

**Особенности построения КЭ схемы и расчета котла и рамы
ж.-д. цистерны с использованием специализированных программных
комплексов ARIES, NASTRAN.**

Овечников М. Н.,
МИИТ
Введение.

В последние годы для расчета машиностроительных конструкций все шире используются всемирно известные специализированные программные комплексы (в большинстве основанные на МКЭ) такие как NASTRAN, ANSYS, COSMOS и др. Такие разработки обычно создаются и поддерживаются известными фирмами при участии специализированных институтов и исследовательских организаций. Научная и финансовая мощь разработчиков, объединение усилий отдельных групп сосредоточенных на узких направлениях, позволяют обеспечивать значительно большие возможности моделирования и расчета. Сегодня с их помощью решают широкий спектр задач, характерных для машиностроения. При этом происходит активное вытеснение индивидуальных программ аналогичного профиля. Одним из важнейших условий успешного применения МКЭ-программ является автоматизация операций ввода-вывода информации. Для этого были разработаны специализированные программы «препроцессор-постпроцессор»^ы, которые обычно используются в паре с одной из расчетных программ. Среди них наиболее известны PATRAN, ARIES, GEOSTAR и др. Освоение этих программ относительно трудоемко и их возможности, зачастую, используются ограничено, поэтому примеры их применения для решения определенных проблем могут оказаться весьма полезны при обретении навыков работы. В данном докладе сообщается об особенностях использования программных комплексов ARIES+NASTRAN для расчета котла и рамы железнодорожной нефтебензиновой цистерны.

Далее предполагается знакомство аудитории с основными понятиями ARIES и NASTRAN^а, а так же с конструкцией цистерны.

Особенности использование MSC ARIES для построения КЭ схемы котла и рамы цистерны.

В соответствие с общепринятой технологией построения КЭ^{ой} схемы, используемой и в ARIES, на *первом* этапе создается геометрическая модель исследуемого объекта. Она не обязательно точно повторяет формы реального объекта (хотя это желательно, особенно при работе с CAD системами), а скорее является «строительными лесами» для построения КЭ^{ых} сеток и наложения граничных условий, предоставляя соответствующие поверхности, кромки или другие геометрические объекты. На *втором* этапе на элементах геометрической модели определяются граничные условия в перемещениях и усилиях. На *третьем* этапе разбиением на КЭ соответствующих объемов и поверхностей геометрической модели, определением зон сгущения сеток, формируют фрагменты конечно-элементной модели. В данной работе предпочтение отдавалось автоматической генерации сеток, так как многие считают, что эта работа «именно для компьютера». Есть основания полагать, что недостатки автоматической генерации (присутствуют в отдельных зонах КЭ^{ой} схемы котла и рамы, например, в районе центра днищ) будут устраняться по мере доработки алгоритмов и увеличения мощности компьютера, что в наше время происходит достаточно быстро.

Стоит отметить, что пользователи, имеющие опыт работы с такими препроцессорами как GEOSTAR, PATRAN, пытаясь использовать сформировавшиеся подходы в ARIES, встречают определенные трудности. Там отсутствуют привычные операции

выделения узлов и элементов по координатам, нельзя вывести на экран или печать КЭ схему или ее фрагмент с номерами узлов и элементов (что очень часто используется разработчиками). Геометрическую модель для оболочечных конструкций в ARIES предпочтительнее строить на основе «solid»'ов (уже устоявшийся термин, переводимый как твердое тело). Используя булевы операции формируют «solid» с поверхностями и кромками соответствующими моделируемой оболочке. Для выделения определенных объемов и поверхностей соответствующих, например, опорам, или лапам предусмотрена специальная операция «region» широко используемая при построении геометрической части модели. В отличие от GEOSTAR или PATRAN в ARIES 'большее значение играет геометрическая модель - многие операции по формированию КЭ^{ой} схемы делаются только через нее. Однако отмеченные выше и другие особенности вероятно правильнее рассматривать не как недостатки, а как «подход» разработчиков.

Прототипом для используемой в работе расчетной схемы взята цистерна модели 15-1443. Поводом такого выбора послужила информация о высокой повреждаемости котла и рамы этой цистерны [2, 3]. Ее исследование представляет интерес как с целью совершенствования расчетов (если причина повреждений недостаток конструкции, необходимо выяснить ошибки проектирования), так и при подборе схем модернизации для снижения повреждаемости.

На рис. 1 – 2 показана геометрическая модель котла цистерны с обозначенными условными символами давления веса груза на оболочку и граничными условиями. Для работы с внутренними регионами, поверхностями и линиями, окружающие регионы можно делать прозрачными (рис. 2 - степень прозрачности регулируется, на вертикальной продольной плоскости симметрии оболочки вдоль образующих видны символы граничных условий).

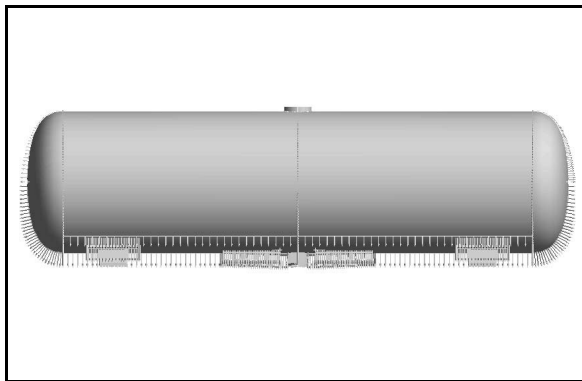


Рис. 1. Обозначение весового давления груза на геометрической модели котла.

