

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 4. С. 188–195
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 4, pp. 188–195

Научная статья
УДК 621.565.093
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185067>
EDN: <https://www.elibrary.ru/LWHXOA>

Упруго-пластическое состояние конструкции труб, устанавливаемых в трубной решетке теплообменника, при использовании электровзрывного импульса

Е.Э. Вологин¹✉, А.А. Кудрявцев², А.А. Пыхалов³

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Российская Федерация

¹vologinee@ex.istu.edu✉

Аннотация. Проведено исследование упруго-пластического состояния труб, предназначенных для соединения с трубной решеткой теплообменного аппарата. Раздача трубы производится давлением создаваемым электровзрывным импульсом. Таким образом, представленное исследование направлено на предварительное изучение упруго-пластического поведения трубы с использованием экспериментальных данных и скоростной фотосъемки, позволивших определить величину и характер деформационных перемещений трубы. Эти данные использованы для создания численной модели, которая позволяет варьировать величины импульсного давления и других параметров представленного процесса. На основе этих данных осуществляется компоновка трубы в трубной решетке. Численное моделирование проводилось на основе конечно-элементного анализа упруго-пластического состояния трубы. Результаты работы подтвердили возможность промышленного применения представленной технологии соединения труб и трубной решетки теплообменника.

Ключевые слова: Теплообменник, труба, трубная решетка, импульсный источник давления, скоростная фотосъемка, упруго-пластическое напряженно-деформированное состояние трубы

Для цитирования. Вологин Е.Э., Кудрявцев А.А., Пыхалов А.А. Упруго-пластическое состояние конструкции труб, устанавливаемых в трубной решетке теплообменника, при использовании электровзрывного импульса // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 4. С. 188–195. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185067>

Original article

The elastic-plastic state of the structure of pipes installed in the tube grid of the heat exchanger when using an electric explosive pulse

E.E. Vologin¹✉, A.A. Kudryavtsev², A.A. Pykhalov³

^{1,2,3}Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Irkutsk National Research Technical University”, Irkutsk, Russian Federation

³Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Irkutsk State Transport University”, Irkutsk, Russian Federation

¹vologinee@ex.istu.edu✉

Abstract. The study of the elastic-plastic state of pipes intended for connection to the tube grid of the heat exchanger is carried out. The pipe is distributed by pressure generated by an electric explosive pulse. Thus, the presented study is aimed at a preliminary study of the elastic-plastic behavior of the pipe using experimental data and high-speed photography, which made it possible to determine the magnitude and nature of the deformation movements of the pipe. These data are used to create a numerical model that allows you to vary the values of the pulse pressure and other parameters of the presented process. Based on these data, the pipe is arranged in a pipe grid. Numerical modeling was carried out on the basis of finite element analysis of the elastic-plastic state of the pipe. The results of the work confirmed the possibility of industrial application of the presented technology for connecting pipes and a tube grid of a heat exchanger.

Keywords: heat exchanger, pipe, pipe grating, pulsed pressure source, high-speed photography, elastic-plastic stress-strain state

For citation. Vologin E.E., Kudryavtsev A.A., Pykhalov A.A. The elastic-plastic state of the structure of pipes installed in the tube grid of the heat exchanger when using an electric explosive pulse. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 4, pp. 188–195. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185067>

Введение (Introduction)

Технологические процессы, связанные с различными температурными режимами работы оборудования, используются во многих энергоемких отраслях промышленности, в частности, на летательных аппаратах (ЛА) и двигателях. Основным оборудованием (около 30–40 %), предназначенным для передачи тепла от одних сред к другим, являются теплообменники (теплообменные аппараты). Надежность и долговечность их работы при высоких температурах и давлениях, в агрессивных средах и колебательных нагрузках, определяется качеством соединения «труба – трубная решетка» [1–3], принципиальная схема которого представлена на рисунке 1.

