

Оптимизировать требования к надежности и качеству элементов конструкции по критерию народнохозяйственного экономического эффекта.

Ведение НИОКР с учетом изложенного позволяет без скачкообразного роста затрат на средства вычислительной техники и при высоком качестве проектных решений сократить продолжительность создания и доводки новой сельскохозяйственной техники в 2-2,5 раза, снизить затраты в эксплуатации и себестоимость сельскохозяйственной продукции. Этим достигается укрепление позиций предприятия на рынке.

УДК 631.3:001.24

А.Н. Вырский

### **Об основных проблемах, связанных с проведением расчетов методом конечных элементов по 3D-моделям, импортированным из САД-систем**

*РКУП «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике»  
Гомель, Беларусь*

Всесторонние расчетные исследования - очень важный элемент в процессе создания и доводки новых машин, их результатом является сокращение цикла разработки машины, снижение материальных затрат за счет исключения основных конструкторских ошибок и выбора оптимальных решений, повышение надежности разработанной машины.

Исследование статической и динамической прочности несущих конструкций машин – наиболее трудоемкий этап в комплексе проводимых в ГСКБ расчетов. Метод конечных элементов (МКЭ) является мощным численным методом решения самых разнообразных инженерных задач и играет существенную роль в повышении надежности несущих конструкций и узлов машин, созданных за последние 10 лет в «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике». Расчеты несущих конструкций с использованием МКЭ выполняются в основном в Интегрированной системе прочностного анализа (ИСПА), также используются пакеты MARC и ANSYS.

Создание сложных пространственных конечно-элементных моделей связано с большими затратами времени. Точность описания топологии модели в большой степени определяет точность расчетов, выполненных по этой модели, и в итоге - надежность спроектированной и изготовленной машины. Во всех современных системах конечно-элементного анализа, в том числе и в ИСПА, предусмотрена автоматическая генерация конечно-элементной сетки по твердотельной модели, импортированной из САД-системы (например, Pro/ENGINEER). То есть из создания модели исключается самая трудоемкая операция - описание ее геометрии.

Наиболее полно во всех КЭ-системах автоматизирован процесс создания КЭ сетки, состоящей из 4х-узловых объемных КЭ (тетраэдров). Этот процесс можно разбить на несколько этапов:

1. Расчетчик получает от конструктора твердотельную модель, разработанную в системе Pro/ENGINEER. Обычно эта модель представляет собой сборку из нескольких деталей: для рамных конструкций – это набор труб, уголков, швеллеров, листов и т.д; для корпусных деталей – набор геометрических примитивов.

2. Выполняется анализ модели с целью выявления зазоров в зонах, где эти зазоры должны отсутствовать. Затем проводится корректировка модели для исключения зазоров. После этого с помощью команд, имеющихся в Pro/ENGINEER, сборка объединяется в одну деталь.

3. Откорректированная модель импортируется в систему ИСПА, в которой автоматически создается КЭ сетка, причем размеры элементов устанавливает расчетчик.

Далее по созданной КЭ сетке проводится комплекс расчетов. При необходимости внесения изменений в конструкцию для обеспечения требуемых параметров прочности, жесткости, виброустойчивости, и т.д. корректировка модели согласовывается с конструктором и может выполняться по двум направлениям:

- Если рассчитывается модель, представляющая собой сборку, то корректировка выполняется конструктором в Pro/ENGINEER, после чего модель повторно передается на расчет.

- Если модель представляет собой одну деталь, то ее корректировка возможна самим расчетчиком в системе ИСПА, после чего она экспортируется в Pro/ENGINEER.

При создании КЭ сетки, состоящей из элементов тонкой оболочки, доля ручного труда значительно больше. Это связано с необходимостью доработки конструкции, представленной для расчета. Расчетчик должен решить вопрос о том, по какой из импортированных поверхностей будет моделироваться оболочечная КЭ сетка (по наружной, по внутренней, или по средней линии). При больших размерах элементов конструкции и малой толщине (бункеры, капоты, крыши, боковины очистки зерноуборочного комбайна, и т.д.) этот вопрос не столь актуален, и обычно принимается решение в пользу наименьшей трудоемкости. Для рам, состоящих из швеллеров, труб, и т.п. элементов, оболочечная модель должна быть создана по средней линии стенки конструктивного элемента. Только в этом случае будет обеспечена необходимая точность расчета. Поэтому, если в импортированной 3D модели, к примеру, квадратная труба своей боковой стороной была приварена к полке швеллера, то в КЭ модели, состоящей из элементов типа оболочка, сгенерированных по средней линии стенки трубы и полки швеллера, между этими двумя элементами возникает зазор. Модель необходимо «склеить». Расчетчик в этом случае может пойти тремя путями:

Удалить одну из параллельных поверхностей, добавив к оставшейся толщину удаленной. Как показывает практика расчетов и эксплуатации сварных конструкций в «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике», их прочность при качественном изготовлении сварных швов, величина катета которых сопоставима с толщиной стенок свариваемых деталей, определяется прежде всего нагруженностью околошовной зоны. При этом для сварных соединений элементов рамы швом, выполненным по замкнутому контуру, в случаях, когда размеры свариваемой зоны сопоставимы с размерами сечений свариваемых элементов, нагруженность этой зоны определяется по суммарной толщине стенок свариваемых деталей, а нагруженность сварных соединений определяется по напряжениям, действующим в околошовной зоне с учетом коэффициента  $K_{ш} = 0,85$ , учитывающего снижение механических характеристик материала свариваемых деталей от сварных швов.

Связать две поверхности моделями сварных швов, что является более корректным решением (а для незамкнутых швов – и единственно верным). Для этого используются КЭ типа «толстая» оболочка, учитывающие деформацию сдвига и имеющие толщину, равную размеру катета шва.

Расположить обе поверхности в одной плоскости и «склеить» их только в местах расположения сварных швов.

В двух последних случаях необходимо следить за взаимным перемещением поверхностей, лежащих внутри сварной зоны. Если эти поверхности при приложении внешних нагрузок «входят» друг в друга, необходимо дополнительное описание контакта с помощью граничных условий.

Таким образом, создание по импортированной твердотельной модели КЭ сетки, состоящей из объемных конечных элементов, выглядит намного более привлекательно, чем создание оболочечной КЭ сетки.

