

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СБОРКИ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕНА

*Мячикова Н.И.<sup>1</sup>, к.т.н., доц., Ремнев А.И.<sup>1</sup>, д.т.н., доц.,*

*Куценко В.Н.<sup>2</sup>, к.т.н., доц., Глотова С.Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород,*

<sup>2</sup>*Региональный открытый социальный институт, г. Курск*

Расчет остаточных давлений в соединениях с натягом. Анализ различных методов сборки труб в ТР подтверждает, что все они (кроме электросварки) связаны с пластической деформацией трубы и упругой или упругопластической деформацией ТР; поэтому основные закономерности процесса осевого деформирования, несмотря на отдельные особенности, при любом методе имеют много общего [1, 2]. Для максимального упрощения расчетов по определению прочности и герметичности соединений с натягом, выбору оптимальных режимов сборки с учетом допускаемых отклонений размеров и механических свойств материалов труб и ТР, определению границ применения сборки и методов повышения прочности и герметичности соединений Т-ТТР принята гидростатическая модель процесса сборки Т-ТТР. При использовании такой модели предполагают, что труба и ТР деформируются под действием равномерного гидростатического давления, приложенного к внутренней поверхности трубы на длине, равной толщине ТР при сборке.

Накопление экспериментальных данных при использовании приведенных зависимостей в инженерной практике позволит уточнить их применительно к различным вариантам технологии сборки Т-ТТР способом осевого деформирования [1].

Процесс сборки Т-ТТР состоит из трех различных стадий объемного гидростатического деформирования (рис.): I стадия – упругое, упругопла-

стическое и пластическое деформирование трубы до соприкосновения наружной поверхности трубы с поверхностью отверстия в ТР; II стадия – совместное объемное пластическое деформирование трубы и упругое, упругопластическое или пластическое деформирование ТР; III стадия – упругая разгрузка узла сборки Т-ТТР при уменьшении давления (усилия деформирования) сборки до нуля; после окончания III стадии на поверхности контакта трубы и ТР возникает остаточное давление (при условии, что при разгрузке упругая деформация на наружной поверхности отверстия меньше, чем на поверхности отверстия в ТР). При этом приняты следующие допущения: 1) Упрочнение материалов трубы и ТР отсутствует. 2) Трубную решетку, представляющую собой перфорированную пластину, заменяют эквивалентной цилиндрической втулкой такой же толщины, с внутренним диаметром, равным диаметру отверстия в ТР  $d_p$ .

Для большей части соединений Т-ТТР в качестве ТР – элемента узла сборки трубы с ТР выбрана эквивалентная втулка, имитирующая ТР, выполненная из того же материала, что и ТР в КСТ, высотой, равной толщине ТР  $h$  с тем же диаметром отверстия, что и в ТР с наружным эквивалентным диаметром  $D_э$ . На рис. 1 представлены различные варианты конструкций ТР и основные геометрические элементы для расчета эквивалентного диаметра втулки  $D_э$ , который определяется по формуле:

$$D_э = d_о + 2K_{II}(t - d_о), \quad (1)$$

где  $d_о$  – диаметр отверстия в ТР, мм;  $K_{II}$  – коэффициент, учитывающий влияние перемычек  $m$  между соседними отверстиями, полученный экспериментально (при расположении отверстий по вершинам равностороннего треугольника  $K_{II}=1,7$ ; по вершинам квадрата  $K_{II}=1,85$ ; по концентрическим окружностям  $K_{II}=1,55$ );  $t$  – шаг расположения отверстий ТР. Если обозначить соотношение диаметров  $D/d_о$  как коэффициент толстостенности ТР  $K_p$ , то получим следующую зависимость:

$$K_p = 1 + 2 K_{II} (t/d_o - 1) \quad (2)$$

При известных значениях  $K_{II}$  эквивалентный диаметр может быть определен из уравнения:  $D_э = d_o K_{II}$ . Расчет наружного диаметра эквивалентной втулки  $D_э$  при исследовании качественных показателей узла сборки Т-Р по герметичности и прочности, согласно экспериментальным данным, считается приемлемым и может быть использован при изготовлении однотрубных образцов.

