

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВАЛЬЦОВКИ ТРУБЫ В ТРУБНОЙ РЕШЕТКЕ ТЕПЛООБМЕННИКА

Гиззатуллин А.А., Ризванов Р.Г., Хабирова Г.Ф.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

При проведении развальцовки трубы в трубной решетке главным является получение необходимого остаточного контактного давления между трубой и отверстием, обеспечивающего соединение «труба-трубная решетка». С целью исследования закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в зоне соединения «труба-трубная решетка» было выполнено численное моделирование методом конечных элементов процесса развальцовки трубы в отверстии трубной решетки. По результатам исследований получены распределения остаточных напряжений по сечению трубы, зависимости утонения стенки и контактного давления от степени развальцовки трубы.

Уровень прочности соединения «труба-трубная решетка» в кожухотрубчатой теплообменной аппаратуре является одним из главных факторов, определяющих работоспособность теплообменников. С позиции обеспечения прочности и герметичности такого соединения в настоящее время накоплен значительный опыт по применению различных методов крепления труб: развальцовка труб роликовым инструментом; однородное расширение (гидрораздача); сварка труб с трубными решетками; комбинирование методов. В отечественном нефтегазохимическом аппаратостроении для крепления труб в трубных решетках применяют развальцовку труб в сочетании со сваркой. При проведении развальцовки трубы в трубной решетке главным является получение необходимого остаточного контактного давления между трубой и отверстием, обеспечивающего соединение «труба-трубная решетка».

Нами было проведено исследование напряженно-деформированного состояния в зоне соединения «труба-трубная решетка», получаемого развальцовкой, при помощи конечно-элементного метода, реализованного в виде программного комплекса ABAQUS.

Для упрощения расчетов и приведения расчетной схемы к двумерному виду, соединение «труба-трубная решетка» было заменено соединением «труба-эквивалентная втулка». Такой подход при конечно-элементном моделировании соединений труб с трубными решетками использован многими исследователями, в частности [1]. На рисунке 1 показан фрагмент трубной решетки с

расположением отверстий по вершинам равностороннего треугольника. Штриховой линией показана эквивалентная втулка, которая по своей жесткости соответствует участку решетки, окружающему отверстию.

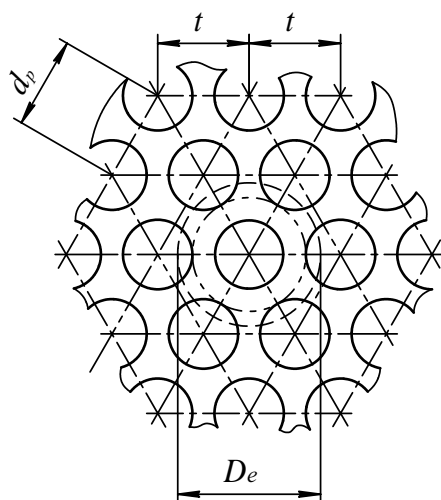


Рисунок 1. Схема определения диаметра эквивалентной втулки

Наружный диаметр эквивалентной втулки D_e определялся по формуле [2]

$$D_e = d_p + 2\alpha(t - d_p),$$

где d_p – диаметр отверстия в трубной решетке; α – коэффициент, учитывающий влияние перемычек между соседними отверстиями (на основании экспериментальных данных при расположении отверстий по вершинам равностороннего треугольника $\alpha_{\Delta} = 1,6$, по вершинам квадрата - $\alpha_{\square} = 1,75$); t – шаг расположения отверстий в решетке. Для труб с наружным диаметром $d_e = 20$ мм шаг расположения отверстий $t = 26$ мм [3]. Диаметр отверстий в решетке задали равным $d_p = 20,6$ мм. В этом случае наружный диаметр эквивалентной втулки принимает значение $D_e = 38$ мм.

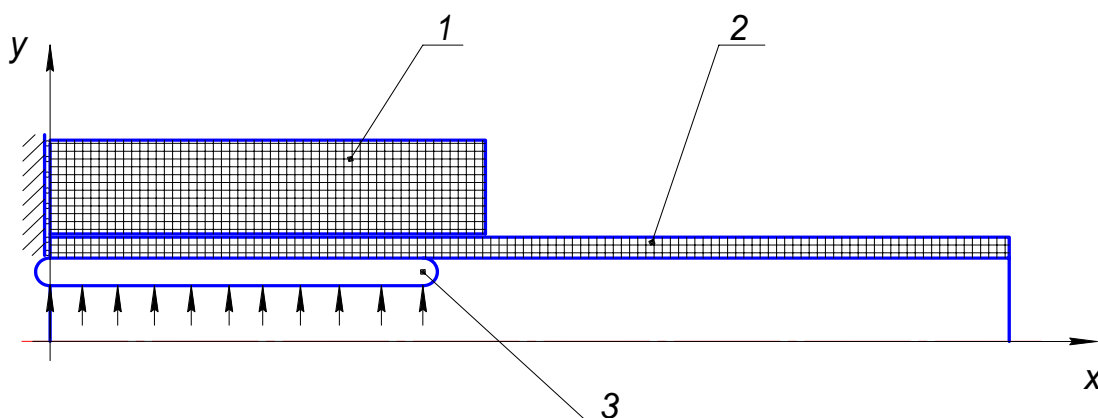
Конечно-элементная осесимметричная модель соединения «труба-втулка» представлена на рисунке 2. На данном рисунке показана только половина сечений деталей, так как они являются симметричными относительно оси x .

