

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИОНАЛОВ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОРТОГОНАЛЬНО ОТРАЖЕННЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*Гультяев В. И., д.т.н., Субботин С. Л., д.т.н., проф., Алексеев А. А., к.т.н., доц.,
Булгаков А. Н., асс., Двужилов А. С., к.т.н.*

Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Российская Федерация

Построение функционалов или их аппроксимация сложными функциями – непростая задача, требующая проведения большого числа дорогостоящих экспериментов [1, 2]. Для сокращения числа опытов в данной работе производится сравнение параметров для отраженных траекторий деформирования с углами излома 90 и -90 градусов.

В качестве примера взяты результаты, полученные в лаборатории кафедры СМТУиП ТвГТУ на комплексе СН-ЭВМ [3, 4]. Опыты проводились на тонкостенных оболочках из стали 45 (ГОСТ 1050-2013), толщина стенки $h = 0,97-1,01$ мм. Условия проведения опытов нормальные, скоростью деформирования порядка $1 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹. Значение предела текучести принято $\sigma_T = \sigma^T / \sqrt{(2/3)} = 328,5$ МПа, модуля упругости $E = 2,18 \cdot 10^5$ МПа, удвоенного модуля сдвига $2G = 1,41 \cdot 10^5$ МПа, коэффициента Пуассона $\mu = 0,3$. Материал в достаточной степени начально изотропный, в рабочей части образца напряженное состояние считалось близким к однородному.

Для нахождения компонентов тензоров девиаторов напряжений S_j ($i, j = 1, 2, 3$) и деформаций $\mathcal{E}_j$ ($i, j = 1, 2, 3$), модулей векторов напряжений σ и деформаций $\mathcal{E}$ в девиаторных пространствах напряжений Σ_3 и деформаций E_3 , длины дуги траектории s , косинуса угла сближения ϑ_1 применялись формулы:

$$S_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\sigma_{11} - \frac{\sigma_{22}}{2} \right) \quad S_2 = \frac{\sigma_{22}}{\sqrt{2}} = \frac{\sigma_{22}}{\sqrt{2}} \quad S_3 = \sqrt{2} S_{12} = \sqrt{2} \sigma_{12}$$

$$\mathcal{E}_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \varepsilon_{11} \quad \mathcal{E}_2 = \sqrt{2} \left(\varepsilon_{22} + \frac{1}{2} \varepsilon_{11} \right) \quad \mathcal{E}_3 = \sqrt{2} \varepsilon_{12}$$

$$\sigma = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \quad \mathcal{E} = \sqrt{\mathcal{E}_1^2 + \mathcal{E}_2^2 + \mathcal{E}_3^2} \quad \Delta S = \sqrt{\Delta \mathcal{E}_1^2 + \Delta \mathcal{E}_2^2 + \Delta \mathcal{E}_3^2}$$

$$\cos \vartheta_1 = \frac{1}{\sigma} \left(S_1 \frac{dE_1}{ds} + S_2 \frac{dE_2}{ds} + S_3 \frac{dE_3}{ds} \right)$$

Численное моделирование процессов сложного упругопластического деформирования материалов выполнялось по зависимостям В. Г. Зубчанинова:

$$\frac{dS_i}{ds} = M_1 \frac{d\mathcal{E}_i}{ds} + \left(\frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos \vartheta_1 \right) \frac{S_i}{\sigma}$$

$$\frac{d\vartheta_1}{ds} + k_1 = -\frac{M_1}{\sigma} \sin \vartheta_1$$

$$\sigma(s) = \Phi(s) + A f_0^p \Omega(\Delta s) - \Delta \sigma_k$$

$$M_1 = 2G_p + (2G - 2G_p^0) f^q$$

$$f = \frac{1 - \cos \vartheta_1}{2}, \quad f_0 = \frac{1 - \cos \vartheta_1^0}{2}$$

$$\Omega(\Delta s) = -[\gamma \cdot \Delta s \cdot e^{-\gamma \Delta s} + b \cdot (1 - e^{-\gamma \Delta s})]$$

где $f, f_0, A, b, \gamma, p, q$ – параметры аппроксимаций, $M_p, \sigma(s)$ – функционалы процесса, $\Omega(\Delta s)$ – функция, учитывающая скалярный нырок напряжений.

