

Значения напряжений и перемещений

$\frac{a_1}{h}$	$\frac{E^{(1)}}{E^{(2)}}$	y_1 / q_0			$u_3 E^{(1)} / q_0 a_1$		
		Точное решение	Первое приближение	Д %	Точное решение	Первое приближение	Д %
3	10	9,934	9,781	-1,5	11,98	12,04	0,5
	10^2	24,75	24,48	-1,1	69,71	70,76	1,5
	10^3	83,62	83,26	-0,4	304,4	311,5	2,3
	10^4	126,3	126,3	0,1	474,3	487,7	2,8
5	10	24,40	24,27	-0,5	33,53	33,50	-0,1
	10^2	41,27	41,10	-0,4	141,0	141,6	0,4
	10^3	144,6	144,3	-0,2	839,9	845,7	0,7
	10^4	317,1	317,0	0	2007	2026	1,0

Уравнения для последующих напряженных состояний следует использовать, главным образом, для уточнения вихревого и потенциального погранслоев.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Плеханов А. В. О построении уточненной теории пологих трансверсально изотропных слоистых оболочек // Статика сооружений. – К. : КИСИ. – 1978. – С. 106 – 109.
2. Плеханов А. В. О построении уточненной теории многослойных пластин // Исследования по теории сооружений. – 1977. – Вып. 23. – С. 111 – 119.
3. Плеханов А. В. Исследование сходимости и точности решений на основе итерационной теории слоистых оболочек и пластин // Вісник Придніпр. держ. акад. будівниц. та архітек. – Д., 2009. – № 3. – С. 21 – 26.

УДК 624:014.2.074.433

ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В УТОРНОМ УЗЛЕ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

Е. А. Егоров, д. т. н., проф., А. С. Соколова, асп.

Ключевые слова: *стальной резервуар, конечноэлементные модели, уторный узел, напряженно-деформированное состояние*

Введение. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары (РВС) относятся к разряду массовых конструкций, широко применяемых в нефтяной промышленности для хранения нефти и нефтепродуктов. Одним из наиболее ответственных узлов таких конструкций является уторный узел – узел сопряжения цилиндрической стенки с плоским днищем.

Анализ публикаций. Исследованиям напряженно-деформированного состояния (НДС) уторного узла посвящено большое количество работ, но, несмотря на это, целый ряд вопросов, связанных с работой узла в различных условиях, и по сегодняшний день остаются открытыми. По-видимому, это связано с тем, что формирование инженерных методов расчета этого узла осуществлялось на основе аналитических зависимостей теории оболочек и практическая реализация их могла быть осуществлена только при условии введения определенных допущений, влияние которых на результат для многих случаев остается неопределенным. В частности, инженерные расчеты в своей общепринятой для инженерной практики форме [1] выполняются с представлением днища в виде балки на упругом основании (модель «днище – балка»), не проводится количественная оценка деформаций, возникающих в уторных зонах стенки и днища, игнорируется различие в толщине окраек и центральной части днища, не учитывается односторонний характер связи днища с основанием и др. Все это может вносить существенную погрешность в расчетные оценки и требует, в связи с этим, проведения дополнительных исследований.

Затронутые выше проблемы на основе аналитических изысканий рассматривались в [2 – 5], однако в [2] деформации днища как круглой мембраны анализируются независимо от деформаций цилиндрической стенки, а в [2 – 5] при получении аналитических зависимостей для расчета модели «днище – пластинка» вводятся допущения, которые искажают действительный характер деформирования уторной зоны. Результаты исследований НДС уторного узла с использованием численных методов на основе ПК «SCAD» приводятся в [6], но они не дают ответа на поставленные выше вопросы.

Цель статьи. В данной статье рассмотрены исследования краевых эффектов, возникающих в уторной зоне РВС, которые проводились на основе метода конечных элементов (МКЭ). Расчетная схема строилась на основе модели «днище – пластинка», в которой основание задавалось с одним коэффициентом жесткости $C1$. Рассматривались случаи («мягкие» основания), когда различного рода отрывы днища от основания были исключены.

Материалы и методы. Расчеты проводились с использованием ПК «SCAD». Рассматривались две оболочки со следующими геометрическими параметрами: I оболочка – высота 12 м, радиус 7,6 м, толщина оболочки в зоне крепления ее к основанию 6 мм; II оболочка – высота 18 м, радиус 19,95 м, толщина оболочки в зоне крепления ее к основанию 16 мм.