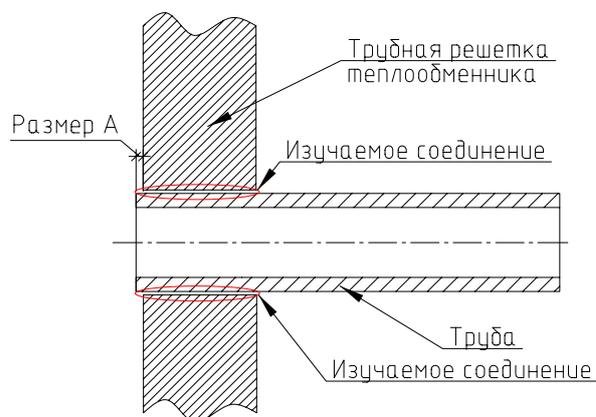


Рис. 1. Принципиальная схема соединения «труба – трубная решетка» теплообменника

Fig. 1. The schematic diagram of the “pipe – pipe grid” connection of the heat exchanger is shown

Это соединение должно обладать высокой прочностью, герметичностью и коррозионной стойкостью. Основными способами соединения являются: развальцовка, пайка, сварка или их комбинация. Недостатком развальцовки является высокая вероятность нарушения плотности соединения, например, при транспортировке, монтаже и других нагрузках, возникающих в эксплуатации. Традиционная сварка и пайка повышают надежность работы соединения, однако в несколько раз увеличивают затраты времени на монтаж или ремонт аппарата, при этом, работы выполняются только в доступных для сварки и пайки местах. Важным обстоятельством также является то, что нагрузки, которые воспринимает труба (давление, температурное воздействие и вибрации), передаются через сварочный шов, а между контактной поверхностью трубы и трубной решеткой образуется зазор, что приводит к дальнейшему разрушению соединения и выходу из строя теплообменного аппарата в целом [3–9].

Поскольку каждый из представленных традиционных способов соединения не лишен недостатков, то, при внедрении принципиально новых технологий, должны рассматриваться лишь такие, которые являются более технологичными и отвечающими схожему или превышающему уровню прочности и надежности.

Одним из таких, предлагаемых, способов крепления труб в трубных решетках является раздача трубы давлением, создаваемым энергией электровзрывного проводника (ЭВП) [10–17], где закон выделения энергии имеет характер переходного процесса в разрядном контуре.

Цель представленной работы состоит в изучении кинетики раздачи трубы, то есть, ее напряженно-деформированного упругопластического состояния, полученного на основе скоростной фотосъемки, и использованного для создания конечно-элементной (КЭ) модели, с решением задач физической и геометрической нелинейности, с целью подбора внутреннего давления в трубе и других параметров, обеспечивающих устойчивость технологического процесса последующего соединения «труба – трубная решетка».

Технология применения ЭВП состоит из следующих этапов [10]:

- изготовление электровзрывного картриджа,
- подготовка изделия и импульсного генератора к работе,

– подача электрического напряжения на электровзрывной проводник.

Тем самым, создается импульс давления и происходит монтаж трубы в трубную решетку. Затем проводится проверка качества соединения методом неразрушающего контроля [10].

Существующая база реализации технологии ЭВП построена на эмпирических принципах, использующих данные специального натурального эксперимента. Одна из таких технологий представлена в работе [10]. Для ее реализации, используется специальная установка, включающая в себя (рис. 2, схема справа) импульсный генератор и электровзрывной картридж (рис. 2, схема слева), заполненный водой и включающий в себя электро-проводник (схема рис. 2).

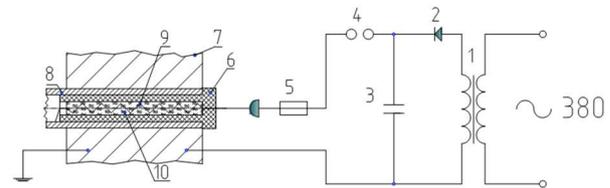


Рис. 2. Импульсный генератор: 1) высоковольтный трансформатор; 2) высоковольтный выпрямитель; 3) батарея конденсаторов; 4) разрядник; 5) электрод; 6) электровзрывной патрон; 7) трубная решетка; 8) труба; 9) взрывающийся проводник; 10) водная среда