Однако 4х-узловой объемный КЭ является весьма жестким на сдвиг, и в этом заключается основная проблема при расчете моделей с тетраэдральной КЭ сеткой, в которых присутствуют сдвиговые деформации. Точное решение может быть получено только при достаточно малом размере КЭ. Единственным критерием подробности КЭ сетки является энергия деформации конструкции или работа внешних сил. Увеличивая подробность КЭ сетки, расчетчик фиксирует энергию деформации и останавливается на такой сетке, при которой энергия деформации станет насыщенной, то есть не будет меняться при дальнейшем измельчении сетки. Как показывает практика, для моделирования элементов рамных конструкций (труб, швеллеров, и т.д.) тетраэдральными КЭ размер элемента должен быть таким, чтобы например стенка трубы имела не менее 2-3 слоев КЭ.

Приведем простой пример.

На рисунке 1 изображена КЭМ рамной конструкции, в которой ребра основания закреплены по 6-и степеням свободы, а в верхней части трубы приложена сила вдоль оси X. Модель состоит из 2700 элементов типа тонкая оболочка, имеет 2700 узлов и 15000 степеней свободы.

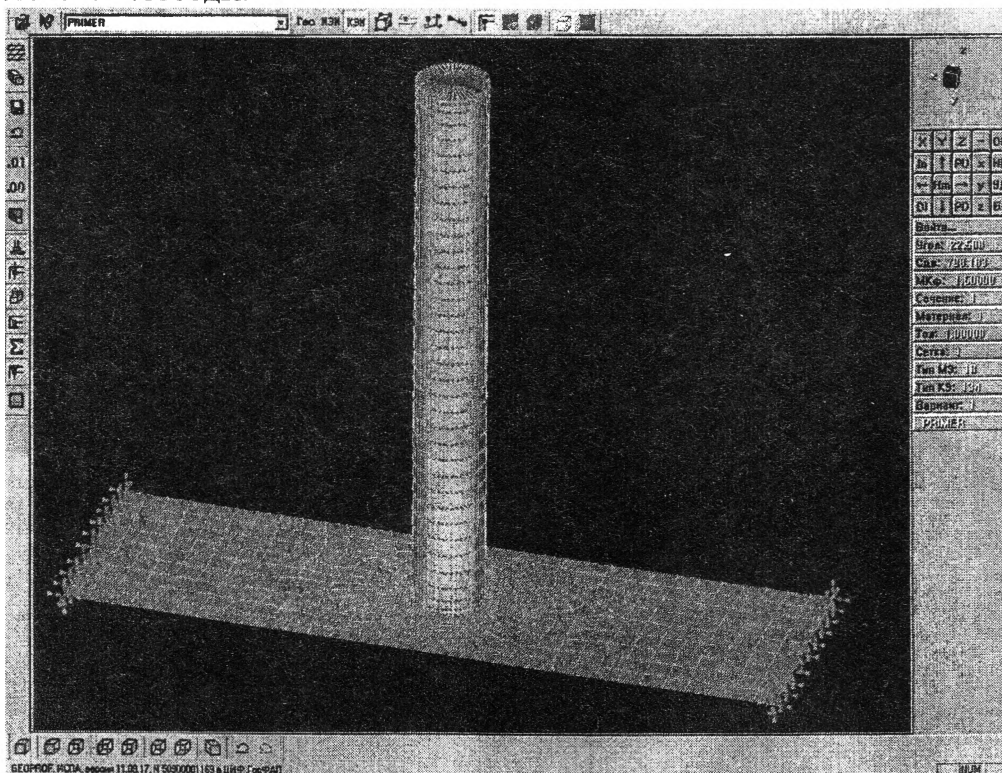


Рис. 1. Расчетная схема рамной конструкции.

На рисунке 2 изображено деформированное состояние в масштабе деформаций 20:1 модели 1 с полями перемещений в направлении действия силы (по оси X). На рисунке 3 изображены поля эквивалентных напряжений в этой же модели. Как следует из рисунков, максимальные перемещения верхней части трубы в направлении действия нагрузки составили  $\Delta l_{\max} = 31,2$  мм, максимальные эквивалентные напряжения действуют в зоне сварного соединения трубы с основанием и составляют  $\sigma_{l_{\max}} = 111$  МПа.

