

ков с ЧПУ, избежать ошибок, позволяет операция симуляции нарезки зубьев или симуляции зацепления в САД-системах для трехмерного моделирования.

Разработка новой технологии производства рабочих звеньев червячной передачи позволила уменьшить трудоемкость до 50%, снизить затраты на инструмент и технологическую оснастку, в значительной мере повысить коэффициент загрузки уникального высокопроизводительного оборудования, значительно повысить качество изготовления крупных червячных передач.

Использование многокоординатных универсальных обрабатывающих центров для нарезки рабочих поверхностей зубьев червячных передач снимает ограничения, налагаемые на профилирование витка червяка, исходя из требования по обеспечению возможности правки алмазным инструментом, упрощенного по форме шлифовального круга в процессе финишной обработки червяка. Это расширяет технологические возможности производства, связанные с оптимизацией условий контакта рабочих поверхностей червячной пары из условий образования гидродинамического масляного клина, снижения скорости скольжения, повышения контактной прочности, а также устойчивости к интерференции элементов зацепления при высоких нагрузках.

Список литературы: 1. Niemann G, Heyer E. Untersuchungen an Schneckenrieben – «VDI», 1953. – № 6. – С. 147-157. 2. Niemann G Grenzleistungen für gekülte Schneckengetrieben – «VDI». – 1955. – № 10. – С. 128-133. 3. Литвин Ф.Л. Новые виды цилиндрических червячных передач. – М. – Л.: Машгиз, 1962. – 163 с. 4. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с. 5. Кривенко И.С. Новые типы червячных передач на судах. – Л.: Судостроение, 1967. – 256 с. 6. Попов В.А. Цилиндрические червячные передачи с повышенными эксплуатационными свойствами // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 3. – С. 105-110. 7. Павленко А.В., Федякин Р.В., Чесноков В.А. Зубчатые передачи с зацеплением Новикова. – К.: Техника, 1978. – 144 с.

Поступила в редакцию 16.09.2012

УДК 539.3

В.Б. ТРЕТЬЯКОВ, ген. дир. ПАО „Карловский маш. завод”, Карловка;
И.И. ИВАНЦОВ, тех. дир. ПАО „Карловский маш. завод”, Карловка;
О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, мл. науч. сотр. каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ”;
А.А. АТРОШЕНКО, асп. каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ”

ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ СИЛОСНЫХ УСТАНОВОК

У роботі описані результати досліджень напружено-деформованого стану елементів силосу для зберігання зерна і інших продуктів. Розглянуті тестові завдання для гофрованих панелей силосу, для болтових з'єднань, а також для повної конструкції корпусу силосу. Описані проблемні чинники при побудові розрахункових моделей елементів силосу.

Ключові слова: напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, гофровані панелі.

© В.Б. Третьяков, И.И. Иванцов, О.В. Веретельник, А.А. Атрошенко

В работе описаны результаты исследований напряженно-деформированного состояния элементов силоса для хранения зерна и других продуктов. Рассмотрены тестовые задачи для гофрированных панелей силоса, для болтовых соединений, а также для полной конструкции корпуса силоса. Описаны проблемные факторы при построении расчетных моделей элементов силоса.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, силос, метод конечных элементов, гофрированные панели.

This paper describes the results of research of the stress-strained state of a silage for storage of grain and other products. Test problems are considered for corrugated panel's silage for bolted connections, as well as full body design silage. Described the problematic factors for building computational models of the elements of silage

Keywords: stress-strain state, silage, finite element method, corrugated panel.

Введение. С ростом объемов и направлений экономической деятельности в Украине особый интерес для практической деятельности представляют проекты с экономической выгодой. Такие проекты, как отмечается в работе [1], получили широкое распространение для хранения и переработки продукции сельского хозяйства. В частности, находят все большее применение возводимые конструкции силосов для хранения зерна, бобов, семечек и т.п. Конструкция силоса из сборных оцинкованных гофрированных панелей не требует капитальных строений; для возведения такой конструкции необходим надежный фундамент, подъемно-транспортная техника и команда строителей, которые в течении месяца сдают силос в эксплуатацию (рис. 1). В Украине широкое распространение силосные установки получили примерно с 2000 г. [1-4].



Рис.1 – Общий вид конструкции

Фирмы, использующие силосные установки такого типа, имеют преимущество по многим параметрам – они избавляют себя от громоздких конструкций из бетона, на строительство которых необходимо гораздо большее количество времени, финансовых затрат, и в первую очередь – безопасность. Создается впечатление простоты и надежности сооружений. Но, как подчеркивается в работе [1], при эксплуатации силосных установок возникает ряд проблемных ситуаций. Несущие элементы выходят из строя, болтовые соединения становятся ненадежными, возникают различного рода деформации, что приводит к выведению сооружения из строя. В связи с этим необходимо проводить своевременные мероприятия по обследованию и ремонту установок, на которые затрачиваются значительные средства. Причиной этой ситуации являются проектные, технологические, монтажные и эксплуатационные факторы. В силу этого при обследованиях различных объектов обнаруживаются разнообразные отклонения от работоспособного состояния [1-16].