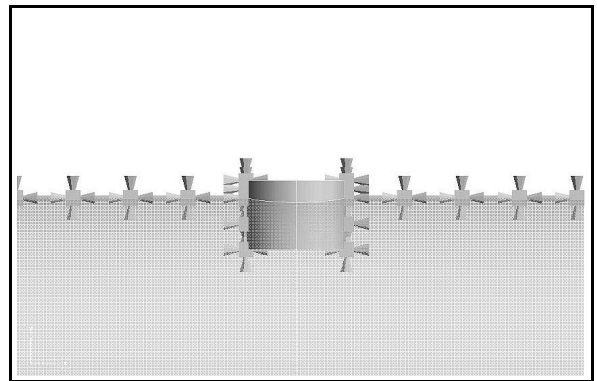


Рис. 2. Вид верхней горловины (тело, формирующее цилиндрическую часть оболочки котла, сделано прозрачным и видна нижняя часть горловины)

Для простоты геометрическая модель конечно-элементной схемы рамы создавалась по принципу «строительных лесов» и для иллюстрации особенностей формы реального объекта не пригодна. Принципы ее создания аналогичны использованным при построении модели оболочки.

При построении конечно-элементных схем использовались КЭ^{ты}: оболочки – для котла и рамы, объемные «кирпичики» – для опорных лежней, балочные – для моделирования ограждения, хомутов, силовых элементов рамы, GAP-элементы для моделирования контакта на опорах и лапах, RB2-элементы для моделирования связи малой опоры с рамой.

КЭ^{мк} схемы котла и рамы строились отдельно с последующей стыковкой, потребовавшей определенной изворотливости. Для этого использовались КЭ^{мк} RB2 и специально подготовленные «платформы» с одинаковым разбиением.

Формирование КЭ^{мк} фрагментов, нагрузок, граничных условий возможно и независимо от геометрической модели, в ARIES такой подход более используется для доработок уже существующих КЭ^{мк} схем.

Для экономии доступных ресурсов программы (10000 узлов), КЭ^{мк} схемы менялись в зависимости от рассматриваемой стороны вопроса, использовались свойства симметрии конструкции и нагрузок: для расчета нагрузок и конструкции симметричных относительно продольной вертикальной плоскости рассматривалась половина конструкции получаемая при рассечении этой плоскостью (рис. 3); аналогично для симметричных относительно поперечной вертикальной плоскости нагрузок и конструкции (рис. 4). На пересечении плоскости симметрии и модели накладывались соответствующие граничные условия. Для соответствия этих схем ограничениям по числу узлов, модель котла принималась без верхней и нижней горловин, сливного уклона. Влияние перечисленных элементов конструкции на НДС зон опор и лап предполагается незначительным.

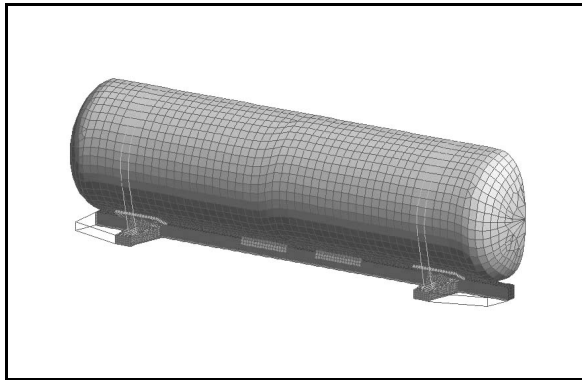


Рис. 3. КЭ схема котел-рама для симметричных относительно продольной вертикальной плоскости нагрузок и конструкции

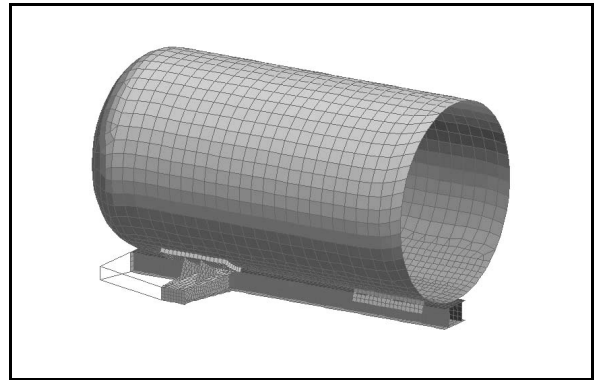


Рис. 4. КЭ схема котел-рама для симметричных относительно поперечной вертикальной плоскости нагрузок и конструкции

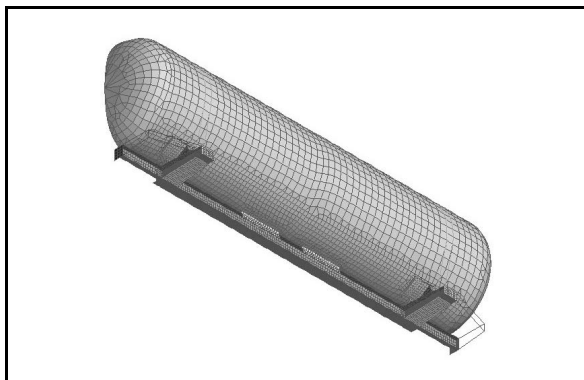


Рис. 5. КЭ схема рис. 3, вид снизу в направлении $(0, 0, 0) - (-1, -1, 1)$.