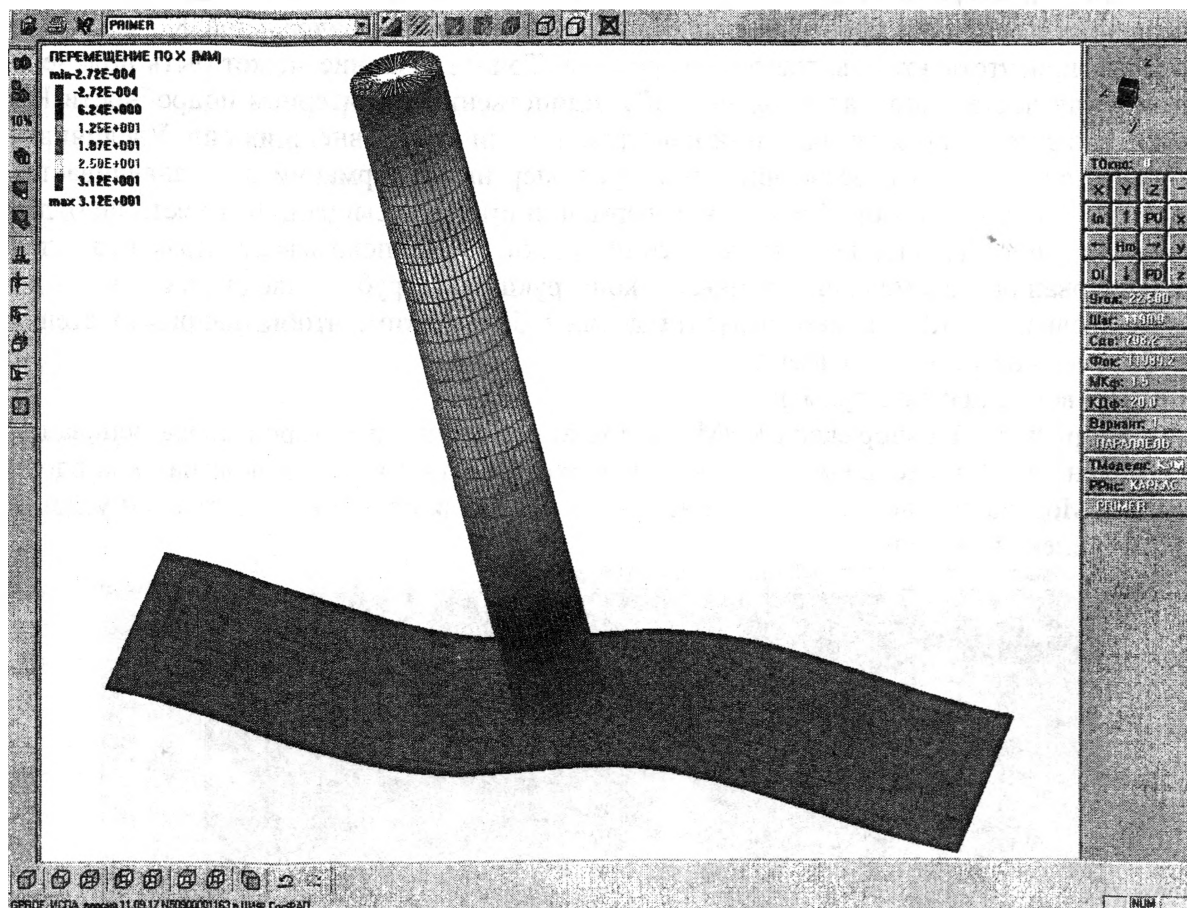


Рис. 2. Перемещения по оси X модели 1.

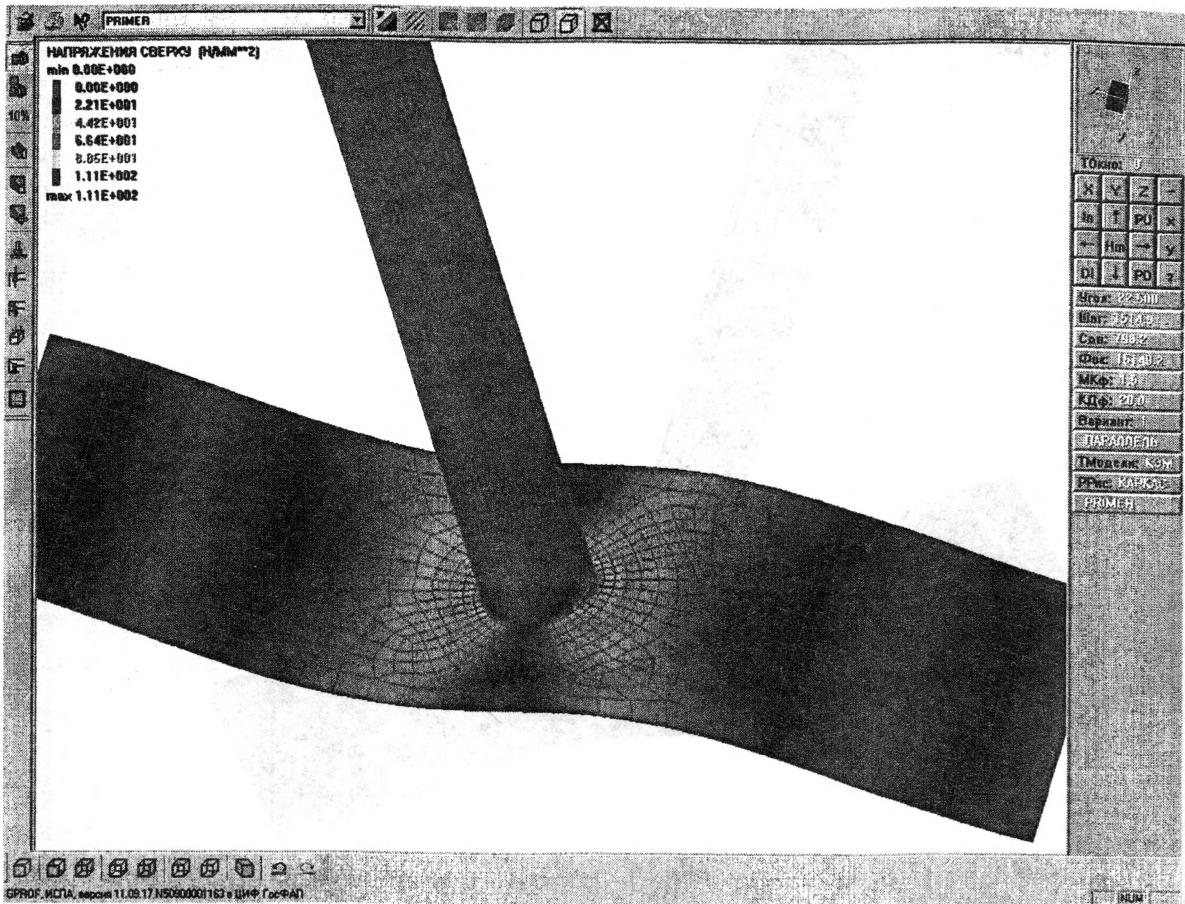


Рис. 3. Поля эквивалентных напряжений в модели 1, МПа.

Теперь рассмотрим модель 2, имеющую такие же, как и у модели 1, геометрические параметры, условия закрепления и нагружения, но состоящую из 370 элементов типа тонкая оболочка, 360 узлов и 1900 степеней свободы. На рисунках 4 и 5 изображено деформированное и напряженное состояние модели 2. Максимальные перемещения верхней части трубы в направлении действия нагрузки для этой модели составили  $\Delta_{2\max} = 32$  мм, максимальные эквивалентные напряжения действуют в зоне сварного соединения трубы с основанием и составляют  $\sigma_{2\max} = 89,2$  МПа.

Как показали расчеты энергии деформации, для модели 1 при дальнейшем уменьшении размера элемента результаты расчетов практически не изменяются. Таким образом, при уменьшении размерности оболочечной модели в 7 раз погрешность в расчете перемещений составила 3 %, в расчете напряжений – 20 %.