В таблице 1 приведены принятые параметры аппроксимации $f, f_0, A, b, \gamma, p, q$, используемые при численном решении дифференциальных уравнений (1) методом Рунге–Кутты 4-го порядка малости.

Таблица 1 – Параметры аппроксимации

f_0	A	b	γ	p	q
0.6	192	0,24	1,8	1	0,50

На рисунке 1 показаны программа деформирования в осях ϑ_1 – ϑ_3 и отклик S_1 – S_3 , на рисунке 2 диаграммы σ – s , на рисунке 3 – зависимость σ – ϑ_1 . На рисунке 4 приведены совмещенные диаграммы σ – s, σ – ϑ_1 .

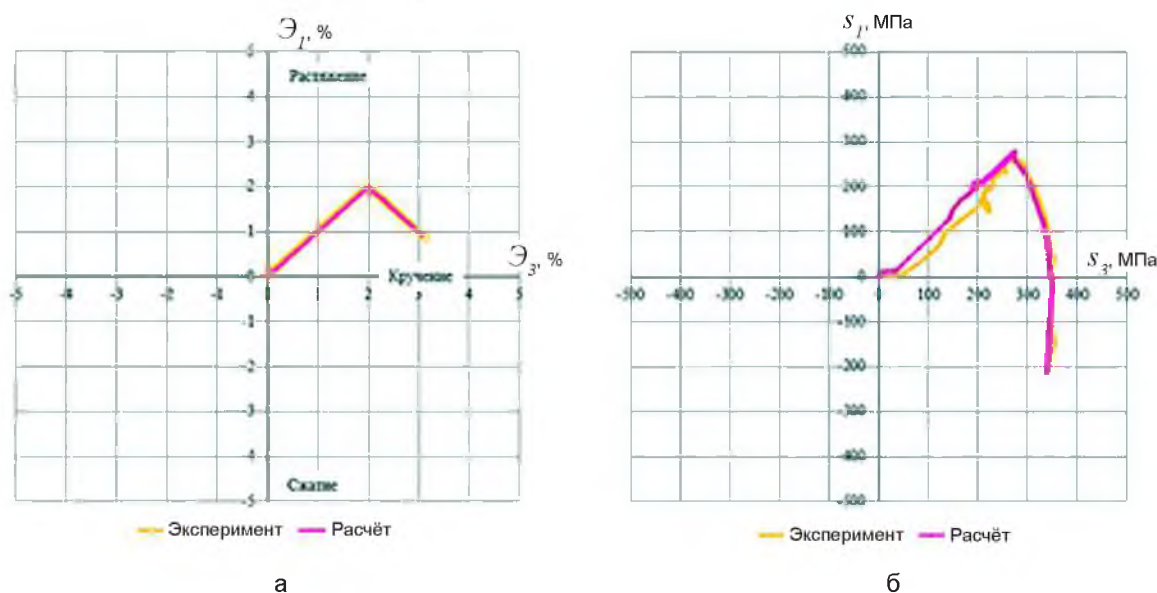


Рисунок 1 – Данные эксперимента
а – программы деформирования; б – отклик на программу