Принятые параметры оболочек соответствуют основным параметрам (высота, радиус, толщина оболочки и днища в точках сопряжения) резервуаров объемом 2 000 и 20 000 м³. Отношение радиуса к толщине в рассмотренных оболочках составляло соответственно $\frac{r}{t} = 1520$ и $\frac{r}{t} = 2220$. Коэффициент жесткости основания $C1$ принимался равным 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; ∞ .

Тестирование конечноэлементной модели осуществлялось на задачах с абсолютно жестким креплением оболочки в основании. Для корректности сравнения результатов расчета двух оболочек их разбивка на конечные элементы выполнялась с учетом следующих соотношений длины (a), высоты (b) и толщины (t) конечного элемента: $\frac{b}{t} \cong 6,25$; $\frac{a}{b} \cong 6,30$; $\frac{a}{t} \cong 39,5$. Были приняты такие размеры конечных элементов: для резервуара объемом 2 000 м³ – $0,283 \times 0,0375 \times 0,006$ м; для резервуара объемом 20 000 м³ – $0,626 \times 0,1 \times 0,016$ м.

При этом определение величины изгибающего момента $m\theta$ непосредственно в точках сопряжения в любом случае может быть осуществлено только с помощью аппроксимации кривой изменения изгибающего момента по высоте уторной зоны и продления ее к точкам сопряжения с основанием (днищем). Это вызвано тем, что градиент изменений изгибающих моментов по высоте оболочки (при удалении от точек сопряжения) настолько резкий, что даже при принятых размерах конечных элементов значение изгибающего момента m в центре самого ближнего к утору элемента существенно (на 20 – 25 %) отличается от величины $m\theta$.

Аппроксимация осуществлялась с использованием программы Microsoft Excel, а именно с использованием встроенной в неё функции построения линии тренда и статистических функций ЛИНЕЙН и ТЕНДЕНЦИЯ. Рассматривались значения изгибающих моментов двух ближних к уторному узлу конечных элементов. Для определения их зависимости от высоты расчетной точки стенки применялся линейный вид аппроксимации, который наилучшим образом отражает изменение величины, растущей или убывающей с постоянной скоростью. Функция ТЕНДЕНЦИЯ, аппроксимирующая прямой линией (по методу наименьших квадратов), использовалась для прогноза величины изгибающего момента на высоте расчетной точки 0 м, т. е. в точке сопряжения цилиндрической стенки с плоским днищем.

Результаты. На рисунке 1, а, б приведены эпюры изгибающих моментов в зоне сопряжения оболочек с плоским днищем, полученные с использованием известных аналитических зависимостей [7] (пунктирная линия) и по МКЭ (сплошная линия). В обоих случаях работа днища моделировалась абсолютно жесткой заделкой, т. е., при $C1 = \infty$.

Как следует из приведенных графиков, для рассмотренных оболочек расхождения в значениях изгибающих моментов в точках сопряжения $m\theta$ составляют не более 5 %.

Эпюры распределения изгибающих моментов по высоте оболочек (в зонах краевых эффектов) также получились практически идентичными. Все это подтверждает приемлемость принятых конечноэлементных расчетных схем для исследований НДС в зонах краевого эффекта, возникающего в уторном узле сопряжения цилиндрической оболочки с плоским днищем.