При проектировании силосных установок в первую очередь необходимо учитывать все нагрузки, действующие на конструкцию, а также учитывать тот фактор, что силосы работают в тяжелых условиях, и принимать во внимание нагрузки, зависящие от климатических условий, скорости ветра и количества выпадаемых

осадков, что в итоге создает многоцикловую сложнокомпонентную нагруженность.

В настоящее время отсутствуют достаточно полные исследования, которые базируются на комплексном учете влияния всех существенных факторов на работоспособность конструкции, что дало бы возможность провести анализ совместного влияния этих факторов на несущую способность силосов. Таким образом, нет возможности объективно и аргументированно определить не только исходные причины возникших проблем, но и очертить границы изменений тех или иных параметров, которые потенциально определяют области работоспособности или неработоспособности силосов. К тому же отсутствуют расчеты по влиянию варьирования хотя бы отдельных параметров на работоспособность силосов. Есть только результаты отдельных расчетов, чего совершенно недостаточно для принятия технически обоснованных решений. В свою очередь, это влечет за собой неопределенные риски, в том числе технические и финансовые, как по существующим конструкциям и эксплуатируемым силосам, так и по вновь проектируемым или осваиваемым в производстве. При этом прямое непосредственное применение численных методов типа метода конечных элементов (МКЭ) [17, 18], аналитических моделей [19] или разработка усовершенствованных подходов и моделей [20-24] не всегда правильно отражает реальное поведение конструкции силосов.

Таким образом, можно сделать вывод об актуальности и критической важности проведения комплексных исследований работоспособности силосов при варьировании множества параметров (конструктивных, технологических, монтажных, эксплуатационных) для построения адекватных расчетных моделей и определения исходных проблемных факторов, а также способов их устранения.

Постановка задачи. Обозначенные выше комплексные исследования можно проводить только на основе углубленной, адекватной и точной математической модели, которая в настоящее время отсутствует. Отдельные исследования, проведенные различными специалистами, хотя и заслуживают внимания и одобрения, в то же время носят характер экспресс-оценок. Они проводились в сжатые сроки, при ограниченных ресурсах и на базе неполного объема исходных данных. Таким образом, они не могут служить надежной основой для принятия важных технических решений, которые сопряжены с возможными потерями работоспособности. Отсюда следует, что наиболее важной и первичной проблемой следует считать разработку, обоснование и реализацию комплексной параметризованной математической модели напряженно-деформированного состояния (НДС) силосов и их отдельных элементов. Только на этой основе возможно проведение адекватного, точного и полного численного моделирования процессов и состояний элементов силосов в процессе нагружения, а, значит, и разработки соответствующих рекомендаций.

Потенциальные значимые факторы, которые необходимо учесть при формировании создаваемой математической модели и при ее численной реализации. Постановка задачи разработки комплексной математической модели и ее численной реализации при помощи метода конечных элементов предполагает принятие во внимание следующего множества факторов:

1) учет трения в сопряжениях „гайка – лист – шайба – головка болта”;

- 2) учет концентрации напряжений при срезе и смятии (на резьбовой части);
- 3) учет эффекта „слайдер”, то есть моделирование тангенциальных смещений панелей при приложении нормальной нагрузки;
- 4) применение более качественной конечно-элементной сетки (большое количество элементов на полуволну гофра панели, по сравнению с применяемой традиционной сеткой, не привязываемой к гофрам);
- 5) применение Shell – моделей (описание оболочечными элементами не только панелей, но и вертикальных ребер жесткости);
- 6) учет пластических деформаций в микроразделах контакта;
- 7) учет неоднородности распределения зазоров в системе „внутренний лист – болт – наружный лист” между отдельными гнездами болтовых соединений;
- 8) более корректное задание граничных условий (в том числе от действия эстакады в верхней части силоса);
- 9) учет волнистости листов на уровне оболочечной модели;
- 10) учет температурной компоненты нагрузки при охлаждении (то есть при уменьшении окружного размера силоса);
- 11) устойчивость деформирования корпуса силоса;
- 12) учет неравномерности затяжки болтовых соединений;
- 13) анализ реальных усилий на болтовое соединение не только по первым главным напряжениям: не всегда главные напряжения определяют направление и величину усилий на болты, особенно для волнистых листов.

Кроме того, при создании комплексной математической модели необходимо проведение серии экспериментов на отдельных элементах и узлах конструкции силоса. В ходе их проведения могут вскрыться и другие проблемные факторы. Далее описаны тестовые задачи для отдельных элементов конструкций силосов.

Тестовые задачи о напряженно-деформированном состоянии элементов силосов. Ниже представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния модели корпуса силоса, а также вспомогательных тестовых задач, которые дополняют данное исследование. Расчет НДС производился при помощи МКЭ. Геометрические модели для тестовых задач были построены в CAD системе SolidWorks, потом для дальнейших расчетов были экспортированы в программный комплекс ANSYS Workbench [17, 18].

Анализ НДС корпуса силоса включает в себя построение геометрии с учетом толщин для каждого яруса, как для панелей, так и для ребер жесткости, а также и для конструкции крыши.

