

удобной форме. Однако иногда роль исследователя становится определяющей: от выбора типа геометрической модели, степени ее детальности, типа конечных элементов и метода построения КЭМ может зависеть не только точность, но даже и адекватность полученных результатов. В таких случаях помехой служит недостаток общей методики автоматизации всего комплекса исследовательских работ. Это касается, в первую очередь, решения задач синтеза, когда нужно проводить многвариантные расчеты напряженно-деформированного состояния объектов очень сложной формы, причем заданных с помощью множества параметров и взаимосвязей между ними, которые очень трудно формализуются. Еще большие сложности возникают в случае, когда самая геометрия исследуемого объекта является искомой в процессе решения задачи. Учитывая указанные обстоятельства, возникает важная та актуальная задача разработки нового подхода, который дает возможность автоматизировать весь цикл подобных исследований. В частности, в ОАО “Азовмаш” и ГСКТИ в процессе изготовления сварной рамы ветроэнергетической установки (ВЭУ) возникла необходимость определения ее напряженно-деформированного состояния, в том числе в районе сварных швов, для оценки прочности сварных швов в процессе эксплуатации, на основе качественно новой твердотельной модели [1]. Требуется, кроме всего прочего, некоторая автоматизация самого процесса создания КЭМ рамы ветроэнергетической установки, проведения расчетов НДС и анализа распределения напряжений в сварных швах.

Постановка задач исследований. Требования практики проектирования сварных рам ветроэнергетических установок обусловило необходимость решения следующих основных задач:

1. Разработка системы автоматизированной генерации твердотельной модели сварной рамы ВЭУ с выделением контролируемых швов в отдельные объемы.

2. Разработка пространственных конечно-элементных моделей сварной рамы ВЭУ при моделировании ее трехмерными конечными элементами.

3. Вариативное моделирование нагружения и граничных условий.

4. Проведение оценочных расчетов напряженно-деформированного состояния сварной рамы с использованием элементов Solid.

На первом этапе исследований предложены методы и подходы для решения поставленной задачи. В статье описана структура специализированной системы генерирования конечно-элементной модели рамы ВЭУ, тестовые программные модули и КЭМ исследуемой рамы, а также результаты решения тестовых задач.

1. Метод конечных элементов в специализированных интегрированных системах автоматизированного анализа и синтеза элементов механических систем. При рассмотрении проблемы автоматизации процесса проектирования, исследования и изготовления элементов сложных машиностроительных конструкций плодотворно использовать системный подход [2]. При этом сама исследуемая

механическая разнокомпонентная система в процессе создания требует проведения целого ряда исследований, в том числе определения напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных и ответственных элементов для обоснованного выбора основных конструктивных параметров. Необходимо проведение многочисленных исследований для определения реакции системы на внешние воздействия, для чего наиболее широко применяется метод конечных элементов (МКЭ) [3].

МКЭ в настоящее время достиг достаточной глубины теоретического обоснования. Он реализован в виде современных программных пакетов (ANSYS, NASTRAN), которые обладают широкими функциональными возможностями для построения конечно-элементных моделей, для моделирования разнообразных физико-механических процессов, а также развитыми средствами постпроцессинга. Кроме того, средства конечно-элементного моделирования интегрируются в системы автоматизированного проектирования (Pro/ENGINEER, CATIA, UG, SolidWorks). Это позволяет решать не только задачи анализа напряженно-деформированного состояния, но и отдельные задачи синтеза. В частности, довольно просто организовываются: анализ чувствительности к изменению конструктивных параметров, параметрический анализ, параметрическая оптимизация. Но возможности анализа и синтеза исчерпываются, как только возникает задача структурного синтеза или построения оптимизационных процедур на множествах, которые задаются системой сложных ограничений и связей. Причина этого затруднения – неприспособленность существующих систем компьютерного проектирования, анализа и синтеза к оперированию с трудноформализуемыми данными. И, в конце концов, существует проблема взаимосвязи в системе „проектировщик – программный комплекс”. Как правило, для исследования сложных и сверхсложных механических систем необходимо привлекать высококвалифицированных исследователей, которые в совершенстве владеют тем или иным программным продуктом. В то же время на практике требуется оперативное проведение большого количества исследований, причем исследователями, которые являются специалистами в вопросах проектирования конструкций конкретных типов.