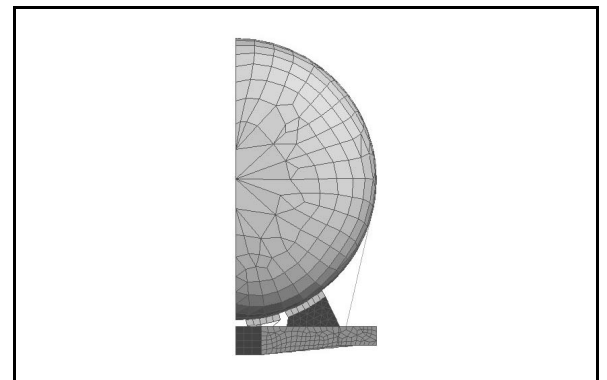


Рис. 6. КЭ схема рис. 3, вид со стороны днища.

Следует отметить, что рис. 1-6 и им подобные, при печати этого документа как твердой копии, малы для удобного изучения (в других работах они обычно принимаются в два раза большего размера и здесь уменьшены для экономии объема). Однако

при использовании документа в электронном виде для изучения подробностей схемы можно воспользоваться масштабом. Рисунки такого же размера содержащие графики распределения напряжений (будут приведены далее) оказались приемлемого качества и при печати. Подбор правильного размера рисунка, не загромождающего документ и в то же время не упускающего важные подробности, является важным этапом в формировании материала. На рис 5-6 показана КЭ схема рис. 3 с различных точек наблюдения.

Уже упоминавшиеся ограничения по числу узлов вынуждают разработчика для изучения конкретных сторон проблемы разрабатывать специализированные схемы, в которых за счет грубой схематизации несущественных сторон повышают точность КЭ^{выс} сеток в рассматриваемой зоне. Так, для расчета в зонах верхней и нижней горловин, сливного уклона, шпангоутов использовались схемы показанные на рис. 7 - 10. В этих схемах опоры моделируются запрещением радиальных перемещений на соответствующих площадках, а лапы запретом тангенциальных и продольных перемещений на площадках лап. Такая схематизация, не обеспечивая высокой точности расчета в опорных зонах, позволяет получать удовлетворительные результаты на достаточном от них удалении - в районах горловин, шпангоутов, сливного уклона.

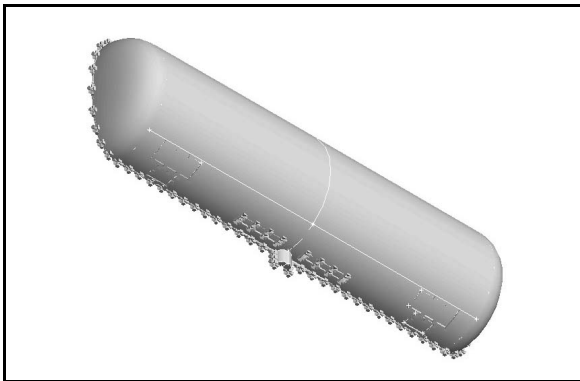


Рис. 7. Геометрическая модель котла для исследования горловин и сливного уклона.

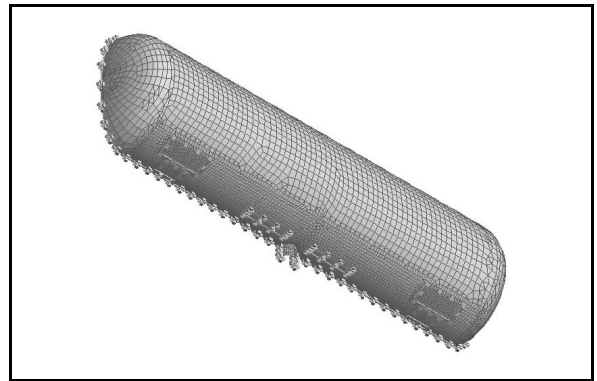


Рис. 8. КЭ^{выс} модель котла для исследования горловин и сливного уклона.

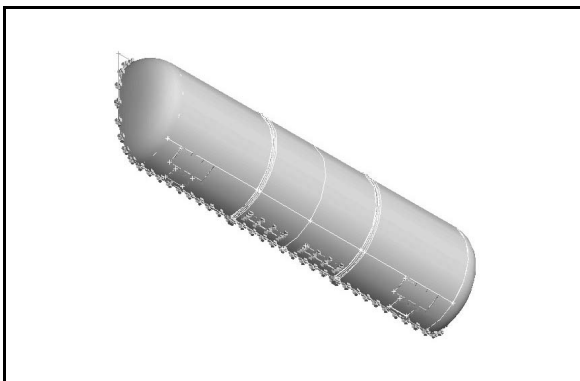


Рис. 9. Геометрическая модель котла для исследования влияния на НДС шпангоутов.

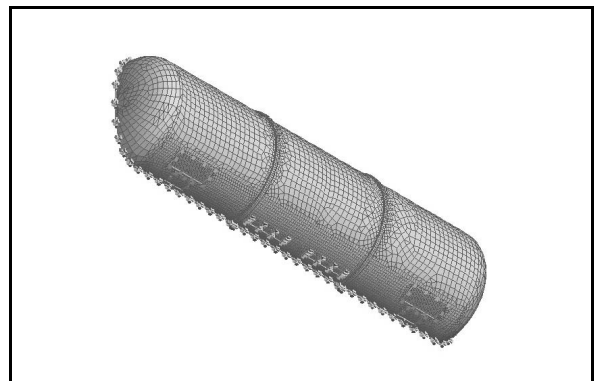


Рис. 10. КЭ^{выс} модель котла для исследования влияния на НДС шпангоутов.

Для моделирования взаимодействия опорных лежней и оболочки котла использованы GАР-элементы, позволяющие оболочке свободно отрываться от опор при наличии со-

ответствующих силовых факторов (при сильных односторонних соударениях) и ослабленных хомутах крепления котла к раме (рис. 11). При моделировании лап GAP-элементы применяются для предотвращения проникновения внутренней кромки лапы в оболочку и возможности ее свободного отрыва по этой кромке (рис. 12).

