

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 4. С. 174–182
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 4, pp. 174–182

Научная статья
УДК 621.565.093
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188543>
EDN: <https://www.elibrary.ru/CVOJKC>

Упруго-пластический анализ соединения трубок и трубной решетки теплообменника, осуществляемого электроимпульсным воздействием

Е.Э. Вологин^{1✉}, А.А. Кудрявцев², А.А. Пыхалов³

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

¹Vologinee@ex.istu.edu✉

Аннотация. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния сборной конструкции труб и трубной решетки в теплообменнике при воздействии внутреннего давления, создаваемого электровзрывным импульсом. Величина давления получена с использованием экспериментальных данных по уровню деформаций трубы, полученных на основе фиксации скоростной фотосъемкой. Эти данные использовались в численном эксперименте анализа изменения величины импульсного давления, в конечно-элементном расчете упруго-пластического состояния трубы, с решением контактной задачи сопряжения трубы и трубной решетки. Результаты работы представлены в виде полей напряжений и контактных сил в рассматриваемой конструкции. Натурный образец сборной конструкции трубы и трубной решетки подвергался дополнительно проверке на герметичность и разрыв. Анализ результатов показал возможность применения технологии соединения труб и трубной решетки, на основе методологического подхода расчета параметров представленного соединения, для промышленной реализации.

Ключевые слова: теплообменник, труба, трубная решетка, импульсный источник давления, контактная задача теории твердого деформированного тела

Для цитирования. Вологин Е.Э., Кудрявцев А.А., Пыхалов А.А. Упруго-пластический анализ соединения трубок и трубной решетки теплообменника, осуществляемого электроимпульсным воздействием // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 4. С. 174–182. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188543>

Original article

Analysis of the elastic-plastic state of the structure of the connection of tubes and a tube grid of a heat exchanger using an electric explosive pulse in solving the contact problem of the finite element method

E.E. Vologin^{1✉}, 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*

¹*warevgen@yandex.ru✉*

Abstract. A heat exchanger is an essential component of energy systems used in industries such as industrial power generation, aviation, general engineering, and the chemical industry. The reliability and durability of their operation under high heat transfer gradients, as well as in aggressive environments and under dynamic conditions, are determined by the quality of the tube-to-tubesheet connection. This connection is the most critical component in a heat exchanger, requiring high sealing, strength, and corrosion resistance. The objective of the presented work is to develop a methodological approach for calculating the parameters of the connection of a tube and a tube sheet of a heat exchanger by an electric explosion, based on the FEM with an elastic-plastic solution of the contact problem and the use of data from a full-scale experiment. A study was conducted on the stress-strain state of a pipe-tubesheet joint under the influence of internal pressure generated by an electric explosive pulse. The nature of the stress state in the joint area is determined by the elastic-plastic deformation of the materials in contact during pipe expansion. With EEP, this process is short-lived, and the pressure, as an influencing factor, is distributed unevenly along the length of the joint, with its value varying widely. The pressure value was determined using experimental data on the level of pipe deformations, obtained from high-speed photography. These data were used in a numerical experiment to select the pulse pressure value, in a finite element analysis of the elastic-plastic state of the pipe, and in solving the contact problem of the pipe-tubesheet joint. The results are presented as stress fields and contact forces in the structure under consideration. The stress level obtained during the numerical experiment does not exceed the values permissible for strength conditions. The obtained results confirm the reliability of the deformation behavior in the full-scale experiment and the finite element model. That is, the process is accompanied by the same level of deformation as during the steps of solving the elastoplastic stress-strain problem for the pipe and tubesheet. A full-scale specimen of the assembled pipe-tubesheet assembly was additionally tested for leak tightness and rupture. Analysis of the results demonstrated the feasibility of industrial-scale application of the pipe-tubesheet joint technology, based on a methodological approach to calculating the parameters of the presented joint.