Особенно ситуация обостряется в процессе проектирования новых машиностроительных конструкций, когда все приведенные выше обстоятельства действуют в совокупности. В связи с этим возникают следующие актуальные задачи:

1. Разработка общего метода описания расчетных моделей сложных и сверхсложных механических систем, которые естественным чином учитывают количественные, качественные, структурные характеристики исследуемых объектов.

2. Разработка структуры интегрированной системы автоматизированного анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза сложных конструкций на основе объединения геометрического, конечно-элементного

моделирования и учета специфических особенностей проектируемых изделий.

3. Реализация предложенного подхода при решении конкретных прикладных задач, например, при исследовании напряженно-деформированного состояния сварных рам ветроэнергетических установок.

Формирование математической модели для исследования напряженно-деформированного состояния сварных рам ВЭУ на основе метода конечных элементов и обобщенного параметрического подхода подробно описано в [4]. Таким образом, требуется провести алгоритмизацию и программную реализацию предложенных подходов, методов и моделей.

2. Общая структура системы автоматизированного проектирования, изготовления и исследования элементов сложных механических систем. Для обеспечения автоматизированного компьютерного моделирования элементов сложных машиностроительных конструкций возможны несколько путей:

1. полномасштабная разработка *оригинальной* специализированной системы;
2. разработка *специальных* модулей в составе универсальной системы;
3. создания *автономных* специализированных модулей, ориентированных на проектирование того или другого класса конструкций;
4. создания *специализированных* модулей анализа и синтеза, которые могут работать как *автономно*, так и в режиме *интеграции*, причем как со специализированными, так и с универсальными системами (рис. 1).



Рис. 1. Специализированная интегрированная система автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем

Последний вариант имеет несомненные преимущества:

- в отличие от варианта 1) не требует больших затрат материальных, интеллектуальных и временных ресурсов на его создание;
- в отличие от вариантов 2) и 3), в которых системы “привязаны” к определенному классу объектов, специализированная система имеет возможность “переналаживания” на того или иной класс объектов при

сохранении таких качеств, как функциональная универсальность создаваемой системы в принципе, оперативность и нетребовательность к квалификации пользователей;

- в отличие от случая 3) появляется возможность использования мощности современных универсальных систем (именно в том случае, когда она необходима), оперативности и невысокой затратности автономных модулей или гибкости и перенастраиваемости специализированных систем в компромиссном варианте.

Кроме того, данный вариант обладает еще и тем несомненным преимуществом, что он может быть основой для создания отечественных систем автоматизированного проектирования, исследования и изготовления элементов сложных и сверхсложных конструкций путем естественного расширения функций и “вымывания” блоков и тех модулей универсальных систем, чьи функции перехватываются, заменяются и улучшаются подсистемами отечественной разработки. Этот очень перспективный путь создания крупномасштабных отечественных разработок, в частности, для проектирования и исследования ВЭУ.

3. Структура системы автоматизированного генерирования моделей исследуемых рам ВЭУ. В статье предлагается следующая структура системы автоматизированного генерирования геометрической и конечно-элементной модели исследуемых пространственных конструкций рам ВЭУ (рис. 2).

На основе полученных данных относительно объекта исследований, которые могут содержать конструктивные параметры и требования, особенности технической эксплуатации или изготовление и т.п., может быть определено, к какому из указанных типов задач она принадлежит. В зависимости от ситуации или переходим непосредственно от существующего конструктивного описания объекта к созданию топологической структуры подобластей и их параметрического описания (I), или к определению алгоритма построения геометрии объекта исследований, а на его основе – к определению способа задания геометрии (II).

Независимо от типа задачи должны быть сформированные наборы параметров $p = \{p_i\}$, которые будут содержать геометрические, физические и технологические свойства конструкции рамы ВЭУ. Они могут быть общими для разных элементов конструкции. Следующим шагом является построение геометрической модели, который предполагает построение системы команд S_G^C . В рамках предложенного подхода система команд может определяться теми же параметрами, которые используются для описания всей конструкции, или производными от них $S_G^C = S_G^C(p_i)$.

В этом случае становится возможной автоматизации построения каждой реализации геометрии по указанным параметрам p_i $\Omega = \Omega(S_G^C)$.