За начало координат по оси x принята левая торцевая поверхность втулки. Для генерации конечно-элементной сетки трубки и трубной решетки использовались четырехугольные изопараметрические конечные элементы CAX4R, для сетки ролика – SFMAX1. Заданы контактные поверхности деталей и

коэффициент трения между ними $f=0,15$. Ограничения на осевое перемещение заданы для узлов конечно-элементной сетки трубы и втулки на левой торцевой поверхности. Радиальные перемещения указанных узлов не были ограничены.

Размеры деталей были приняты следующие: наружный диаметр трубы $d_e = 20$ мм, толщина стенки трубки $s = 2$ мм, длина трубки $l = 65$ мм, внутренний диаметр втулки (равен диаметру отверстия в трубной решетке) $D_i = 20,6$ мм, наружный диаметр втулки $D_e = 38$ мм, длина втулки $L = 40$ мм. Длина участка развальцовки взята на 5 мм меньше длины втулки: $L_p = 35$ мм. Материал трубы – сталь с пределом текучести $\sigma_T = 210$ МПа, втулки – сталь с $\sigma_T = 290$ МПа. Модуль продольной упругости для обеих сталей принят $E=2 \cdot 10^5$ МПа. Для описания поведения материала трубы в пластической области деформирования было принято мультилинейное представление истинной кривой «напряжение-деформация».

В данной работе моделирование процесса развальцовки осуществлялось радиальным перемещением на 0,5 мм ролика 3 развальцовочного инструмента (см. рисунок 2).