Fig. 2. Pulse generator: 1) a high-voltage transformer; 2) a high-voltage rectifier; 3) a capacitor bank; 4) a spark gap; 5) an electrode; 6) an electric explosive cartridge; 7) a grid; 8) a pipe; 9) an exploding conductor; 10) water environment

Монтаж трубы в трубную решетку теплообменника происходит при помощи раздачи трубы импульсом давления, создаваемого энергией электровзрывного проводника. Давление импульса зависит от ряда параметров, в частности, от конструктивных особенностей электровзрывного патрона, закона выделения энергии в проводнике и других. Тем самым, достигается получение необходимого распределения давления в трубе.

Регистрация деформирования металлических труб высокоскоростной камерой (*Registration of deformation of metal pipes by a high-speed camera*)

Натурный эксперимент проводился на образце трубы, которая предназначена для дальнейшего использования в теплообменнике. Труба подвергалась нагружению внутренним давлени-

нием от электроимпульсного воздействия. Для получения полной картины величин деформационных перемещений трубы, на всем промежутке времени проведения эксперимента, использовалась высокоскоростная камера.

В эксперименте использовалось несколько образцов труб:

- из алюминиевого сплава АД1 диаметром 28 мм и толщиной стенки 4 мм (28x4 мм)
- и из латуни Л70, Л63 диаметром 25x2,5 мм.

Съемку скоростного деформирования осуществляли оптико-механической камерой СФР-2М в режиме теневой покадровой съемки со скоростью $1,75 \times 10^6$ кадров в секунду. Схема съемки представлена на рис. 3.

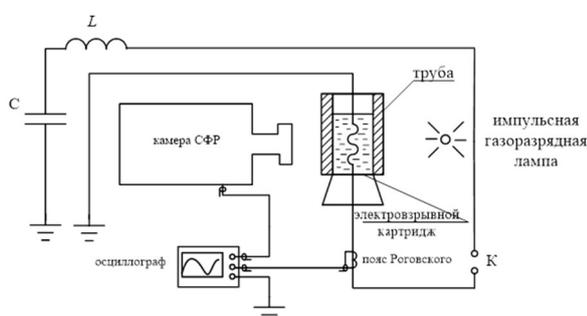


Рис. 3. Схема испытания при исследовании скоростного деформирования труб с помощью СФР: *K* – коммутатор; *C* – емкость батареи; СФР – скоростной фоторегистратор

Fig. 3. Test scheme for studying high-speed deformation of pipes using a high-speed photo recorder: *K* – switch; *C* – battery capacity; SFR – high-speed photo recorder

Ключевым аспектом использования сверхскоростной фоторегистрирующей установки (СФР) (рис. 3) является синхронизация во времени срабатывания:

- импульсного генератора (ИГ),
- импульсной газоразрядной лампы (ИГЛ)
- и осциллографа.

То есть, синхронизация СФР с явлением скоростного деформирования осуществлялась с помощью специального блока СФР. Сигнал с импульсного генератора поступал в электронный блок пульта управления (ПУ) СФР. После чего происходило срабатывание затвора и выдача иницирующего импульса, которым запускался коммутатор ИГ. Синхронизация СФР и подсветки в процессе деформирования обеспечивается с помощью дополнительного разрядного промежутка, включенного последовательно с коммутатором, который срабатывает одновременно с СФР.

Результаты регистрации деформационных перемещений трубы представлены на рис. 4, 5 [15–17]. По результатам съемки получены кадры с временным интервалом 0,572 мкс.