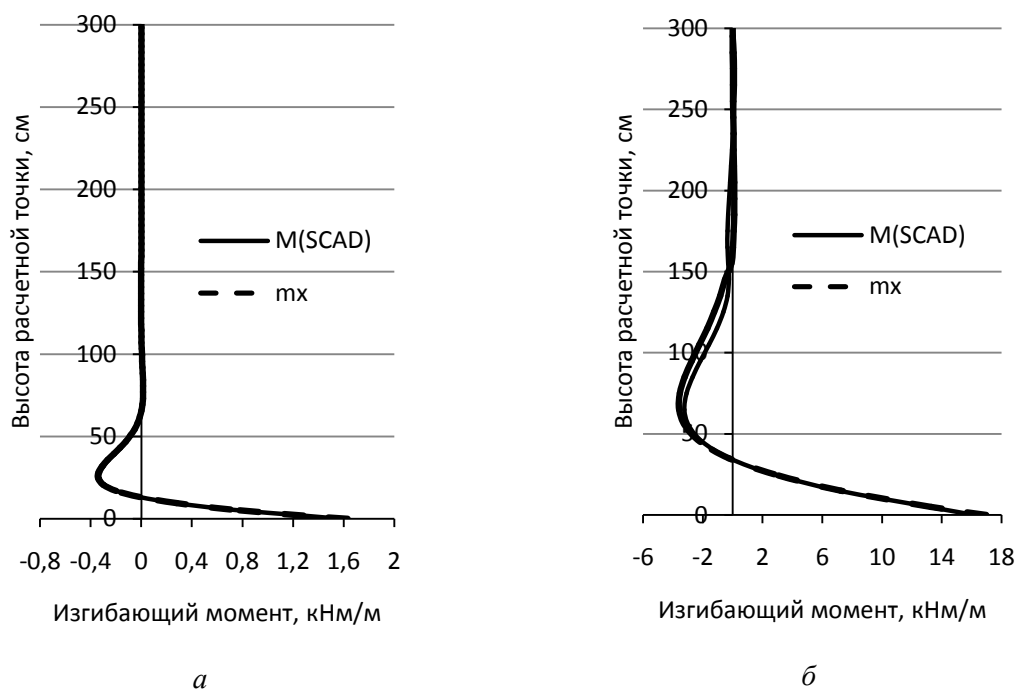


Рис. 1. Сопоставление результатов расчета при жестком креплении оболочки в основании:
 а – оболочка-резервуар объемом 2 000 м³; б – оболочка-резервуар объемом 20 000 м³

Расчеты уторного узла с учетом упругого основания проводились для тех же (см. выше) вариантов оболочек. При этом для сравнения в каждом случае дополнительно проводились расчеты и в инженерной постановке (с использованием известных зависимостей [1; 7]) на основе модели «днище – балка». Полученные таким образом значения изгибающих моментов в точках сопряжения цилиндрических оболочек с плоским днищем при различной жесткости основания приведены в таблице.

Т а б л и ц а

Значения изгибающих моментов в точках сопряжения цилиндрической оболочки с плоским днищем

№ п/п	2 000 м ³				20 000 м ³			
	C1 (кН/см ³)	m0	m0(SCAD)	%	C1 (кН/см ³)	m0	m0(SCAD)	%
1	жесткое	1,631	1,571	3,646	жесткое	16,965	16,163	4,7256
2	0,2	0,755	0,842	10,332	0,2	8,680	8,108	6,5927
3	0,15	0,732	0,811	9,786	0,15	8,407	7,742	7,9087
4	0,1	0,702	0,771	8,860	0,1	8,043	7,290	9,3612
5	0,05	0,667	0,717	6,974	0,05	7,504	6,564	12,523

Анализ полученных значений m0 показывает, что, если для оболочки, соответствующей резервуару объемом 2 000 м³, использование модели «днище – пластинка» (более точная модель) дает более высокие значения m0 и при проверке прочности уторного узла применение ее становится обязательным, то для оболочки-резервуара объемом 20 000 м³ более высокие значения m0 получаются для модели «днище – балка» и поэтому в рассмотренных здесь условиях для такой оболочки можно применять расчет (в запас) на основе именно этой упрощенной модели, а расчет с использованием модели «днище – пластинка» целесообразно применять в случаях, когда возникает необходимость выявления дополнительных (скрытых) резервов прочности.

Характер распределения изгибающих моментов по высоте зоны краевого эффекта во всех рассмотренных случаях оказывается качественно идентичным и качественно схожим с распределениями m при жесткой заделке оболочек в основании (см. рис. 2).