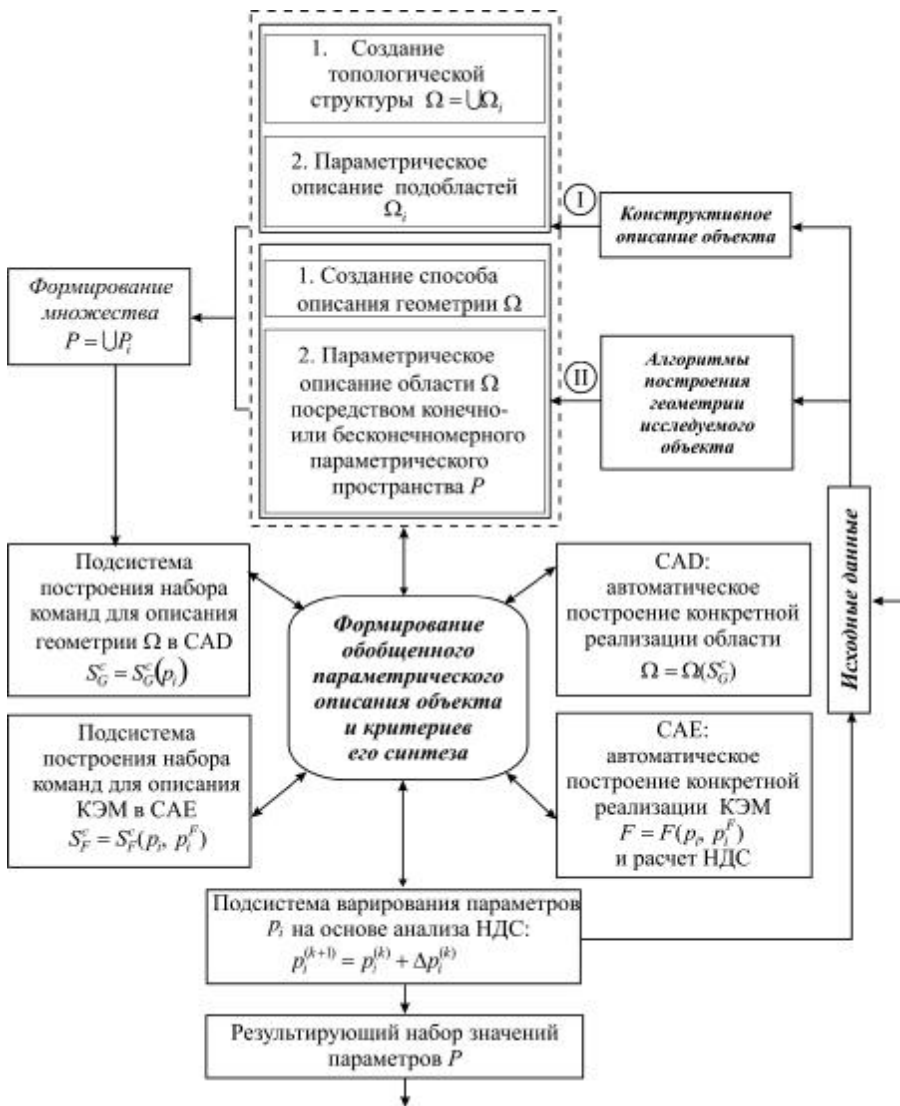


Рис. 2. Структура системы автоматизированного генерирования моделей исследуемых объектов

На основе созданной геометрической модели в САЕ-комплексе строится КЭМ, связанная с ней непосредственно. Влияние геометрических параметров может быть непосредственно внесено в систему команд описания конечно-элементной модели. В соединении с параметрами конечно-элементной

модели p_i^F имеем следующее определение построения конечно-элементной сетки с помощью команд, которые сгенерированы автоматически:

$$S_F^C = S_F^C(p_i, p_i^F) \rightarrow F = F(p_i, p_i^F) .$$

Таким образом, на основе метода обобщенного параметрического описания напряженно-деформированного состояния элементов механических систем [5-9] разработана технология построения автоматизированной системы параметрического описания геометрической и конечно-элементной моделей, которая позволяет проводить анализ НДС исследуемой конструкции при разных наборах параметров. В соединении с подсистемой варьирования параметров эта система дает возможность решать весь спектр указанных задач и определять искомые параметры конструкции любого уровня сложности.