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. Analysis of the elastic-plastic state of the structure of the connection of tubes and a tube grid of a heat exchanger using an electric explosive pulse in solving the contact problem of the finite element method. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 4, pp. 174–182. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188543>

Введение (*Introduction*)

Теплообменник является одним из необходимых агрегатов энергетических систем, применяемых в таких отраслях как промышленная энер-

гетика, авиация, общее машиностроение, химическая промышленность и другие. Надежность и долговечность их работы при высоких градиентах параметров теплообмена, а также в агрес-

сивных средах и в условиях динамического воздействия определяется качеством соединения труба – трубная решетка [1–3].

То есть, представленное соединение является наиболее ответственным узлом в теплообменнике, которое должно обладать высокими параметрами герметичности, прочности, а также коррозионной стойкости.

Традиционными способами соединения являются: развальцовка, пайка, сварка или их комбинация. Недостатки данных способов соединения представлены в работах [4, 5]. Основным недостатком является высокая вероятность нарушения герметичности соединения, возникающие в эксплуатации, высокая стоимость ремонта и низкий уровень технологичности.

Таким образом, разработка перспективных высокотехнологических способов представленного соединения является актуальной задачей. Одним из таких подходов компоновки соединения, осуществляемого посредством внутреннего давления в трубе, создаваемого энергией электровзрывного проводника (ЭВП) [4–12]. Представленный в работе [4] натурный эксперимент показал качественную картину возможности использования данной технологии соединения. Однако, в этом случае возникает проблема разброса параметров самого соединения: разные виды материалов трубы и трубной решетки, разные диаметры соединений, подбор параметров электровзрыва и др. Решение этих проблем возможно с использованием современных компьютерных технологий, например, в виде численного анализа, например, методом конечных элементов (МКЭ).

Цель представленной работы состоит в разработке методологического подхода расчета параметров соединения трубы и трубной решетки теплообменника электрическим взрывом, на основе МКЭ с упругопластическим решением контактной задачи и использованием данных натурального эксперимента [2]. Разработка методологического подхода предполагает его дальнейшее промышленное использование.

Построению конечно-элементной (КЭ) модели предназначена для анализа упруго-пластического состояния твердого деформированного тела, с решением контактной задачи и определении параметров соединения на основе электровзрыва, обеспечивающего герметичность и прочность соединения трубы и трубной решетки.

Схема изучаемого соединения представлена на рисунке 1.

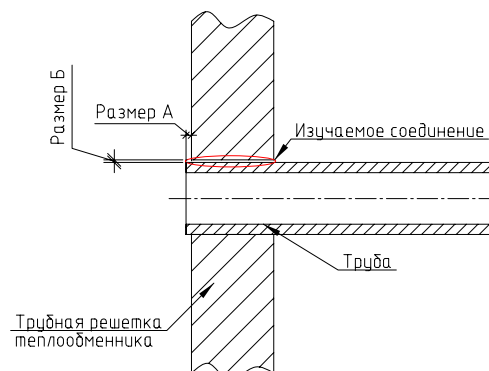


Рис.1. Принципиальная схема размещения трубы в трубной решетке

Fig. 1. Schematic diagram of the pipe arrangement in the tube sheet

Технология применения ЭВП состоит из следующих этапов [4, 5]:

- изготовление электровзрывного картриджа,
- установка трубы в трубную решетку,
- установка электровзрывного патрона в трубу,
- создание импульса генератором,
- проверка качества соединения.

Для реализации технологии используется специальная установка [4, 5], включающая в себя импульсный генератор (рис. 2, схема справа) и электровзрывной картридж (рис. 2, схема слева), заполненный водой и включающий в себя электро-проводник.