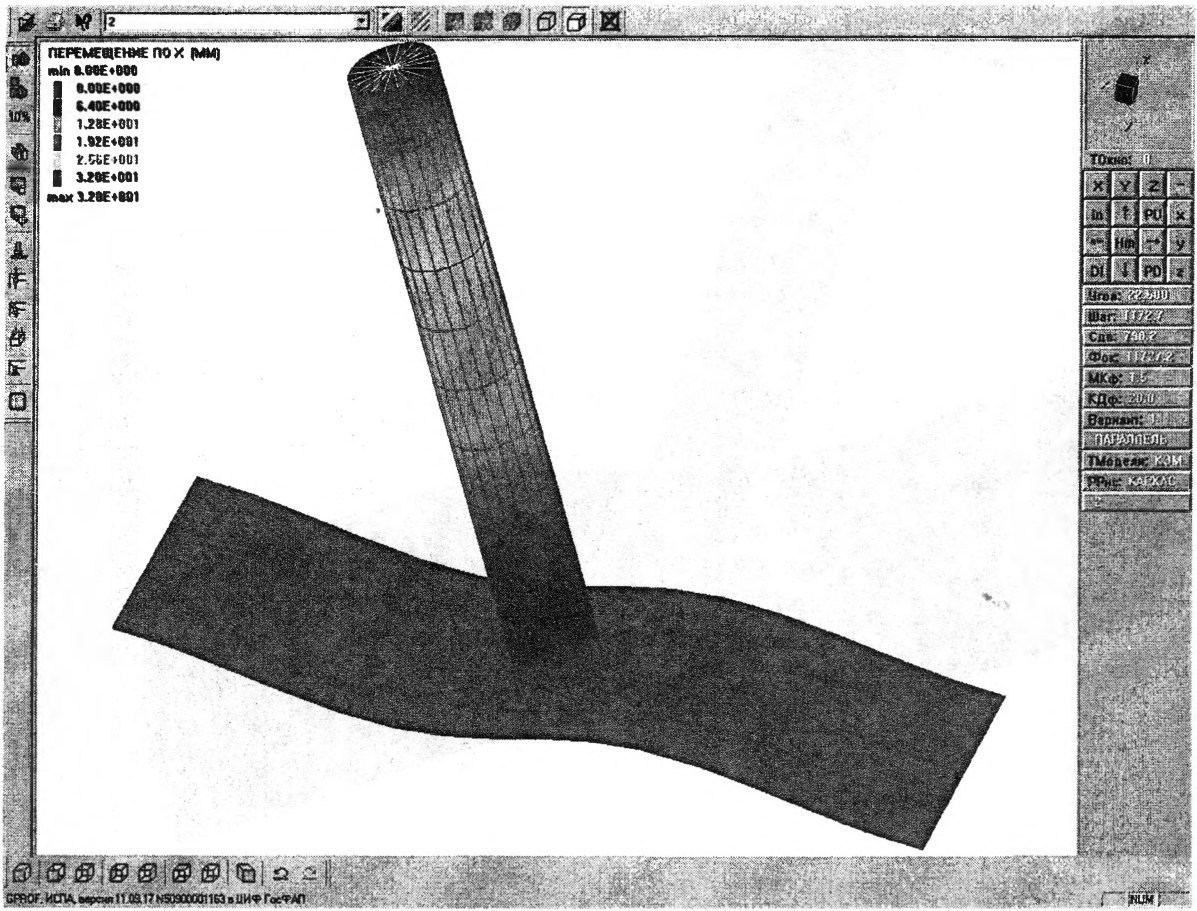


Рис. 4. Перемещения по оси X модели 2.

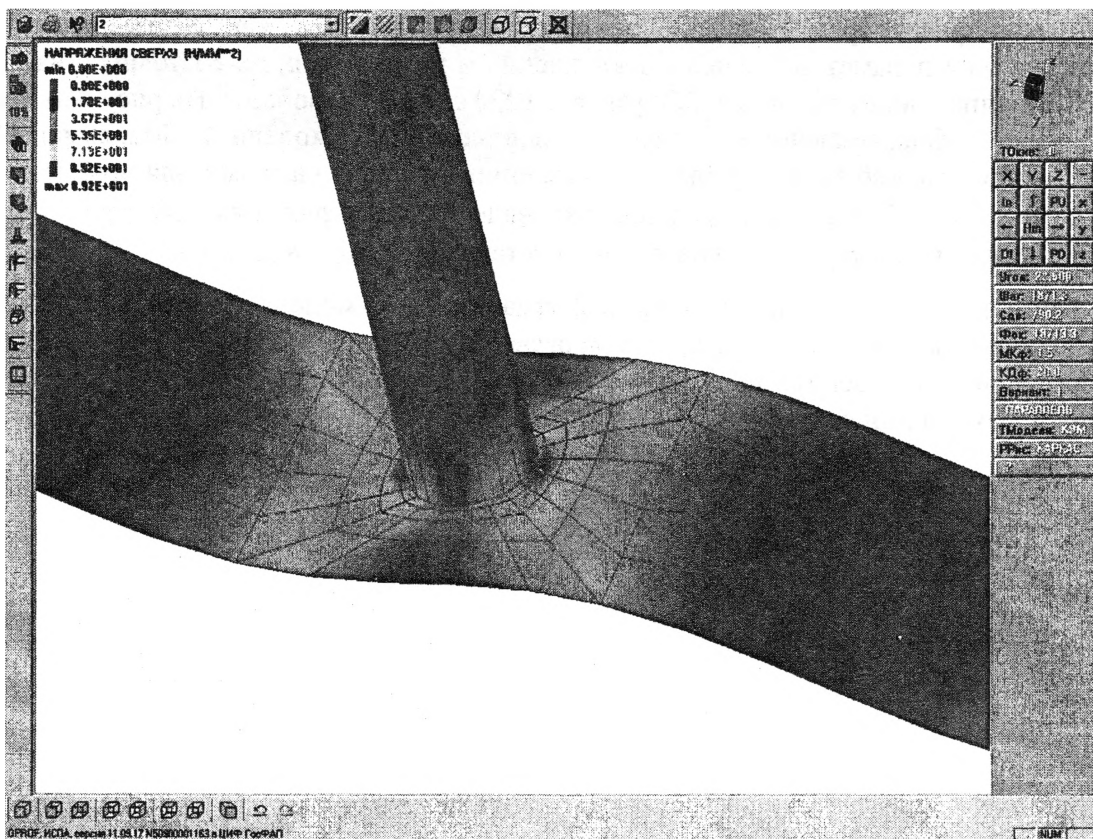


Рис. 5. Поля эквивалентных напряжений в модели 2, МПа.