К преимуществам предложенного метода принадлежат:

- автоматизация всего цикла многовариантных исследований, в том числе этапа описания геометрии;
- возможность предусматривать удобное параметрическое описание не только геометрии, но и конечно-элементной модели;
- универсальность, т.е. возможность применения для областей разнообразной формы, задач разных типов с разными граничными условиями и разными видами физических процессов.

Таким образом, удается органически соединить этапы описания геометрии и конечно-элементной модели при решении общей задачи оптимального синтеза конструкции на основе единого параметрического описания, что позволяет избавиться от основных трудностей при исследовании НДС сварных рам ВЭУ.

4. Программная реализация системы и тестовые модели исследуемых сварных рам ветроэнергетической установки. В соответствии с разработанными подходами, алгоритмами и структурой специализированной интегрированной системы были созданы программные модули, позволяющие автоматизировать процесс создания конечно-элементных моделей исследуемых сварных рам ветроэнергетических установок.

Например, для исследования напряженно-деформированного состояния сварных рам ветроэнергетических установок (рис.3) одним из важных вопросов является определение типа конечных элементов, которые могут быть использованы для моделирования НДС конструкции.

При использовании Shell-элементов (рис. 4) получаемая модель имеет на порядок меньшие размеры по числу степеней свободы. Это позволяет с привлечением незначительных вычислительных ресурсов решать весь комплекс задач моделирования реакции конструкции на различные типы воздействий. Однако сравнение результатов решения тестовых задач с

использованием Shell- и Solid-элементов (рис. 5) сразу же указывает на недопустимое количественное и качественное несоответствие получаемых полей напряжений.

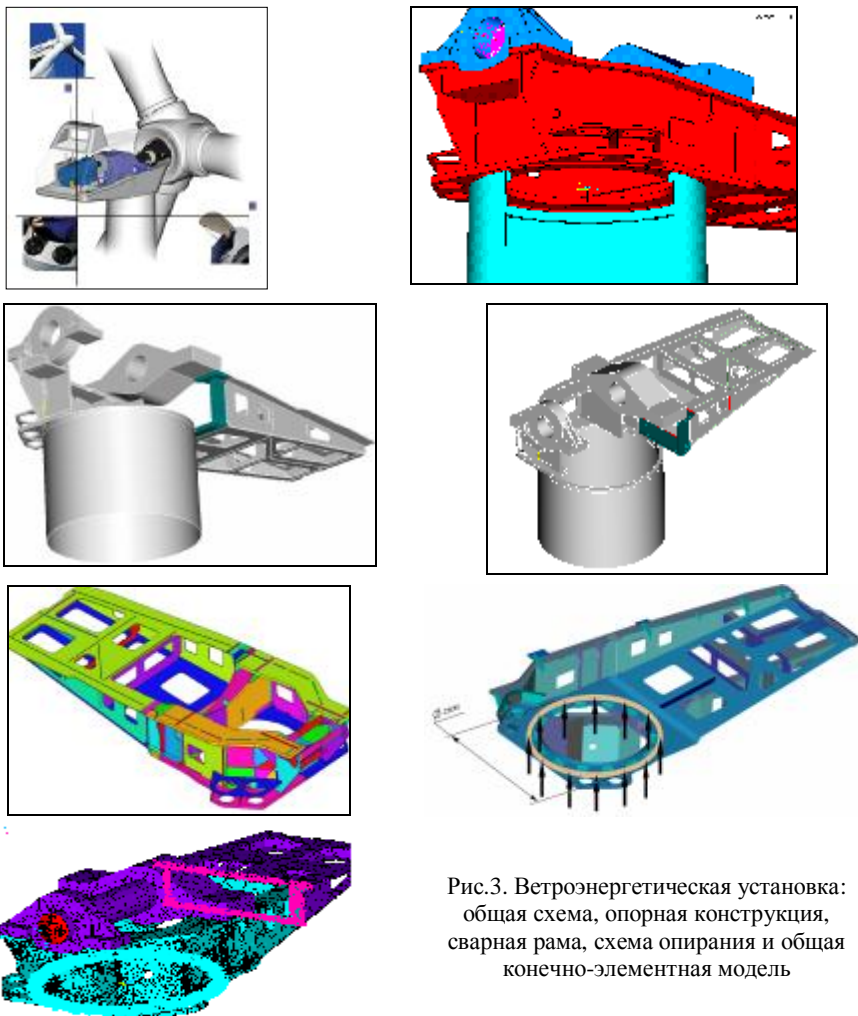
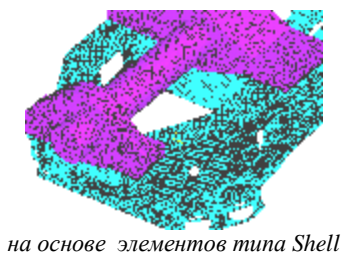
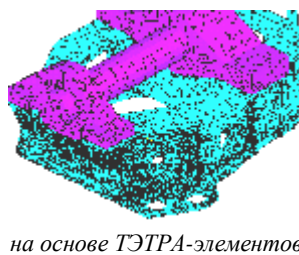