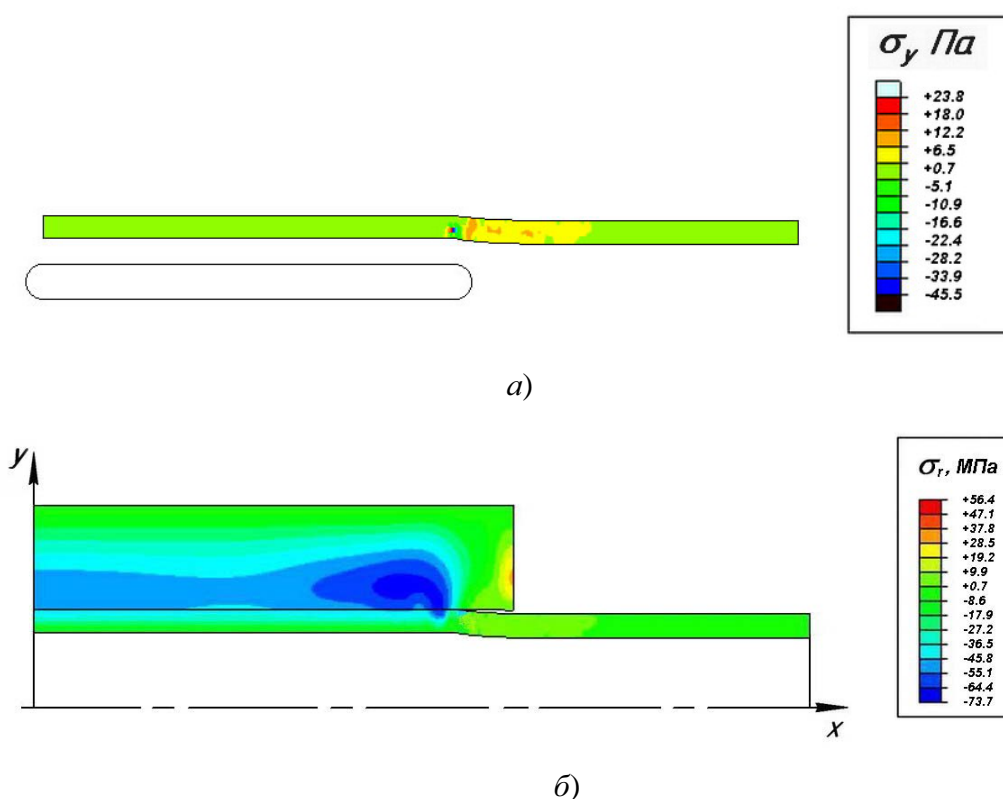


1 – эквивалентная втулка, 2 – труба, 3 – ролик

Рисунок 2. Осесимметричная конечно-элементная модель процесса развальцовки

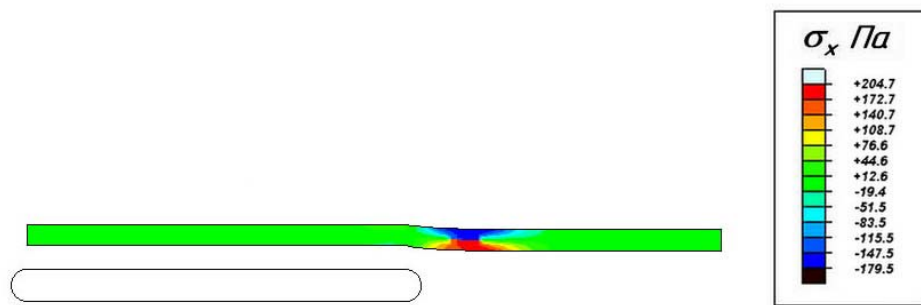
Были выполнены расчеты развальцовки трубы для двух случаев: 1) труба развальцовывалась без контакта со втулкой, то есть рассмотрена свободная раздача трубы на длине L_p ; 2) труба развальцовывалась внутри эквивалентной втулки. Свободная раздача трубы была смоделирована с целью оценки влияния втулки на распределение остаточных напряжений в переходной зоне трубы.

На основании выполненных расчетов были получены следующие результаты. На рисунках 3...6 приведены распределения остаточных радиальных, осевых, окружных и эквивалентных (по Мизесу) напряжений по объему деталей, рассчитанные для двух рассмотренных случаев деформирования. Из рисунка 3 видно, что при развальцовке трубы во втулку значения остаточных радиальных напряжений на порядок выше и максимальные напряжения (МХ) сосредоточены в малой зоне вблизи правого скругления ролика. Из рисунков 4...6 также видно, что при развальцовке трубы во втулку распределения остаточных напряжений значительно отличаются от распределений после свободной развальцовки, что объясняется ограничивающим действием втулки на радиальные перемещения точек трубы.

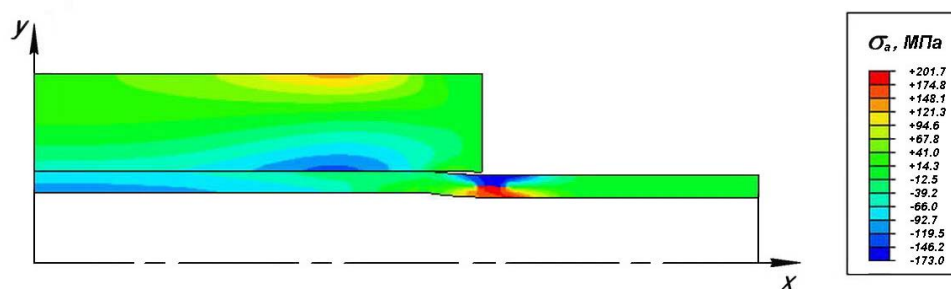


а) свободная раздача трубы; б) развальцовка трубы во втулку

Рисунок 3. Распределение остаточных радиальных напряжений



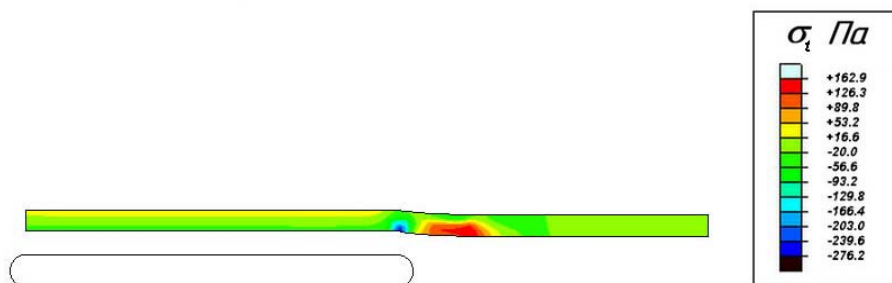
а)



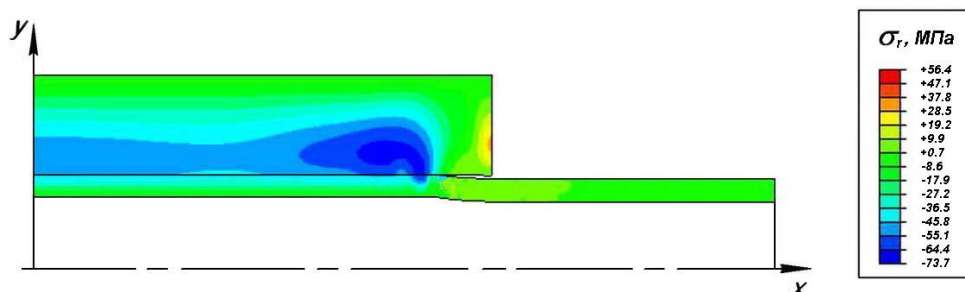
б)

