

Министерство образования и науки Российской Федерации
Саратовский государственный технический университет

**РАСЧЕТ НА ЭВМ КРАЕВЫХ СИЛ И КРАЕВЫХ МОМЕНТОВ
В УЗЛАХ СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ,
НАГРУЖЕННЫХ ГАЗОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ**

Методические указания
к самостоятельной работе
для студентов специальностей 260601.65, 240801.65

*Одобрено
редакционно-издательским советом
Саратовского государственного
технического университета*

Саратов 2010

ВВЕДЕНИЕ

Во всех случаях, когда край оболочки так или иначе закреплен, имеет место весьма значительная концентрация напряжений на этом крае и вблизи, от него. Как известно, всякое закрепление края равносильно введению дополнительных связей и, следовательно, возникновению сил и моментов, приложенных к этому краю.

В реальных конструкциях аппаратов края оболочек присоединяются к другим оболочкам (часто иных профиля и толщины) или к соответствующим деталям (фланцы, трубные решетки, плоские крышки и т.д.). В таких узлах сопряжения под действием заданных внешних поверхностных нагрузок возникают дополнительные, так называемые, краевые нагрузки (краевые силы P_0 и краевые моменты M_0), вызывающие местные напряжения в материале сопрягаемых элементов [1-4].

Причиной появления краевых силовых факторов P_0 и M_0 по контуру сопряжения является различие в возможностях для деформации сопрягаемых элементов, которое может быть вызвано заделкой края оболочки, изменением свойств материала и нагрузки вдоль меридиана оболочки и т.д. Таким образом, краевые силы P_0 и краевые моменты M_0 являются реакциями заделки края оболочки, которому мешает свободно деформироваться сопрягаемая деталь с иными возможностями для перемещений под действием приложенных внешних нагрузок.

В результате совместного действия всех нагрузок (заданных и краевых) края сопрягаемых элементов в реальном сосуде совершают одинаковые радиальные и угловые перемещения и непрерывность сосуда в сечении стыка не нарушается.

Очевидно, что возникающие по краям сопрягаемых элементов краевые силы P_0 и моменты M_0 должны быть равны по величине и обратны по направлению (см. эквивалентную схему, рис. 1б).

Сначала опыт, затем и теория, показали, что влияние краевых силовых факторов на напряжения и деформации может быть весьма значительным и его неучет (по безмоментной теории оболочек краевой эффект не учитывается) может привести к ошибочным результатам.

Поэтому в ряде случаев возникает необходимость в определении величины и направления краевых сил P_0 и краевых моментов M_0 в сечении

стыка сопрягаемых элементов, чтобы затем от их действия можно было найти по краевой задаче для соответствующих случаев [1, 2, 4] напряжения и деформации (краевой эффект), которые следует учесть при проверке условия прочности узла сопряжения.

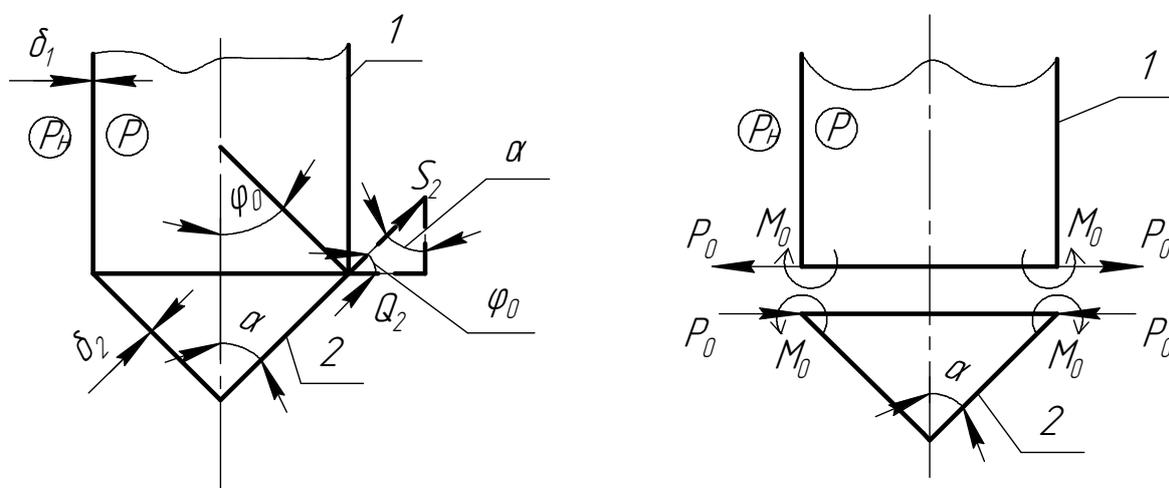


Рис. 1. Схема к определению краевых сил и моментов в сечении стыка двух элементов на примере цилиндра с конусом:

- а) расчетная схема узла сопряжения цилиндра (1-й элемент) и конуса (2-й элемент); б) эквивалентная схема узла сопряжения

Задача по определению краевых силовых факторов P_0 и M_0 в узлах сопряжения элементов тонкостенных сосудов, нагруженных газовым давлением, требует значительной вычислительной работы. Такие расчеты производятся многими студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Использование вычислительной техники в расчетах позволяет освободить студентов от механической вычислительной работы, сосредоточить основное их внимание на творческой части проекта.

В настоящих методических указаниях приведены схема алгоритма и программа расчета на ЭВМ краевых сил и краевых моментов в узлах сопряжения наиболее часто встречающихся элементов тонкостенных сосудов, нагруженных газовым давлением, пример выполнения расчета, а также даны необходимые пояснения, отражающие особенности структуры программы расчета.

Программа расчета составлена для ЭВМ на языке "Visual Basic". Программирование излагается студентам при изучении курса

"Информатика", поэтому студенты смогут выполнять расчеты на машине практически самостоятельно.