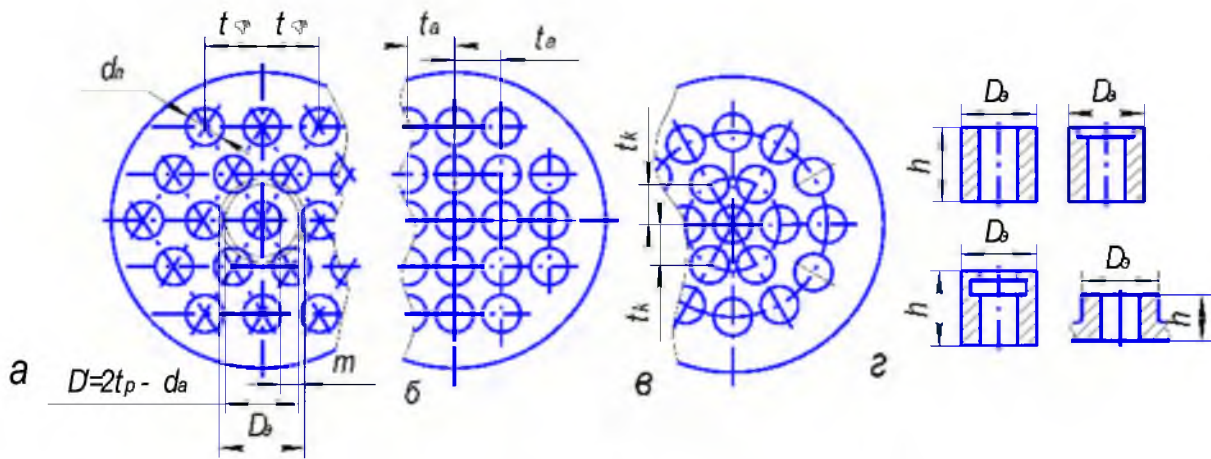


Рисунок 1 – Схема для определения эквивалентного диаметра  $D_э$  втулки при разбивке отверстий в ТР: а – по вершинам равностороннего треугольника  $t_Δ$ ; б – по вершинам квадратов  $t_□$ ; в – по концентрическим окружностям  $t_k$ ; г – конструктивные элементы эквивалентных втулок (ТР);  $m$  – толщина перемычки между отверстиями ТР, мм;  $t_p$  – шаг расположения отверстий ТР, мм

Процесс сборки соединений с натягом можно представить в виде графика (рис. 2). В начале стадии I труба деформируется упруго и зависимость давления при сборке от деформации будет линейной (участок  $OA$ ). Точка  $A$  соответствует возникновению пластических деформаций на внутренней поверхности трубы. На участке  $AB$  труба деформируется упруго-пластически до тех пор, пока пластические деформации не охватят все сечение трубы (точка  $B$ ). После этого труба деформируется при постоянном давлении (участок  $BB$ ), что следует из сделанных допущений.

В действительности, на участке *БВ* происходит, с одной стороны, увеличение давления за счет упрочнения материала трубы, а с другой стороны, увеличение этого давления за счет утолщения стенок трубы за счет осевой осадки ее в объем отверстия между ТР, трубой и инструментом для сборки, а также увеличения диаметра трубы на величину зазора между трубой и отверстием ТР.