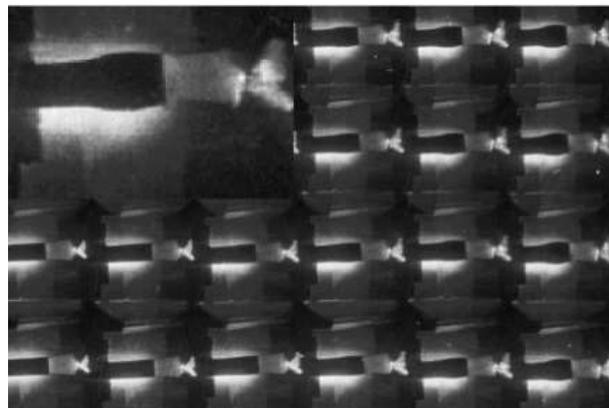


Рис. 4. Кадры скоростного деформирования латунной трубы Л70 Ø25x2,5 мм

Fig. 4. Frames of high-speed deformation of brass pipe L70 Ø25x2,5 mm

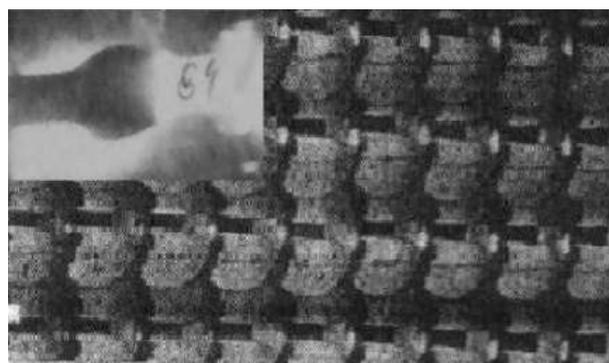


Рис. 5. Кадры скоростного деформирования алюминиевой трубы АД1 Ø28x4 мм

Fig. 5. Frames of high-speed deformation of aluminum pipe AD1 Ø28x4 mm

Каждый образец трубы, представленный на кадре, предварительно делился на 8–10 поперечных сечений с одинаковым расстоянием (рис. 6). Для калибровки и оценки деформации определялся поправочный коэффициент (K_s), который записывается в виде

$$K_s = \frac{D_{вн}}{D_{внS}}, \quad (1)$$

где $D_{вн}$ – внешний радиус деформированной трубы на кадре, мм; $D_{внS}$ – исходный внешний радиус деформированной трубы.

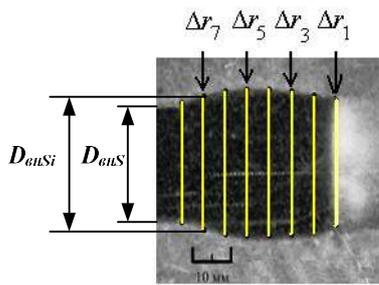


Рис. 6. Кадр скоростного деформирования трубы
 Fig. 6. Frame of high-speed deformation of a pipe

На представленном кадре (рис. 6), обозначены $D_{внS}$, $D_{внSi}$ – диаметр деформируемого участка трубы в сечении, которые используются для получения оценки абсолютной величины деформации Δr_i . Δr_i по формуле:

$$\Delta r_i = K_S \frac{D_{внSi} - D_{внS}}{2}, \quad (2)$$

По результатам теневой съемки скоростного деформирования построены зависимости приращения радиуса трубы (Δr) в произвольно взятых сечениях, с использованием формул выше (1) и (2) построены графики значений деформации в выбранных сечениях трубы (таблица 1). В верхней строке таблицы представлены четные измерения сечений, в нижней строке нечетные.

Таблица 1.

Значения деформации трубы из сплава АД1	Значения деформации трубы из сплава Л170

Основным недостатком экспериментального метода деформирования с помощью ЭВП является сложность в получении (подборе) параметров пластичности деформации, достаточной для необходимого уровня контактного давления между трубой и трубной решеткой, а также позици-

онирование трубы в трубной решетке. Поэтому, полученная с помощью СФР картина деформаций использована при построении математической конечно-элементной модели.

Построение конечно-элементной (КЭ) модели трубы (Construction of a finite element model of a pipe)

Модель построена для решения упруго-пластической задачи напряженно-деформированного состояния (НДС), с целью подбора внутреннего давления в трубе, получением картины пластического поведения трубы и остаточных деформаций, соответствующих данным натурального эксперимента.