Производство расчетов на ЭВМ предполагает предварительное тщательное изучение методики выполняемого расчёта, а также ознакомление с программой расчета.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КРАЕВЫХ СИЛ И МОМЕНТОВ В УЗЛАХ СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ, НАГРУЖЕННЫХ ГАЗОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Краевые силы P_0 и краевые моменты M_0 , возникающие на краях сопрягаемых элементов тонкостенных сосудов, нагруженных внешней поверхностной нагрузкой (в том числе и газовым давлением), определяются из уравнений совместности радиальных и угловых деформаций. Сущность этих уравнений заключается в том, что для обеспечения непрерывности сосуда необходимо, чтобы на эквивалентной схеме (рис. 1б) в сечении стыка сопрягаемых элементов суммы радиальных и угловых деформаций края одного элемента от действия внешних (заданных) и краевых нагрузок были равны соответствующим суммам радиальных и угловых деформаций края другого элемента.

При составлении эквивалентной схемы узла сопряжения следует придерживаться правила знаков для краевых сил P_0 и краевых моментов M_0 , схематично показанных на рис. 2.

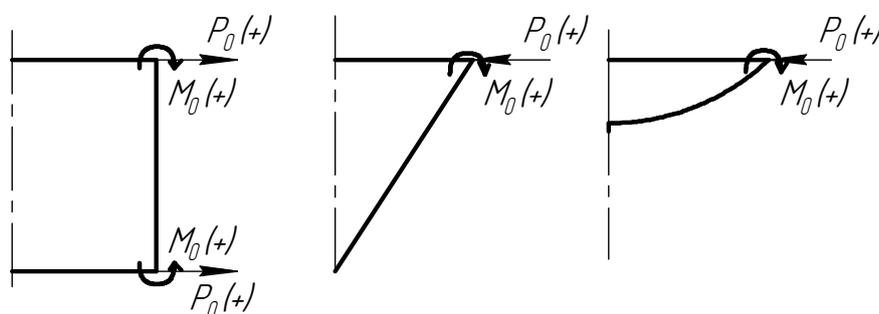


Рис. 2. К правилу знаков для краевых силовых факторов P_0 , M_0

В случае длинных оболочек (в реальных сосудах в подавляющем большинстве случаев имеют место длинные оболочки) уравнения совместности радиальных Δ и угловых Θ деформаций для узла сопряжения

двух любых элементов в аппарате, находящемся под действием внутреннего и наружного давления (см. схему, рис. 1) запишутся в виде

$$\Delta_{(p-p_n)}^{(1)} + \Delta_{p_0}^{(1)} + \Delta_{(-Q_1)}^{(1)} + \Delta_{M_0}^{(1)} = \Delta_{(p-p_n)}^{(2)} + \Delta_{p_0}^{(2)} + \Delta_{(-Q_2)}^{(2)} + \Delta_{M_0}^{(2)} ;$$

$$\Theta_{(p-p_n)}^{(1)} + \Theta_{p_0}^{(1)} + \Theta_{(-Q_1)}^{(1)} + \Theta_{M_0}^{(1)} = \Theta_{(p-p_n)}^{(2)} + \Theta_{p_0}^{(2)} + \Theta_{(-Q_2)}^{(2)} + \Theta_{M_0}^{(2)} ,$$
(1)

где $\Delta_{(p-p_n)}^{(1)}, \Theta_{(p-p_n)}^{(1)}, \Delta_{(p-p_n)}^{(2)}, \Theta_{(p-p_n)}^{(2)}$ – соответственно, радиальные и угловые деформации краев первого и второго элементов, входящих в узел сопряжения, под действием заданных внутреннего P и наружного P_n давлений (определяются по безмоментной теории оболочек для соответствующих случаев);

$\Delta_{p_0}^{(1)}, \Theta_{p_0}^{(1)}, \Delta_{p_0}^{(2)}, \Theta_{p_0}^{(2)}, \Delta_{M_0}^{(1)}, \Theta_{M_0}^{(1)}, \Delta_{M_0}^{(2)}, \Theta_{M_0}^{(2)}$ – то же, под действием соответственно краевых сил P_0 и краевых моментов M_0 (по краевой задаче);

$\Delta_{(-Q_1)}^{(1)}, \Theta_{(-Q_1)}^{(1)}, \Delta_{(-Q_2)}^{(2)}, \Theta_{(-Q_2)}^{(2)}$ – то же под действием обратных направлений распорных сил Q_1 и Q_2 (по краевой задаче).

Примечание. Очевидно, что на краю сопрягаемых элементов в P_0 входят распорные силы Q_1 и Q_2 соответственно, влияние которых (в неявном виде) учтено при определении деформаций, вызываемых действием заданных поверхностных нагрузок. Поэтому при определении деформаций от краевых сил распорные силы на краях сопрягаемых элементов должны быть вычтены из P_0 , что равносильно их учету с обратным направлением.

Распорная сила Q на краю соответствующего элемента, как проекция силы S на краю этого элемента от действия заданных поверхностных нагрузок на плоскость параллельного круга, может быть определена по формуле [1, 2]

$$Q = S \cdot \cos \varphi_0, \quad (2)$$

где знак (-) в соответствии с правилом знаков для краевых сил;

φ_0 – широта точек на краю элемента.

Примечание. Распорные силы на краю цилиндра равны нулю ($Q=0$).

При действии внутреннего P и наружного P_n давлений распорные силы Q равны:

- на краю конуса

$$Q = -\frac{(P - P_n) \cdot R}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \cos \varphi_0 = -\frac{(P - P_n)}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot R \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

- на краю сферического сегмента

$$Q = -\frac{(P - P_n) \cdot R}{2} \cdot R_0 \cdot \cos \varphi_0, \quad (4)$$

где R – радиус параллельного круга на краю конуса;

α – половина угла при вершине конуса;

R_0 – радиус сферы.