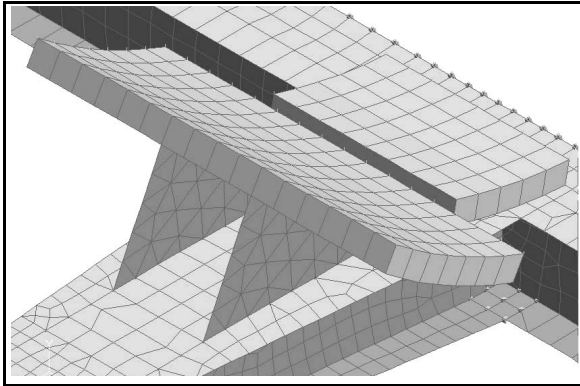


Рис. 11. Подробности КЭ^{об} модели опоры, на внутренней поверхности лежней заметна «щетина» GAP-элементов

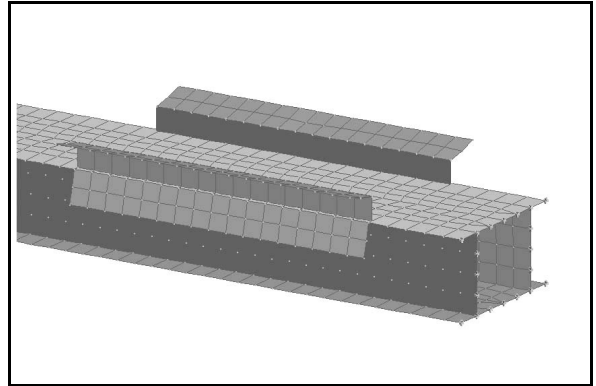


Рис. 12. КЭ^{об} модель лапы котла, соединение с хребтовой балкой; на внутренней кромке лапы заметны GAP-элементы.

Использование GAP-элементов при решении пространственных задач требует выработки определенных приемов. Так при моделировании взаимодействия опора-оболочка, сетки моделирующие лежни опоры (для нас интересна сетка на внутренней поверхности лежней) и опорную зону оболочки подбираются одинаковыми и с постоянным шагом. Это позволяет построение GAP-элементов на видимых кромках соединения с его последующим копированием (вслепую) вдоль направлений постоянного шага узлов. Результаты таких операций необходимо контролировать, возможны «промахи» – когда узлы скопированных GAP'ов оказываются не достаточно близки к узлам сеток оболочки и лежней. При выполнении операции «merge» осуществляющей слияние близких узлов выдается число «спаянных» узловых пар, по которому можно прикинуть, все ли элементы встали на место. Контроль также возможен, если закрывающие GAP-элементы сетки сделать невидимыми, например как на рис. 11. При этом становится видима «щетина» GAP-элементов, которую при соответствующем увеличении можно хорошо проконтролировать. В ряде случаев GAP-элементы использовались совместно с RB2-элементами, что позволяло точнее смоделировать реальную ситуацию.

В NASTRAN'е предусмотрены возможности повышающие эффективность контактного моделирования, однако в имеющихся в МИИТ'е версиях ARIES подготовка их реализации не предусмотрена.

Для расчета котла на устойчивость к нормативному разряжению 0.5 кГ/см^2 , предлагается КЭ^{об} схема показанная на рис. 13. Свободные нижние кромки лап на схеме закреплены. Подробнее об особенностях работы с MSC ARIES изложено в [4].

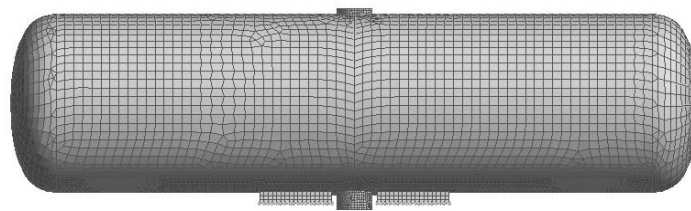


Рис. 13. КЭ^{об} модель котла для расчета на устойчивость при нормативном разряжении.

Особенности использования MSC NASTRAN для расчета котла и рамы цистерны.

Вопросам расчета котла и рамы цистерны с использованием MSC NASTRAN посвящена отдельная работа [5]. Здесь приводятся данные общего характера, которые могут представлять интерес для пользователей NASTRAN'a и из других отраслей машиностроения. Для понимания материала кратко отметим основные подходы и понятия, которые будут присутствовать в изложении.

В соответствии с «Нормами расчета вагонов ...» [1] для обеспечения работоспособности цистерны напряжения в элементах ее конструкции от нагрузок I^{ого} и III^{ого} режимов нагружения должны не превышать допустимого уровня, котел - выдерживать внутреннее разряжение 0.5 кг/см².

Полученные с помощью ARIES+NASTRAN результаты расчетов представлены в следующем порядке. На предварительном этапе показано влияние на результат учета физической и геометрической нелинейности. Далее рассматриваются некоторые результаты расчета по I^{ому} режиму (никаких особенностей в применении NASTRAN'a в расчете по III^{ему} режиму не отмечено и он не рассматривается) и оценка устойчивости оболочки при нормативном разряжении. В заключение рассматриваются некоторые особенности работы конструкции, которыми можно проиллюстрировать возможности программы.

Для представления результатов расчетов используются рисунки, показывающие «контурные» распределения основных компонент НДС на схеме, деформацию под действием нагрузок. На основе анализа этих рисунков и опыта расчета аналогичных конструкций на КЭ^{ой} схеме выбираются «контрольные линии» - на которых предполагаются максимальные напряжения. Вдоль «контрольных линий» строятся графики компонент НДС (обычно напряжений). Такие графики позволяют более точные представления результатов. На основе анализа рисунков и графиков делаются выводы по расчету.