а) свободная раздача трубы; б) развальцовка трубы во втулку

Рисунок 4. Распределение остаточных осевых напряжений



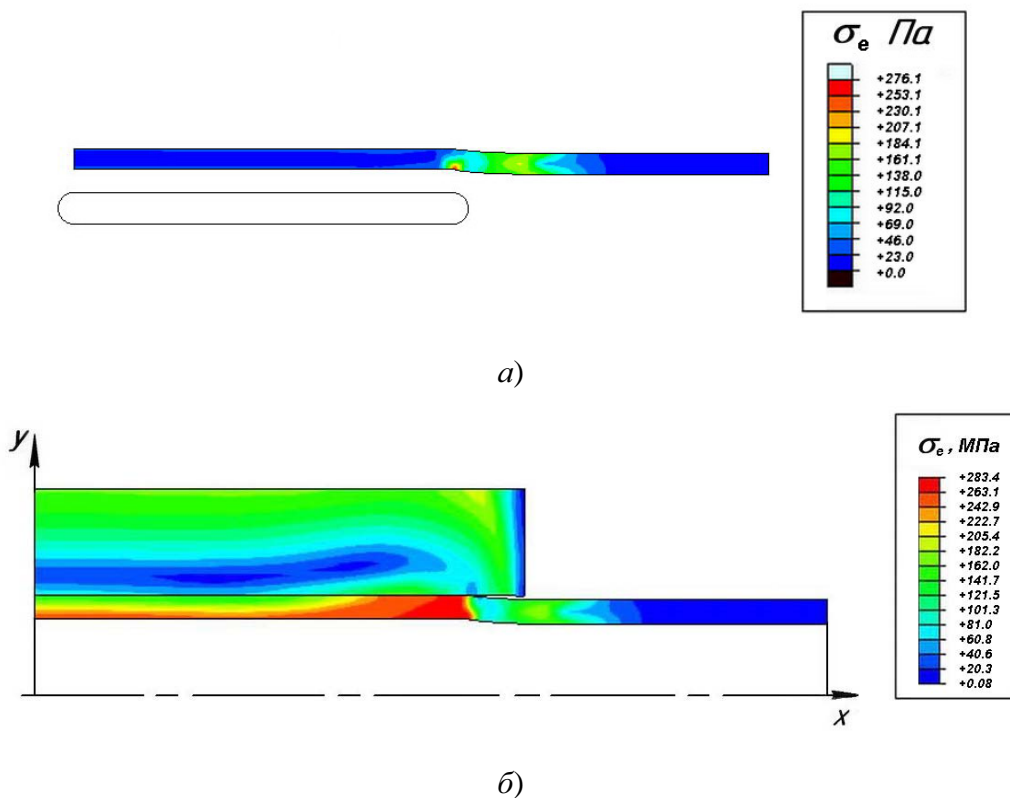
а)



б)

а) свободная раздача трубы; б) развальцовка трубы во втулку

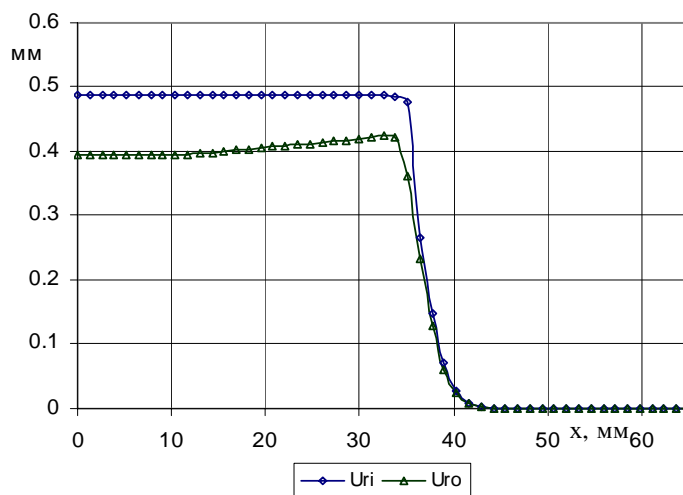
Рисунок 5. Распределение остаточных окружных напряжений



а) свободная раздача трубы; б) развальцовка трубы во втулку
Рисунок 6. Распределение остаточных эквивалентных напряжений