Свойство пластичности металла позволяет ему, под влиянием внешних сил, менять форму и размеры, а также сохранять эти изменения после завершения воздействия и при этом не разрушаться, поддерживая изначальную структуру материала [18, 19, 20].

Определить теоретически величину и характер распределения давления в данном упруго-пластическом деформировании не представляется возможным. В связи с этим целесообразно использовать данные из эксперимента, при котором труба претерпевает воздействие внутреннего давления, создаваемого ЭВП, а изменение ее размеров регистрируется сверхскоростной фоторегистрирующей установкой.

Численное исследование напряженно-деформированного состояния трубы проведено на ее КЭ модели включая зону предполагаемого соединения с трубной решеткой, а также с учетом установки (позиционирования) электровзрывного картриджа. КЭ модель построена в программном комплексе FEMAP.

Моделирование трубы под давлением проводилось без контакта с трубной решеткой. Полученное поле деформационных перемещений трубы необходимо для последующей оценки влияния трубной решетки на распределение остаточных напряжений в переходной зоне трубы.

При построении конечно-элементной модели трубы использовалась ее осевая симметрия, что позволило иметь КЭ сетку, необходимую для решения упругопластической задачи НДС [21, 22]. Геометрическая модель, граничные условия и нагрузка в трубе представлена на рисунке 7.



Рис. 7. Геометрическая модель трубы

Fig. 7. Geometric model of the pipe

Величина нагружения, осесимметричной относительно оси x в модели трубы, внутренним давлением, представлена на рисунке 8. Также, ниже на рисунке указаны нагрузки, подобранные по деформационным перемещениям, полученным в натурном эксперименте с использованием скоростной фотосъемки.

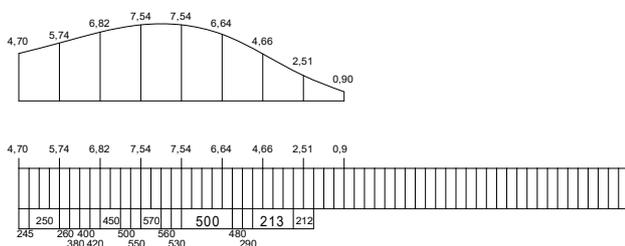


Рис. 8. Модель трубы с подобранной нагрузкой по деформационным перемещениям

Fig. 8. A pipe model with a matched strain displacement load

Граничные условия в модели использовались 2-х типов:

- выделения осевой симметрии
- и торцевое крепление трубы справа в осевом направлении (рис. 7).

Исследовалась труба из алюминиевого сплава АД1 диаметром 28 мм и толщиной стенки 4 мм.

Для генерации сетки КЭ (рис. 9) использовались объемные изопараметрические конечные элементы в цилиндрической системе координат.

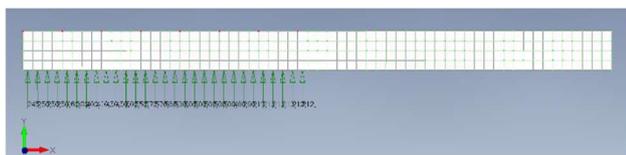
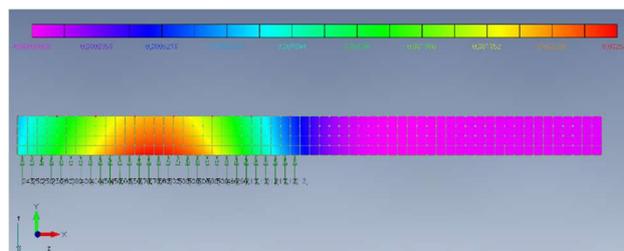


Рис. 9. Модель трубы

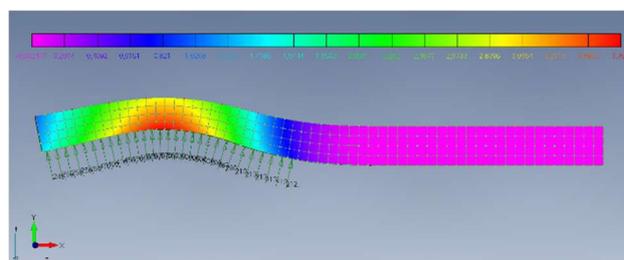
Fig. 9. Pipe model

На рисунке 10 (а, б, в, г) представлена кинетика упругопластического напряженно-деформированного состояния трубы при воздействии