Имеющаяся информация об опасных зонах котла и рамы, анализ результатов аналогичных расчетов, дают основание выбрать контрольные линии, как показано на рис. 14 - 15.

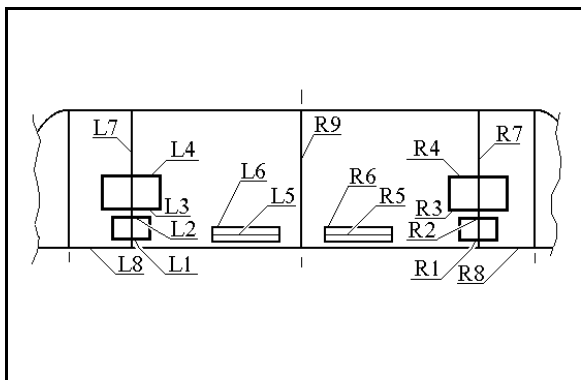


Рис. 14. Контрольные линии на котле цистерны (L – левая часть, R - правая)

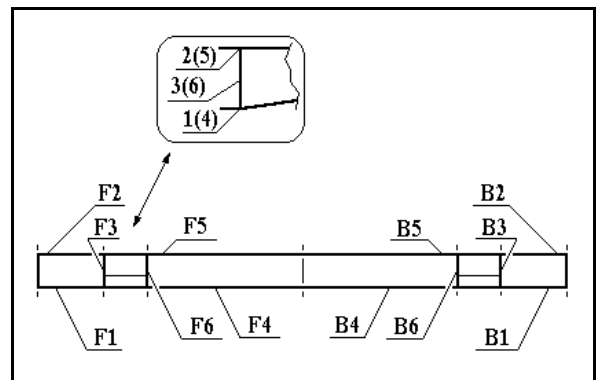


Рис. 15. Контрольные линии на раме цистерны (F – левая часть, B - правая)

Буква L свидетельствует о принадлежности «контрольной линии» левой половине котла, R – правой. Аналогично для рамы: F – о принадлежности к левой половине, В – к правой.

Направление продольных линий принимается от торцов к середине, а круговых и вертикальных снизу вверх.

Так как допускаемые «Нормами» напряжения ниже предела текучести, НДС обычно рассчитывают в линейной постановке. Для подтверждения правомерности такого подхода были проведены расчеты напряжений при *линейной* постановке задачи, с учетом только *физической нелинейности*, только *геометрической нелинейности* и как *физической*, так и *геометрической* нелинейностей одновременно. Расчет велся от действия наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок $I^{ог}$ режима (обычно это сочетание продольной ударной нагрузки 350тс, опорной нагрузки и внутреннего давления, в [5] это утверждение подтверждено расчетами). На рис. 16-21 показано сравнение перечисленных вариантов на внешней поверхности оболочки, вдоль контрольных линий котла R1, R4, R5, R8 и рамы B1, B2.