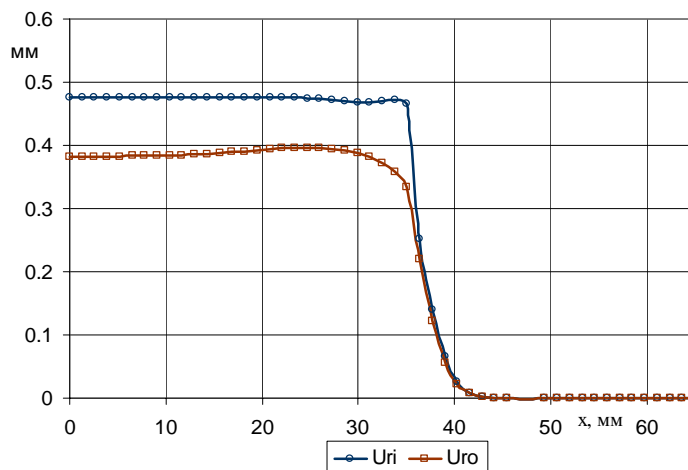
Радиальные остаточные перемещения точек трубы, расположенных на ее внутренней и наружной поверхностях, представлены на рисунках 7 и 8. Данные распределения представляют собой изображенный в увеличенном масштабе профиль трубы по соответствующей поверхности после развальцовки. Из данных рисунков видно, что на трубе после развальцовки можно выделить три участка. Первый участок представляет собой расширенную часть, в пределах которой вальцовочный ролик оказывал радиальное воздействие на внутреннюю поверхность трубы. Вторым участком – это переходная зона, на которой осуществляется переход от расширенной части трубы к недеформированному участку. Длина переходной зоны составляет приблизительно 9 мм, что равно среднему радиусу трубы. Из сравнения рисунков 7 и 8 видно, что втулка влияет на характер деформирования трубы в расширенной части и на начальном участке переходной зоны. При свободной раздаче на наружной поверхности трубы на границе расширенной и переходной зон имеется выступ, а при развальцовке во втулке данный участок на внешней поверхности трубы более сглаженный из-за воздействия внутренней цилиндрической поверхности втулки.

Разность между перемещениями соответствующих точек на внутренней и наружной поверхностях трубы после выполнения развальцовки показывает величину утонения ее стенки.



U_{ri} – перемещения на внутренней поверхности;
 U_{ro} – перемещения на внешней поверхности

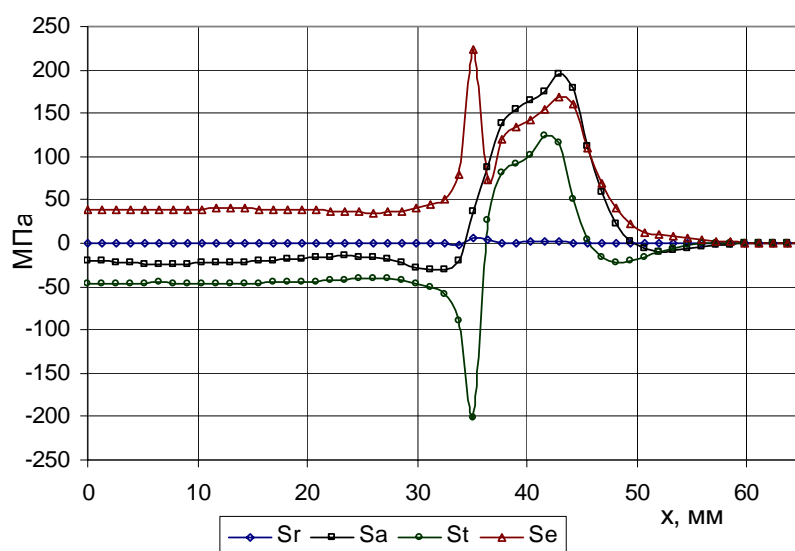
Рисунок 7. Радиальные перемещения поверхностных точек трубы для случая раздачи трубы без втулки



U_{ri} – перемещения на внутренней поверхности;
 U_{ro} – перемещения на внешней поверхности

Рисунок 8. Радиальные перемещения поверхностных точек трубы для случая развальцовки трубы во втулке

На рисунках 9...12 приведены распределения вдоль оси трубы остаточных напряжений, действующих в слоях металла на ее внутренней и наружной поверхностях, для случаев свободной раздачи и развальцовки во втулку. Из данных рисунков видно, что характер распределения остаточных напряжений значительно отличается для двух рассмотренных случаев деформирования. Эквивалентные напряжения определены по теории прочности Мизеса. Для развальцовки во втулку эквивалентные напряжения в слоях на обеих поверхностях трубы выше, чем при свободной развальцовке. Причем на наружной поверхности трубы, развальцованной во втулку, эквивалентные напряжения имеют значительную неравномерность распределения (см. рисунок 12), что объясняется контактным воздействием поверхности отверстия втулки. Наиболее опасными с точки зрения прочности в условиях коррозионного воздействия рабочей среды являются растягивающие напряжения в металле. Как показывают результаты численного моделирования наибольшие растягивающие остаточные осевые и окружные напряжения действуют на внутренней поверхности в конечной части переходной зоны развальцованной трубы ($x = 40...45$ мм).



