

## **Компьютерная система для анализа напряженно-деформированного состояния болтовых соединений гидротурбины**

*Национальный технический университет «ХПИ»*

Разработана параметрическая модель болтового соединения и на ее основе создана компьютерная система для проведения многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния болтовых соединений гидротурбин. Определены коэффициенты концентрации напряжений под головкой для болта М110х4.

**Ключевые слова:** болтовое соединение, коэффициент концентрации напряжений, гидротурбина, контактные напряжения, компьютерная система

### **Введение**

Болтовые соединения являются неотъемлемой частью различных конструкций (в том числе гидротурбин) и могут определять ресурс изделия. Это предъявляет особые требования к точности анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) болтовых соединений.

Важным аспектом данной работы является исследование НДС болтов с так называемыми двухрадиусными галтелями, в которых концентрация напряжений под головкой болта снижается, по сравнению с болтами, имеющими однорадиусную галтель [1]. Так как исследование влияния соотношения радиусов, их взаимного расположения на НДС болта в литературе не исследовано [1], то актуальной является задача разработки компьютерной системы, позволяющей проводить многовариантные исследования и достоверно определить НДС болтов различных типоразмеров с учетом контактного взаимодействия головки болта с сопрягаемым телом, а также в резьбе.

### **1. Построение параметрической конечно-элементной модели болтового соединения**

Параметрическая модель разработана на основе чертежей типовых болтов методом декомпозиции. Для типового болта выделены основные параметры, однозначно определяющие его геометрические характеристики. Результаты такого моделирования представлены в виде диаграммы классов (рис. 1) на универсальном языке моделирования (UML). С учетом диаграммы классов и типовых чертежей болта, была построена параметрическая модель болта (рис. 2, а).

Основным фактором, определяющим НДС болта крепления рабочего колеса гидротурбины, является тепловая затяжка болта [2]. При таком виде нагрузки болт можно рассматривать в осесимметричной постановке [3]. Так, на основе параметрической геометрической модели (см. 2, а), была построена параметрическая осесимметричная конечно-элементная (КЭ) модель с учетом контактного взаимодействия головки болта с сопрягаемым телом, а также в резьбе (рис 2, б). Для построения конечно-элементной модели использовался восьмиузловой конечный элемент с двумя степенями свободы в узле. В качестве граничных условий, которые моделируют тепловую затяжку, задавалось начальное смещение (натяг) головки болта относительно опорной поверхности на величину теплового удлинения. Данный параметр является наиболее удобным с инженерной точки

зрения, так как в дальнейшем его можно легко пересчитать как в температуру нагрева болта при тепловой затяжке, так и в угол поворота болта при использовании силовой затяжки холодным способом.