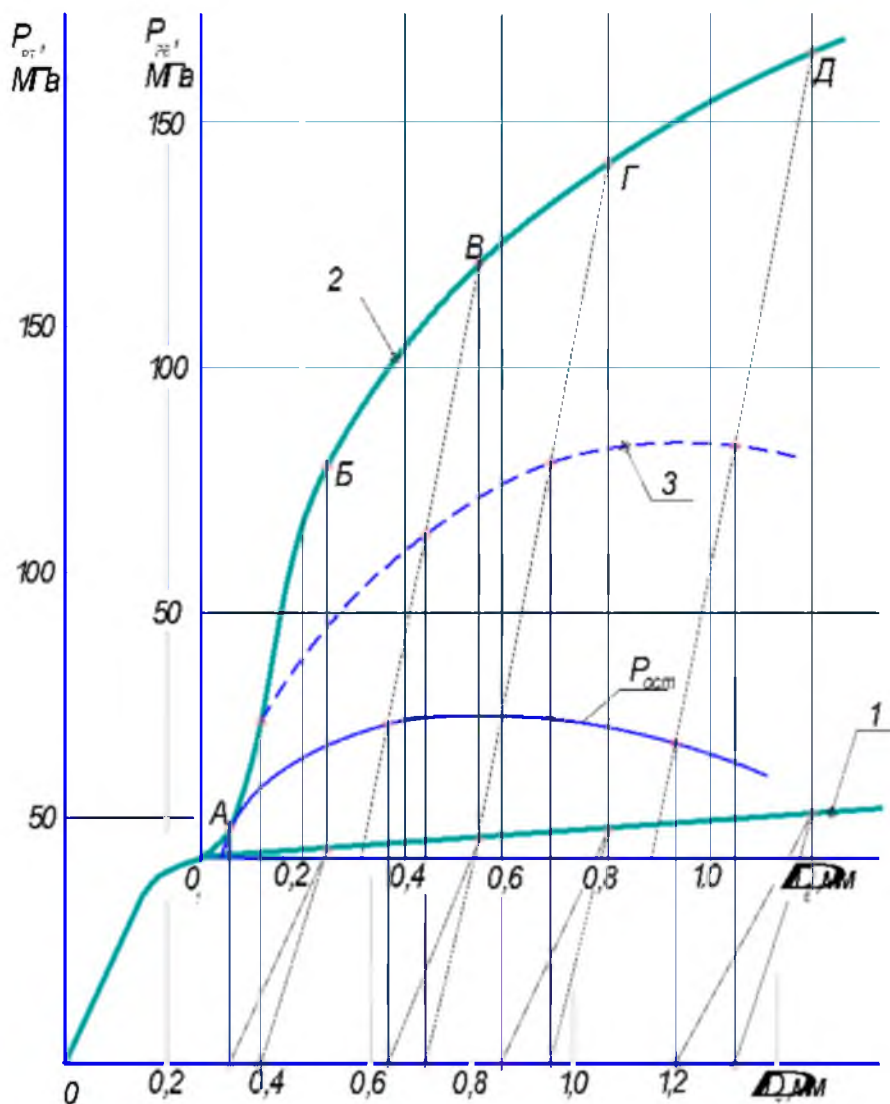


Рисунок 2 – Зависимость радиального давления  $P_{p, T}$  и  $P_{p, B}$  от приращения диаметров  $\Delta D_T$  и  $\Delta D_B$  для трубы  $\varnothing 10 \times 1$  мм из АМцН и эквивалентной втулки из стали 20: 1 – труба; 2 – эквивалентная втулка; 3 – кривая равновесия при совместной разгрузке трубы и втулки;  $P_{ост}$  – остаточное давление (напряжение) в соединении Т-Р после разгрузки; А-Д – характерные точки нагрузки и разгрузки соединения Т-Р

В точке *A* соприкасаются поверхности трубы и ТР. С этого момента начинается стадия II процесса – совместная деформация трубы и ТР. На этой стадии процесса при дальнейшем увеличении сечения трубы давление при сборке вновь начинает возрастать за счет сопротивления деформациям, оказываемого материалом ТР. Труба на стадии II сборки соединения Т-ТТР все время находится в пластическом состоянии. Кривая *ABVI*Д соответствует изменению давления на внутреннюю поверхность отверстия ТР при увеличении диаметра этого отверстия, совпадающего на стадии II процесса с наружным диаметром трубы. Как и труба на стадии I, ТР вначале деформируется упруго (линейный участок *Ab*), затем – упругопластически (участок *b/l*) до достижения предельного давления (точка *l*), при котором исчерпывается несущая способность ТР (эквивалентной втулки), то есть достигается упругая область во всех точках перемычки ТР (по всей толщине стенки эквивалентной втулки).

