

устройство для его осуществления. Оpubл.: 19.06.2018 Бюл. № 17/ Черепанов А.П. Заявитель: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет». – 8с.: ил. – Текст: непосредственный..

6. Патент № 2824813 Российская Федерация, МПК В 01 D3/14, B01D 3/16, B01D 3/20 (2006.01). Способ теплообмена парогазовой смеси и устройство для его осуществления: № 2024100413: заявл. 9.01.2024 :опубл.: 14.08.2024. Бюл. № 23 / Черепанов А.П. Ангарский государственный технический университет. – 13с. : ил. – Текст : непосредственный.

7. Патент № 2830292 Российская Федерация, МПК B01D 3/20, B01F 5/22 (2006.01). Способ теплообмена га-

зожидкостной смеси и устройство для его осуществления: № 2024105334: заявл. 29.02.2024: опубл. 18.11.2024. Бюл. № 32 / Черепанов А.П. Патентообладатель: Ангарский государственный технический университет. – 13 с. : ил. – Текст : непосредственный.

8. Патент № 2836165 Российская Федерация, МПК B01F 23/00, B01F 25/00, B01F 27/00, B01F 33/00 (2022.01). Способ получения многокомпонентной смеси при теплообмене и устройство для его осуществления: № 2024110995: заявл. 19.04.2024 опубл.: 11.03.2025 Бюл. № 8 / Черепанов А.П. Патентообладатель: Ангарский государственный технический университет. – 19 с. : ил. – Текст : непосредственный.

УДК 62-555.62

*Щербин Сергей Анатольевич,*

*к.т.н., доцент, декан факультета технической кибернетики,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: dekan\_ftk@angtu.ru*

*Глазков Евгений Викторович,*

*студент гр. ТМм-24-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: evglazkov27@gmail.com*

### КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

*Shcherbin S.A., Glazkov E.V.*

### COMPENSATION OF TEMPERATURE DEFORMATIONS

**Аннотация.** В статье проанализированы причины и возможные последствия температурных деформаций в оборудовании, а также перспективные мероприятия для компенсации этого опасного явления.

**Ключевые слова:** температурное расширение, деформация, компенсация тепловых удлинений, температурный зазор.

**Abstract.** The article analyzes the causes and possible consequences of temperature deformations in equipment, as well as promising measures to compensate for this dangerous phenomenon.

**Keywords:** thermal expansion, deformation, compensation of thermal elongation, temperature gap.

Физическое свойство температурного расширения материалов обуславливает одну из значимых проблем современного машиностроения. При изменении температуры все материалы изменяют свои линейные размеры, что может привести к возникновению значительных напряжений в материалах, составляющих жесткие конструкции и, как следствие, к их разрушению. Особенно критичной эта проблема становится в узлах соединения различных элементов, где концентрируются механические напряжения.

Согласно современным нормативным документам, компенсация теплового расширения должна предусматриваться на этапе проектирования для всех конструкций, подверженных температурным воздействиям. Отсутствие мероприятий, компенсирующих этот фактор, может привести к серьезным авариям, особенно в трубопроводных системах, технологическом оборудовании и строительных конструкциях.

В соответствии с Правилами промышленной безопасности при использовании

оборудования, работающего под избыточным давлением, каждый участок трубопровода между неподвижными опорами должен быть рассчитан на компенсацию тепловых удлинений, которая может осуществляться за счет самокомпенсации или путем установки компенсаторов.

Современные подходы к решению проблемы теплового расширения включают как традиционные методы компенсации, так и инновационные решения, основанные на использовании новых материалов и конструктивных схем. Выбор оптимального решения зависит от применяемого материала, диапазона рабочих температур, величины перемещений, экономических соображений и требований к надежности.

Тепловое расширение обусловлено увеличением амплитуды колебаний атомов в кристаллической решетке при нагревании. Количественно это явление характеризуется коэффициентом линейного теплового расширения, который показывает относительное изменение линейных размеров (длины) тела, происходящее в результате изменения его температуры на 1 К при постоянном давлении:

$$\alpha = \Delta L / (L_0 \cdot \Delta T),$$

где  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения материала, 1/К;  $L_0$  - первоначальная длина тела, м;  $\Delta T$  - изменение температуры, К;  $\Delta L$  - изменение длины, м.