S_r – радиальные, S_a – осевые, S_t – окружные, S_e – эквивалентные напряжения

Рисунок 9. Распределение остаточных напряжений на внутренней поверхности трубы после развальцовки без втулки

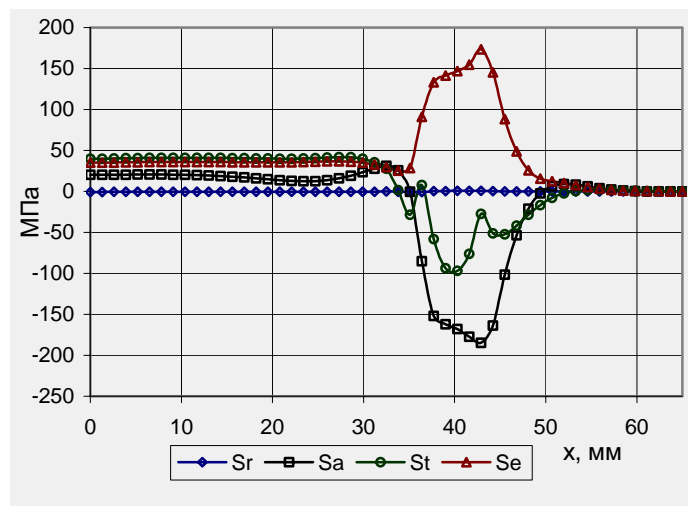


Рисунок 10. Распределение остаточных напряжений на наружной поверхности трубы после развальцовки без втулки

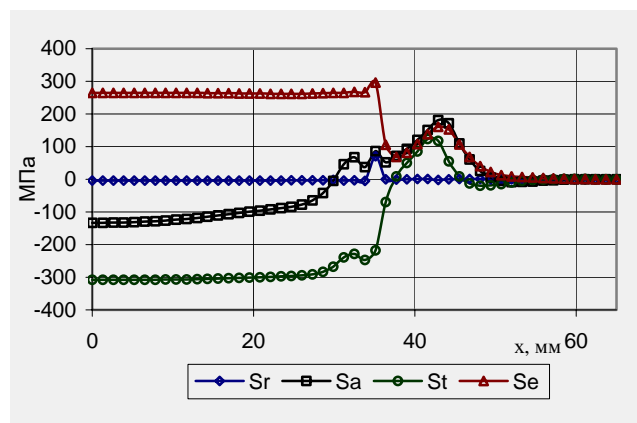


Рисунок 11. Распределение остаточных напряжений на внутренней поверхности трубы после развальцовки во втулке

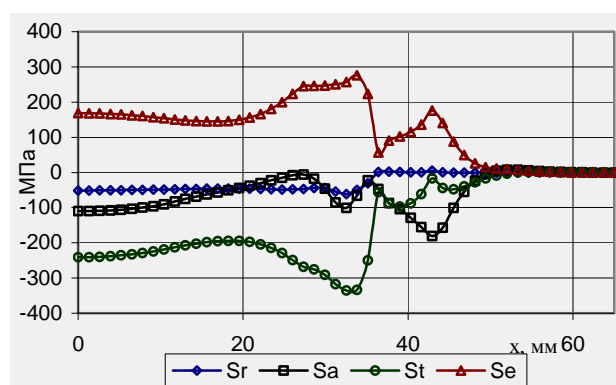
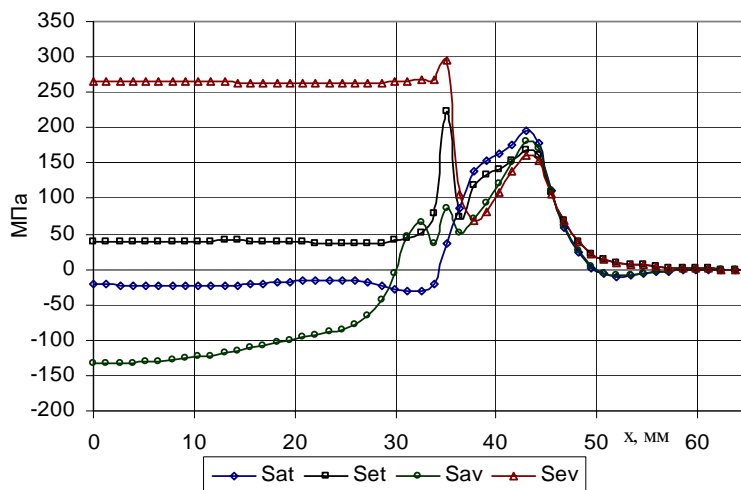


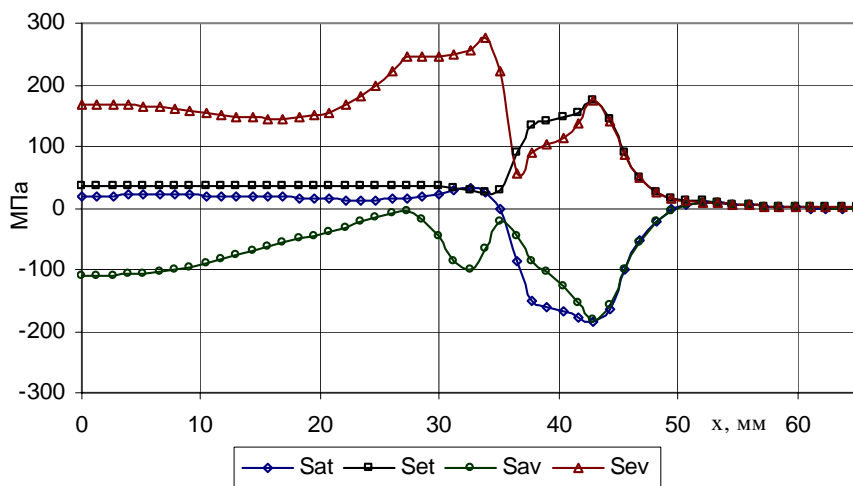
Рисунок 12. Распределение остаточных напряжений на наружной поверхности трубы после развальцовки во втулке

На рисунках 13 и 14 приведены с целью сравнения распределения остаточных осевых и эквивалентных напряжений для двух случаев деформирования трубы.