Исследование вспомогательных тестовых задач заключается в анализе реакций отдельных элементов/фрагментов конструкции корпуса силоса: поведения боковых панелей, ребер жесткости, болтового соединения и исследование поведения резьбы. В частности, это:

- исследование плоской и гофрированной панелей (внешние габариты – 1x2м, толщина – 4мм). Осуществлялось различное приложение нагрузки – две задачи на растяжение, т.е. приложение растягивающей силы как вдоль панели, так и поперек, а также моделирование задачи изгиба;

- исследование ребра жесткости, т.е анализ поведения соединения ребер жесткости между собой с учетом вставок/накладок/усилений, а также исследование ребер в shell- (оболочечной) и beam- (т.е. стержневой) постановках;

- исследование резьбы при болтовом соединении боковых панелей корпуса силоса (две панели соединены болтом).

Тестовый расчет 1. Исследование боковой плоской и гофрированной панелей. Конечно-элементная сетка плоской и гофрированной панелей (обозначны далее ПП и ГП соответственно) показаны на рис. 2 и 3. Осуществлялось различное приложение нагрузки – две задачи на растяжение (при нагрузке вдоль панели и поперек нее), а также изгиб при действии нормально приложенной нагрузки.

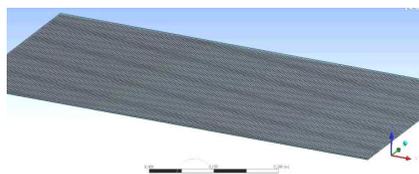


Рис. 2 – Конечно-элементная модель ПП

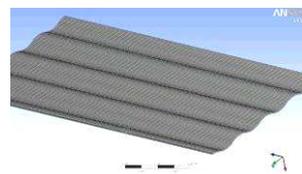


Рис. 3 – Конечно-элементная модель ГП

Рассмотрим схемы прикладываемых нагрузок и закреплений для задачи на растяжение. Схема нагружения плоской панели показана на рис. 4, сила прикладывается вдоль листа, место закрепления – у основания. Схема нагружения гофрированной панели показана на рис. 5. На рис. 6-9 показаны результаты расчетов на растяжение гофрированной и плоской панели.

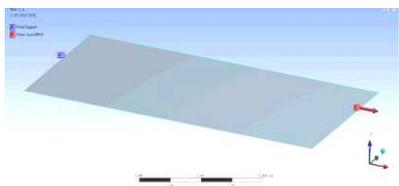


Рис. 4 – Схема нагружения ПП вдоль листа

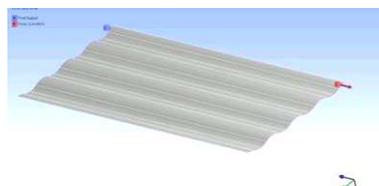


Рис. 5 – Схема нагружения ГП вдоль листа



Рис. 6 – Полные перемещения ПП



Рис. 7 – Полные перемещения ГП

Рассмотрим схемы прикладываемых нагрузок и закреплений для задачи на растяжение с другим видом закрепления. Схема нагружения плоской панели показана на рис. 10 (сила прикладывается поперек листа, место закрепления – по

краям). Схема нагружения гофрированной панели показана на рис. 11. На рис. 12-15 показаны результаты расчетов на растяжение гофрированной и плоской панели.



Рис. 8 – Эквивалентные напряжения по Мизесу ПП



Рис. 9 – Эквивалентные напряжения по Мизесу ГП

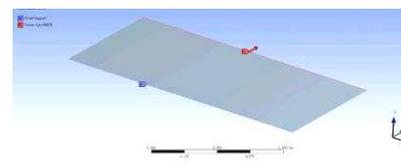


Рис. 10 – Схема нагружения ПП (сила прикладывается поперек листа)

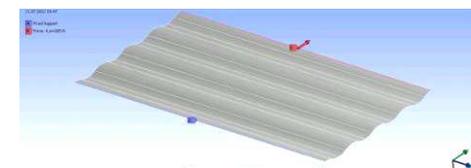


Рис. 11 – Схема нагружения ГП (сила прикладывается поперек листа)



Рис. 12 – Полные перемещения ПП



Рис. 13 – Полные перемещения ГП



Рис. 14 – Эквивалентные напряжения по Мизесу ПП



Рис. 15 – Эквивалентные напряжения по Мизесу ГП

Рассмотрим схемы прикладываемых нагрузок и закреплений для задачи на изгиб. Схема нагружения плоской панели показана на рис. 16, сила прикладывается на всю поверхность листа, место закрепления – по краям. Схема нагружения гофрированной панели показана на рис. 17. На рис. 18 – 21 показаны результаты расчетов на изгиб гофрированной и плоской панели. Сравним полученные результаты расчетов плоской (косая штриховка) и гофрированной (вертикальная штриховка) панелей (рис. 22-27, табл.).