Рис.3. Ветроэнергетическая установка: общая схема, опорная конструкция, сварная рама, схема опирания и общая конечно-элементная модель

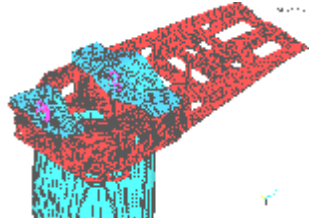
В связи с этим в процессе дальнейших исследований НДС сварных рам ветроэнергетических установок пришлось отказаться от элементов типа Shell. Получаемые модели, построенные на основе элементов типа Solid, и системы анализа, их использующие, строго говоря, нельзя назвать “экспресс – моделями” и “экспресс – системами” в силу сложности первых и вторых.



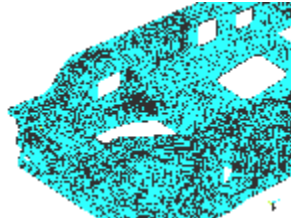
на основе элементов типа Shell



на основе ТЭТРА-элементов

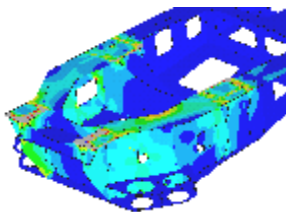


рама, сопряженная с опорой

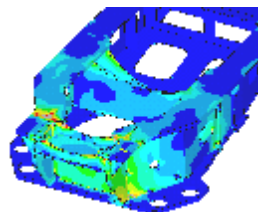


на основе призматических КЭ

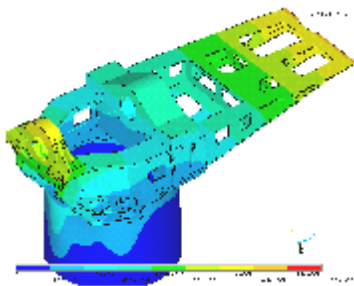
Рис. 4. Варианты конечно-элементных моделей рамы ВЭУ



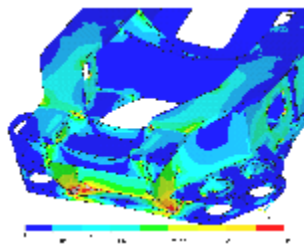
на основе элементов типа Shell



на основе ТЭТРА-элементов



рама, сопряженная с опорой



на основе призматических КЭ

Рис. 5. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния рамы ВЭУ

Однако в данном случае можно использовать следующий подход: с использованием сложных, но достоверных КЭМ производится расчет

напряженно-деформированного состояния от некоторых типовых силовых воздействий (рис.6), а результат расчетов записывается в базу данных специальной структуры. Далее эта база данных используется как “экспресс – система”, поскольку практически мгновенно дает возможность получить ответ на вопрос о величине напряжений по заданной комбинации типовых воздействий (рис.7).