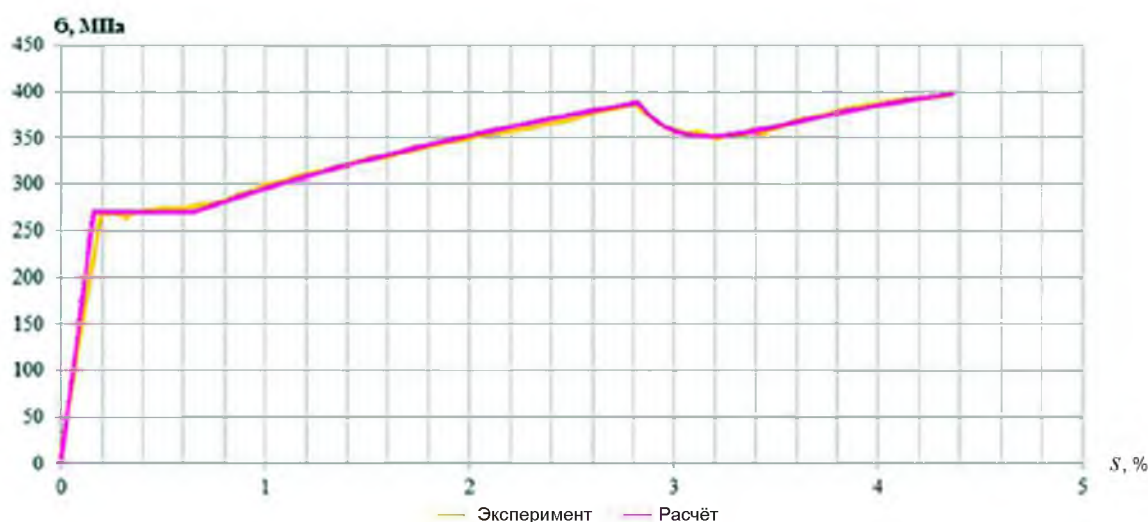


Рисунок 2 – Диаграммы прослеживания процесса σ – s

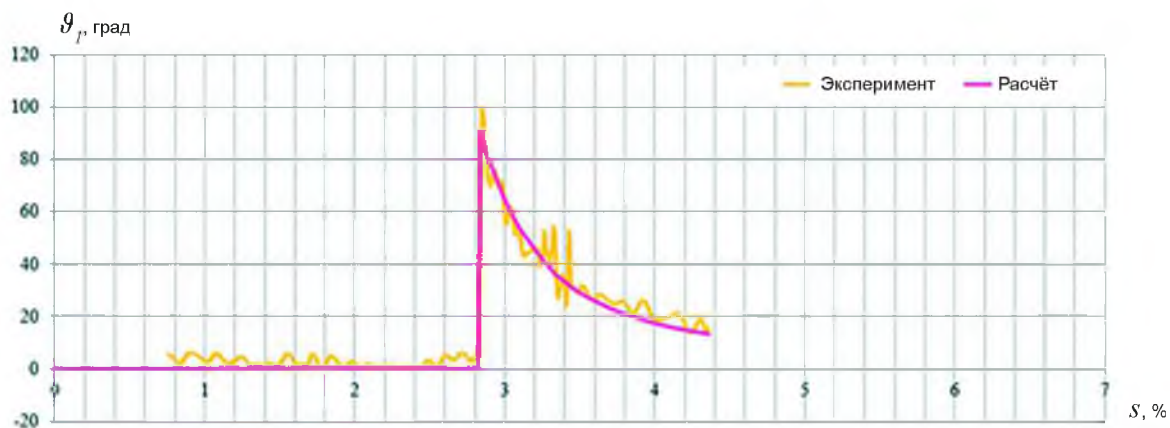


Рисунок 3 – Диаграмма угла сближения $\vartheta_I - s$

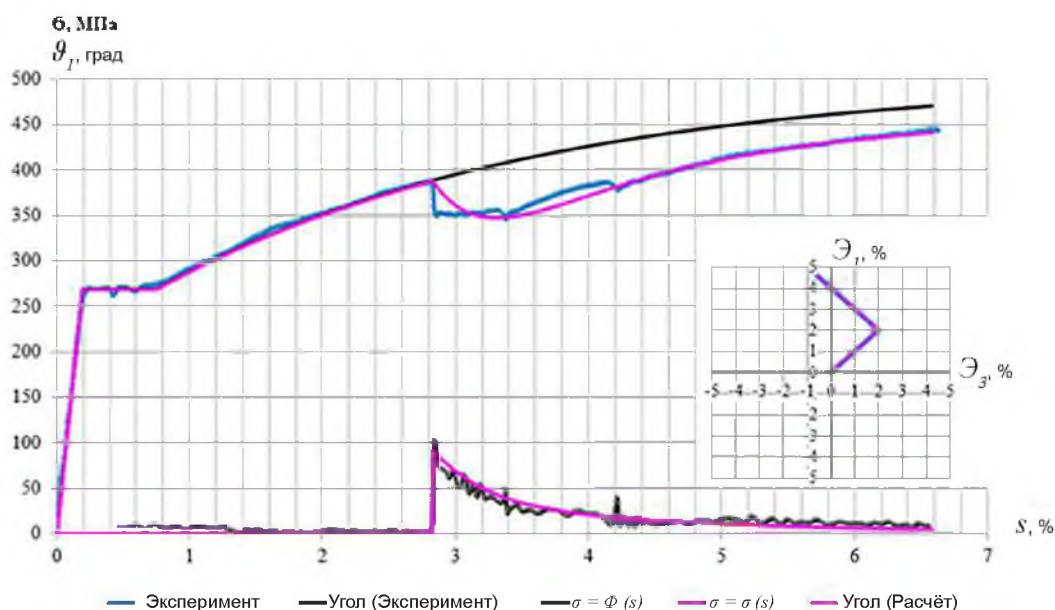


Рисунок 4 – Совмещенные диаграмма деформирования и угла сближения

Наши данные показывают, что для отраженных траекторий деформирования могут использоваться одни и те же параметры аппроксимации, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований, например, сравнения параметров при различных углах излома [5, 6, 7].