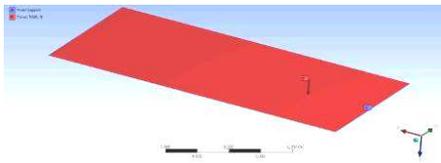


Рис. 16 – Схема нагружения ПП (моделирование изгиба)



Рис. 18 – Полные перемещения ПП



Рис. 20 – Эквивалентные напряжения по Мизесу ПП

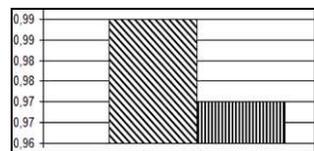


Рис. 22 – Полные перемещения при нагружении вдоль панели (мм)

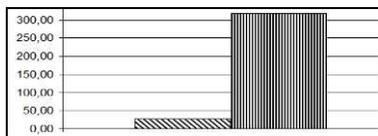


Рис. 24 – Полные перемещения при нагружении поперек панели (мм)

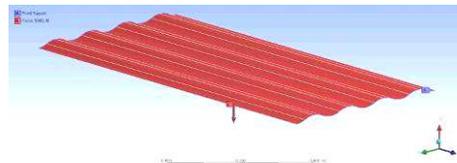


Рис. 17 – Схема нагружения ГП (моделирование изгиба)



Рис. 19 – Полные перемещения ГП



Рис. 21 – Эквивалентные напряжения по Мизесу ГП

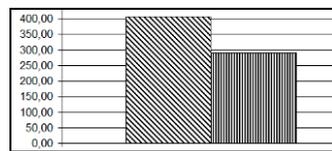


Рис. 23 – Эквивалентные напряжения по Мизесу при нагружении вдоль панели (МПа)

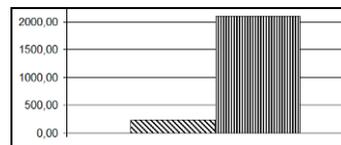


Рис. 25 – Эквивалентные напряжения по Мизесу при нагружении поперек панели (МПа)

Таким образом, можно отметить следующее: полученное напряженно-деформированное состояние „плоской” и „гофрированной” моделей – принципиально различны как локально, так и глобально; как по распределениям величин, так и по их значениям. Основываясь на диаграммах сравнения результатов, получаем, что перемещения отличаются на порядки, а напряжения

– в несколько раз. Наличие гофр делает панели существенно анизотропными и неоднородными по свойствам (соответственно вдоль-поперек направления гофр, а также вдоль линии профиля гофр). Для адекватного описания НДС панелей необходимо более подробное конечно-элементное моделирование (с количеством SHELL-элементов не менее 5-10 на полуволну).

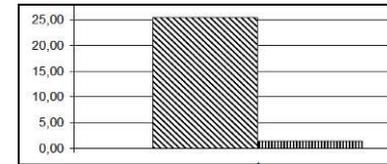


Рис. 26 – Полные перемещения при нагружении при изгибе (мм)

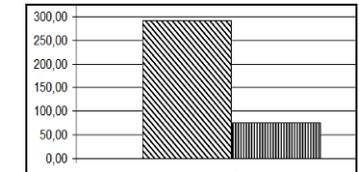


Рис. 27 – Эквивалентные напряжения по Мизесу при нагружении при изгибе (МПа)

Таблица – Полученные значения перемещений и напряжений

	Полные перемещения, мм		Экв. напр. по Мизесу, МПа	
	„Плоская”	„Гофрированная”	„Плоская”	„Гофрированная”
Вдоль	0,99	0,97	406,00	291,00
Поперек	27,14	318,85	242,00	2101,00
Изгиб	25,36	1,38	291,00	75,00

Тестовый расчет 2. Исследование соединения ребер жесткости между собой с учетом вставок/накладок/усилений, а также исследование ребер в SHELL- и BEAM- постановках (далее обозначены S и B). Схемы прикладываемых нагружений и закреплений рассматриваются в двух постановках – с двумя растягивающими силами и моделирование изгиба (далее обозначены P и И) (рис. 28-29). На рис. 30 – 33 показаны результаты расчетов моделирования растяжения и изгиба ребра жесткости.

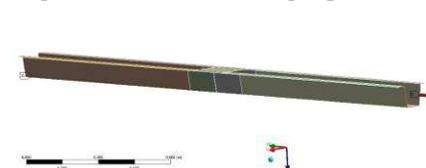


Рис. 28 – Схема нагружения с двумя растягивающими силами (S)

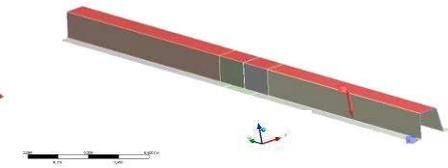


Рис. 29 – Схема нагружения ребра (моделирование изгиба) (S)

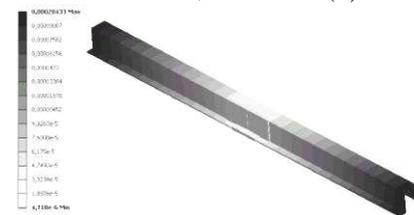


Рис. 30 – Полные перемещения (P)



Рис. 31 – Эквивалентные напряжения по Мизесу (P)

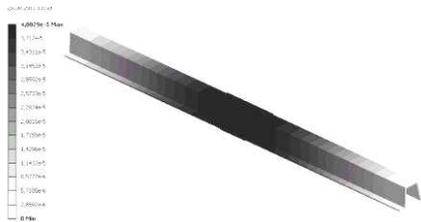


Рис. 32 – Полные перемещения (И)



Рис. 33 – Эквивалентные напряжения по Мизесу (И)



Рис. 34 – Полные перемещения (И, P1)



Рис. 35 – Эквивалентные напряжения по Мизесу (И, P1)

Рассмотрим результаты расчетов в PLANE- и BEAM- постановках (далее обозначены P1 и B). На рис. 34–39 показаны результаты моделирования изгиба и растяжения балки в этих постановках.