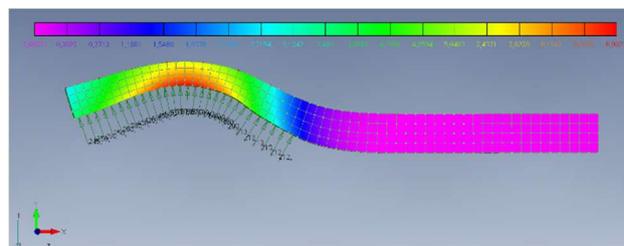
внутреннего давления, создаваемого электроимпульсным воздействием (ЭИВ), где: на рисунке 10 а – поле напряжений в начале ЭИВ; на рисунке 10 б и 10 в поля промежуточных напряжений и деформаций, и на рисунке 10 г – поле напряжений и деформаций в конце воздействия ЭИВ.



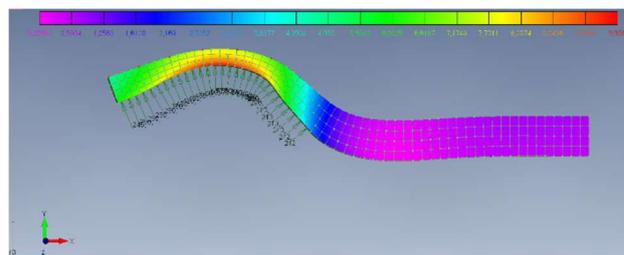
а



б



в



г

Рис. 10. Упругопластическое напряженно-деформированное состояние трубы при воздействии внутреннего давления, создаваемого электроимпульсным воздействием (ЭИВ): а) Напряжения в начале ЭИВ; б) Промежуточное напряжение; в) Промежуточное напряжение; г) Напряжения в конце ЭИВ

Fig. 10. The elastoplastic stress-strain state of a pipe under the influence of internal pressure created by an electric pulse action (EIV): а) Stresses at the beginning of the EIV; б) Intermediate stress; в) Intermediate stress; г) Stresses at the end of the EIV

Сравнение результатов (рис. 11) начального и конечного состояния трубы подтверждает достоверность деформационного поведения КЭ модели и образца трубы в натурном эксперименте. То есть, процесс сопровождается таким же уровнем деформационных перемещений, что и на всех шагах решения упругопластической задачи напряженно-деформированного состояния трубы. Также, в частности, это подтверждается тем, что деформации по продольной оси x сопровождаются смещением трубы адекватно натурному эксперименту.

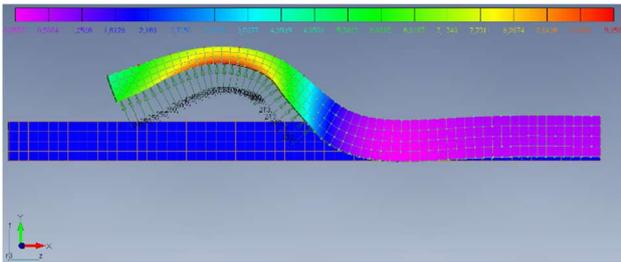


Рис. 11. Сравнение начального и конечного состояния трубы
Fig. 11. Comparison of the initial and final state of the pipe

Заключение (Conclusions)

Представленный подход определения внутреннего давления в трубе и других параметров, необходимых для применения ЭВП для соединения трубы и трубной решетки, предполагает, как натурный эксперимент воздействия давления от электро-импульса на трубу с использованием скоростной теневой фоторегистрации деформаций трубы, так и численное исследование, проведенное на основе метода конечных элементов (МКЭ), при решении физически и геометрически-нелинейной задачи.

