

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА  
ПРОЕКТИРОВЩИКА АГРЕГАТОВ СО ЗМЕЕВИКОВЫМИ СИСТЕМАМИ****Баранова И. В., Петривна Е. А.**

Разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать расчет геометрических параметров змеевиковых элементов и реализовать их в параметрических моделях гладких и оребренных труб. Проведенный вычислительный эксперимент с использованием данных моделей позволяет установить распределение напряжений по сечению оребренной трубы и закономерности влияния эффекта оребрения. В программе определяется минимально возможный радиусгиба трубы, зависящий от исходных данных: диаметров трубы и полученного оребрения, толщины стенки оребрения, шага оребрения и механических свойств материала трубы.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати розрахунок геометричних параметрів змеевикових елементів, реалізувати їх в параметричних моделях гладких та оребрених труб. Проведений обчислювальний експеримент з використанням цих моделей дозволяє визначити розподіл напружень в перерізі оребреної труби та закономірності впливу підкріплюючого ефекту оребрення та жорсткості ребра. В програмі визначається мінімально можливий радіус згину труби, що залежить від вхідних даних: діаметрів труби та отриманого оребрення, товщини стінки оребрення, кроку оребрення і механічних властивостей матеріалу труби.

Software, allowing to automatize the calculation of geometrical parameters of elements of worm-pipes, and realize them in the parametrical models of smooth pipe and models of pipe with ribs, is developed. The calculable experiment is conducted with the use of these models of pipe. The results of experiment allows to set distributing of tensions on the section of pipe with ribs and conformity to the law of influencing of dimension and mechanical properties of ribs. The possible minimum radius of bend of the pipe is determined in the program. This radius depending on basic data: diameters of pipe and got ribs, thickness of wall of ribs, step of ribs and mechanical properties of material of pipe.

Баранова И. В.

канд. техн. наук, доц. СумГУ

[gloria@opm.sumdu.edu.ua](mailto:gloria@opm.sumdu.edu.ua)

Петривна Е. А.

студент СумГУ

УДК 62.462.3

**Баранова И. В., Петривна Е. А.**

## **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА ПРОЕКТИРОВЩИКА АГРЕГАТОВ СО ЗМЕЕВИКОВЫМИ СИСТЕМАМИ**

В промышленности широко применяют змеевиковые системы. В настоящее время конструкции змеевиковых систем содержат преимущественно оребренную трубу, изогнутую в плоский или пространственный змеевиковый элемент. Змеевиковые элементы на участке изгиба трубы и прилегающих участках не предусматривают оребрения, или же ребра имеют низкую степень оребрения (высоту) вследствие существующих технологий гибки труб [1–4]. Этот факт значительно снижает эксплуатационные характеристики таких систем и обуславливает увеличение их габаритов.

В работе [5] приведены исследования нового способа гибки алюминиевых оребренных монометаллических труб с малым радиусомгиба. Отличительной особенностью данного способа гибки является то, что для обеспечения качественногогиба трубу на этом участке следует подвергнуть сжатию в осевом направлении. Исследуемый новый способ еще достаточно не изучен, но позволяет решить поставленные задачи при соответствующей доработке.

На практике возникает необходимость гнуть трубы с наименьшим возможным радиусомгиба. Наиболее важным физико-механическим фактором при этом являются пластические свойства металла [6–8], которые оцениваются величиной остаточного относительного удлинения на расчетной длине при растяжении. При гибке удлинения металла в отдельных волокнах могут превышать максимальные удлинения, получаемые при испытании образцов на разрыв. Предварительный расчет наибольшей возможной деформации при гибке трубы нельзя производить по данным, полученным стандартными испытаниями их на растяжение. Учитывая, что нагружение трубы при изгибе происходит более сложно, чем нагружение образца при растяжении, более правильно пользоваться данными по удлинениям шейки, исходя из величины поперечного сужения образца при разрыве.

Целью работы является разработка автоматизированного рабочего места (АРМ) проектировщика агрегатов со змеевиковыми системами, в котором требуемые эксплуатационные характеристики змеевиковых систем будут обеспечены с заданными геометрическими и прочностными ограничениями что, позволит снизить металлоемкость, а, следовательно, и себестоимость их изготовления.