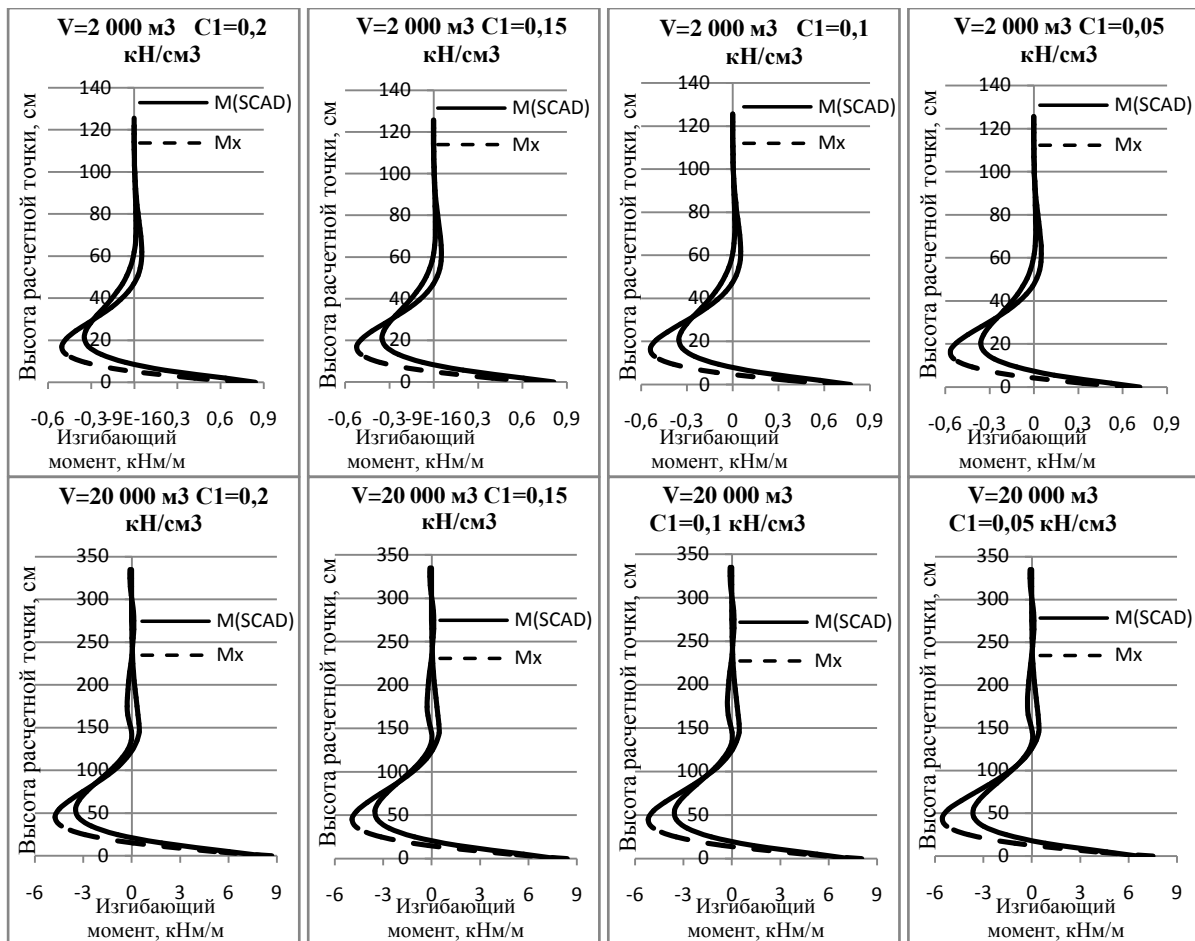


Рис. 2. Распределение изгибающих моментов по высоте зон краевого эффекта

Распределение кольцевых растягивающих напряжений σ_2 по высоте оболочек (см. рис. 3), говорит о том, что для оболочек-резервуаров 2 000 м³ своего максимума они достигают на высоте 37 см, т. е., в пределах нижнего пояса (в большинстве случаев высота пояса h цилиндрической стенки резервуаров составляет 1,5 м), а для оболочек-резервуаров 20 000 м³ максимум достигается на высоте 200 см, т. е., при $h = 1,5$ м он имеет место на втором поясе. То есть, расчетный уровень при проверках прочности нижнего пояса может приниматься существенно выше уровня $0,6\sqrt{V(rt)}$, рекомендованного в [8].

Сравнение максимальных значений кольцевых напряжений σ_{2max} , возникающих на безмоментных участках оболочки, и максимальных значений изгибных напряжений σ_{1max} , возникающих в точках сопряжения оболочки с днищем, показывает, что и для оболочки-резервуара 2 000 м³, и для оболочки-резервуара 20 000 м³, изгибные напряжения в уторе σ_{1max} оказываются больше напряжений σ_{2max} только в случае абсолютно жесткого основания (абсолютно жесткая заделка). В обоих случаях разница в указанных значениях напряжений такова, что применительно к стальным вертикальным цилиндрическим резервуарам с принятием коэффициента условий работы для нижнего пояса и $\gamma_c = 1,2$ для узла сопряжения стенки с днищем работа уторной зоны сопряжения цилиндрической стенки с плоским днищем будет ограничена упругой стадией. При более высоких значениях γ_c для нижнего пояса (например, при ограничениях напряжений в нижнем поясе $2/3 \sigma_T$, как это принято в API 650 [9], или при $\gamma_c = 0,7$ для нижнего пояса резервуара, как это принято в России [10]), в уторном узле РВС, установленных на жестком фундаменте, могут иметь место упругопластические деформации. В этих случаях в дополнение к расчету на прочность необходимо проводить расчеты на приспособляемость и циклическую пластичность (малоцикловую усталость).