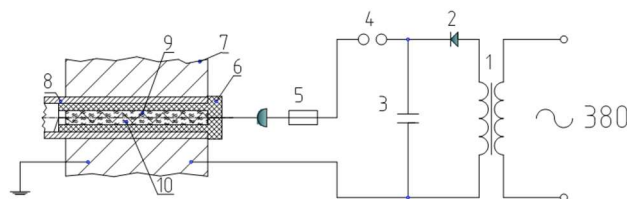


Рис. 2. Импульсный генератор: 1) высоковольтный трансформатор; 2) высоковольтный выпрямитель; 3) батарея конденсаторов; 4) разрядник; 5) электрод; 6) электровзрывной патрон; 7) трубная решетка; 8) труба; 9) взрывающийся проводник; 10) водная среда

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

Получение необходимого соединения трубы и трубной решетки теплообменника происходит при помощи раздачи трубы под давлением импульса, создаваемого энергией электровзрывного

проводника. Давление импульса зависит от электровзрывного патрона, конструктивные особенности которого определяют параметры выделения энергии в проводнике и, тем самым, закон распределения давления в трубе.

Проходящий по проводнику ток вызывает резкое повышение его температуры, вплоть до разрушения проводника и, тем самым, обеспечивается вскипание воды, приводящее к кратковременному возрастанию давления на внутреннюю поверхность трубы.

Под действием давления, труба раздается, претерпевая упруго-пластическое деформирование, и заполняет зазор (рис. 1). После прекращения действующего силового фактора между трубой и стенкой возникает контактное давление, обусловленное упругими силами остаточных деформаций. Таким образом, труба со стенкой образуют между собой посадку с натягом. Характеристики напряженно-деформированного состояния вблизи всей сопрягаемой поверхности являются определяющим фактором в обеспечении герметичности и прочности теплообменника.

Для прогнозирования работоспособности теплообменника, в части обеспечения заданных режимов теплообмена в процессе эксплуатации, в конечно-элементной модели используются данные натурного эксперимента полученные на основе скоростной фотосъемки деформирования трубы [5]. Тем самым обеспечивается подбор величины импульсного давления в конечно-элементном анализе упруго-пластического состояния трубы, с решением контактной задачи механики деформируемого твердого тела сопряжения трубы и трубной решетки.

Поскольку характеристики напряженного состояния обуславливают герметичность и прочность соединения, то их определение является одной из важнейших задач в исследовании узла теплообменника «труба-трубная решетка».

Построение конечно-элементной (КЭ) модели сборной конструкции трубы и трубной решетки с решением контактной задачи (Construction of a finite element model of a pipe)

КЭ модель предназначена для решения упругопластической задачи напряженно-деформированного состояния (НДС) и получения картины деформаций, соответствующих данным натурального эксперимента.

Характер напряженного состояния в области стыка определяются течением процесса упруго-пластического деформирования материалов контактирующих элементов при раздаче трубы. С использованием ЭВП этот процесс является краткосрочным, при этом давление, как действующий фактор, распределено по длине участка стыка неравномерно и его значение изменяется в очень широких пределах.

В связи с этим целесообразно использовать данные из предварительного эксперимента, при котором труба испытывается отдельно (без трубной решетки). Она претерпевает воздействие внутреннего давления, создаваемого ЭВП, а изменение ее размеров регистрируется сверхскоростной фоторегистрирующей установкой. Труба в этом случае, не имея подпора снаружи, раздается (подвергается пластической деформации) до величин отклонения размеров, предшествующих моменту ее разрушения.

В эксперименте использовалась труба из алюминиевого сплава АД1 диаметром 28 мм и толщиной стенки 4 мм (28×4 мм).

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

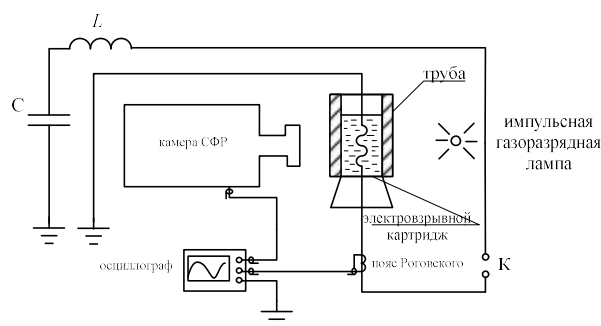


Рис. 3. Схема испытания при исследовании скоростного деформирования труб с помощью СФР: К – коммутатор; С – емкость батареи; СФР – скоростной фоторегистратор

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

Результаты регистрации деформаций трубы представлены на рисунке 4. Точками на снимке обозначены сечения диаметров для вычисления деформаций трубы.