Коэффициенты расширения различных материалов могут существенно различаться. Например металлы обычно характеризуются коэффициентами в диапазоне  $10^{-5} < \alpha < 2,5 \cdot 10^{-5}$  1/К, в то время как полимерные материалы могут иметь коэффициенты в 5-10 раз больше. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании узлов из разнородных материалов.

Особое внимание следует уделять материалам, демонстрирующим аномальные (например, отрицательные) значения коэффициента  $\alpha$ , а также анизотропным материалам, у которых коэффициент расширения может различаться в разных направлениях.

В зависимости от способности воспринимать температурные деформации, соединения узлов классифицируются на несколько основных типов. Каждый тип имеет свои преимущества, недостатки и область оптимального применения, указанные в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Типы соединений и их характеристики

Тип соединения	Принцип работы	Компенсирующая способность	Область применения	Преимущества	Недостатки
Жесткое	Неподвижное соединение элементов	Отсутствует	Короткие участки до 20м	Простота, надёжность	Высокие напряжения
Плавающее	Одна точка фиксации, свободное расширение	До 200 мм	Прямые участки трубопроводов	Естественная компенсация	Требует направляющих
Сильфонный компенсатор	Гофрированная металлическая гильза	50-500 мм	Высокие давления и температуры	Высокая компенсация	Дорогостоящий
П-образный компенсатор	Упругая деформация изогнутого участка	100-300 мм	Паровые и водяные сети	Простота изготовления	Большие габариты
Сальниковый компенсатор	Осевое перемещение в сальнике	150-500 мм	Низкие давления до 1,6 МПа	Большая компенсация	Требует обслуживания
Резиновый компенсатор	Деформация эластомера	25-100 мм	Вибрация и небольшие перемещения	Гашение вибраций	Ограниченная температура

Жесткие соединения представляют собой неподвижные узлы, которые не позво-

ляют элементам конструкции перемещаться при тепловом расширении. Они применяют-

ся на коротких участках, где величина теплового расширения незначительна и может быть воспринята за счет упругих деформаций материала. Преимущества жёстких соединений включают простоту конструкции, высокую надежность и отсутствие движущихся частей. Однако их применение ограничено длиной участков не более 20-30 м для металлических конструкций, поскольку при больших длинах возникают недопустимые напряжения.

Плавающие соединения характеризуются наличием одной неподвижной опоры и возможностью свободного перемещения в одном направлении. Такая схема позволяет элементу конструкции свободно расширяться или сжиматься под действием температуры.

Компенсаторные узлы включают специальные устройства, предназначенные для поглощения температурных деформаций. К ним относятся линзовые, сальфонные, сальниковые, резиновые и другие типы компенсаторов. Выбор типа компенсатора зависит от рабочих параметров системы: давления, температуры, агрессивности среды.

Расчет температурных зазоров является критически важным этапом проектирования узлов с компенсацией теплового расширения. Правильный расчет обеспечивает надежную работу конструкции в течение всего срока эксплуатации и предотвращает возникновение аварийных ситуаций.

Базовый расчет температурного зазора выполняется по формуле линейного расширения, но при этом необходимо учитывать ряд дополнительных факторов: неравномерность нагрева, влияние связей с другими элементами конструкции, возможные отклонения от расчетных температур, усадочные деформации:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

где:  $1,1 \leq K_1 \leq 1,3$  - коэффициент неравномерности нагрева;  $1,2 \leq K_2 \leq 1,5$  - коэффициент запаса;  $0,8 \leq K_3 \leq 1,0$  - коэффициент влияния связей.

При расчете зазоров для трубопроводных систем необходимо учитывать не только температуру транспортируемой среды, но и температуру окружающей среды, особенно для наружных трубопроводов. Разность между максимальной температурой эксплуатации и минимальной температурой монтажа определяет расчетный температурный пере-

пад.

Для полимерных материалов расчеты усложняются из-за нелинейной зависимости коэффициента расширения от температуры и времени нагружения. В таких случаях рекомендуется использовать специализированные программы расчета или проводить экспериментальные исследования.

Современная инженерная практика предлагает широкий спектр конструктивных решений для компенсации теплового расширения. Выбор оптимального решения зависит от конкретных условий эксплуатации, экономических факторов и требований к надежности системы.