На рисунке 6 изображен фрагмент модели 3, состоящей из 4х-узловых объемных элементов и имеющей такие же, как и у рассмотренных выше моделей, геометрические параметры, условия закрепления и нагружения. Эта модель построена в системе ИСПА автоматически по существующей 3D-модели. Она состоит из 103500 элементов и имеет 34300 узлов и 102300 степеней свободы. Обратим внимание, что и лист основания, и труба смоделированы конечными элементами в один слой.

На рисунке 7 приведены поля перемещений модели 3 в направлении действия силы, приложенной в верхней части трубы, на рисунке 8 – зона действия максимальных эквивалентных напряжений. Максимальные перемещения верхней части трубы составили  $\Delta_{3\max} = 5,72$  мм, т.е. в 5,5 раз меньше, чем в модели 1 с КЭ типа оболочка. Максимальные эквивалентные напряжения в зоне сварного соединения трубы с основанием составили  $\sigma_{3\max} = 40$  МПа, т.е. в 2,8 раза меньше, чем в модели 1. При уменьшении размера объемных элементов погрешность расчета уменьшается. Но обеспечить достаточную сходимость результатов можно только в том случае, если стенка трубы имеет не менее 2-х слоев объемных 4х-узловых КЭ. В этом случае КЭМ, состоящая из 4х-узловых объемных элементов, будет иметь не менее 1 млн. КЭ. Работа с такой моделью по заданию граничных условий, а тем более расчет требует очень больших затрат времени, объемов оперативной памяти и дискового пространства ПЭВМ.

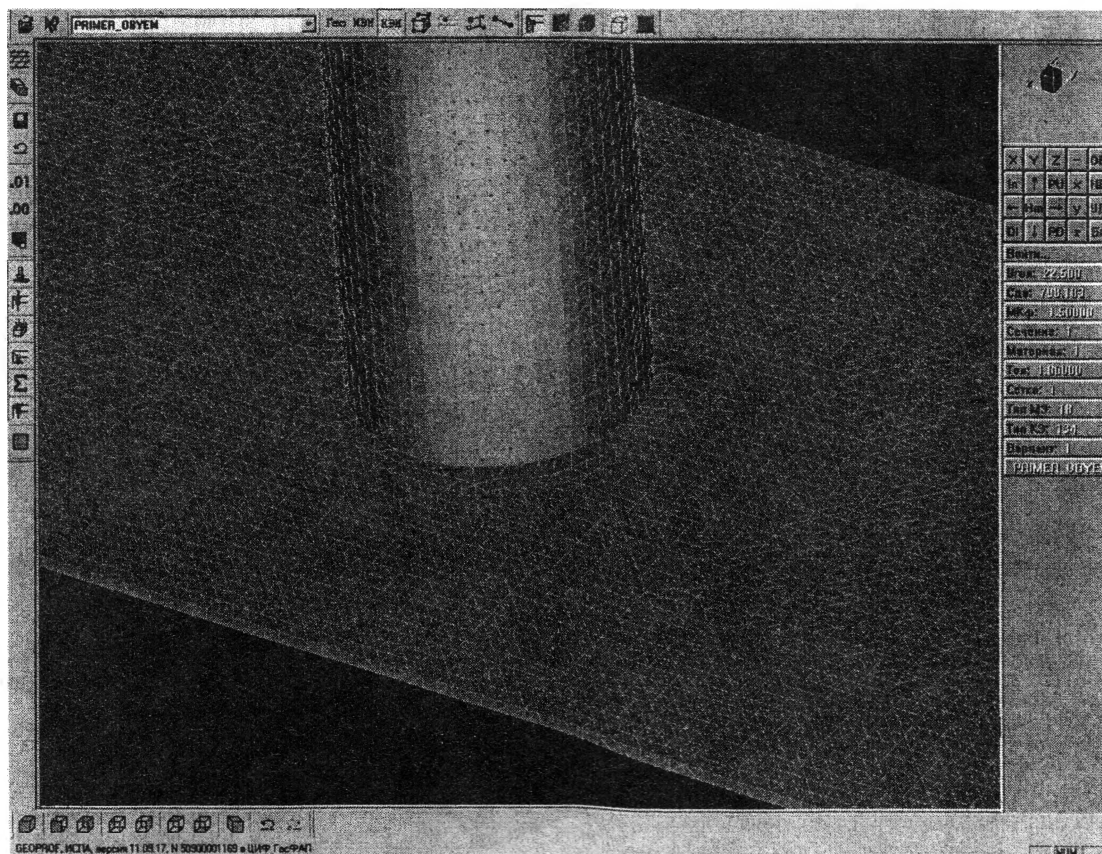


Рис. 6. Фрагмент модели 3, состоящей из 4х-узловых объемных элементов.