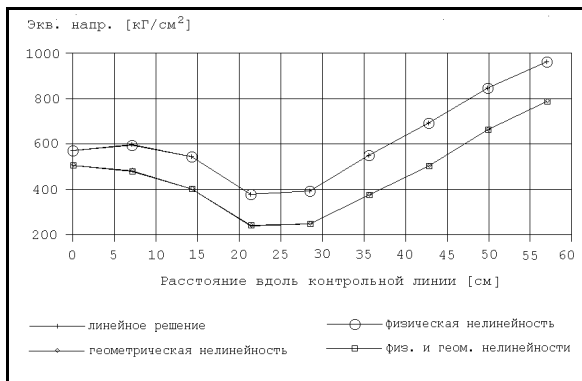


Рис. 16. Сравнение результатов линейных и нелинейных расчетов вдоль линии R1

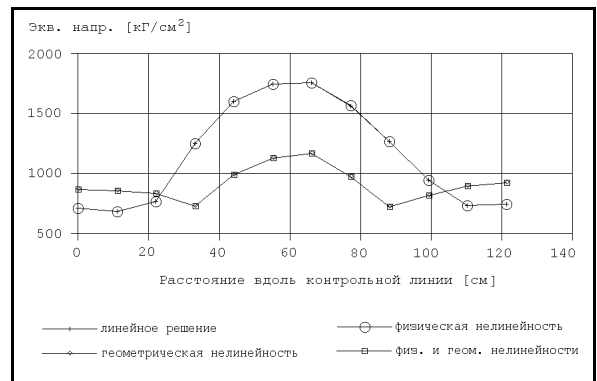


Рис. 17. Сравнение результатов линейных и нелинейных расчетов вдоль линии R4

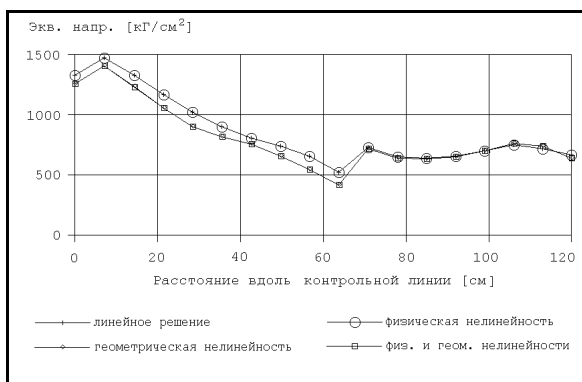


Рис. 18. Сравнение результатов линейных и нелинейных расчетов вдоль линии R5

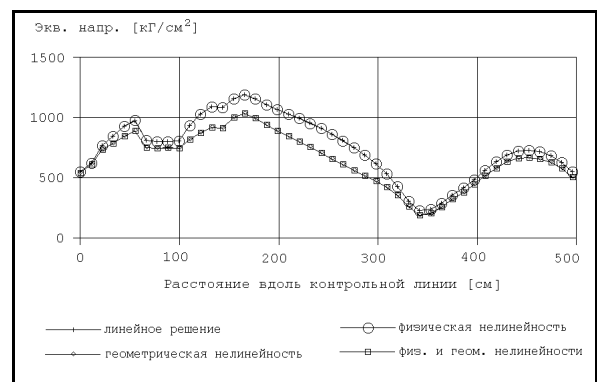


Рис. 19. Сравнение результатов линейных и нелинейных расчетов вдоль линии R8

ность не предусмотрена, поэтому приходится последовательно захватывать кадры анимации, объединяя их, например, в Adobe Acrobat. Рис. 22, 23 можно достаточно подробно рассмотреть в режиме электронного документа, при масштабе 200% и более. При печати жесткой копии многие подробности этих рисунков утрачиваются, поэтому для получения приемлемого результата размер этих рисунков следует выбирать больше.

Точность оценки напряжений на основе контурного рисунка ограничена шириной диапазона контура и порой бывает предпочтительней пользоваться привычными графиками. ARIES располагает для этого рядом встроенных возможностей.

На рис. 24 - 26 показаны графики эквивалентных, максимальных и минимальных напряжений на внешней поверхности элементов, от наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок I^{pro} режима, на контрольной линии R2. Предоставляемая ARIES возможность построения графиков ограничена и для более наглядного вида материал подвергается дополнительной обработке в любом графическом процессоре. Для сравнения на рис. 27 показан необработанный график.

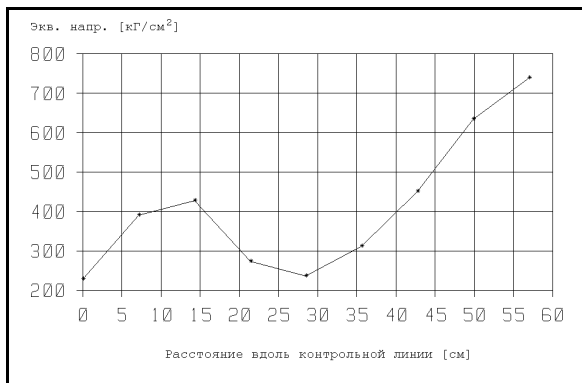


Рис. 24. Экв. напр. на внешней поверхности элементов вдоль линии R2.

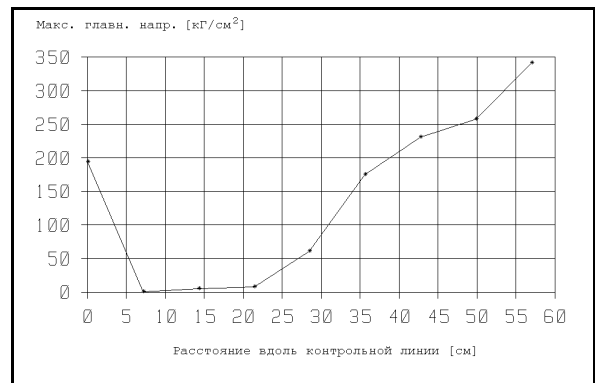


Рис. 25. Макс. главн. напр. на внешней пов. элементов вдоль линии R2.

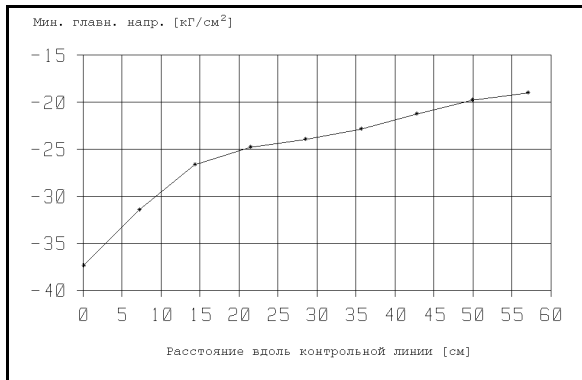


Рис. 26. Мин. главн. напр. на внешней поверх. элементов вдоль линии R2.

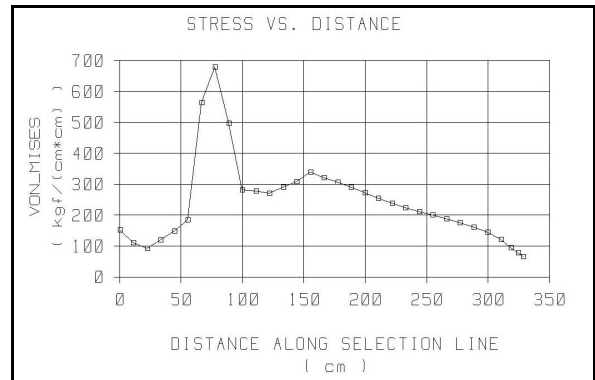


Рис. 27. Произвольный график из ARIES не подвергавшийся доработке.

К сожалению, в использованных версиях ARIES отсутствует возможность построения на одном графике распределений по внешней, нейтральной и внутренней поверхностям элементов – это сократило бы количество графиков и повысило бы наглядность материала. При расчете НДС цистерны графики, типа представленных на рис 24 – 26 строятся вдоль всех контрольных линий. Анализ этих графиков и контурных распределений по-

зволяет делать выводы о результатах расчета. Ниже приводятся выводы касающиеся только особенностей расчета на этом этапе, но не результатов.