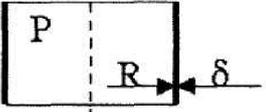
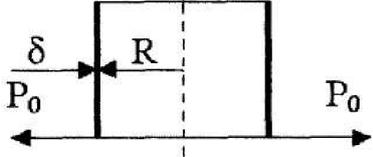
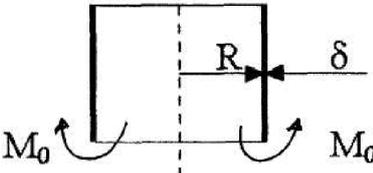
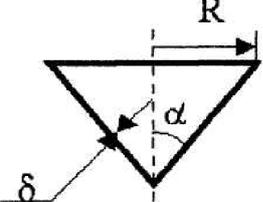
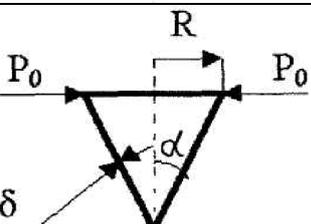
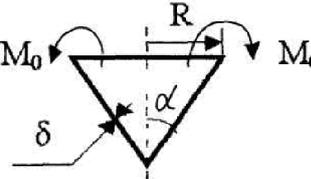
При составлении уравнений совместности деформаций (1) каждый член этих уравнений должен быть взят с учетом его знака для принятой эквивалентной схемы в соответствии с правилами знаков для деформаций. При этом рекомендуется знак для Δ брать в зависимости от того, имеет место уменьшение (+) или увеличение (-) радиуса параллельного круга на краю элемента. Что касается углов поворота Θ , то важно, чтобы повороты одинакового направления брались с одинаковыми знаками в обеих частях уравнения.

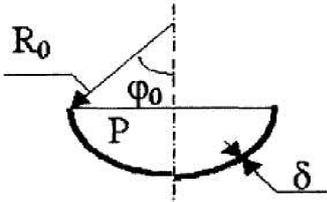
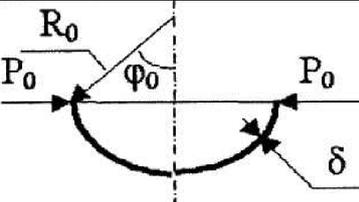
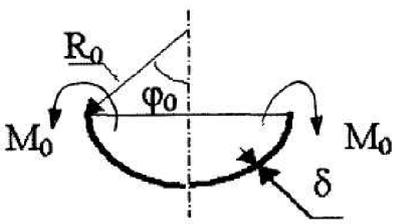
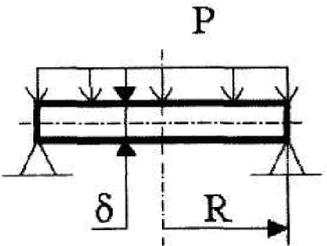
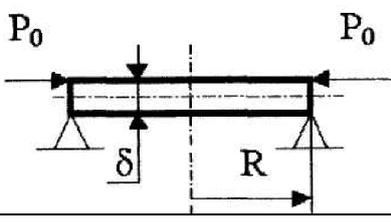
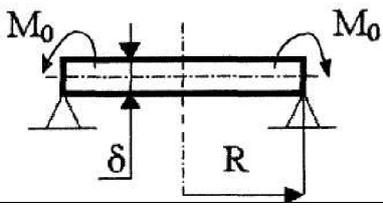
Выражения для нахождения членов уравнений (1) на краях цилиндрических, конических, сферических оболочек и на краю плоских днищ (крышек) даны в табл. 1.

Примечание. Расчеты должны проводиться на конец нормативного срока эксплуатации сосуда когда толщины стенок его элементов будут равны соответственно ($\delta_1 - \delta_0$) и ($\delta_2 - \delta_0$), где δ_0 – прибавка на коррозию и эрозию.

Формулы для определения перемещений на краю оболочек [4] (где E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона материала оболочки).

Таблица 1

Форма оболочки и нагрузка	Перемещения	
	$ \Delta $	$ \Theta $
	$-\frac{P}{2\delta E} R^2 (2 - \mu) \quad (5)$	0
	$-\frac{2\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{R\delta} \delta E} R^2 P_0 \quad (6)$	$\frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\delta^2 E} R P_0 \quad (7)$
	$-\frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\delta^2 E} R M_0 \quad (8)$	$\frac{4[\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}]^3}{\delta^2 E} \sqrt{\frac{R}{\delta}} M_0 \quad (9)$
	$-\frac{P R^2}{2\delta E \cos \alpha} (2 - \mu) \quad (10)$	$-\frac{3}{2} \frac{P R \operatorname{tg} \alpha}{\delta E \cos \alpha} \quad (11)$
	$\frac{2\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\delta E \sqrt{\frac{R\delta}{\cos \alpha}}} R^2 P_0 \quad (12)$	$\frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\delta^2 E} R P_0 \quad (13)$
	$-\frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\delta^2 E} R M_0 \quad (14)$	$-\frac{4[\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}]^3}{\delta^2 E} \sqrt{\frac{R}{\delta \cos \alpha}} M_0 \quad (15)$

Форма оболочки и нагрузка	Перемещения	
	$ \Delta $	$ \Theta $
	$-\frac{PR_0^2}{2\delta E}(1-\mu)\sin\varphi_0 \quad (16)$	0
	$\frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\delta E} \sqrt{\frac{R_0}{\delta}} R_0 \sin^2 \varphi_0 P_0 \quad (17)$	$\frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\delta^2 E} R_0 \sin \varphi_0 P_0 \quad (18)$
	$-\frac{2\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\delta^2 E} R_0 \sin \varphi_0 M_0 \quad (19)$	$\frac{4[\sqrt{3(1-\mu^2)}]^3}{\delta^2 E} \sqrt{\frac{R_0}{\delta}} M_0 \quad (20)$
	0	$\frac{3PR^3}{2\delta^3 E}(1-\mu) \quad (21)$
	$\frac{(1-\mu)}{\delta E} RP_0 \quad (22)$	$\frac{6(1-\mu)}{\delta^2 E} RP_0 \quad (23)$
	0	$-\frac{12(1-\mu)}{\delta^3 E} RM_0 \quad (24)$

В случае, если имеет место скачкообразное изменение температурного поля вдоль меридиана (например, в аппаратах с рубашками), то это необходимо учесть в уравнениях (1) добавлением в левую и правую их части членов $\Delta_{(t_1-t_0)}^{(1)}$, $\Theta_{(t_1-t_0)}^{(1)}$, $\Delta_{(t_2-t_0)}^{(2)}$, $\Theta_{(t_2-t_0)}^{(2)}$ соответственно.