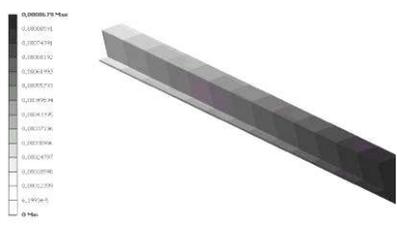


Рис. 36 – Полные перемещения (P, P1)

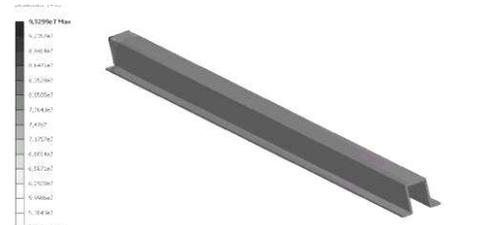


Рис. 37 – Эквивалентные напряжения по Мизесу (P, P1)



Рис. 38 – Полные перемещения (P, B)



Рис. 39 – Полные перемещения (P, B)

Сравнивая НДС по BEAM- и SHELL-моделях для отдельно взятого элемента при простых нагружениях, можно получить некоторое соответствие ре-

зультатов. При работе в составе конструкций, когда часть плоскостей ребер находятся в контакте, в часть – свободны, использование BEAM-моделей не может привести к адекватному моделированию НДС.

Тестовый расчет 3. Исследование резьбы при болтовом соединении двух панелей корпуса силоса между собой. В данной тестовой задаче исследуется болт M10. Моделируется три вида контактного взаимодействия:

- 1) три витка резьбы входят в контакт с пластиной 2 мм;
- 2) следующее положение болта – когда два витка резьбы входят в контакт с пластиной;
- 3) положение болтового соединения – когда контактное взаимодействие моделируется без учета резьбы.

На рис. 40-41 показаны закрепление и нагружение моделируемой задачи. Контактные взаимодействия резьбовых соединений с пластиной иллюстрируются рис. 42-43. Полные перемещения в контакте показаны на рис. 44-45.

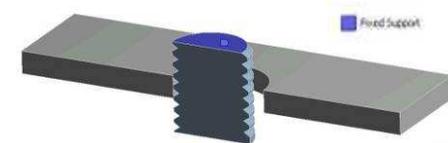


Рис. 40 – Закрепление – торцевые поверхности болта

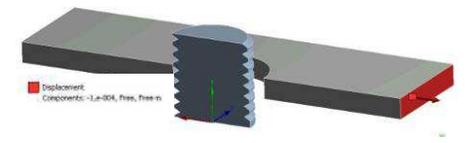


Рис. 41 – Нагружение – приложенная сдвигающая сила

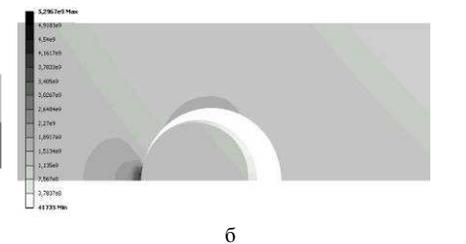
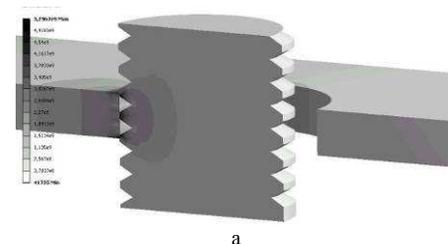


Рис. 42 – Эквивалентные напряжения по Мизесу контакта с резьбой три витка: а – вид в разрезе, б – вид сверху

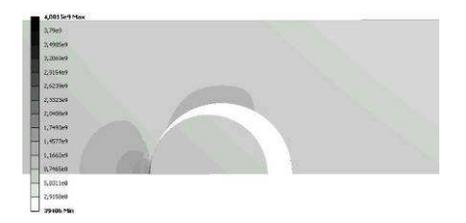
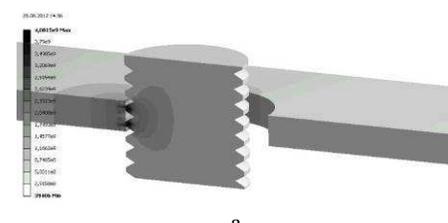


Рис. 43 – Эквивалентные напряжения по Мизесу контакта с резьбой два витка: а – вид в разрезе, б – вид сверху