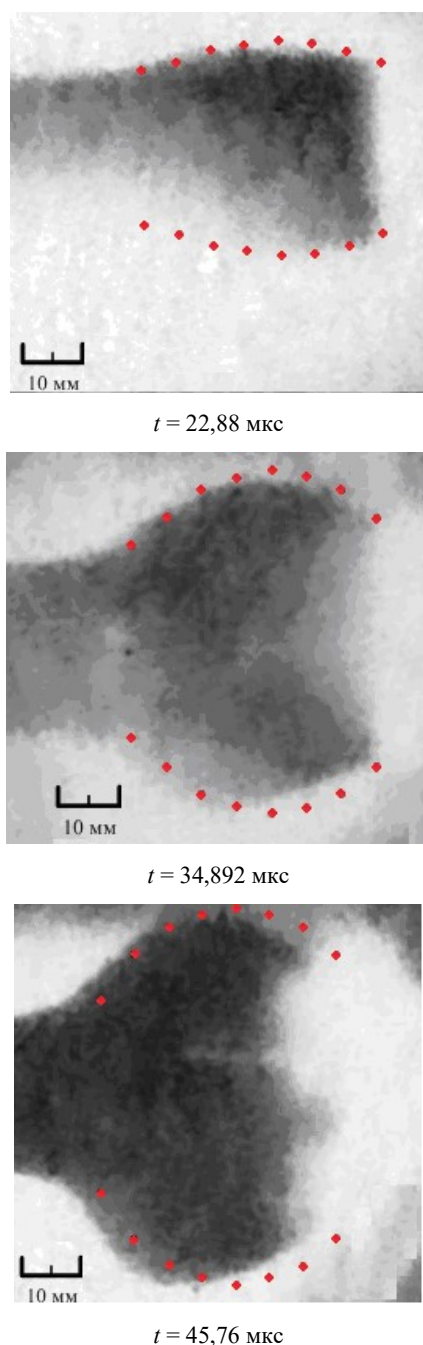


Рис. 4. Экспериментальные скоростные снимки деформации для трубы марки АД1 (28×4 мм) в некоторые моменты времени

Fig. 4. Experimental high-speed images of deformation for AD1 grade pipe (28×4 mm) at certain points in time

Проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне соединения трубы с трубной решеткой, получаемого электроимпульсным воздействием (ЭИВ), с использованием конечно-элементной модели, реализованной в программном комплексе FEMAP [13–16].

Осесимметричная относительно оси x геометрическая модель с нагружением внутренним давлением представлена на рисунке 5. Модель нагружения в КЭ модели строилась на основании данных остаточной деформации трубы алюминиевого сплава АД1, более подробно с графиками и таблицами написано в предыдущей статье [5].

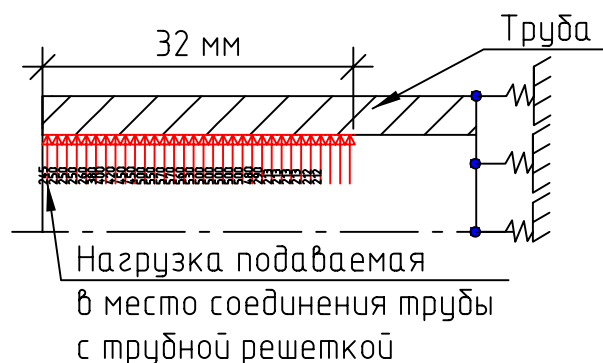


Рис. 5. Принципиальная схема трубы (геометрия, с нагрузкой, подобранной по остаточным деформациям, и граничными условиями)

Fig. 5. Schematic diagram of a pipe (geometry, with load selected based on residual deformations and boundary conditions)

Также, на рисунке 5 указаны нагрузки, подобранные по деформациям трубы, полученным в натурном эксперименте, то есть, величина давления определялась с использованием значений приращения радиусов трубы по участкам (сечениям, со значением полученной величины деформации на участке трубы), где на трубу будет воздействовать усилие от импульса электровзрывного картриджа. Принято допущение, что давление в процессе нагружения возрастает пропорционально на всех участках.