При этом для цилиндра можно записать (в случае $t_1 \geq t_0$, $t_2 \geq t_0$):

$$\Delta_{(t_1-t_0)}^{(1)} = -\beta_1 \cdot (t_1 - t_0) \cdot R, \quad \Theta_{(t_1-t_0)}^{(1)} = 0, \quad (25)$$

$$\Delta_{(t_2-t_0)}^{(2)} = -\beta_2 \cdot (t_2 - t_0) \cdot R, \quad \Theta_{(t_2-t_0)}^{(2)} = 0, \quad (26)$$

где t_1 и t_2 – температуры цилиндра по зонам;

t_0 – температура изготовления сосуда;

β_1 и β_2 – коэффициенты температурного расширения материалов по зонам;

R – радиус цилиндра.

В случае, если край нагруженной оболочки жестко защемлен в недеформирующемся массиве (например, во фланце большой толщины, трубной доске, кольце жесткости, массивной крышке и т.д.), то правые части уравнений (1) следует принять равными нулю.

После подстановки всех членов с учетом их знаков в уравнения (1) следует решить эти уравнения относительно интересующих нас величин P_0 и M_0 . При этом, если найденные из уравнения совместности деформаций значения P_0 или M_0 скажутся отрицательными, то их действительные направления противоположны выбранным на эквивалентной расчетной схеме. Это необходимо учесть в дальнейших расчетах.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА

Запишем уравнения (1) совместности деформаций в следующем виде:

$$\begin{cases} (\Delta_{P_0}^{(1)} - \Delta_{P_0}^{(2)}) + (\Delta_{M_0}^{(1)} - \Delta_{M_0}^{(2)}) + [(\Delta_{(P-P_H)}^{(1)} + \Delta_{(-Q_1)}^{(1)}) - (\Delta_{(P-P_H)}^{(2)} + \Delta_{(-Q_2)}^{(2)})] = 0 \\ (\Theta_{P_0}^{(1)} - \Theta_{P_0}^{(2)}) + (\Theta_{M_0}^{(1)} - \Theta_{M_0}^{(2)}) + [(\Theta_{(P-P_H)}^{(1)} + \Theta_{(-Q_1)}^{(1)}) - (\Theta_{(P-P_H)}^{(2)} + \Theta_{(-Q_2)}^{(2)})] = 0 \end{cases} \quad (27)$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \Delta_{P_0}^{(1)} &= A_1 * P_0; & \Delta_{M_0}^{(1)} &= B_1 * M_0; \\ \Delta_{P_0}^{(2)} &= A_2 * P_0; & \Delta_{M_0}^{(2)} &= B_2 * M_0; \\ \Theta_{P_0}^{(1)} &= A_3 * P_0; & \Theta_{M_0}^{(1)} &= B_3 * M_0; \\ \Theta_{P_0}^{(2)} &= A_4 * P_0; & \Theta_{M_0}^{(2)} &= B_4 * M_0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= A_1 - A_2; & B &= B_1 - B_2; \\ A_0 &= A_3 - A_4; & B_0 &= B_3 - B_4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{(p-p_H)}^{(1)} &= C_1; & \Delta_{(p-p_H)}^{(1)} &= C_5; \\ \Delta_{(p-p_H)}^{(2)} &= C_2; & \Theta_{(p-p_H)}^{(2)} &= C_6; \\ \Delta_{(-Q_1)}^{(1)} &= C_3; & \Theta_{(-Q_1)}^{(1)} &= C_7; \\ \Delta_{(-Q_2)}^{(2)} &= C_4; & \Theta_{(-Q_2)}^{(2)} &= C_8. \end{aligned}$$

$$C = (C_1 + C_3) - (C_2 + C_4); \quad (28)$$

$$C_0 = (C_5 + C_7) - (C_6 + C_8), \quad (29)$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 и B_1, B_2, B_3, B_4 – множители соответственно при P_0 и M_0 для членов уравнения (27) по краевой задаче (см. табл. 1).

С учетом принятых обозначений уравнения (27) представим в виде

$$\left. \begin{aligned} A \cdot P_0 + B \cdot M_0 + C &= 0 \\ A_0 \cdot P_0 + B \cdot M_0 + C &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Решая систему равнений (30) относительно краевых сил P_0 и краевых моментов M_0 , получим:

$$P_0 = \frac{C \cdot B_0 - B \cdot C_0}{B \cdot A_0 - A \cdot B_0}; \quad (31)$$

$$M_0 = - \left(\frac{A_0 \cdot P_0 + C_0}{B_0} \right). \quad (32)$$

Программа расчета краевых сил P_0 (31) и моментов M_0 (32) составлена на языке "Visual Basic" для следующих наиболее часто встречающихся вариантов сочетания элементов, составляющих узел сопряжения:

- I = 1 – цилиндр и широкий край конуса;
- I = 2 – цилиндр и широкий край сферического сегмента;
- I = 3 – цилиндр и плоское днище (крышка);
- I = 4 – цилиндр и массивный плоский элемент (фланец, днище, кольцо и т.д.);
- I = 5 – два цилиндра с разным температурным полем;
- I = 6 – массивный плоский элемент (фланец, крышка и т.д.) и широкий край конуса;
- I = 7 – массивный плоский элемент (фланец, крышка и т.д.) и широкий край сферического сегмента.

Перечисленные варианты сочетания элементов сосуда в узле сопряжения представлены для наглядности схематично на рис. 3.