1. При построении графиков напряжений по узлам вдоль контрольной линии, на которой пересекаются сетки разных элементов, программой отсортировываются максимальные (с учетом знака) значения напряжения ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{\text{экв}}$, др.) по всем примыкающим к узлу элементам. Ввиду этого $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{\text{экв}}$ могут выбираться от разных элементов и известное соотношение

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}$$

не выполняться.

2. Опыт использования GAP-элементов свидетельствует о высоких требованиях содержащих их расчетных схем к вычислительным ресурсам. Процесс сходимости порой оказывается достаточно долгим (проведенный на одном из компьютеров тест показал: с GAP-элементами время счета ~ 17 час, без них ~ 4 час). Необходимо следить за характером деформаций в зонах с этими элементами, так как формальное их использование может приводить к результатам существенно отличным от действительных.

3. Опыт решения нелинейных задач показал, что NASTRAN (как видимо и многие другие системы) «не любит» сильную нелинейность - при ней возможны аварийные остановки программы, требующие настроек исходных параметров. В процессе работы с программой все же были получены решения (они заканчивались аварийно, но было сделано достаточно большое количество шагов), в которых можно говорить о ситуациях близких к развитию пластического шарнира в районе заднего упора.

4. При использовании нескольких случаев нагружения в одном решении их комбинирование при линейной и нелинейной постановках происходит по разному.

Далее на примере анализа устойчивости оболочки котла к внутреннему разряжению проиллюстрируем возможности университетской версии NASTRAN'a для решения этой проблемы.

В соответствии с требованиями норм, котел нефтебензиновой цистерны должен выдерживать внутреннее разряжение 0.5 кг/см^2 . В имеющейся «университетской» версии NASTRAN'a есть подсистема расчета на устойчивость в линеаризованной постановке задачи, когда элементы геометрической матрицы конструкции принимаются пропорциональными внешней нагрузке. Хотя решение в линеаризованной постановке не всегда приемлемо, для многих задач оно все же позволяет получать удовлетворительные оценки. В «большом» NASTRAN'e имеется подсистема расчета на устойчивость в более полной постановке.

Для решения поставленной задачи к конструкции прикладываются нагрузки величиной, возможно, более близкой к критической. Удачный выбор исходной величины нагрузок, обеспечивает лучшую сходимость итерационного процесса решения.

В качестве результата решения, программой выдается форма потери устойчивости и «коэффициент устойчивости» – действительное число, показывающее как нужно изменить компоненты исходной нагрузки (их величины умножаются на этот коэффициент), чтобы она стала критической. Задавая в качестве исходной величины нормативное разряжение 0.5 кг/см^2 , получаем коэффициент устойчивости – 1.7268. Расчет проводился по схеме показанной на рис. 13. На рис. 28, 29 показана низшая форма потери устойчивости оболочки котла, рассчитанная по схеме с горловинами и без них.

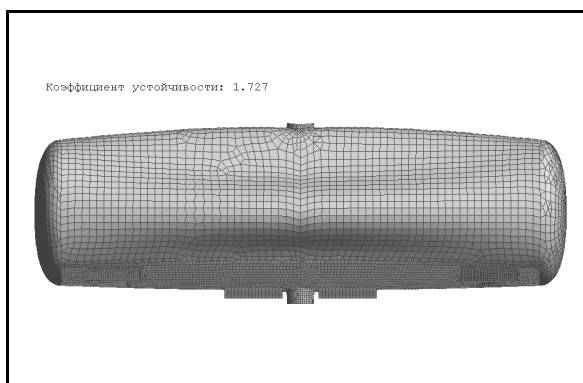


Рис. 28. Форма потери устойчивости оболочки котла при внутреннем разряжении 0.5 кГ/см² (с учетом горловин).

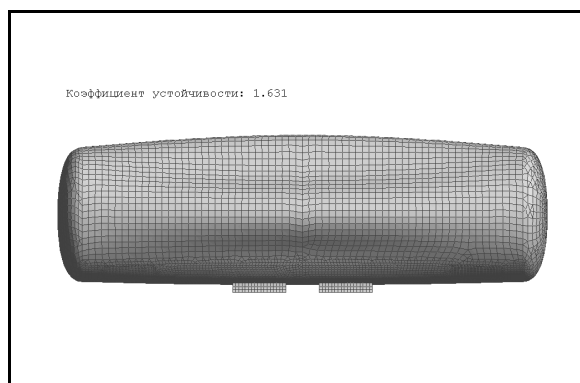


Рис. 29. Форма потери устойчивости оболочки котла без учета горловин.

Сопоставление коэффициентов устойчивости и форм позволяет сделать вывод о незначительном влиянии верхней и нижней горловин на устойчивость оболочки.

Значительный интерес представляет изучение влияния на устойчивость оболочки к разряжению опорных вмятин (довольно обычного повреждения на котлах 53 и 62 калибров [3]). На рис. 30 - 31 показаны формы потери и коэффициенты устойчивости для двух уровней подобной вмятины. Так как в этой работе исследуется характер влияния, а не конкретные величины, вмятины моделировались упрощенно - смещением части опорных узлов внутрь котла в вертикальном направлении на величину 10 см (рис. 30) и 20 см (рис. 31). Возможно более точное моделирование, на основе пластических решений, однако здесь оно не рассматривается.