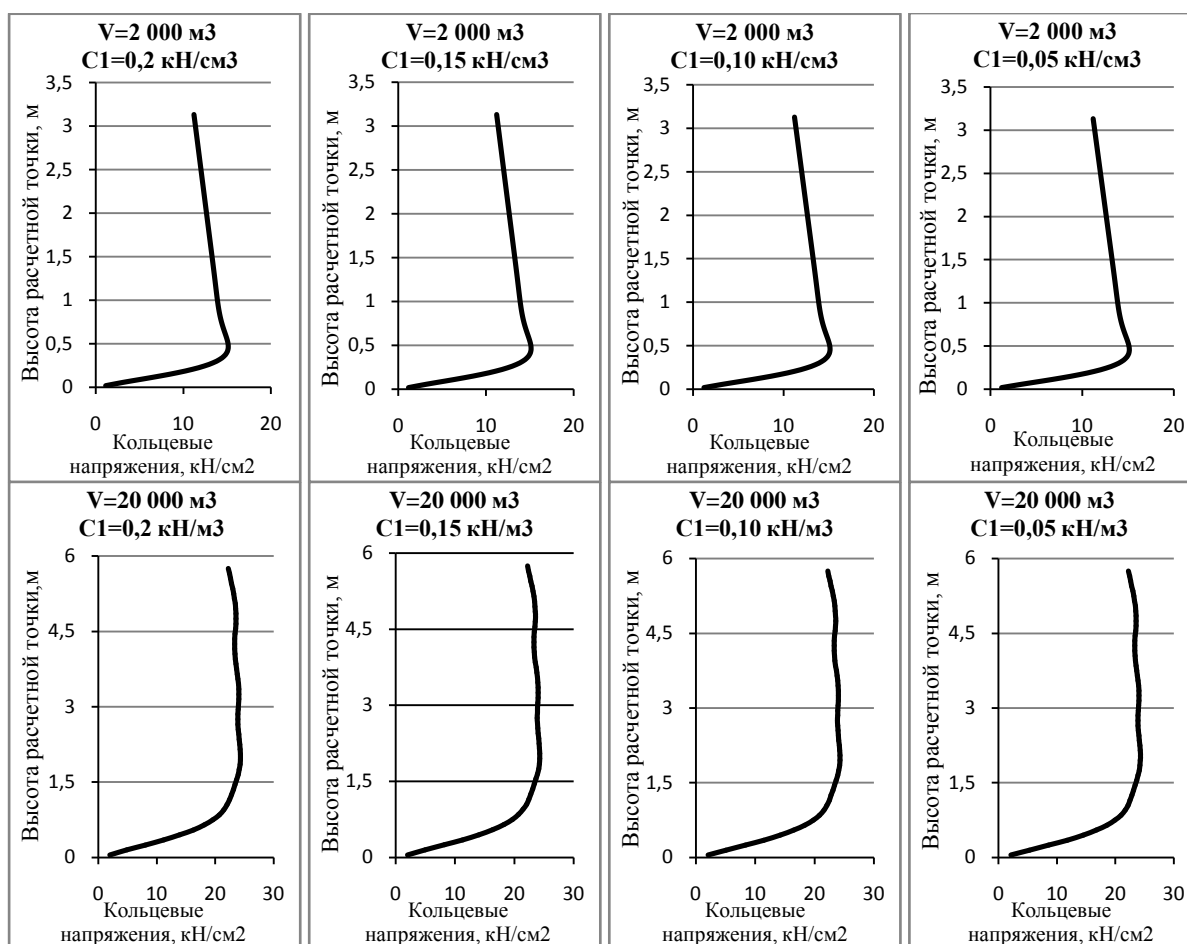


Рис. 3. Распределение кольцевых растягивающих напряжений σ_2 по высоте цилиндрических оболочек

Выводы. 1. Эффективное (с погрешностью не более 5 %) использование численных методов для определения НДС в зонах краевого эффекта, возникающего в узле сопряжения тонкостенной цилиндрической оболочки с плоским дном при действии гидростатического давления, требует аппроксимации основных компонентов НДС для определения их значений непосредственно в точках сопряжения.

2. Расчет уторного узла цилиндрической стенки РВС на основе модели «дно – балка» в целом ряде случаев (при определенных параметрах РВС и основания) не обеспечивает требуемого запаса прочности, поэтому при проектировании РВС рекомендуется проводить альтернативный расчет указанного узла с использованием численных методов на основе модели «дно – пластинка».