В математической КЭ модели для использования физически нелинейных свойств материала предложена диаграмма растяжения листа из материала АД1 [17] и критерий пластичности Мизеса.

Зона длины нагрузки по оси x короче длины зоны деформации из-за того, что в конце зоны деформаций имеют место их величины в области упругости. Процесс деформирования (рис. 6) на шагах решения упругопластической задачи напряженно-деформированного состояния трубы сопровождается одинаковыми значениями для КЭ модели и образца трубы в натурном эксперименте (скоростная фотосъемка).

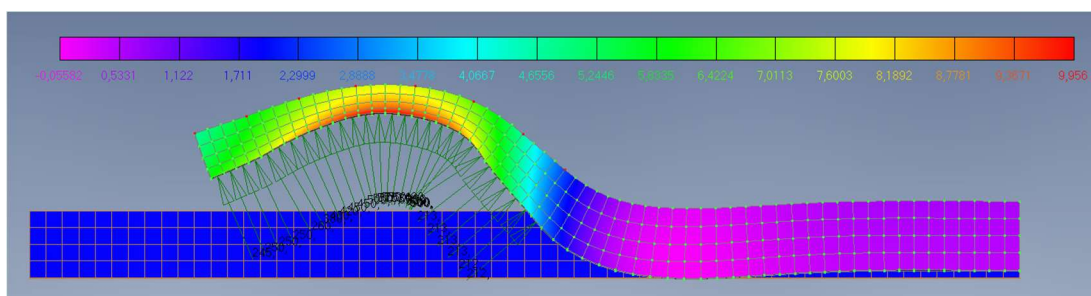


Рис. 6. Сравнение начального и конечного состояния трубы

Fig. 6. Comparison of the initial and final state of the pipe

На рисунке 7 и 8 представлена принципиальная схема соединения сборной конструкции трубы и трубной решетки (геометрия, прикладываемая нагрузка и граничные условия).

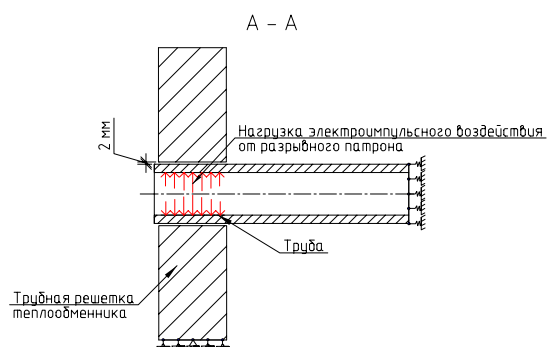


Рис. 7. Принципиальная схема (геометрическая модель соединения, вид диаметрального разреза)

Fig. 7. Schematic diagram (geometric model of the connection, view of the diametrical section)

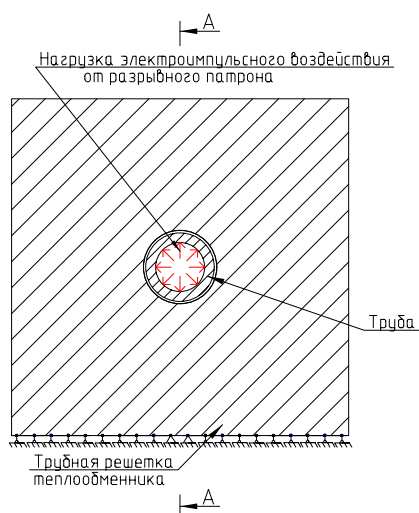


Рис. 8. Принципиальная схема (геометрическая модель соединения, вид спереди)

Fig. 8. Schematic diagram (geometric model of the connection, front view)

Внутреннее давление от электроимпульса используется в КЭ модели сборной конструкции трубы и трубной решетки, полученное в решении математической КЭ модели трубы (рис. 6).