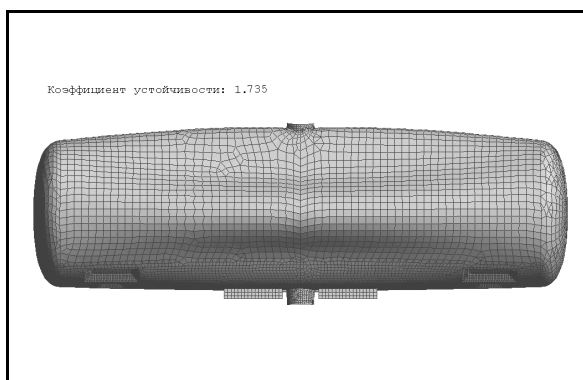


Рис. 30. Форма потери устойчивости оболочки с опорной вмятиной 10 см.

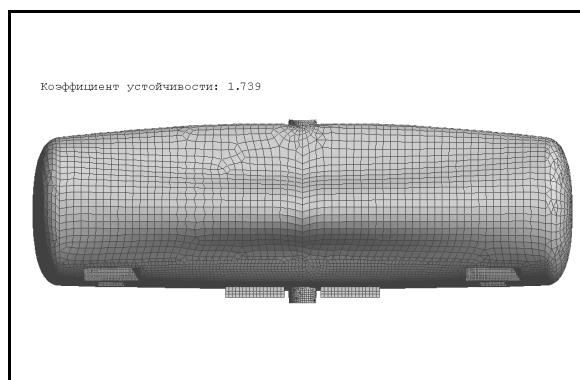


Рис. 31. Форма потери устойчивости оболочки с опорной вмятиной 20 см.

Рис. 30, 31 свидетельствуют о *незначительном* влиянии глубины опорной вмятины на коэффициент устойчивости, что может объясняться существенными различиями в «характерных» размерах вмятины и элементов формы потери устойчивости. Возможно, слабая зависимость это результат линеаризации задачи – необходимы дополнительные исследования.

Ограниченный опыт использования динамических возможностей NASTRAN'a здесь демонстрируется на примере сопоставления динамического и эквивалентного статического решений с целью обоснования приемлемости последнего.

Известно, что одной из составляющих нагрузки по режимам является нагрузка от продольного удара (все сказанное справедливо и для рывка). Предполагается, что воз-

никающая в автосцепке в момент удара сила уравнивается силами инерции груза (которые в случае цистерн, проявляются давлением гидроудара), котла, тележек, рамы. Это давление и силы инерции определяются в соответствии с нормами и задача оценки НДС конструкции при ударе может быть сведена к статической.

Для численной проверки приемлемости статического решения, в этом разделе задача решалась в динамической постановке, когда давление гидроудара и инерционные силы прикладывались коротким импульсом продолжительностью ~ 0.03 с., при тех же граничных условиях. Задача решалась в линейной постановке (в «большом» NASTRAN'е имеется подсистема динамического расчета в нелинейной постановке), демпфированием пренебрегали. Сравнение статического и динамического решений проведено в момент времени $t=0.03$ сек. по контрольным линиям R4, B3 (рис. 32 - 33) для эквивалентных напряжений на внешней поверхности элементов.

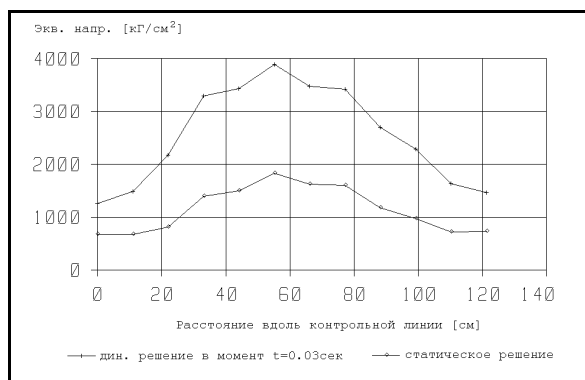


Рис. 32. Сравнение напряжений статического и динамического расчетов вдоль линии R4.

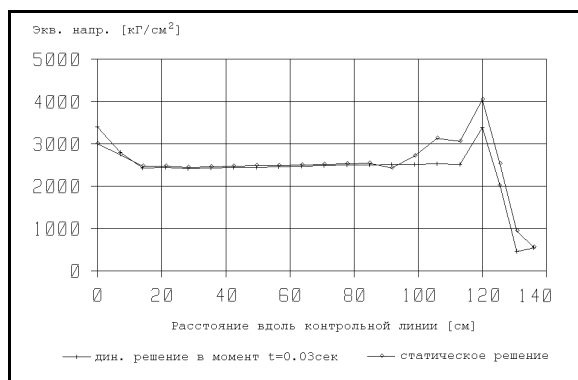


Рис. 33. Сравнение напряжений статического и динамического расчетов вдоль линии B3.

Рис. 33 свидетельствует о сопоставимости результатов статического и динамического расчетов вдоль контрольной линии B3. Почти 2-х кратное различие статического и динамического решений вдоль линии R4 (рис. 32), возможно обусловлено недостаточным количеством гармоник и требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996 г., 319 с.
2. Овечников М. Н. Статистическая информация о повреждениях железнодорожных нефтебензиновых цистерн - обработка с помощью СУБД MS ACCESS./ МИИТ, М., 1998.- 24 с.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 6153 жд-98.
3. Овечников М. Н. Эксплуатационные повреждения нефтебензиновых железнодорожных цистерн – фотоснимки, схемы. / МИИТ, М., 1998.- 55 с.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 6154 жд-98.
4. Овечников М. Н. Моделирование котла и рамы нефтебензиновой железнодорожной цистерны с использованием MSC ARIES. / МИИТ, М., 1998.- 24с.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 6188 жд-98.
5. Овечников М. Н. Расчет котла и рамы нефтебензиновой железнодорожной цистерны с использованием MSC NASTRAN. / МИИТ, М., 1998.- 40с.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 6198 жд-98.