S_{at} и S_{av} - осевые напряжения после развальцовки без втулки
и во втулке соответственно;
 S_{et} и S_{ev} - эквивалентные напряжения после развальцовки без втулки
и во втулке соответственно

Рисунок 13. Распределение остаточных напряжений на внутренней поверхности трубы



S_{at} и S_{av} - осевые напряжения после развальцовки без втулки
и во втулке соответственно;
 S_{et} и S_{ev} - эквивалентные напряжения после развальцовки без втулки
и во втулке соответственно

Рисунок 14. Распределение остаточных напряжений на наружной поверхности трубы

Таким образом, анализ полученных распределений остаточных напряжений показал, что самым опасным участком вальцованного соединения "труба-трубная решетка" в кожухотрубчатых теплообменниках является конечный участок переходной зоны. Если при эксплуатации в трубках трубного пучка теплообменника возникают дополнительные растягивающие напряжения из-за действия температурных деформаций и давления, то это может ускорить разрушение трубок на указанном участке.

Также нами было проведено исследование влияния степени развальцовки трубы в трубной решетке на утонение стенки трубы и остаточное контактное давление.

Степень развальцовки B , согласно ОСТ 26-02-1015-85, вычисляется по следующей формуле:

$$B = d_{ik} - (d_i + \Delta \cdot \beta),$$

где $d_i = 16$ мм – внутренний диаметр трубы до процесса развальцовки; d_{ik} – внутренний диаметр трубы после процесса развальцовки; $\Delta = 0,6$ мм – начальный диаметральный зазор между поверхностью отверстия в трубной решетке и трубой; $\beta = d_e/d_i$ – коэффициент толстостенности трубы. Учитывая что $d_e = 20$ мм, получаем $\beta = 1,25$.

Были произведены расчеты напряженно-деформированного состояния в зоне соединения «труба-трубная решетка» при различных значениях степени развальцовки, которые обеспечивались заданием соответствующего радиального перемещения вальцовочного ролика. Значения радиальных перемещений ролика были приняты равными 0,45; 0,475; 0,5; 0,525; 0,55; 0,575; 0,6 мм.

Для вычисления степени развальцовки трубы при заданном перемещении ролика определялся внутренний диаметр трубы после деформирования d_{ik} . На рисунке 15 показана зависимость степени развальцовки от радиального перемещения ролика.

Согласно ОСТ 26-02-1015-85 рекомендуемая степень развальцовки для данного размера труб составляет $B = 0,13$ мм; максимальная - $B_{max} = 0,24$ мм; минимальная - $B_{min} = 0,02$ мм. Указанным значениям степени развальцовки соответствуют радиальные перемещения ролика до 0,52 мм.

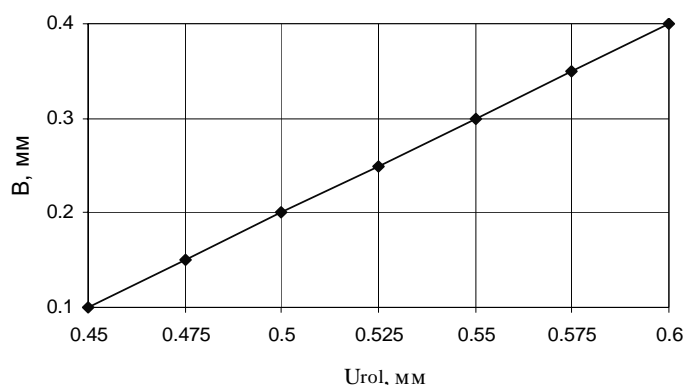


Рисунок 15. Степень развальцовки трубы во втулке в зависимости от радиального перемещения ролика

На рисунке 16 представлена зависимость утонения стенки трубы от степени развальцовки.