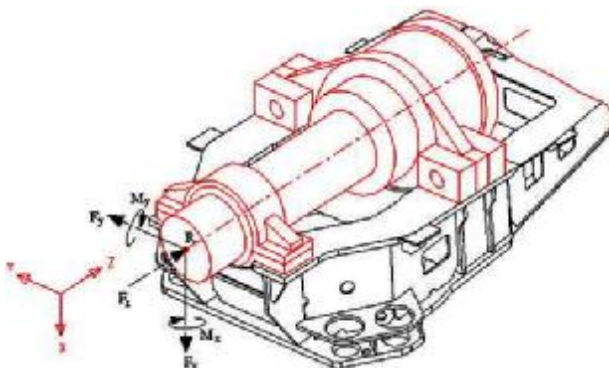


Рис.6. Силовые факторы на роторе ВЭУ

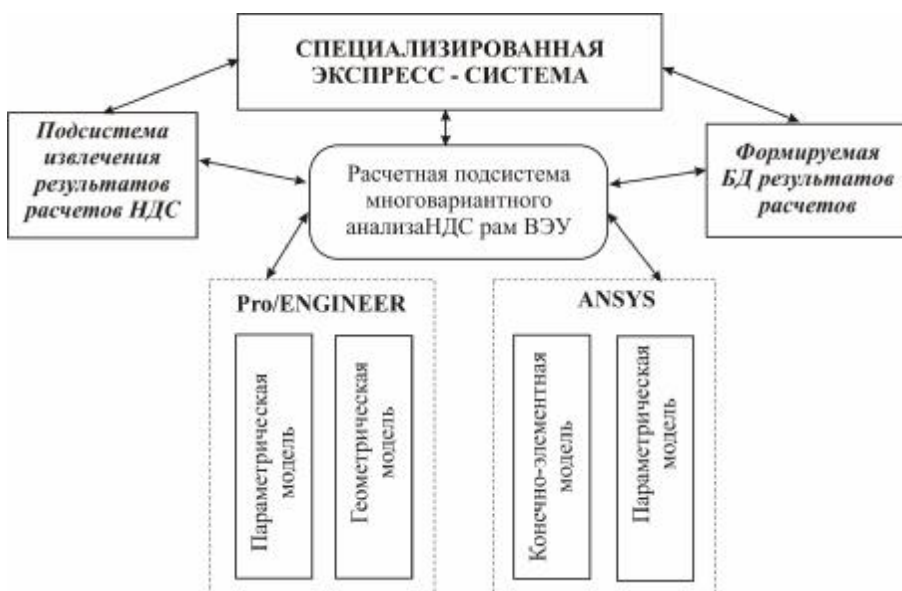


Рис. 7. Формирование и использование базы данных результатов исследования НДС рам ветроэнергетических установок для экспресс-оценки напряжений в конструкции

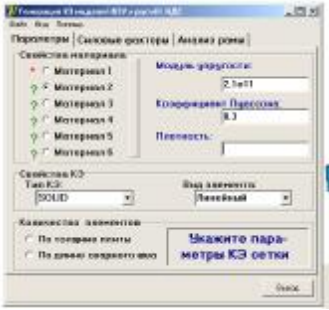
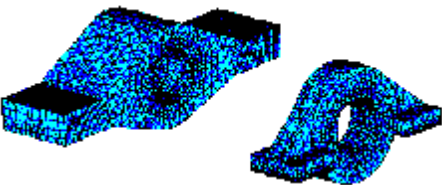
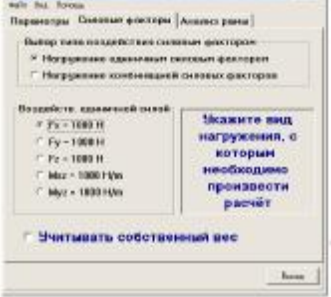
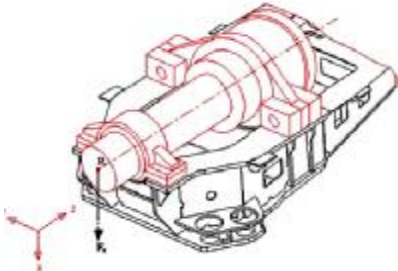
Более того, построенная таким образом “экспресс – система” позволяет подключить к оценке долговечности сварных рам ветроэнергетических установок различные теории и критерии, поскольку наиболее трудоемкий этап исследований напряженно-деформированного состояния “выносится за скобки”, т.к. осуществлен ранее. В дополнение к получаемым преимуществам такая организация исследований позволяет вычислительные средства большой мощности задействовать в одном исследовательском центре, а обработку результатов производить с применением компьютеров средней мощности в любом другом исследовательском центре.