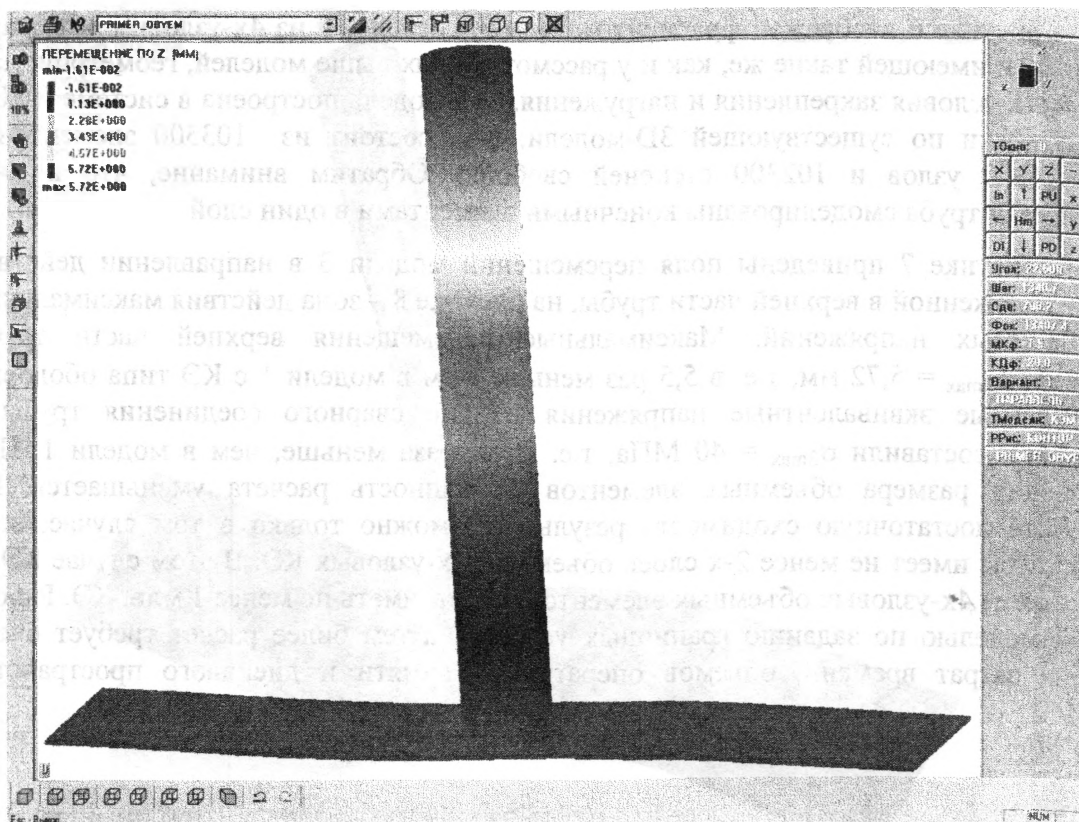


Рис. 7. Деформированное состояние модели 3 в масштабе деформаций 20:1 с полями перемещений в направлении действия силы, приложенной к трубе.



Рис. 8. Поля эквивалентных напряжений в модели 3, МПа.



Таким образом, за кажущейся простотой и удобством получения КЭ сетки, состоящей из объемных конечных элементов, по импортированной 3D-модели кроется опасность или совершить очень серьезную ошибку, или потратить на выполнение расчетов такие временные ресурсы, которые позволили бы, затратив определенную долю ручного труда, создать не одну оболочечную КЭМ.

Поэтому считаем, что автоматическая генерация конечно-элементной сетки, состоящая из тетраэдров, по твердотельной модели, импортированной из CAD-системы, целесообразна только для корпусных деталей, у которых доля сдвиговых деформаций в общей нагруженности достаточно мала. Пример такой КЭ сетки изображен на рисунке 9. Ее подробность отвечает условию насыщения энергии деформации. Сетка состоит из 260000 тетраэдральных элементов, имеет 85000 узлов и 240000 степеней свободы. Время решения на ПЭВМ класса PIV с тактовой частотой 2.7GHz с применением итерационного способа решения линейных уравнений составляет 15-20 мин.

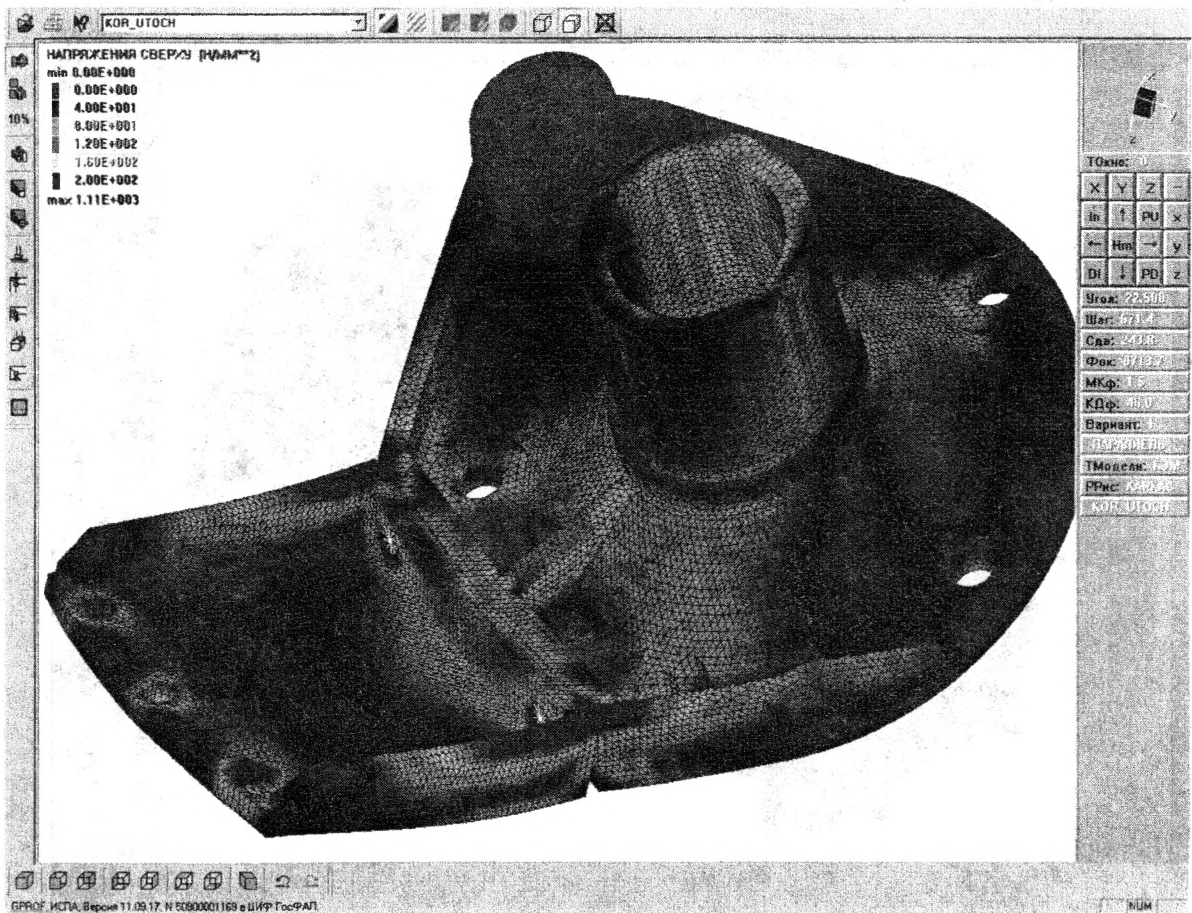


Рис. 9. Пример КЭ сетки корпусной детали, состоящей из 4х-узловых объемных элементов.