Естественная компенсация основана на использовании упругих свойств самой конструкции. П-образные, Г-образные и Z-образные участки трубопроводов способны поглощать значительные температурные деформации за счет изгибных деформаций. Этот метод наиболее экономичен, но требует достаточного пространства для размещения компенсирующих участков.

Сальфонные компенсаторы представляют собой гофрированные металлические элементы, способные воспринимать осевые, радиальные и угловые перемещения. Они обеспечивают высокую компенсирующую способность при компактных размерах, но требуют качественного изготовления и правильной установки. При выборе сальфонного компенсатора учитываются следующие обстоятельства: компенсирующая способность должна превышать расчетное перемещение на 20-30 %; рабочее давление и температура должны соответствовать параметрам системы; материал сальфона должен быть совместим с рабочей средой; требуется регулярный контроль состояния сальфона

Скользящие опоры обеспечивают направленное перемещение элементов конструкции при сохранении их фиксации в перпендикулярных направлениях. Они широко применяются в трубопроводных системах большой протяженности и требуют качественной смазки и защиты от коррозии.

Современные тенденции в области компенсации теплового расширения направлены на повышение надежности, снижение эксплуатационных расходов и улучшение экологических характеристик систем. Активно развиваются новые материалы, конструктивные решения и методы расчета.

Перспективным направлением является использование материалов с памятью формы, которые способны автоматически изменять свою конфигурацию в зависимости от температуры. Такие материалы могут обеспечивать активную компенсацию температурных деформаций без внешнего управления.

Развитие композитных материалов открывает новые возможности создания компенсаторов с улучшенными характеристиками: высокой коррозионной стойкостью, малым весом и возможностью точного подбора коэффициента расширения.

Современные программные комплексы позволяют проводить точное моделирование температурных полей и напряжений в сложных конструкциях. Это обеспечивает опти-

мизацию решений и снижение материалоемкости конструкций.

Тенденции развития решений для компенсации теплового расширения: интеграция датчиков температуры и деформации для мониторинга состояния узлов; использование наноматериалов для повышения долговечности компенсаторов; разработка самодиагностирующихся систем компенсации; применение аддитивных технологий для изготовления сложных компенсаторов.

Будущее компенсации теплового расширения связано с развитием интеллектуальных систем, способных автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации и предотвращать аварийные ситуации на ранней стадии их развития.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таблицы компенсации теплового расширения узлов – Текст: электронный // URL: <https://inner.su/articles/tablitsy-kompensat>

sii-teplovogo-rasshireniya-uzlov/ (дата обращения: 05.11.2025).

УДК 621.039.534

**Щербин Сергей Анатольевич,**  
к.т.н., доцент, декан факультета технической кибернетики,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: dekan\_fik@angtu.ru  
**Гловов Валерий Андреевич,**  
студент гр. ТМм-24-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: valera.glotov.2002@mail.ru

### РЕКОНСТРУКЦИЯ ХОЛОДИЛЬНИКА СТОЧНЫХ ВОД В ПРОИЗВОДСТВЕ ДИХЛОРЭТАНА И ХЛОРИСТОГО ВИНИЛА

*Shcherbin S.A., Glotov V.A.*

### RECONSTRUCTION OF THE WASTEWATER REFRIGERATOR IN THE PRODUCTION OF DICHLOROETHANE AND VINYL CHLORIDE

**Аннотация.** В статье рассматривается вариант решения проблемы низкой эффективности кожухотрубчатого аппарата для охлаждения сточных вод в производстве дихлорэтана и хлористого винила. Предложен вариант реконструкции теплообменника, позволяющий повысить его эффективность.

**Ключевые слова:** кожухотрубчатый теплообменник, реконструкция теплообменного аппарата, теплопередача, гидравлическое сопротивление.

**Abstract.** A solution to the problem of low efficiency of a shell-and-tube apparatus for cooling wastewater in the production of dichloroethane and vinyl chloride is being considered. A variant of the heat exchanger reconstruction is proposed, which makes it possible to increase its efficiency.

**Keywords:** shell-and-tube apparatus, reconstruction of the heat exchanger heat transfer, hydraulic resistance.

Поливинилхлорид (ПВХ) – это универсальный полимер, из которого получают

огромный спектр пластмассовых изделий, как пластифицированных, так и непластифици-