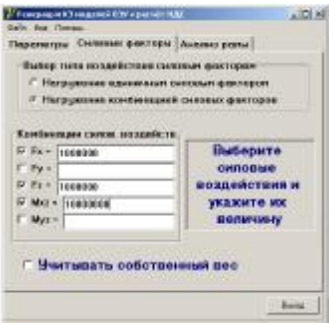
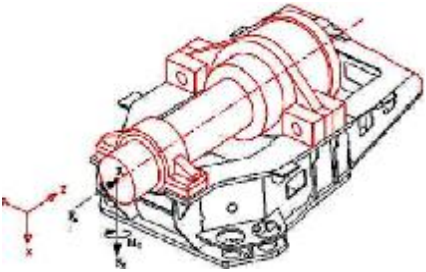
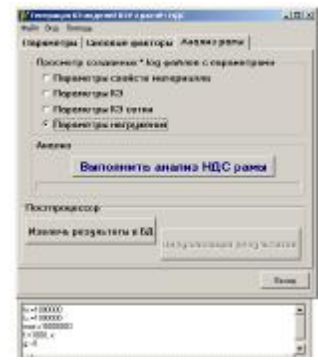
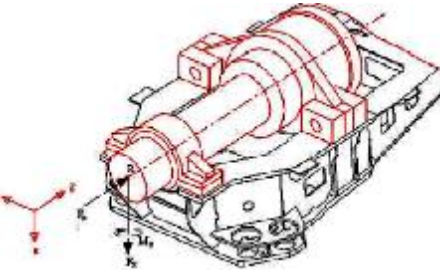
В табл. 1 представлены этапы формирования конечно-элементной модели рамы, а также расчета напряженно-деформированное состояния и анализа напряжений в сварных швах.

В табл. 2 и на рис. 8 приведены сгенерированная КЭМ рамы и поля напряжений в конструкции и отдельных швах с использованием в качестве решателя CAE-системы ANSYS.

Таблица 1

Этапы создания конечно-элементных моделей сварных рам ВЭУ

№ пп.	Вид програмного окна	Создаваемые модели
Этап 1		
Этап 3		

№	Вид программного окна	Создаваемые модели
Этап 4		
Этап 5		

Заключение. В статье на основе единого обобщенного параметрического подхода реализована новая технология генерации конечно-элементных моделей сварных рам ВЭУ. Принципиальное отличие данной системы от подобных систем состоит в том, что она является специализированной интегрированной средой, реализующей качественно новый параметрический метод и математические модели для рационального проектирования сложных пространственных конструкций, какими являются сварные рамы ВЭУ, на основе исследования их НДС.

В процессе дальнейших исследований требуется провести параметрический анализ влияния силовых факторов на напряженно-деформированное состояние рамы ВЭУ и наполнение базы данных характеристик напряженного состояния в сварных швах.

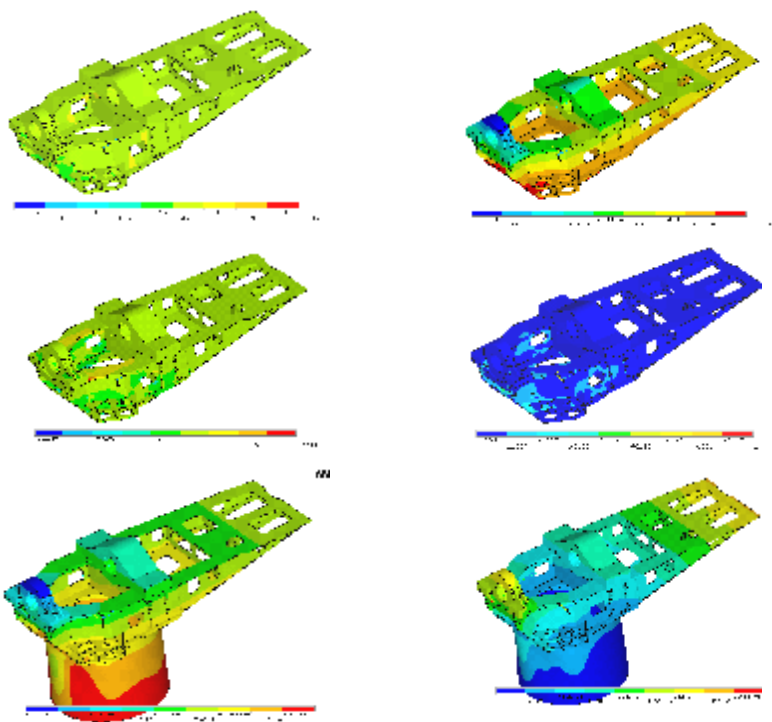


Рис. 8. Распределение компонент тензоров напряжений и вектора перемещений в сварной раме ВЭУ

Таблица 2

Напряжения в сварных швах сварной рамы ВЭУ

шов №10		шов №11	
шов №14		шов №18	