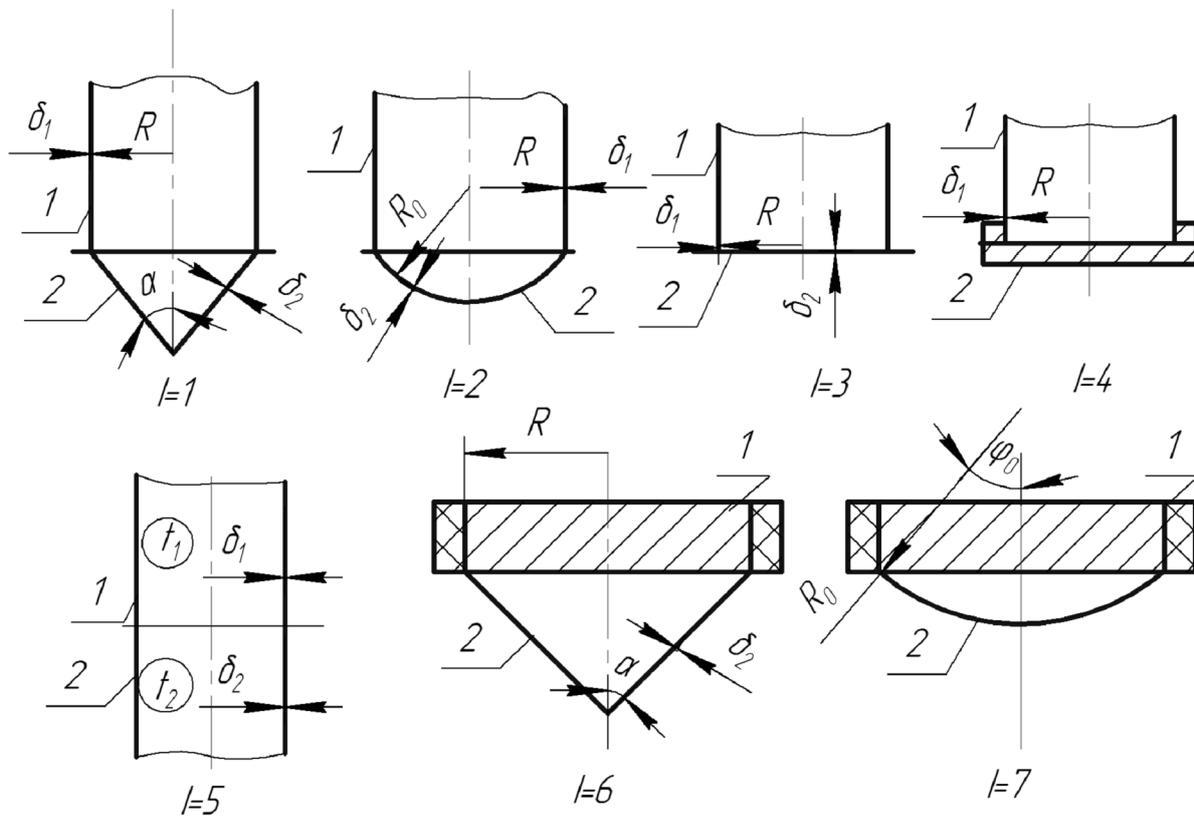


Рис. 3. Варианты сочетания 1-го и 2-го элементов сосуда в узле сопряжения (все узлы сопряжения без плавного перехода)

Для проведения расчетов по представленной методике необходимы следующие исходные параметры:

- P – внутреннее избыточное давление в сосуде, МПа;
- P_n – наружное избыточное давление (вакуум) в сосуде, МПа;
- μ – коэффициент Пуассона материала сосуда;
- δ_0 – прибавка на коррозию, эрозию, м;
- R – радиус цилиндра или широкого края конуса, м;
- R_0 – радиус поверхности сферического сегмента, м;
- α – половина угла при вершине конуса, град;
- φ_0 – широта точек на широком крае сферического сегмента, град;
- δ_1 – исполнительная толщина стенки 1-го элемента, м;
- δ_2 – исполнительная толщина стенки 2-го элемента, м;
- E_1 – модуль упругости материала 1-го элемента, МПа;
- E_2 – модуль упругости материала 2-го элемента, МПа;
- t_1, t_2 – температуры цилиндра в 1-й и 2-й зонах, °С;
- t_0 – температура изготовления сосудов °С;
- β_1, β_2 – коэффициенты температурного расширения материалов цилиндра в 1-й и во 2-й зонах, $1/^\circ\text{C}$.

В программе расчета приняты следующие обозначения исходных параметров (табл. 2).

Таблица 2

Исходный параметр	Размерность	Обозначение в программе
P	МПа	P
P_n	МПа	P1
μ	-	M
δ_0	м	Z0
R	м	R
R_0	м	R0
α	град	V
φ_0	град	F0
δ_1	м	Z1
δ_2	м	Z2
E_1	МПа	E1
E_2	МПа	E2
t_1	°С	T1
t_2	°С	T2
t_0	°С	T0
β_1	$1/^\circ\text{C}$	W1
β_2	$1/^\circ\text{C}$	W2

Для производства расчетов на ЭВМ по заданному варианту I необходимо предварительно подготовить и затем ввести следующие исходные параметры в зависимости от значения I (табл. 3).

Таблица 3

Вариант расчета	Необходимые исходные параметры														
	2														
I=1	P	P1	M	Z0	R	Z1	E1	Z2	V	E2	-	-	-	-	
I=2	P	P1	M	Z0	R	Z1	E1	R0	Z2	E2	-	-	-	-	
I=3	P	P1	M	Z0	R	Z1	E1	Z2	-	-	-	-	-	-	
I=4	P	P1	M	Z0	R	Z1	E1	-	-	-	-	-	-	-	
I=5	P	P1	M	Z0	R	Z1	E1	E2	T1	T2	T2	T0	W1	W2	
I=6	P	P1	M	Z0	R	Z2	V	-	-	-	-	-	-	-	
I=7	P	P1	M	Z0	R0	F0	Z2	-	-	-	-	-	-	-	

Промежуточные переменные в программе расчета обозначены следующим образом (табл. 4).