Пластическое деформирование ТР (участок *l/l'*) в любом случае крайне нежелательно, так как ведет к снижению качества сборки соединения. Давление в соединении Т-ТТР при сборке  $p_1$  (давление на внутреннюю поверхность трубы) на стадии II складывается из давления  $p_B$ , приводящего трубу в пластическое состояние на стадии I, и давления  $p_2$ , воспринимаемого ТР, тогда  $p_1 = p_2 + p_B = p_2 + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{\text{ТР}} \ln \beta$  (3)

При расчете режимов сборки зависимость коэффициента упругой разгрузки *A* от коэффициента толстостенности трубы  $\beta$  при  $k = 1,8$ :  
 1 –  $E_T / E_P = 2$ ; 2 –  $E_T / E_P = 1$ ; 3 –  $E_T / E_P = 0,5$ .

После окончания стадии II (совместного деформирования трубы и ТР) начинается постепенная разгрузка (удаление инструмента из отверстия трубы) – стадия III. При завершении упругой разгрузки наружной поверхности трубы разгрузка поверхности отверстия ТР еще не закончена, вслед-

ствие чего на поверхности контакта трубы и ТР после окончания стадии III возникает остаточное давление  $P_{ост}$ . Кривая  $P_{ост}$  характеризует изменение остаточного давления,  $p_{ост}$  от усилия объемного деформирования после окончания сборки. Увеличение давления при сборке обеспечивает рост остаточного давления. После того, как исчерпана несущая способность ТР (точка Г), дальнейшее увеличение давления при сборке не повышает  $P_{ост}$ . Более того, в реальных условиях при дальнейшем увеличении давления при сборке (на участке Г/Г') происходит интенсивное увеличение сечения трубы, при котором остаточное давление начинает снижаться (чрезмерное усилие при сборке). Расчетные зависимости для определения характерных точек диаграммы, полученные на основании теории наибольших касательных напряжений.

Расчет режимов сборки и определение напряженно-деформированного состояния (НДС) при сборке соединения с натягом для точки А, то есть возникновение пластических деформаций в трубе.

Давление и относительная деформация при сборке соединения Т-ТТР определяется соответственно  $p_A = \frac{\sigma_{TT}}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{\beta^2}\right)$ ,  $\varepsilon_{L1} = \frac{\sqrt{3}}{2\beta^2} \frac{\sigma_{TT}}{E_T}$ .

При пластической деформации НДС всего сечения трубы (точки  $O_1A$ ) для давления и относительной деформации соединения Т-ТТР определяется соответственно  $p_B = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{TT} \ln \beta$ ,  $\varepsilon_{L2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_{TT}}{E_T}$ .

Возникновение пластических деформаций в ТР при сборке (точки  $AB$ ) для давления и относительной деформации соединения Т-ТТР определяется соответственно для точки А и В:  $p_{II} = \frac{\sigma_{TT}}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{k^2}\right)$  и  $p_D = p_B + p_{II}$ ,

$$\varepsilon_{L3} = \varepsilon_{L2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_{TT}}{E_T}.$$

НДС для упругопластических деформаций ТР (точки  $BГ$  и  $Д$ ) для давления и относительной деформации определяется соответственно

$$p_{TW} = \frac{\sigma_{TP}}{\sqrt{3}} \left( 1 + 2 \ln \lambda - \frac{\lambda^2}{k^2} \right) \text{ и } p_{DE} = p_B + p_{TW}, \quad \varepsilon_{TW} = \varepsilon_{WE} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_{TP}}{E_p} \lambda^2.$$