На основе полученных снимков экспериментального исследования построены графики кинетики деформационных перемещений в зависимости от приращения нагрузки от воздействия ЭВП и, соответственно радиуса трубы в ее поперечных сечениях. Полученные результаты позволили на основе решения МКЭ определить величину внутреннего силового давления в трубе (и другие параметры) от электро-импульса.

Полученные результаты показали перспективность представленной технологии для сборки теплообменника. Однако, остались неизвестными ряд параметров, которые можно опреде-

лить при дополнительном моделировании контактного взаимодействия упругопластического поведения трубы и трубной решетки.

Список источников

1. Бажан П.И., Каневец Г.И., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 369 с.
2. Головинцов А.Г., Юдаев Б.Н., Федотов Е.И. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Машиностроение, 1970. 296 с.
3. Степанов В.Г. Основы технологии развальцовки труб в судовых теплообменных аппаратах. Л., 1972. 189 с.
4. Китаев А.М., Губин А.Н. Сварка и пайка тонкостенных трубопроводов. М.: Машиностроение, 1972. 133 с.
5. Анзин А.К., Бродский А.Я., Швецов Н.Т. Слесарно-сварочные приспособления в самолетостроении. М.: Оборонгиз, 1949. 312 с.
6. Макаренко В.Д., Палий Р.В., М.Ю. Мухин М.Ю. и др. Технологические свойства монтажной сварки трубопроводов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. 118 с.
7. Юхин Н.А. Дефекты сварных швов и соединений». М.: Издательство «СОУЭЛО», 2007. 56 с.
8. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. Киев: Высшая школа, 1987. 245 с.
9. Деев Г.Ф., Пацкевич И.Р. Дефекты сварных швов. Киев: Издательство «Наукова думка», 1984. 208 с.
10. Вологин Е.Э., Пыхалов А.А., Потапов В.В. Технология производства и ремонта теплообменного оборудования с применением электровзрывного импульса // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 2. С. 68–78.
11. Мазуровский Б.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. Киев: Наукова Думка, 1980. 172 с.
12. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 253 с.
13. Колмаков В.П., Дмитриев В.Г., Чеботнягин Л.М. Соединение трубчатых деталей электрическим взрывом проводника: Иркутск: Издательство ИрГТУ, 2011. 152 с.
14. Чеботнягин Л.М., Потапов В.В. Некоторые закономерности скоростного деформирования металлической трубы с помощью электрического взрыва проводника. Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций // II Всероссийская конференция «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций»: тезисы докладов. Новосибирск: НГТУ, 2011. С. 127.
15. Чеботнягин Л.М. Соединение трубчатых деталей импульсным давлением расширяющегося плазменного канала электрического разряда: дисс. ... канд. техн. наук: Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014. 137 с.
16. Чеботнягин Л.М., Потапов В.В., Лопатин В.В. Кинетика деформирования сплавов импульсным давлени-