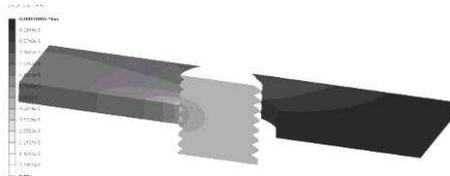


Рис. 44 – Полные перемещения три витка

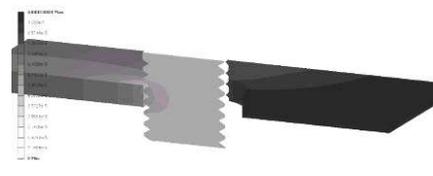
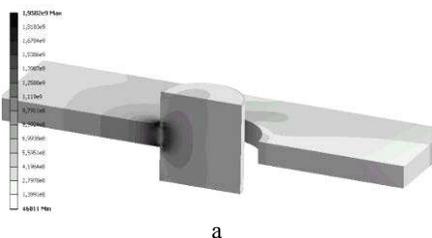
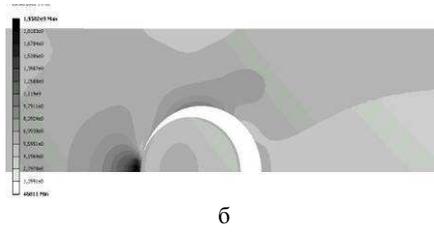


Рис. 45 – Полные перемещения два витка



а



б

Рис. 46 – Эквивалентные напряжения по Мизесу контакта без резьбы:
а – вид в разрезе, б – вид сверху

Рассмотрим задачу с контактным взаимодействием болт/пластина без учета резьбы. Результаты расчета показаны на рис. 46, 47. Сравним полученные результаты расчетов контактных взаимодействий резьба/пластина с двумя, тремя витками и контактное взаимодействие без учета резьбы (рис. 48, 49).

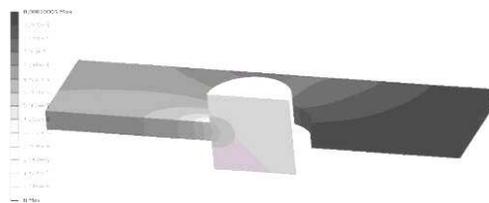


Рис. 47 – Полные перемещения

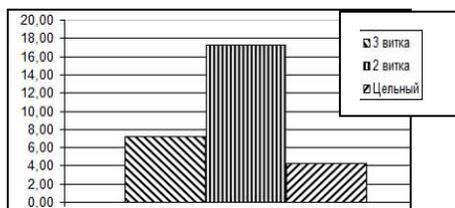


Рис. 48 – Максимальные контактные напряжения (ГПа)

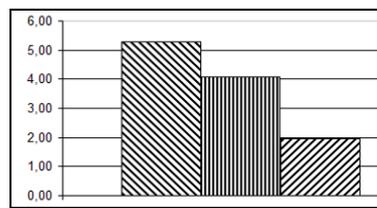


Рис. 49 – Эквивалентные напряжения по Мизесу (ГПа)

Основываясь на полученных результатах решения данной задачи можно сделать вывод, что учет реальной геометрии резьбовой накатки приводит к существенно неоднородному распределению контактных давлений и компонент НДС как по высоте (толщине листов), так и по окружному направлению отверстий. Четко выделяются зоны концентрации контактных давлений в центральной части контактирующих с листами борозд резьбы болтов. Подат-

ливость сопряжения „болт с резьбой – панели”, момент перехода в упругопластическое состояние материала болтов и панелей, а также другие характеристики поведения системы контактирующих тел существенно зависят от учета реальной формы резьбовой накатки.

По результатам решения тестовых задач можно сделать следующие общие выводы.

1. Для адекватного анализа НДС корпусов силосов в целом, а также их элементов и фрагментов (в том числе – силовых болтовых соединений), необходимо кардинально изменить сам принцип создания конечно-элементных моделей. Необходимо учесть реальную геометрию гофрированных панелей, промоделировать наличие негладкой формы болтов в сопряжении с панелями, описать контакт листов с возможным локальным раскрытием стыков, а также наличие конструктивных зазоров и погрешностей расположения системы соединяемых элементов „болт – панели”, возможное появление пластических деформаций в наиболее нагруженных зонах конструкции, влияние предварительной затяжки болтового соединения и трения в сопряжениях сдвигающихся элементов.

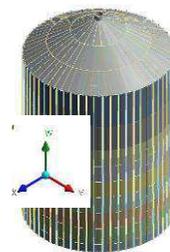


Рис. 50 – Геометрия корпуса силоса (типа СМВУ 183100.000 СБ)

2. Для верификации создаваемых конечно-элементных моделей исследуемых силосов необходимо проведение расчетно-экспериментальных исследований с жестким контролем степени соответствия получаемых численным и экспериментальным путями результатов.

3. Для создания адекватных и достоверных моделей напряженно-деформированного состояния силосов (в том числе их перспективных вариантов) необходимо сотрудничество исследователей, проектантов, изготовителей.

Далее в первом приближении рассчитано НДС силоса как отправная точка для последующих исследований.

Анализ напряженно-деформированного состояния полной конструкции силоса. Анализ НДС корпуса силоса включает в себя построение геометрии с учетом толщин для каждого яруса, как для панелей, так и для

ребер жесткости, а также и для конструкции крыши (рис. 50), построение конечно-элементной сетки (рис. 51), адекватное задание граничных условий и прикладываемых нагрузок (рис. 52, 53). На рис. 54-56 показаны результаты расчета НДС модели корпуса силоса.