Таблица 4

Переменная	Обозначение в программе	Переменная	Обозначение в программе
Q ₁	Q1	A ₄	A4
Q ₂	Q2	B ₁	B1
C ₁	C1	B ₂	B2
C ₂	C2	B ₃	B3
C ₃	C3	B ₄	B4
C ₄	C4	C	C
C ₅	C5	C ₀	C0
C ₆	C6	A	A
C ₇	C7	A ₀	A0
C ₈	C8	B	B
A ₁	A1	B ₀	B0
A ₂	A2	P ₀	P0
A ₃	A3	M ₀	M0

После ввода пользователем в ЭВМ числовых значений исходных параметров, программа предложит вывести на печать исходные данные и результаты расчета: знаки (направления) и численные значения распорных сил на краях сопрягаемых элементов; словесное описание эквивалентной расчетной схемы (направление краевых сил P_0 и моментов M_0 на краях сопрягаемых элементов); знак (действительное направление) и численные значения краевых сил P_0 и моментов M_0 .

СХЕМА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА

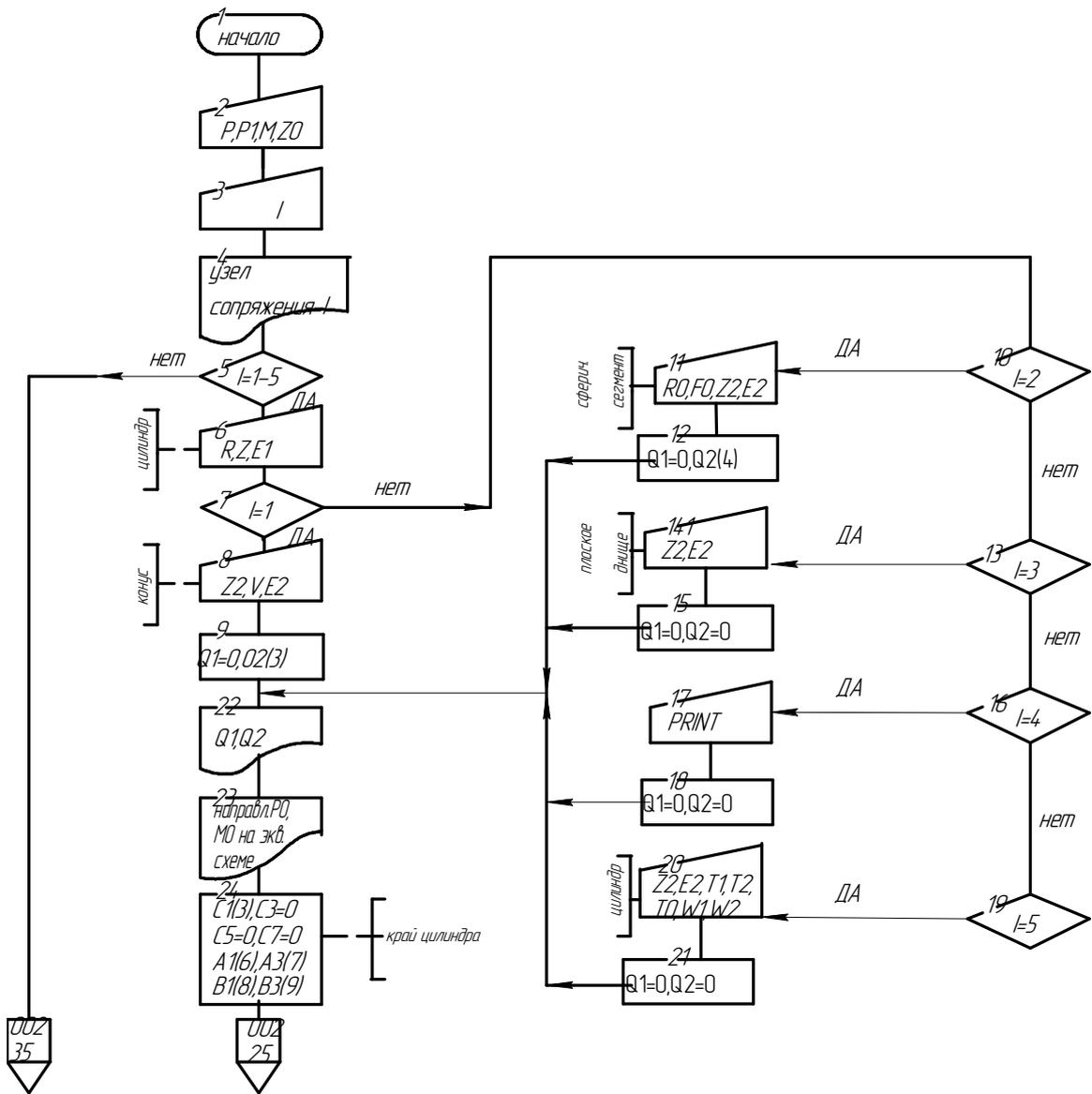
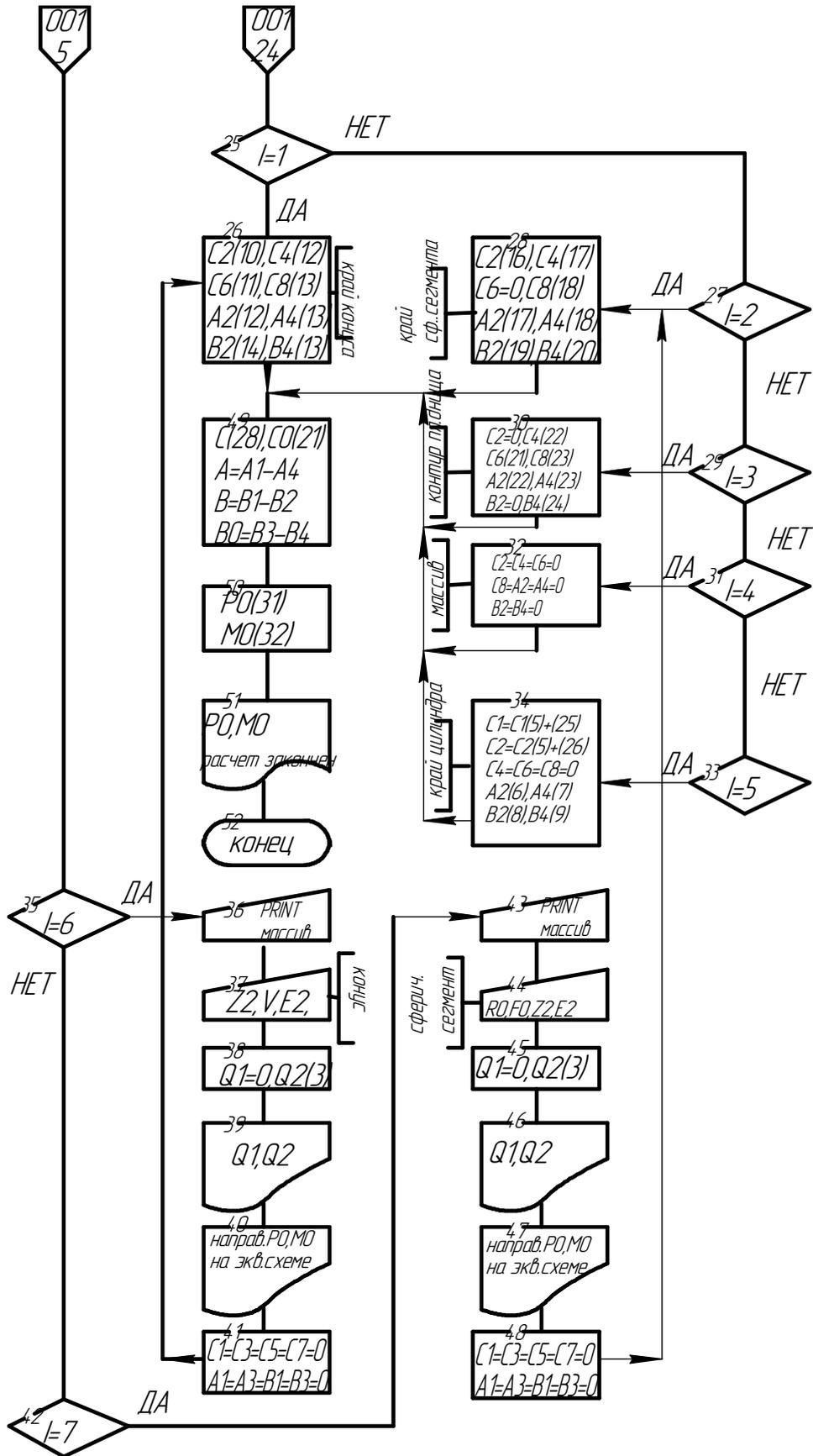