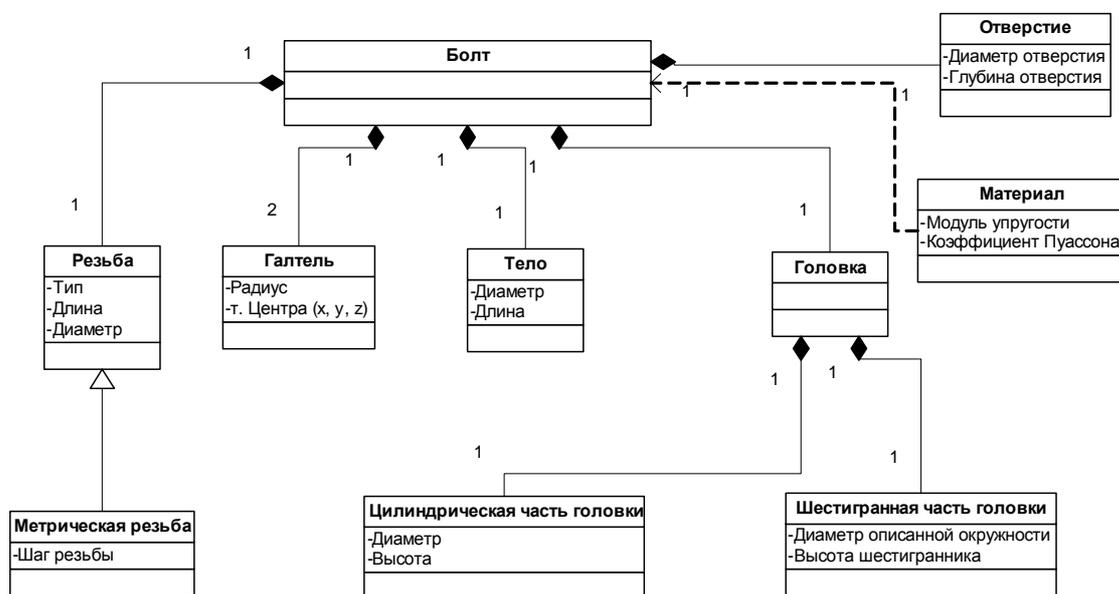


Рис. 1. Диаграмма классов, описывающая структуру болта

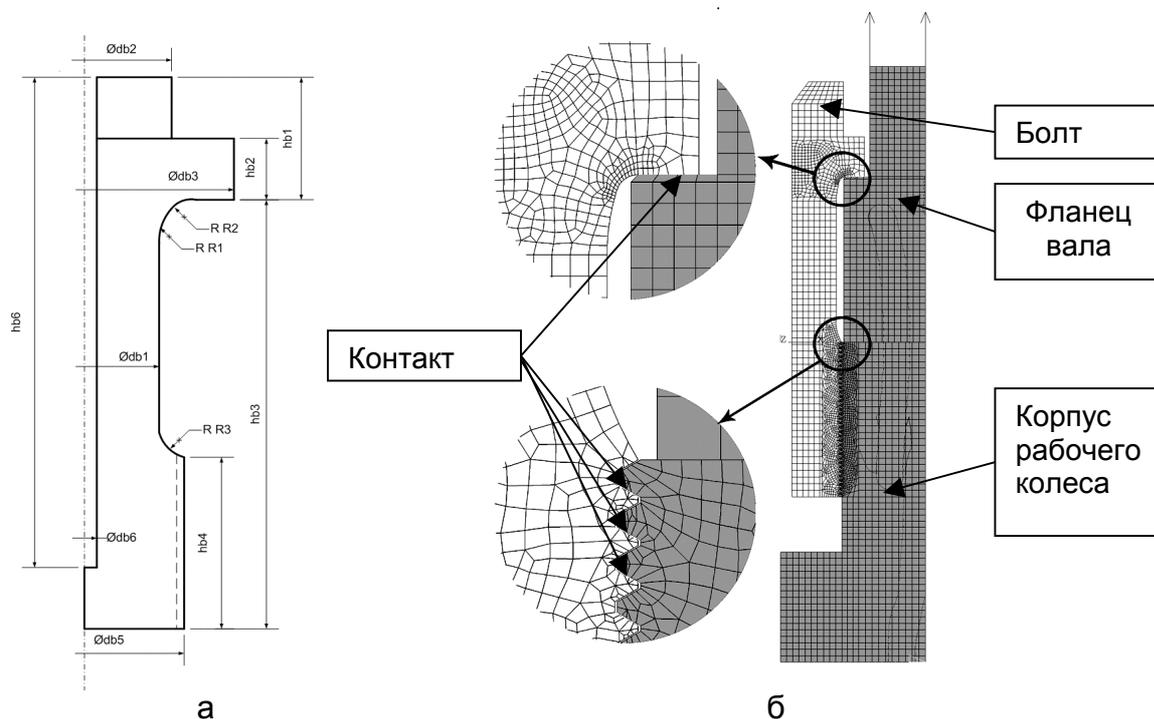


Рис. 2. Модель болта: а – параметрическая; б – конечно-элементная

## 2. Организация компьютерной системы анализа НДС болта

Реализация компьютерной системы выполнена на языке C# и платформе .NET. Общий принцип работы компьютерной системы представлен в виде диаграммы развертывания UML (рис. 3). Так, управляющая программа на основе вве-

денных пользователем параметров геометрии болта с помощью подсистемы визуализации, реализованной с использованием библиотеки OpenGL, выполняет построение реалистического образа болтового соединения. На основании этой информации пользователь может оценить правильность введенных данных и при необходимости их откорректировать. После запуска расчета управляющая программа создает дополненный пользовательскими данными пакет макросов, посредством которого производится автоматизация расчета НДС болтового соединения. Полученные значения параметров НДС, а также картины их распределения по конструкции в формате vrmf, передаются в управляющую программу, после чего сохраняются в базе данных и представляются пользователю.

