОГОС-Прочность, б – эталонное решение

## Результаты численного решения задачи

Величина	ЛОГОС-Прочность	Эталонное решение	Относительное отклонение, %
Максимальное результирующее перемещение, мм	5,56e-06	5,41e-06	<3 %
Максимальное напряжение по Мизесу, кгс/мм <sup>2</sup>	7,02e+06	6,90e+06	<2 %

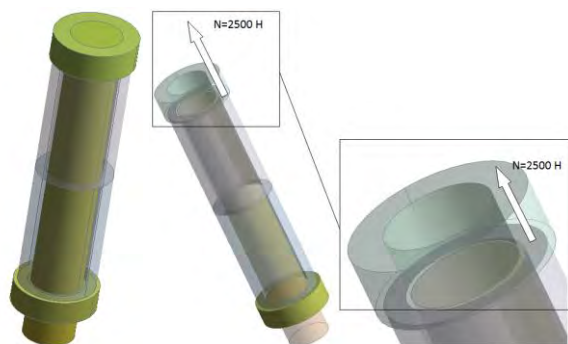


Рис. 13. Начальная геометрия

На рис. 14 приведены картины распределения полей перемещения на момент окончания расчета, а на рис. 15 – картины распределения полей напряжений, полученные при решении данной задачи по ЛОГОС-Прочность и по одной из конечно-элементных методик, чей результат рассматривается в качестве эталонного.

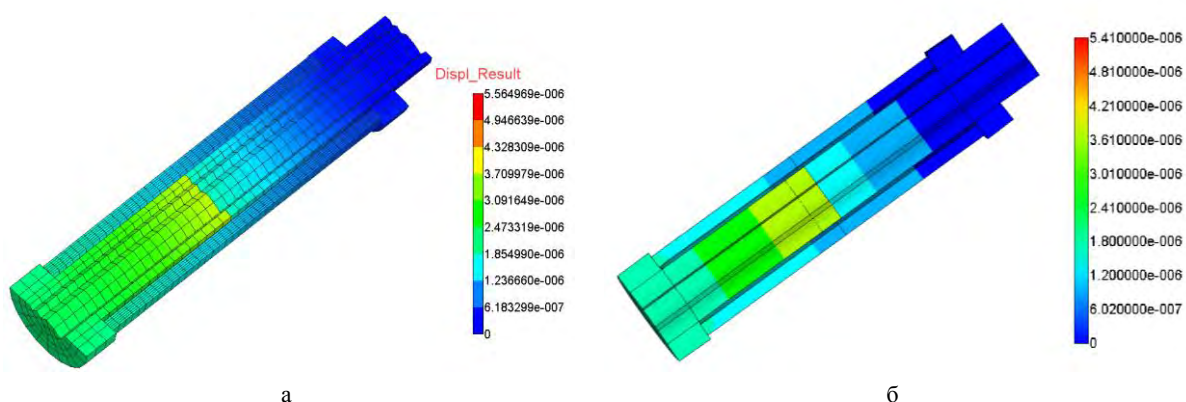
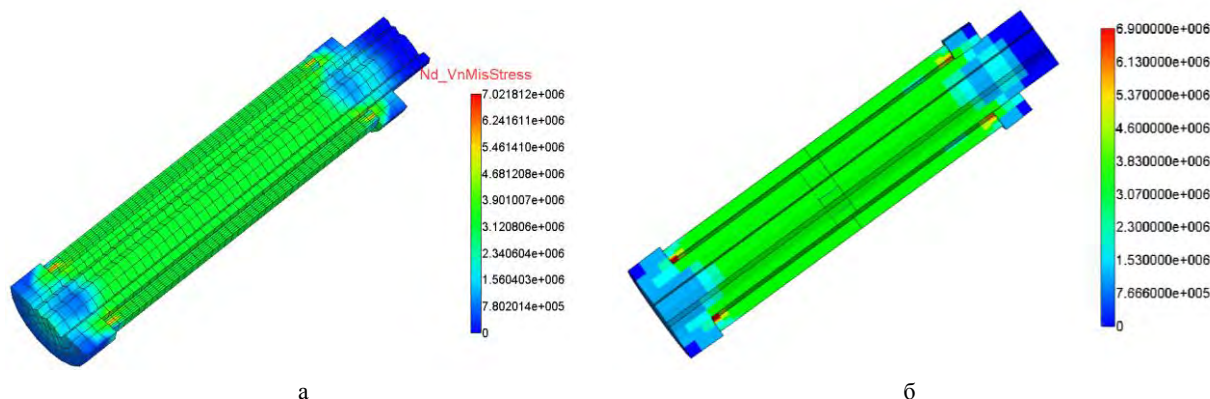
Сравнивая полученные данные, можно сделать вывод о хорошем качественном и количественном согласии результатов по ЛОГОС-Прочность с эталонным решением.

Результаты численного решения задачи приведены в табл. 5.

## Заключение

В данной работе приведено описание реализации в пакете ЛОГОС-Прочность функционала, позволяющего моделировать болтовые и заклепочные соединения при решении задач квазистатической прочности.

Работоспособность и эффективность реализованного функционала показана на примере численного решения задач. Хорошее согласие результатов расчетов рассмотренных задач с эталонными решениями, полученными по другим программам инженерного анализа, указывает на готовность пакета программ

Рис. 14. Поля полных перемещений на конечный момент:  
а – ЛОГОС-Прочность, б – эталонное решениеРис. 15. Поля напряжений на конечный момент:  
а – ЛОГОС-Прочность, б – эталонное решение

ЛОГОС с достаточной степенью точности описывать процессы статического деформирования конструкций с учетом моделирования болтовых и заклепочных соединений.

### Литература

1. Филимонкин Е. А., Барабанов Р. А., Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Наумов А. О., Косарим С. С., Александрова О. Л., Рябов А. А. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач статической прочности конструкций с учетом физической и геометрической нелинейностей // Сборник докладов XI научно-технической конференции «Молодежь в науке» / Секция «Теоретическая и математическая физика». Саров, 2012.

2. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование». – Саров, 2011.

3. Hibbitt, Karlsson and Sorenson. Computer process for prescribing an assembly load to provide pretensioning simulation in the design analysis of load-bearing structures // United States Patent, patent number: 5,920,491, date of patent: Jul. 6, 1999.

4. Fukuoka T. Analysis of the Tightening Process of Bolted Joint With a Tensioner Using String Elements, Journal of Pressure Vessel Technology, November 1994, Vol. 116. P. 443–448.

5. ANSYS Basic Analysis Guide section 2.9 «Defining Pretension in a Joint Fastener», ANSYS Software Revision 5.7.1, ANSYS Inc., 2002.

6. Multi-Spring Representation of Fasteners for MSC/NASTRAN Modeling. A. Rutman, J. B. Kogan. Proceedings of The 1st MSC Conference for Aerospace Users, L. Angeles, 1997.

7. A novel finite element for modeling a fastener in a lap joint assembly. A dissertation by Brian D. Foster, 2014.

8. Rutman A., Viisoreanu A., Parady J. A. Fasteners Modeling for MSC. Nastran Finite Element Analysis. Paper No. 2000-01-5585. Proceedings of the 2000 World Aviation Conference, San Diego, October 2000.