- нием электрического разряда // Известия Вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 1. С. 51–56.
17. Райнхарт Дж.С., Пирсон Дж. Поведение металлов при импульсивных нагрузках. М.: Издательство «Иностранной литературы», 1958. 296 с.
 18. Скрипов В.П., Файзуллин М.З. Фазовые переходы кристалл-жидкость-пар и термодинамическое подобие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 160 с.
 19. Пыхалов А.А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: дисс. ... д-ра. техн. наук. М.: Московский государственный авиационный институт, 2006. 405 с.
 20. Пыхалов А.А., Милов А.Е. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 192 с.
 21. Гиззатуллин А.А., Ризванов Р.Г., Хабирова Г.Ф. Численное моделирование процесса развальцовки трубы в трубной решетке теплообменника // Нефтегазовое дело. 2006. Т. 2. 14 с.
 22. Ластовка А.В., Деордиев С.В., Мурзинцев А.К. Моделирование напряженно-деформированного состояния усиленной композитной арматурой бетонной балки. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13, № 4. С. 645–654.
 9. Deev GF., Patskevich IR. *Defects in welds*. Kyiv: Naukova dumka; 1984. 208 p. (In Russ.).
 10. Vologin EE, Pykhalov AA, Potapov VV. Technology of heat exchange equipment manufacturing and repair with electric-explosive impulse application. *Thermal processes in engineering*. 2024;16(2):68–78. (In Russ.).
 11. Mazurovskii BYa. *Electrohydroimpulse pressing of pipes in tube arrays of heat exchangers*. Kyiv: Naukova dumka; 1980. 172 p. (In Russ.).
 12. Yutkin LA. *Electrohydraulic effect and its application in industry*. Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 253 p. (In Russ.).
 13. Kolmakov VP, Dmitriev VG, Chebotnyagin LM. *Connection of tubular parts by electric explosion of the conductor*. Irkutsk; 2011. 152 p. (In Russ.).
 14. Chebotnyagin LM, Potapov VV. Some patterns of high-speed deformation of a metal pipe by means of an electric explosion of a conductor. *II Vserossiiskaya konferentsiya «Deformirovanie i razrushenie strukturno-neodnorodnykh sred i konstruktzii»: tezisy dokladov*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet; 2011, 127 p. (In Russ.).
 15. Chebotnyagin LM. *Connection of tubular parts by pulsed pressure of an expanding plasma channel of an electric discharge*. Tomsk: Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet; 2014. 137 p. (In Russ.).
 16. Chebotnyagin LM, Potapov VV, Lopatin VV. *Kinetics of deformation of alloys by pulsed electric pressure*. Russian Physics Journal. 2015;58(1):51–56. (In Russ.).
 17. Rinehart JS, Pearson J. *Behavior of metals under impulsive loads*. Ohio; The American Society for Metals Cleveland. 1954. (In Russ.).
 18. Skripov VP, Faizullin MZ. *Crystal-liquid-vapor phase transitions and thermodynamic similarity*. Moscow: FIZMATLIT; 2003. 160 p. (In Russ.).
 19. Pykhalov AA. *The contact problem of static and dynamic analysis of prefabricated rotors of turbomachines*. Moscow: Moscow Aviation Institute; 2006. 405 p. (In Russ.).
 20. Pykhalov AA, Milov AE. *The contact problem of static and dynamic analysis of prefabricated rotors of turbomachines*. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet; 2007. 192 p. (In Russ.).
 21. Gizzatullin AA, Rizvanov RG, Khabirova GF. Numerical modeling of the process of tube flaring in a heat exchanger tube sheet. *Oil and Gas Business*. 2006;2:14. (In Russ.).
 22. Lastovka A.V., Deordiev S.V., Murzintsev A.K. Stress-strain modelling for a composite reinforced concrete beam. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhmost*. 2023;13(4):645–654.

References

1. Bazhan PI, Kanevets GI, Seliverstov VM. *Handbook of heat exchangers*. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 369 p. (In Russ.).
2. Golovintsov AG, Yudaev BN, Fedotov EI. *Technical thermodynamics and heat transfer*. Moscow: Mashinostroenie; 1970. 296 p. (In Russ.).
3. Stepanov VG. *Fundamentals of pipe flaring technology in marine heat exchangers*. Leningrad; 1972. 189 p. (In Russ.).
4. Kitaev AM, Gubin AN. *Welding and soldering of thin-walled pipelines*. Moscow: Mashinostroenie; 1972. 133 p. (In Russ.).
5. Anzin AK, Brodskii AYa, Shvetskov NT. *Locksmith and welding devices in aircraft construction*. Moscow, Oborongiz; 1949. 312 p. (In Russ.).
6. Makarenko VD, Palii RV, Mukhin MYu et al. *Technological properties of installation welding of pipelines*. Moscow: Nedra-Biznestsentr; 2001. 118 p. (In Russ.).
7. Yukhin NA. *Defects in welds and joints*. Moscow: SOUEHLO; 2007. 56 p. (In Russ.).
8. Kasatkin BS, Prokhorenko VM, Chertov IM. *Stresses and deformations during welding*. Kiev: Vysshaya shkola; 1987. 245 p. (In Russ.).