На рисунках 9 и 10 представлены КЭ модель (общий вид) сборной конструкции трубы и трубной решетки. Условия контактирования в виде зазора определяется величиной зазора между трубой и трубной решеткой (размер Б, рис. 1). Величина выступа трубы из трубной решетки определяется значением размера А. Положение электровзрывного картриджа, в КЭ модели, определяется длиной участка с нагрузкой (рис. 7 и рис. 10).

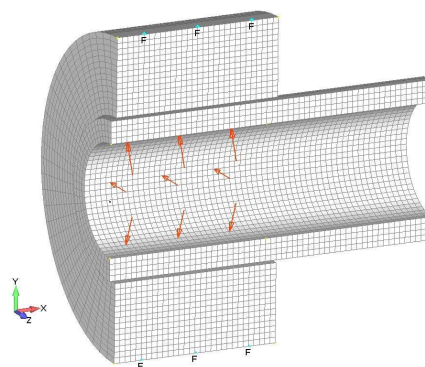


Рис. 9. Конечно-элементная модель сборной конструкции трубы с трубной решеткой

Fig. 9. FE model of a prefabricated tube-and-tube-sheet structure

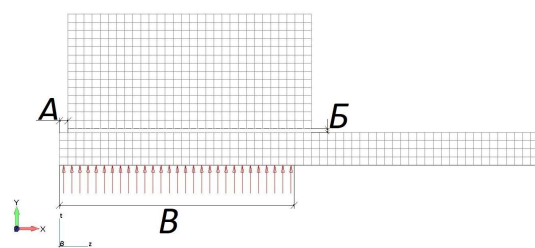


Рис. 10. Модель нагружения трубы с трубной решеткой

Fig. 10. Tube-sheet loading model

Размер В необходимо учитывать при установке электровзрывного картриджа, чтобы поле контактного давления, определенное остаточными деформациями, было симметрично относительно срединной плоскости трубной решетки.

На рисунке 11 напряженно-деформированное состояние сборной конструкции в конце нагружения, а на рисунке 12 напряженно-деформированное состояние сборной конструкции после снятия нагрузки.

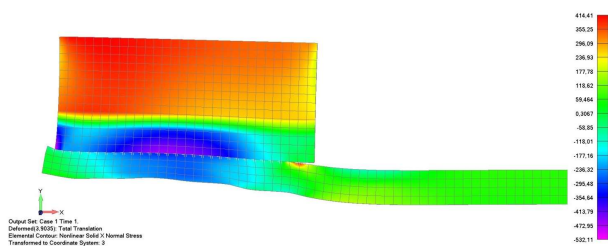


Рис. 11. Напряженно-деформированное состояние трубы и трубной решетки до снятия нагрузки давлением

Fig. 11. Stress-strain state of the pipe and tube sheet before removing the pressure load

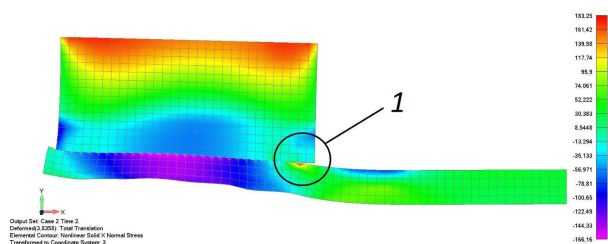


Рис. 12. Напряженно-деформированное состояние трубы и трубной решетки после снятия нагрузки давлением

Fig. 12. Stress-strain state of the pipe and tube sheet after removal of the pressure load

Как видно на рисунке 12, после снятия нагрузки происходят упругие деформации трубы в трубной решетке. В правом участке контактной поверхности (рис. 12, положение 1) образовались дополнительные напряжения в трубе, которые объясняются несимметричностью давления от электроимпульса, определяющего остаточные деформации между трубой и трубной решеткой, относительно срединной плоскости. То есть, если в этом случае картридж передвинуть в осевом направлении на некоторую величину, то это дополнительное поле напряжений (рис. 12, положение 1) исчезает.