3. При определении напряжений в нижнем поясе РВС большого объема (более 10 000 м³) расчетный уровень можно принимать исходя из точной (с учетом влияния узла сопряжения стенки с дном) эпюры напряжений, что в отдельных случаях позволит уменьшить расчетную толщину пояса.

4. При сооружении РВС на жестких фундаментах (сплошная железобетонная плита или система металлических балок) расчет узла сопряжения стенки с дном становится обязательным и требует оценки не только напряжений, но и деформаций.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Кузнецов В. В.** Металлические конструкции. Общая часть. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата Госуд. премии СССР В. В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова) – М.: АСВ, 1998. – 576 с.

2. **Шапиро Г. А.** Действительная работа плоских дном стальных тонкостенных

цилиндрических резервуаров // Материалы по стальным конструкциям. – М. : ПСК, 1958. – № 3. – С. 185 – 215.

3. **Иштиряков М. С.** Напряженно-деформированное состояние днища вертикального цилиндрического резервуара / М. С. Иштиряков, В. Б. Галеев // ВНИИОЭНГ Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1977. – № 2. – С. 28 – 29.

4. **Иштиряков М. С.** Расчет днища и стенки вертикальных цилиндрических резервуаров большой вместимости / М. С. Иштиряков, В. Б. Галеев // ВНИИОЭНГ Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1978. – № 6. – С. 8 – 9.

5. **Галеев В. Б.** Расчет нижнего узла сопряжения корпуса и днища резервуаров / В. Б. Галеев, Л. В. Короткова // ВНИИОЭНГ Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1978. – № 6. – С. 38 – 39.

6. **Муцанов В. Ф.** Исследование напряженно-деформированного состояния уторного узла в вертикальных цилиндрических резервуарах объемом 10 000...50 000 м³/ В. Ф. Муцанов, Д. И. Роменский // Металлические конструкции. – 2012. – Т. 18. – № 1. – С. 61 – 71.

7. **Бояршинов С. В.** Основы строительной механики машин. – М. : Машиностроение. – 1973. – 456 с.

8. Проектирование складов нефти и нефтепродуктов с давлением насыщенных паров не выше 93,3 кПа ВБН В.2.2-58.1-94 (взамен СНиП 11-106-79). – К. : Госкомнефтегаз Украины, 1994. – 149 с.

9. Welded Steel Tanks for Oil Storage. API Standard-650 (9th Ed.). – American Petroleum Institute Standard, Washington D. C. – 1993.

10. Правила устройства вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов (ПБ 03-381-00). – М. : – 2001. – 86 с.

УДК 681.5:66.046:517.958

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗОГРЕВА ОДНОРОДНОГО ТЕЛА

В. С. Ткачев, к. т. н., А. В. Костенко, асп.

Ключевые слова: моделирование, нагрев, распределение температуры, однородное тело

Введение. При термической обработке керамических и других изделий важно знать распределение температуры по их объему. Использование такой информации позволит точнее выдерживать среднюю температуру обработки и исключить недопустимые перепады температуры путем выбора рациональной интенсивности нагрева, что также способствует экономии энергоресурсов.

В настоящее время контроль процесса термической обработки производится по температуре поверхности изделий и по температуре внутри печи.

Анализ публикаций. Существующие аналитические методы исследования процесса переноса тепла связаны с решением уравнений в частных производных [1] и не обеспечивают требуемого быстродействия для оперативного контроля процесса нагрева в реальном времени.

Разработка аналитических методов контроля распределения температуры в объемном теле по информации о настоящей температуре наружной поверхности, ее изменении в течение всего процесса обработки позволит повысить качество обрабатываемых изделий и снизить расход энергоносителей.

Применение инженерных методов расчета и имитационного моделирования дает возможность визуального анализа изменения температуры внутри обрабатываемого изделия.

Цель статьи. Разработать методику определения значений температуры во времени и по объему однородного тела произвольной формы, аппроксимировав его набором элементарных кубиков. Составить систему уравнений, описывающих тепловые процессы, используя уравнения тепловых балансов каждого кубика и уравнения теплопередачи между их смежными гранями. Решение этой системы уравнений, описывающих динамику нагрева, осуществить с помощью программного обеспечения, предназначенного для моделирования динамических систем MATLAB Simulink 4.0. Проиллюстрировать возможность определения расчетным путем динамики нагрева кубического однородного тела, разбив его на 27 элементов. Оценить степень равномерности температур.