Список использованных источников

1. Зубчанинов, В. Г. Механика процессов пластических сред / В. Г. Зубчанинов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 352 с.
2. Зубчанинов, В. Г. Механика сплошных деформируемых сред. / В.Г. Зубчанинов. – Тверь : Чудо, 2000. – 703 с.
3. Гуляев, В. И. Экспериментальное изучение упругопластического деформирования конструкционных материалов на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ / В. И. Гуляев, А. Н. Булгаков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия. Механика предельного состояния. – 2023. – № 2(56). – С. 53-64. – DOI 10.37972/chgpu.2023.56.2.006.
4. Экспериментальное исследование материала сталь 45 при деформировании по программам смещённого веера / В. И. Гуляев, А. А. Алексеев, А. Н. Широков, А. Н. Булгаков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета

- им. И.Я. Яковлева. Серия. Механика предельного состояния. – 2023. – № 2(56). – С. 88–98. – DOI 10.37972/chgpu.2023.56.2.009.
5. Боков, А. В. Изучение скалярных и векторных свойств стали 45 при сложном нагружении по траекториям деформирования в виде полуокружностей / А. В. Боков, А. Н. Булгаков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : сб. докл., Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 38–44.
6. Субботин, С. Л. Определяющие соотношения теории упругопластических процессов для решения краевых задач при плоском напряженном состоянии / С. Л. Субботин, А. А. Алексеев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия. Механика предельного состояния. – 2022. – № 2(52). – С. 42–50. – DOI 10.37972/chgpu.2022.52.2.005.
7. Булгаков, А. Н. Выявление момента появления отклика на диаграмме деформирования стали 45 по траекториям типа смещенного веера / А. Н. Булгаков, А. В. Боков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : сб. докл., Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 44–49.

УДК 621.316

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

*Гаврик А. Н., студ., Жерносек С. В., к.т.н., доц.
Витебский государственный технологический университет,
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В современных условиях стремительного развития технологий и возрастающего внимания к энергосбережению тепловые насосы занимают важное место в системах отопления, вентиляции и кондиционирования. Актуальность внедрения теплонасосных технологий обусловлена необходимостью снижения потребления традиционных энергоносителей, уменьшения выбросов парниковых газов и обеспечения устойчивого развития энергетики. Понимание принципов работы и особенностей эксплуатации тепловых насосов является ключевым фактором для их эффективного применения. В работе представлены результаты расчета термодинамического цикла парокомпрессионного теплового насоса малой мощности.

Ключевые слова: термодинамический цикл, парокомпрессионный тепловой насос, испаритель, конденсатор, диаграмма состояния, температура, хладагент.

По данным Международного энергетического агентства, к началу 2025 года во всем мире использовалось более 177 миллионов тепловых насосов, которые обеспечивают около 7 % мировых потребностей в отоплении. Лидерами в использовании ТНУ являются Китай и страны Северной Америки. В Европе наибольшее распространение тепловые насосы получили в Норвегии (обеспечивают порядка 60 % потребностей систем отопления), Швеция (43 %) и Финляндия (41 %) [1–7].

Термодинамический расчет цикла парокомпрессионного теплового насоса типа «вода-вода» заключается в определении его энергетических характеристик для заданных условий работы [8–10]. На рисунке 1 представлена принципиальная схема парокомпрессионного теплового насоса и его идеальные термодинамические циклы на $T-s$ и $p-h$ диаграммах.

Для построения рабочего цикла на диаграмме требуется точное определение параметров: t_o – температура кипения; t_K – температура конденсации; t_{BC} – температура всасывания; t_{II} – температура переохлаждения [10, 11]. В качестве хладагента используется фреон R134a.