Рис. 4. Схема алгоритма расчета



Окончание рис. 4

Программа расчета

Option Explicit

Public Sub Block_135()

'2,3,4,5

Pr(0) = "ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ"

Pr(1) = "Внутреннее давление в аппарате P= " & P & " МПа"

Pr(2) = "Наружнее давление (вакуум) P1= " & P1 & " МПа"

Pr(3) = "Коэф. Пуассона материала цилиндра M= " & M

Pr(4) = "Прибавка на коррозию, эрозию Z0= " & Z0 & " м"

Pr(5) = "Радиус цилиндра R= " & R & " м"

Pr(6) = "Исполнительная толщина стенки цилиндра Z1= " & Z1 & " м"

Pr(7) = "Модуль упругости материала цилиндра E1= " & E1 & " МПа"

Printer.FontSize = 12

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(0))) / 2

Printer.Print Pr(0)

Printer.FontSize = 10

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(1))) / 2

Printer.Print Pr(1)

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(2))) / 2

Printer.Print Pr(2)

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(3))) / 2

Printer.Print Pr(3)

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(4))) / 2

Printer.Print Pr(4)

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(5))) / 2

Printer.Print Pr(5)

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(6))) / 2

Printer.Print Pr(6)

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(7))) / 2

Printer.Print Pr(7)

Printer.Print

End Sub

Public Sub Block_198()

'2,6,7

If Q2 < 0 Then

Pr(14) = "Знак (-) распорных сил показывает, что они направлены от
оси оболочки"

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(14))) / 2

```

Printer.Print Pr(14)
Printer.Print
End If

If Q2 > 0 Then
Pr(16) = "Знак (+) распорных сил показывает, что они направлены к
оси оболочки"
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(16))) / 2
Printer.Print Pr(16)
Printer.Print
End If
End Sub

Public Sub Block_235()
'2,3,4,5
C1 = -(P - P1) * R ^ 2 * (2 - M) / (2 * (Z1 - Z0) * E1)
C3 = 0
C5 = 0
C7 = 0
A1 = -2 * X * R ^ 2 / ((Z1 - Z0) * E1 * Sqr(R * (Z1 - Z0)))
A3 = 2 * X1 * R / (E1 * (Z1 - Z0) ^ 2)
B1 = -A3
B3 = 4 * X ^ 3 * Sqr(R / (Z1 - Z0)) / (E1 * (Z1 - Z0) ^ 2)
End Sub

Public Sub Block_285()
'1,6
C2 = -(P - P1) * R ^ 2 * (2 - M) / (2 * (Z2 - Z0) * E2 * X2)
C4 = 2 * X * R ^ 2 * (-Q2) / (E2 * (Z2 - Z0) * Sqr(R * (Z2 - Z0) / X2))
C6 = -3 * (P - P1) * R * (Sin(PI / 180 * V) / (Cos(PI / 180 * V))) / (E2 * (Z2 -
Z0) * X2)
C8 = 2 * X1 * R * (-Q2) / (E2 * (Z2 - Z0) ^ 2)
A2 = 2 * X * R ^ 2 / (E2 * (Z2 - Z0) * Sqr(R * (Z2 - Z0) / X2))
A4 = 2 * X1 * R / (E2 * (Z2 - Z0) ^ 2)
B2 = -A4
B4 = -4 * X ^ 3 * Sqr(R / ((Z2 - Z0) * X2)) / (E2 * (Z2 - Z0) ^ 2)
End Sub

Public Sub Block_475()
'2,7
C2 = -(P - P1) * R0 ^ 2 * (1 - M) * X3 / (2 * (Z2 - Z0) * E2)
C4 = 2 * X * R0 * Sqr(R0 / (Z2 - Z0)) * X3 ^ 2 * (-Q2) / (E2 * (Z2 - Z0))