Пластические деформации перемычек отверстия ТР (сечения эквивалентной втулки, точка  $Г$  и  $Д$ ) для давления и относительной деформации

$$\text{определяется соответственно } p_J = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{TP} \ln k \quad \text{и} \quad p_E = p_B + p_J,$$

$$\varepsilon_{JI} = \varepsilon_{WE} = GW = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_{TP}}{E_p} k.$$

Упругая разгрузка соединения Т-ТТР (максимально-возможные режимы сборки): в точке  $Г$  для относительной деформации

$$\text{определяется соответственно } \varepsilon_{IK} = MK = \frac{P_s}{E_p} B.$$

Тогда остаточное давление после сборки в конечной ее стадии для давления и относительной деформации определяется соответственно

$$p_{ост}^0 = p_{ост}^1 = p_J - \frac{P_E}{A}, \quad \varepsilon_{KQ} = \varepsilon_{JI} - \varepsilon_{IK}.$$

При расчетах режимов сборки коэффициенты  $A$  и  $B$  определяют по

$$\text{формулам: } A = \frac{\beta^2 - 1}{2} \left( \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} - \mu_T + \frac{E_T}{E_p} B \right); \quad (4) \quad \text{и} \quad B = \frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} + \mu_p; \quad \lambda = \frac{d_c}{d_p}, \quad (5)$$

где  $\beta = d_c / d_1$ ;  $k = D / d_p$ ;  $d_c$  — диаметр зоны пластических деформаций в ТР ( $d_p < d_c < D$ ).

При упругопластических деформациях ТР зависимость между остаточным давлением и упругими деформациями нелинейная. Максимального значения остаточное давление достигает в точке  $I'$ , соответствующей давлению при котором исчерпывается несущая способность ТР (точка  $Д$ ).

Таким образом, условие возможности сборки отдельного соединения Т-ТТР с заданной прочностью и герметичностью  $P_{ост}$  при известных

размерах и механических свойствах ( $\beta, k, \sigma_{TT}, \sigma_{TP}, E_T, E_P, \mu_1, \mu_P$ ) можно

записать в виде

$$\left. \begin{aligned} & \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{TT} \\ & \frac{2}{3} \sigma_{TT} \ln \beta + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{TP} \ln k \\ & \frac{2A \sigma_{TT} \ln \beta}{\sqrt{3}(A-1)} \end{aligned} \right\} > \frac{\left( \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{TT} \ln \beta + p_{ост}^A \right) A}{A-1} \quad (6).$$

В левую часть неравенства (6) подставляют меньшее из трех указанных значений.

В технологиях XXI века при изготовлении новых СТ основное внимание следует уделять ресурсосберегающим технологиям с рациональным использованием материальных и трудовых ресурсов. Ресурсосберегающие технологии необходимо предусматривать на стадиях научно-исследовательских и конструкторских разработок [1-4].

### Литература

1. Ремнев, А. И. Технология производства систем теплообмена с тонкими трубными решетками [Текст] / А. И. Ремнев. – Курск, 2005. – 236 с.
2. Ремнев, А. И. Организация производства по выпуску ресурсосберегающих систем теплообмена [Текст] / А. И. Ремнев, С. Г. Емельянов, Ю. С. Степанов // Известия Курского государственного технического университета. – Курск, 2008. – № 2(23). – С.13-23
3. Ремнев, А. И. Оценка качества обработки поверхностей элементов систем теплообмена [Текст] / А. И. Ремнев, Е. И. Яцун, В. А. Тисенко // Известия Юго-Западного государственного университета. – Курск, 2011. – № 6(39). – Ч. 2. – С. 135-143.
4. Пат. № 2381859 (Россия) Способ получения змеевикового элемента с U-образными коленами заданной кривизны гибкой монометаллических или биметаллических оребренных труб [Текст] / А. И Ремнев, И. С. Захаров, С. Г. Емельянов, Оpubл. 20.02.2010 в Бюл. № 5.