Рис. 51 – Конечно-элементная модель (фрагмент корпуса силоса – стык крыши и стенки)

Сравнение полученных результатов с аналогичными, проведенными ранее, в том числе и в других системах, дает основание для следующих выводов.

1. Напряженно-деформированное состояние, рассчитанное в различных системах, примерно соответствуют по характеру напряжений.

2. Сравнимые конечно-элементные модели (КЭМ) имеют общий принципиальный недостаток: геометрическая форма боковых панелей не содержит гофр. Это ведет к искажению НДС. При этом нужно отметить, что применение моделей анизотропных „эквивалентных” материалов, в некоторых смыслах заменяющих наличие гофр [19], не дает возможности в полной мере моделировать действительно наблюдаемое напряженно-деформированное состояние. Не отрицая методологической ценности таких „эквивалентных” моделей, необходимо принимать во внимание, что возможности современных компьютеров достаточны для подробного и полного описания НДС подобных конструкций обычными SHELL-элементами без построения „эквивалентных” ортотропных моделей.

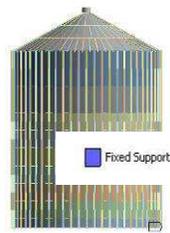


Рис. 52 – Закреп-ление корпуса силоса (закреп-лена нижняя торцевая часть ребер

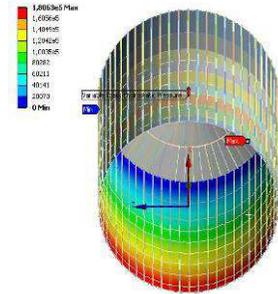


Рис. 53 – Гидростатическая нагрузка от материала плотностью 800кг/м³

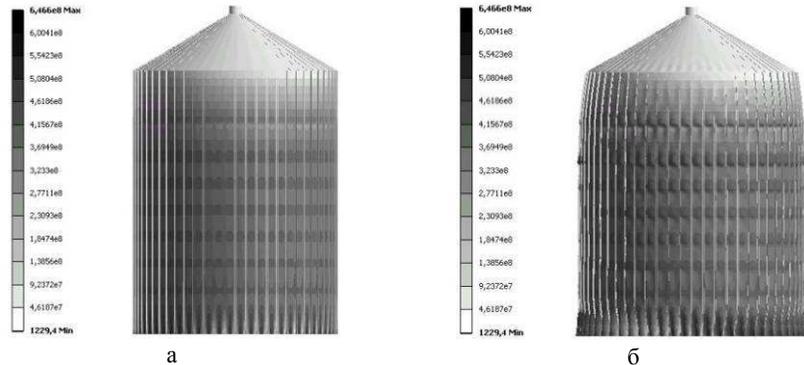


Рис. 54 – Эквивалентные напряжения по Мизесу: а – без масштаба, б – с масштабом (утрированное изображение деформированного состояния)

3. Размер построенной выше конечно-элементной модели недостаточен для описания НДС всего силоса – нужно как минимум 5-6 млн. конечных элементов вместо 300-500 тыс.

4. Модель корпуса должна содержать не BEAM-элементы, а SHELL-, в т.ч. и для описания вертикальных ребер жесткости.

5. Принципиальным „кинематическим” недостатком построенных моделей являются неучет условий контактного взаимодействия листов, возможно-

го проскальзывания и наличия зазоров в тангенциальном направлении между болтами и листами.

6. Соединение „лист– лист” недопустимо моделировать как монолитное, поскольку оно вносит искажение в НДС и листов, и болтов.

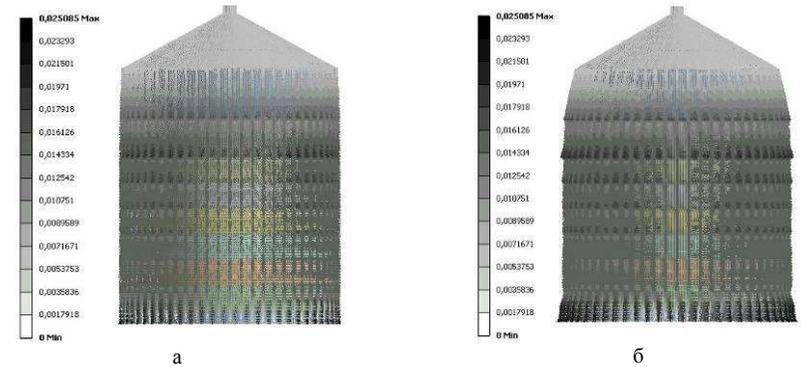


Рис. 55 – Полные перемещения: а – без масштаба, б – с масштабом

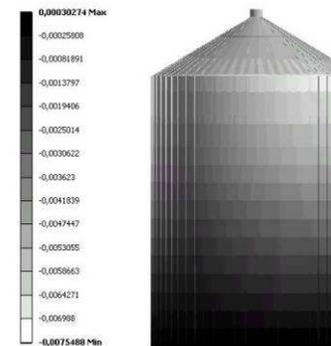


Рис. 56 – Перемещения вдоль вертикальной оси

7. Не учитывается взаимодействие бугристого профиля боковой поверхности болта с торцевыми поверхностями отверстий в листах.