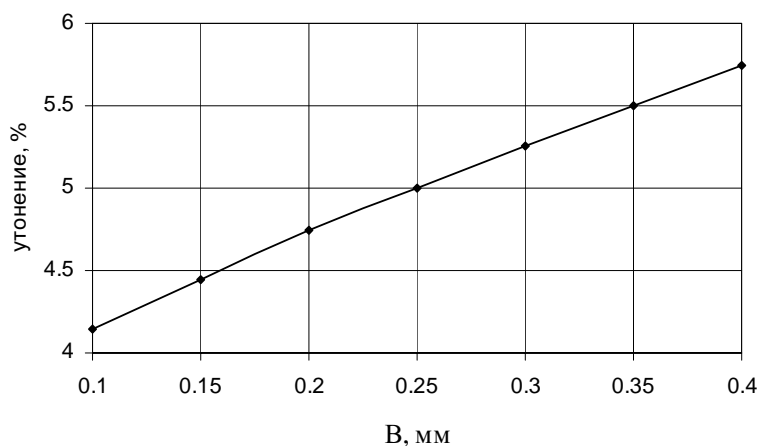


Рисунок 16. Утонение стенки трубы в зависимости от степени развальцовки

Далее были построены кривые контактных давлений между трубой и эквивалентной втулкой в зависимости от степени развальцовки (рисунок 17). Из рисунка видно, что при малых степенях развальцовки, то есть при небольших радиальных перемещениях ролика, характер распределения контактных давлений в расширенной зоне трубы имеет значительную неравномерность. С увеличением степени развальцовки распределение контактных давлений выравнивается по ширине развальцовки.

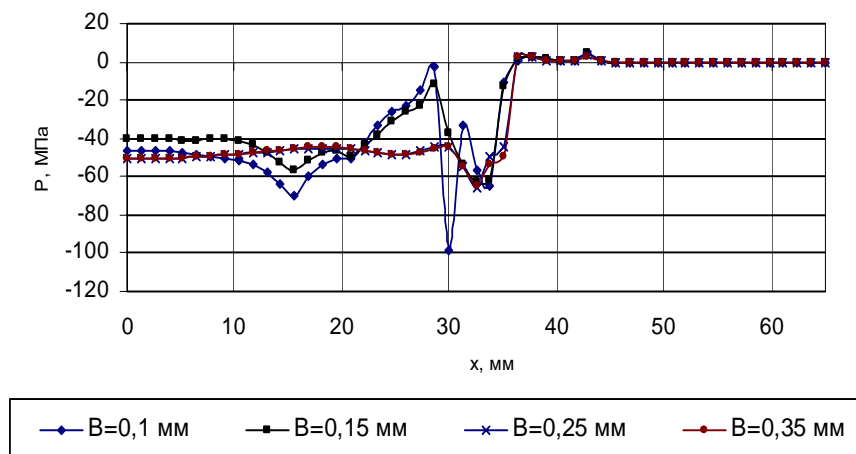


Рисунок 17. Распределение контактного давления на внешней поверхности трубы вдоль ее оси после развальцовки во втулке

На рисунке 18 представлено изменение толщины стенки вдоль оси трубы при различных степенях развальцовки. Из данного рисунка следует, что с увеличением степени развальцовки изменяется величина утонения стенки, а характер распределения толщины стенки вдоль оси трубы не меняется.

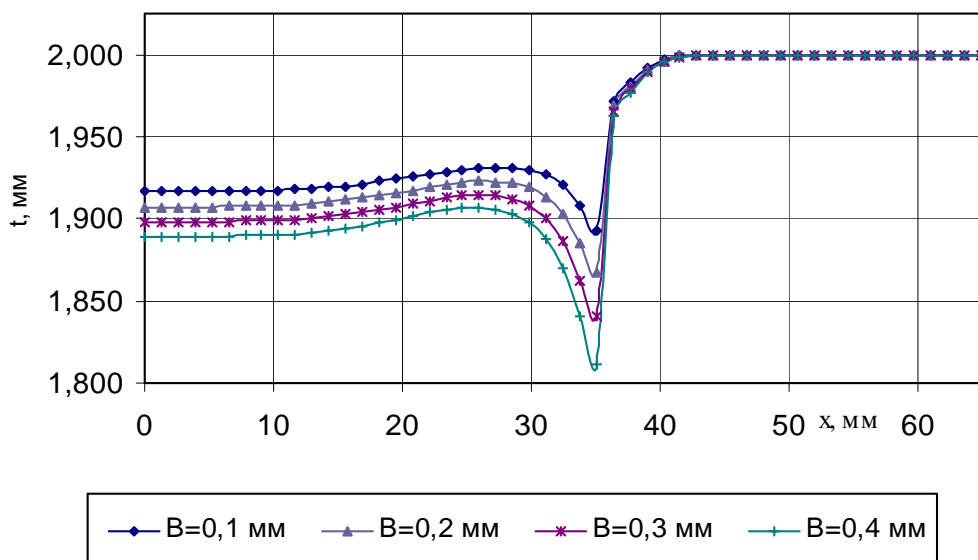


Рисунок 18. Изменение толщины стенки вдоль оси трубы после развальцовки во втулке

Литература

1. M. Allam, A. Chaaban, A. Bazergui. Estimation of Residual Stresses in Hydraulically Expanded Tube-to-Tubesheet Joints // Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 120, 1998, p.129-136.

2. Ткаченко Г.П., Бриф В.М. Изготовление и ремонт кожухотрубчатой теплообменной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1980. – 160 с.

3. ОСТ 26-02-1015-85. Крепление труб в трубных решетках. Отраслевой стандарт. – М.: ВНИИнефтемаш, 1985. – 29 с.