Расчеты КЭМ, созданных по твердотельным моделям, импортированным из CAD-систем, являются уточненными и заключительными. КЭ сетка в этом случае достаточно точно описывает геометрические параметры конструкции, расчетчик

выполняет окончательную проверку конструкторских решений, воплощенных в 3D-моделях.

Однако на этапе эскизного проекта отсутствует твердотельная модель, конструктору необходимо наметить пути построения конструкции, определиться с основными размерами, в конечном итоге принять правильное решение по компоновке машины. В этом случае расчетчик с использованием макроэлементного подхода создает модель с «нуля», используя все возможные инструменты в описании топологии конструкции. При этом для уменьшения объемов работы исключаются все второстепенные элементы, не оказывающие существенное влияние на общую нагруженность конструкции. От профессионализма расчетчика в данном случае зависит оперативность принятия решений и исключение основных ошибок при проектировании.

Построение модели и одновременное выполнение поэтапных расчетов прочности и жесткости начинается с основных элементов, на которые постепенно наращивается вся несущая конструкция. Эта работа предусматривает постоянный контакт расчетчика и конструктора. В качестве примера приведем КЭМ несущей конструкции зерноуборочного комбайна КЗС-9, созданной в системе ИСПА (рисунок 10)

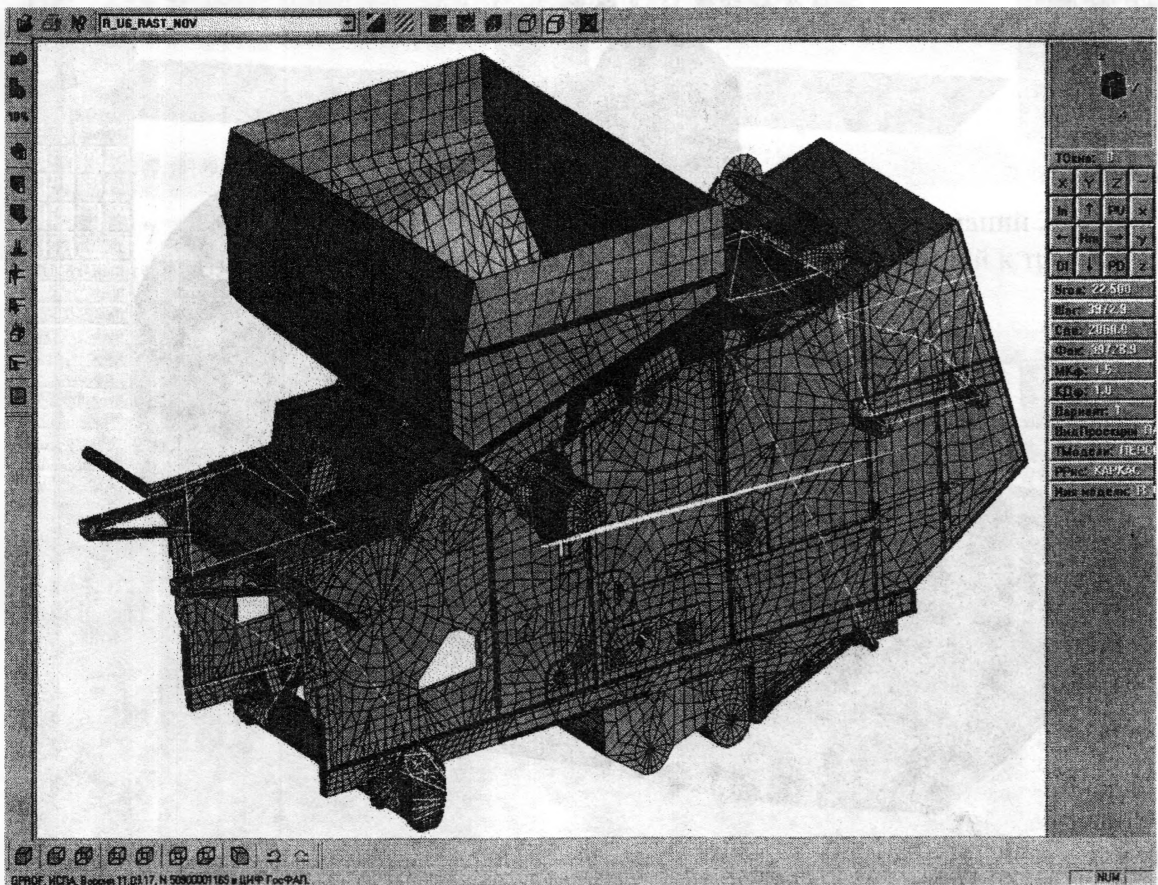


Рисунок 10. КЭМ несущей конструкции зерноуборочного комбайна КЗС-9, созданная в системе ИСПА по конструкторским эскизам.

Создание и уточнение модели происходило в течение все периода проектирования машины. Одновременно проводились промежуточные статические расчеты, отсутствие каких либо элементов конструкции заменялось соответствующими граничными условиями и нагрузками. Такая модель достаточно точно отображает реальную несущую конструкцию комбайна, позволяет проводить статические и динамические расчеты, расчеты на потерю начальной устойчивости. Возможность оперативно

вносить изменения в модель позволяет выполнять поиск оптимальных решений (по материалоемкости, трудоемкости) до создания конструкторского документа. Приведенная модель состоит из 35000 элементов типа оболочка, имеет 30000 узлов и 165000 степеней свободы, время расчета на ПЭВМ класса PENTIUM IV с тактовой частотой 2,7GHz составляет 45 - 50 мин.

В последнее время в «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике» широкое применение находит «комбинированный» метод, когда расчетчик собирает модель из отдельных блоков, часть которых создана вручную по конструкторским эскизам, а часть – по импортированным твердотельным моделям. На рисунке 11 изображена КЭМ несущей конструкции кормоуборочного комбайна «Полесье-800», которая создана именно таким «комбинированным» методом. Эта модель состоит из 61000 элементов типа оболочка, имеет 50000 узлов и 265000 степеней свободы.