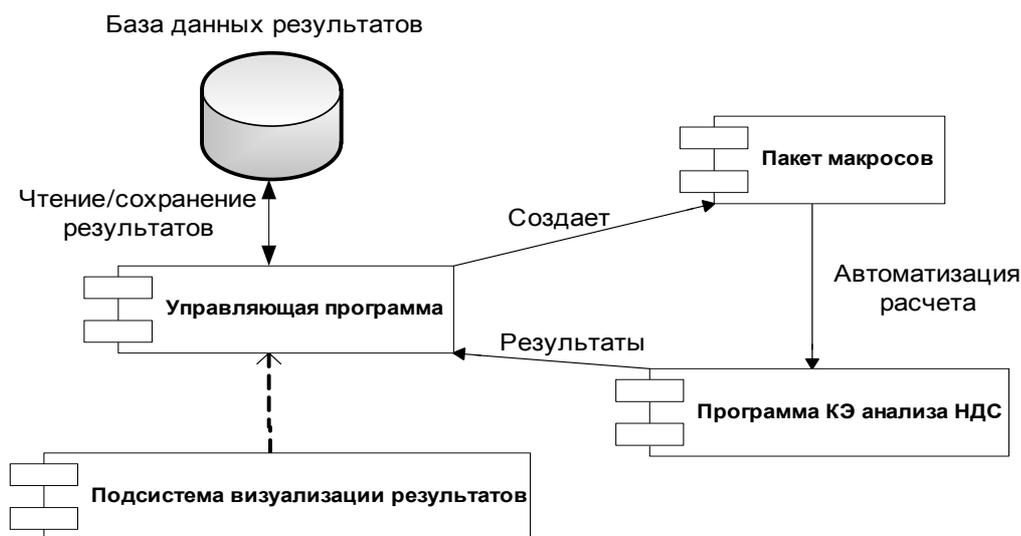


Рис. 3. Общий принцип работы программы, представленный в виде диаграммы разворачивания UML

### 3. Компьютерный анализ НДС болтового соединения

На первом этапе анализа с помощью разработанной компьютерной системы в автоматическом режиме была построена геометрическая модель болта М110х4, соединяющего фланец ротора с корпусом рабочего колеса пропеллерной гидротурбины. На втором этапе - серия конечно-элементных моделей с учетом контактного взаимодействия: головки болта с фланцем ротора, фланца ротора и корпуса рабочего колеса, в резьбе. Затем была выбрана модель, для которой погрешность по максимальным напряжениям не превышает 3%. На этой модели выполнен расчет НДС под действием тепловой затяжки (рис. 4). Из рис. 4 видно, что опасными областями являются галтель под головкой болта и первый виток резьбы. Полученные результаты подтверждены практикой эксплуатации болтовых соединений: именно в этих местах наиболее часто наблюдаются разрушения.

В инженерной практике наиболее распространен подход, основанный на определении напряжений в опасных участках с помощью коэффициентов концентрации. Коэффициент концентрации под головкой болта с однорадиусной галтелью определяется соотношением (1)

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 0,55 \sqrt{\frac{d}{R_{\delta}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\sigma}$  - коэффициент концентрации контурных напряжений под головкой болта;  $d$  – диаметр стержня болта;  $R_{\delta}$  – радиус скругления галтели под головкой. Так как соотношение радиусов двухрадиусной галтели болта М110х4 составляет 1 к 10, то галтель большего радиуса можно рассматривать как конус, увеличивающий диаметр стержня болта. В связи с этим предлагается использовать выражение (1) для оценки коэффициента концентрации двухрадиусной галтели. С помощью разработанной компьютерной системы были также определены коэффициенты концентрации контурных и эквивалентных по Мизесу напряжений на галтели под головкой болта по отношению к напряжениям в стержне болта (таблица).