Таким образом, созданная конечно-элементная модель может рассматриваться действительно только как отправная точка при построении более совершенных моделей.

Заключение. По результатам решения ряда тестовых задач можно сделать следующие общие выводы.

1. Для адекватного анализа напряженно-деформированного состояния корпусов силосов в целом, а также их элементов и фрагментов (в том числе силовых болтовых соединений), необходимо кардинально изменить сам принцип создания конечно-элементных моделей. Необходимо учесть реальную геометрию гофрированных панелей, промоделировать наличие негладкой формы боковой поверхности болтов (резьбовая накатка) в сопряжении с панелями, описать контакт листов с возможным локальным раскрытием стыков, а также наличие конструктивных зазоров и погрешностей расположения системы соединяемых элементов „болт – панели”, возможное появление пластических деформаций в наиболее нагруженных зонах конструкции, влияние предварительной затяжки болтового соединения, трения в сопряжениях сдвигающихся элементов и т.д.
2. Для верификации создаваемых конечно-элементных моделей исследуе-

мых силосов необходимо проведение расчетно-экспериментальных исследований с жестким контролем степени соответствия получаемых численным и экспериментальным путями результатов.

3. Для создания адекватных и достоверных моделей НДС силосов (в том числе их перспективных вариантов) необходимо сотрудничество исследователей, проектантов, изготовителей.

В дальнейшем планируется проведение численных и экспериментальных исследований с применением более точных моделей конструкции силоса.

Список литературы. 1. *Подгородецкий О.А.* Актуальные вопросы обеспечения эксплуатационной надежности силосов // «Хранение и переработка зерна». – 2011. – №11. – С. 46-52. 2. <http://presspoint.ua/press/pressiteminfo/4266> – информация о силосах. 3. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Силос> – описание силоса и силосных установок. 4. <http://www.kmz.pl.ua/catalog/124/1.html> – информация о силосах. 5. *Кулаковский А. Б., Федосеев В. В.* Элеваторы СССР. – М.: Колос, 1966. 6. Новое в строительстве зернохранилищ и предприятий системы заготовок. – М.: Колос, 1972. 7. Справочник по монтажу оборудования элеваторов, зерноперерабатывающих и комбикормовых заводов / Под редакцией *М.А. Тартаковского*. – М.: Колос, 1983. 8. *ДБН В.2.6-163:2010.* Державні будівельні норми України. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу / Мінрегіонбуд України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 202 с. 9. *ДБН В.1.2-2:2006.* Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 60 с. 10. *ДБН В.2.2-8-98.* Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна / Держбуд України. – К.: Держбуд України, 1998. – 39 с. 11. *СНУП 2.09.03-85.* Сооружения промышленных предприятий / Госстрой СССР. – М.: ЦИТИ, 1986. – 116 с. 12. Пособие по проектированию предприятий, зданий и сооружений по хранению и переработке зерна (к СНиП 2.10.05-85) / ЦНИИпромзернопроект. – М.: ЦИТИ Госстроя СССР, 1989. – 145 с. 13. *ДБН А.1.1-1-93.* Система стандартизації та нормування в будівництві. Основні положення / Держбуд України. – К.: Держбуд України, 1993. – 11 с. 14. *ДБН В.1.2-14-2009.* Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 32 с. 15. Правила обстежень, оцінки технічного стану та паспортизації виробничих будівель і споруд / Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. – К.: Держбуд України, 1999. – С. 5-69. 16. *ДБН 362-92.* Оценка технического состояния стальных конструкций эксплуатируемых производственных зданий и сооружений. – К.: Госстрой Украины, 1993. – 47 с. 17. *Басов К.А.* ANSYS: справочник пользователя. – М. ДМК Пресе, 2005. – 640 с. 18. *Капун А.Б.* ANSYS в руках инженера. – М.: Единотриал, 2003. – 272 с. 19. *Бурдун Е.Т., Кочанов В.Ю., Курпиевич А.Б., Коссе В.К.* Напряженно-деформированное состояние гофрированных пластин и полых оболочек при действии поверхностных нагрузок // Зб. наук. пр. нац. ун-ту кораблебудування. – 2009 р. – №5(428). – 45-53 с. 20. *Короткий О.А.* Совершенствование конструкции цилиндрических силосов, используемых в сельском хозяйстве. Автореферат дис. канд. тех. наук., Москва, 2009 г. – 24 с. 21. *Рацеккин С.В.* Принципы конструирования и экспериментальные исследования новых металлических спиральных силосов. Дис. канд. тех. наук., Саратов, 2003. – 172 с. 22. *Кузнецов И.М.* Пространственная работа гибкого металлического силоса с наружным стержневым каркасом. Дис. канд. тех. наук., Москва, 2000. – 181 с. 23. *Ягофаров А.Х.* Совершенствование конструкции, уточнение расчета и оптимальные параметры стального круглого бункера. Дис. канд. тех. наук., Екатеринбург, 2005. – 146 с. 24. *Вершинина Н.И.* Трещиностойкость преднапряженных элементов стен сборных цилиндрических зерновых силосов. Дис. канд. тех. наук., Москва, 1984. – 220 с.

Поступила в редколлегию 07.09.12