```

```

C6 = 0
C8 = 2 * X1 * R0 * X3 * (-Q2) / (E2 * (Z2 - Z0) ^ 2)
A2 = 2 * X * R0 * X3 ^ 2 * Sqr(R0 / (Z2 - Z0)) / (E2 * (Z2 - Z0))
A4 = 2 * X1 * R0 * X3 / (E2 * (Z2 - Z0) ^ 2)
B2 = -A4
B4 = -4 * X ^ 3 * Sqr(R0 / (Z2 - Z0)) / (E2 * (Z2 - Z)) ^ 2
End Sub

Public Sub Block_1500()
'1,2,3,4,5,6,7
C = (C1 + C3) - (C2 + C4)
C0 = (C5 + C7) - (C6 + C8)
A = A1 - A2
A0 = A3 - A4
B = B1 - B2
B0 = B3 - B4
P0 = (C * B0 - B * C0) / (B * A0 - A * B0)
M0 = -(A * P0 + C0) / B0

Pr(22) = "Значение краевых сил P0= " & P0 & " МН/м"
Pr(23) = "Значение краевых моментов M0= " & M0 & " МН/м"
Pr(24) = "Знак (-) при "P0" означает, что действительное их направление"
Pr(25) = "противоположно выбранному на эквивалентной схеме."
Pr(26) = "Это необходимо учесть при дальнейших расчетах."
Pr(27) = "Знак (-) при "M0" означает, что действительное их
направление"
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(22))) / 2
Printer.Print Pr(22)
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(23))) / 2
Printer.Print Pr(23)
Printer.Print

If P0 < 0 Then
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(24))) / 2
Printer.Print Pr(24)
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(25))) / 2
Printer.Print Pr(25)
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(26))) / 2
Printer.Print Pr(26)
End If

If M0 < 0 Then

```

```

Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(27))) / 2
Printer.Print Pr(27)
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(25))) / 2
Printer.Print Pr(25)
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(Pr(26))) / 2
Printer.Print Pr(26)
End If
'КОНЦОВКА
PP(90) = Family
PP(91) = TI
PP(92) = DA
Printer.Print
Printer.Print
Printer.FontSize = 12
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(PP(90)) - 2000)
Printer.Print PP(90)
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(PP(91)) - 2000)
Printer.Print PP(91)
Printer.FontSize = 10
Printer.CurrentX = (Printer.ScaleWidth - Printer.TextWidth(PP(92)) - 2000)
Printer.Print PP(92)
On Error GoTo 2
frmRkm.cdIDialog.ShowPrinter
Printer.EndDoc

2: MsgBox "Нажмите кнопку "Назад" и проведите расчет по-новому",
vbInformation, "Отмена печати"
Printer.KillDoc
Exit Sub

End Sub

```

ЛИТЕРАТУРА

1. Канторович З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов / З.Б. Канторович. - М.: Машиностроение, 1980. – 743 с.
2. Канторович З.Б. Машины химической промышленности / З.Б. Канторович. - М.: Машиностроение, 1985. – 415 с.
3. Соколов В.И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств / В.И. Соколов. - М.: Машиностроение, 1983. - 447 с.
4. Михалев Н.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств / Н.Ф. Михалев. - Л.: Машиностроение, 1984. - 304 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример выполнения расчета

Расчетная схема – узел сопряжения цилиндра с широким краем конуса (цилиндр и конус длинные)

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Внутреннее давление в аппарате $P = 0,6$ МПа.

Наружнее давление (вакуум) $P_1 = 0$ МПа.

Коэф. Пуассона материала цилиндра $M = 0,3$.

Прибавка на коррозию, эрозию $Z_0 = 0,001$ м.

Радиус цилиндра $R = 0,8$ м.

Исполнительная толщина стенки цилиндра $Z_1 = 0,004$ м.

Модуль упругости материала цилиндра $E_1 = 199000$ МПа.

Исполнительная толщина стенки конуса $Z_2 = 0,005$ м.

Половина угла при вершине конуса $V = 30$ град.

Модуль упругости материала конуса $E_2 = 199000$ МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Распорные силы на краю цилиндра $Q_1 = 0$ МН/м.

Распорные силы на краю конуса $Q_2 = -0,1385641$ МН/м.

Знак (-) распорных сил показывает, что они направлены от оси оболочки.

На эквивалентной расчетной схеме приняты следующие направления краевых силовых факторов: краевые силы "P0" на краю цилиндра – от оси, на широком крае конуса – к оси.

Краевые моменты "M0" выгибают края наружу.

Значение краевых сил $P_0 = -1,943641E-02$ МН/м.

Значение краевых моментов $M_0 = -1.412352E-05$ МН/м.

Знак (-) при "P0" означает, что действительное их направление противоположно выбранному на эквивалентной схеме.

Это необходимо учесть при дальнейших расчетах.

Знак (-) при "M0" означает, что действительное их направление противоположно выбранному на эквивалентной схеме.

Это необходимо учесть при дальнейших расчетах.

ТИ СГТУ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Основные положения методики расчета краевых сил и моментов в узлах сопряжения элементов тонкостенных сосудов, нагруженных газовым давлением .	5
Особенности структуры программы расчета.....	10
Схема алгоритма расчета	15
Программа расчета.....	17
Литература.....	21
Приложение	22

РАСЧЕТ НА ЭВМ КРАЕВЫХ СИЛ И КРАЕВЫХ МОМЕНТОВ
В УЗЛАХ СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ,
НАГРУЖЕННЫХ ГАЗОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Методические указания
к самостоятельной работе

Составили: ЗАБРУДСКИЙ Владимир Тихонович
НИКИТИН Андрей Иванович

Рецензент Г.И. Старшов

Редактор С.В. Горбунова

Подписано в печать

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,39 (1,5)

Заказ

Формат 60x84 1/16

Уч.-изд. л. 1,3

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в РИЦ СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77