Коэффициенты концентрации напряжений под головкой болта

Коэффициенты концентрации	Значения
эквивалентных напряжений по Мизесу	2,97
контурных напряжений	3,37
контурных напряжений согласно (1)	3,28

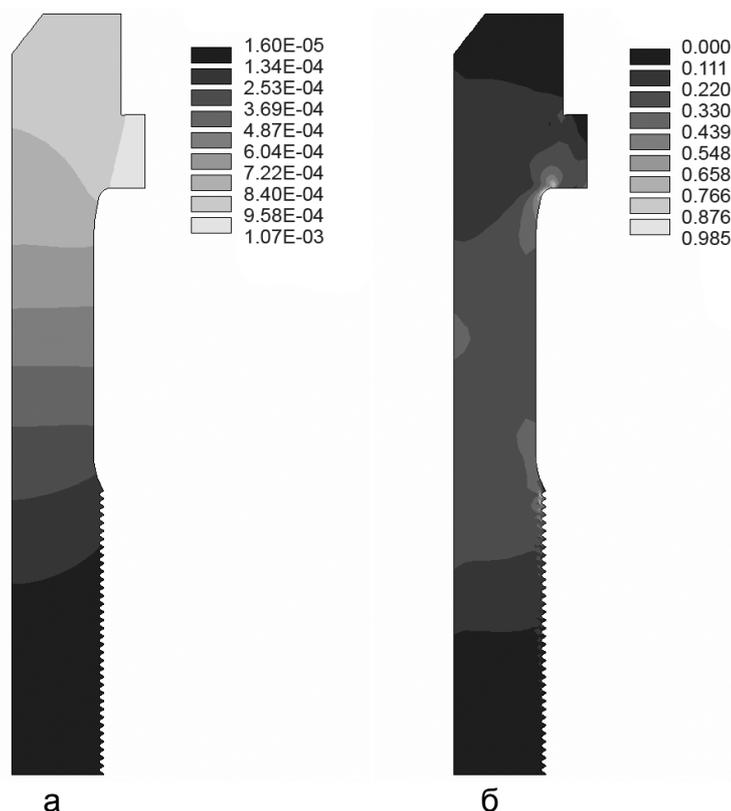


Рис. 4. Результаты расчета НДС болтового соединения при тепловой затяжке (болт М110х4): а – суммарные перемещения, отнесенные к длине болта; б - эквивалентные напряжения по Мизесу, отнесенные к пределу текучести

### Выводы

1. Построена параметрическая модель болтового соединения, учитывающая конструктивные особенности болтов гидротурбин.

2. На основе параметрической модели создана компьютерная система, позволяющая проводить многовариантные исследования НДС болтовых соединений гидротурбин.
3. Получены коэффициенты концентрации напряжений, которые превышают значения, используемые в практике проектирования [1].
4. Разработанная компьютерная система позволяет провести исследования влияния параметров двухрадиусной галтели под головкой болта на концентрацию напряжений.

#### Список литературы

1. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979, - 702 с.
2. Евдокимов Н.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния болтового соединения рабочего колеса гидротурбины на основе 3d модели. / Н.Н. Евдокимов, А.С. Степченко, А.И. Трубаев. // Вісник НТУ «ХПІ» / Динаміка і міцність машин.– Х.: НТУ «ХПІ». – 2009. - №42. с. 45 - 53.
3. Водка А.А. Разработка экспериментальной лабораторной модели для имитации напряженно-деформированного состояния болтовых соединений гидротурбины. / А.И. Трубаев, А.С. Степченко, А.А. Водка // Прочность материалов и элементов конструкций // Тр. междунар. научн.-техн. конф. “Прочность материалов и элементов конструкций” (28 – 30 сент. 2010 г.). – К.: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. с. 414 – 421.

**Рецензент:** д.т.н., проф., зав. каф. Львов Г. И., «Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Поступила в редакцию 16.05.2011

### Комп'ютерна система для аналізу напружено-деформованого стану болтових з'єднань гідротурбіни

Розроблено параметричну модель болтового з'єднання і на її основі комп'ютерну систему для проведення багатоваріантних досліджень напружено-деформованого стану болтових з'єднань гідротурбін. Визначено коефіцієнти концентрації напружень під головкою для болта М110х4.

**Ключові слова:** болтове з'єднання, коефіцієнт концентрації напружень, гідротурбіна, комп'ютерна система

### A computer system for analysis of stress-strain state of the hydro-turbine bolted connection

A computer system for multivariate studies of stress-strain state of hydroturbines bolted connection has been created based on a parametric model of bolted connection. The coefficients of stress concentration under the head of bolt M110x4 have been defined.

**Keywords:** bolted connection, stress concentration coefficient, hydroturbine, contact stress, computer system