Уровень напряжений, полученных в ходе численного эксперимента, не превышает допусти-

мых для условий прочности значений. Полученные результаты подтверждает достоверность деформационного поведения в натурном эксперименте и КЭ модели. То есть, процесс сопровождается таким же уровнем деформаций, что и на шагах решения упругопластической задачи напряженно-деформированного состояния трубы и трубной решетки.

Проверка качества соединения трубы с трубной решеткой (Checking the quality of the pipe connection with the pipe grid)

Анализ соединения на герметичность проводится керосином [18]. Механические испытания, проводимые на завершающем этапе, в виде опыта на растяжения (разрыв) соединения [19], проходили на разрывной машине ГРМ-2 при комнатной температуре в специальной оправке для удержания образцов (рисунок 13). Более подробно по проверке качества соединения описано в предыдущей статье [4].

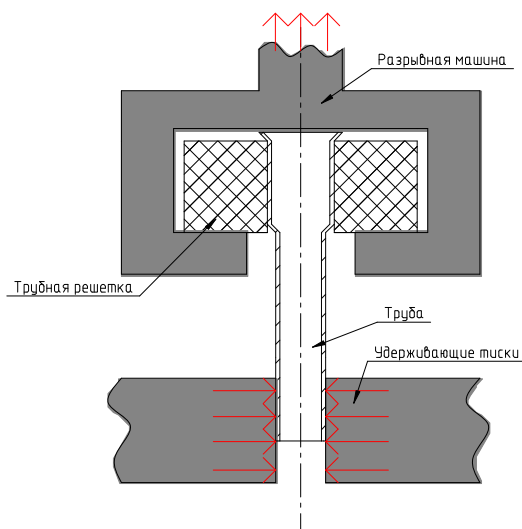


Рис. 13. Испытание на разрыв разрывной машиной ГРМ-2

Fig. 13. Tear test

Заключение (Conclusions)

Представленный в работе методологический подход предполагает, как натурный эксперимент воздействия электроимпульса на трубу с использованием скоростной теневой фоторегистрации деформаций трубы, так и численное исследование, проведенное на основе МКЭ, при решении контактно-, физически- и геометрически-нелинейной задачи.

На основе КЭ модели трубы [5] получили силовое давление в трубе от электро-импульса. Данное давление от электро-импульса используется в КЭ модели сборной конструкции трубы и трубной решетки. Полученные результаты подтверждает достоверность деформационного поведения в натурном эксперименте и КЭ модели. То есть, процесс сопровождается таким же уровнем деформаций, что и на шагах решения упругопластической задачи напряженно-деформированного состояния трубы и трубной решетки.

Полученные соединения подвергались проверке на натурных образцах, которые подтвердили возможность применения представленной технологии соединения труб и трубной решетки в теплообменнике, а также возможность последующей разработки методологического подхода расчета параметров соединения трубы и трубной решетки электровзрывным импульсом.

При электровзрывном импульсе влияние на нагружение конструкции высокими температурами несущественно. Необходимо изучение теплового воздействия на данное соединение во время его эксплуатации, в связи с разностью температурных сред.