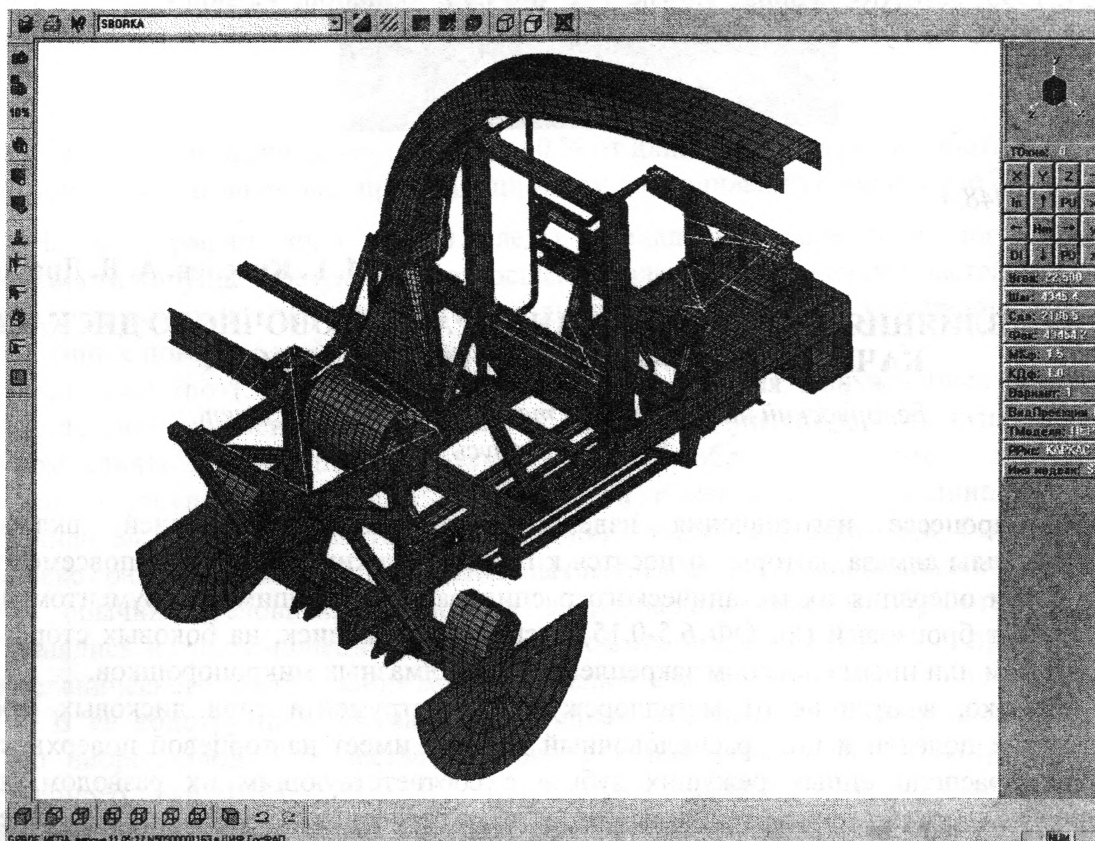


Рис. 11. КЭМ несущей конструкции кормоуборочного комбайна Полесье-800.

Применение метода конечных элементов в «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике» играет существенную роль в обеспечении требуемых параметров надежности машин. Использование импортированных трехмерных моделей, разработанных в Pro/ENGINEER, значительно сокращает время создания КЭМ конструкции, повышает точность расчетов, позволяет исключить или свести к минимуму ошибки при проектировании.

Важным условием быстрого и качественного выполнения проекта, обеспечения требуемых параметров надежности разработанной машины является тесное взаимодействие конструктора и расчетчика для совместного поиска оптимального решения, готовность и желание конструктора вносить необходимые изменения. Именно такая работа в команде практикуется в РКУП «ГСКБ по зерноуборочной и

кормоуборочной технике», и именно такая работа позволила нам достичь определенных успехов в проектировании и создании машин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник/ В.И. Мяченков, В.П. Мальцев, В.П. Майборода и др.; Под общ. Ред. В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989;
2. Линейная теория тонких оболочек/ В.В. Новожилов, К.Ф. Черных, Е.И. Михайловский. – Л.: Политехника, 1991;
3. Н.В. Колкунов. Основы расчета упругих оболочек. – М.: Высшая школа, 1963;
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости – М.: Наука, 1975.–576с.;
5. Конечно-элементный пакет ИСПА: Теоретические основы. Руководство пользователя/ А.Н. Мухин. – М.: МАДИ, 1995;
6. MARC Volume A: Theory and User Information, Version K7. – Copyright © 1997 MARC Analysis Research Corporation, USA.

УДК 621.9.048.4

М. Г. Киселев, А. В. Дроздов

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИЛ ЗАКЛИНИВАНИЯ РАСПИЛОВОЧНОГО ДИСКА НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

В процессе изготовления изделий из драгоценных камней, включая монокристаллы алмаза, которые относятся к группе хрупких материалов, повсеместно применяется операция их механического распиливания. Режущим инструментом при этом служит бронзовый (Бр ОФ 6.5-0.15) распиловочный диск, на боковых сторонах которого тем или иным способом закреплены зерна алмазных микропорошков.

Однако, в отличие от металлорежущего инструмента типа дисковых фрез, ножовочных полотен и пил, распиловочный диск не имеет на торцевой поверхности регулярно расположенных режущих зубьев с соответствующим их разводом, что сделано для уменьшения толщины реза и сокращения безвозвратных потерь дорогостоящего сырья. Расположенные на его торцевой и боковой поверхности зерна шаржированного алмазного микропорошка имеют небольшие размеры и не могут предотвратить стремление пропиленных частей заготовки сомкнуться за счет действия внутренних напряжений. В результате возрастает величина усилий, действующих по нормали к боковым поверхностям диска, что обуславливает их постоянный скользящий контакт с пропиленными участками заготовки. Данное увеличение сил заклинивания распиловочного диска вызывает рост температуры в зоне скользящего контакта инструмента и заготовки, в результате увеличения сил давления на боковые стороны распиловочного диска. Это приводит к изменению условий и механизма трения-скольжения в зоне распиливания.

При взаимодействии боковых сторон распиловочного диска и пропиленных участков образца имеет место абразивное изнашивание-полирование обработанных частей заготовки (сетка однонаправленных рисок, оставленных зернами алмазных микропорошков, закрепленных на боковой поверхности инструмента). Увеличение температуры в зоне взаимодействия может приводить к изменению механизма