Список источников

- Бажан П.И., Каневец Г.И., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. Москва: Машиностроение, 1989. 369 с.
- Головинцов А.Г., Юдаев Б.Н., Федотов Е.И. Техническая термодинамика и теплопередача. Москва: Машиностроение, 1970. 296 с.
- Степанов В.Г. Основы технологии развальцовки труб в судовых теплообменных аппаратах. Ленинград, 1972. 189 с.
- 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.
- 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.
- Мазуровский Б.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. Киев: Наукова Думка, 1980. 172 с.
- Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 253 с.
- Колмаков В.П., Дмитриев В.Г., Чеботнягин Л.М. Соединение трубчатых деталей электрическим взрывом проводника: Иркутск: Издательство ИрГТУ, 2011. 152 с.
- 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.
- 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.
- Чеботнягин Л.М., Потапов В.В., Лопатин В.В. Кинетика деформирования сплавов импульсным давлением электрического разряда // Известия Вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 1. С. 51–56.
- Райнхарт Дж.С., Пирсон Дж. Поведение металлов при импульсивных нагрузках. М.: Издательство «Иностранной литературы», 1958. 296 с.
- Скрипов В.П., Файзуллин М.З. Фазовые переходы кристалл-жидкость-пар и термодинамическое подобие. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 160 с.
- Пыхалов А.А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: дисс. ... д-ра. техн. наук. Москва: Московский государственный авиационный институт, 2006. 405 с.
- Пыхалов А.А., Милов А.Е. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 192 с.
- Гиззатуллин А.А., Ризванов Р.Г., Хабирова Г.Ф. Численное моделирование процесса развальцовки трубы в трубной решетке теплообменника. Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2006. Т. 2. 14 с.
- Шалин Р.Е. (ред.). Авиационные материалы. Справочник в девяти томах. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. М.: ОНТИ, 1982. 626 с.
- ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
- ГОСТ 1497-2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение.

References

- Bazhan PI, Kanevets GI, Seliverstov VM. *Handbook of heat exchangers*. Moscow: Mashinostroyeniye; 1989. 369 p. (In Russ.).
- Golovintsov AG, Yudaev BN, Fedotov EI. *Technical thermodynamics and heat transfer*. Moscow: Mashinostroyeniye; 1970. 296 p. (In Russ.).

3. Stepanov VG. *Fundamentals of pipe flaring technology in marine heat exchangers*. Leningrad. 1972. 189 p. (In Russ.).
4. 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.).
5. Vologin EE, Kudryavtsev AA, Pykhalov AA. 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; 17(4):188–195. (In Russ.).
6. Mazurovskii BYa. *Electrohydroimpulse pressing of pipes in tube arrays of heat exchangers*. Kyiv: Naukova dumka; 1980. 172 p. (In Russ.).
7. Yutkin LA. *Electrohydraulic effect and its application in industry*. Leningrad: Mashinostroenie; 1986. 253 p. (In Russ.).
8. Kolmakov VP, Dmitriev VG, Chebotnyagin LM. *Connection of tubular parts by electric explosion of the conductor*. Irkutsk; 2011. 152 p. (In Russ.).
9. 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 konstruktsii»: tezisy dokladov*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. 2011. 127 p. (In Russ.).
10. Chebotnyagin LM. *Connection of tubular parts by pulsed pressure of an expanding plasma channel of an electric discharge*. PhD. thesis. Tomsk: Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet. 2014. 137 p. (In Russ.).
11. 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.).
12. Rinehart JS, Pearson J. *Behavior of metals under impulsive loads*. Ohio: The American Society for Metals Cleveland; 1954. (In Russ.).
13. Skripov VP, Fayziulin MZ. *Crystal-liquid-vapor phase transitions and thermodynamic similarity*. Moscow: FIZMATLIT; 2003. 160 p. (In Russ.).
14. Pykhalov AA. *The contact problem of static and dynamic analysis of prefabricated rotors of turbomachines*. PhD. thesis. Moscow: Moscow Aviation Institute; 2006. 405 p. (In Russ.).
15. 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.).
16. Gizzatullin AA, Rizvanov RG, Habirova GF. Numerical modeling of the process of tube flaring in a heat exchanger tube sheet. *Oil and Gas Business*. 2006;2:14. (In Russ.).
17. Shalin RE. *Aviation Materials. A Nine-Volume Handbook. Vol. 4. Aluminum and Beryllium Alloys*. Moscow: ONTI; 1982. 626 p. (In Russ.).
18. *Nondestructive testing. Capillary methods. General requirements. State Standard 18442-80*. (In Russ.).
19. *Metals. Methods of tension test. State Standard 1497-2023* (In Russ.).