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать расчет геометрических параметров змеевиковых элементов, реализовать их в параметрической 3D-модели и провести вычислительный эксперимент для определения прочностных характеристик гладких и оребренных труб с помощью комплекса SolidWorks + COSMOSXpress. В программе определяется минимально возможный радиусгиба трубы, зависящий от вводимых исходных данных: диаметров трубы и полученного оребрения, толщины стенки оребрения, шага оребрения и механических свойств материала трубы. Фактором, ограничивающим минимальный радиусгиба, является касание соседних ребер на внутренней частигиба.

В работе [5] приведена эмпирическая зависимость для определения минимального относительного радиусагиба  $R_{\min} = \frac{R_{\text{вн}}}{D_n}$ , которая не отражает геометрических параметров

оребренной трубы: глубины и шага оребрения, толщины ребра и др. Поэтому в ходе разработки АРМ была получена зависимость, учитывающая эти параметры.

В процессе формирования изгиба трубы волокна внутренней частигиба укорачиваются, а волокна внешней частигиба удлиняются. Длина дуги нейтрального слоя определяется из геометрических соотношений по формуле:

$$l_0 = \pi \cdot R_0 \frac{\beta}{180}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где  $R_0$  – радиус гiba нейтрального слоя оребренной трубы (по геометрической оси), мм;  $\beta$  – угловой шаг оребрения на гibe.

Длина дуги в нейтральном слое гiba, между соседними двумя точками винтовой линии оребрения, измеренная вдоль образующей поверхности трубы, будет приблизительно равна шагу оребрения  $S$ . Тогда формула (1) примет вид:

$$S \approx l_0 = \pi \cdot R_0 \frac{\beta}{180}, \text{ мм}. \quad (2)$$

Из расчетной схемы для оребренной трубы можно определить тангенс угла между двумя соседними ребрами:

$$\frac{\Delta}{R_{\min}} = \text{tg}\beta, \quad (3)$$

где  $\Delta$  – толщина стенки оребрения, мм.

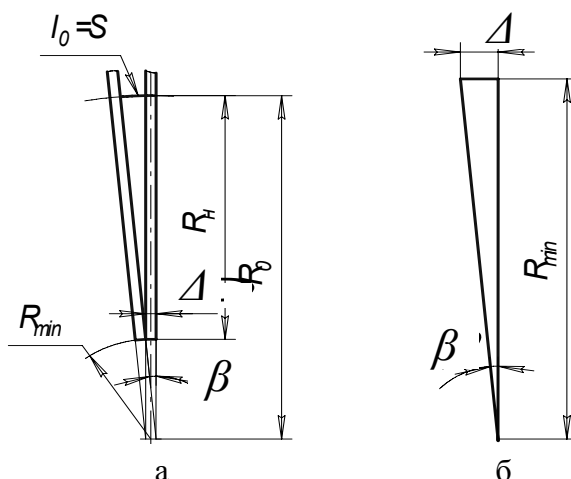


Рис. 1. Расчетная схема для определения минимального радиуса гiba

Поскольку  $R_{\min} = \frac{\Delta}{\text{tg}\beta}$  и  $R_{\min} = R_0 - R_H$ , то с учетом тангенса угла наклона ребер для участка гiba (рис. 1) путем математических преобразований определим минимальный радиус гiba в нейтральном слое [6]:

$$R_{0 \min} = \frac{\Delta R_H}{S - \Delta} + R_H = \frac{\Delta \frac{D_H}{2}}{S - \Delta} + \frac{D_H}{2}, \text{ мм}. \quad (4)$$

Определение прочностных характеристик гладких и оребренных труб и преимуществ одной из них проходило следующим образом.

Вначале производились аналитические расчеты на прочность гладких труб. Расчет гладкой трубы на прочность производится по четвертой (энергетической) теории прочности [7–8]. Применение этой теории прочности позволяет производить расчеты с достаточной точностью, при этом расчетные формулы будут достаточно простыми [9]. Главные нормальные напряжения определялись по формуле Ляме. При проверочном расчете по ГОСТ 3845-75 наибольшая величина пробного давления рассчитывалась по формуле:

$$P = \frac{2s \cdot R}{D}, \tag{5}$$

где  $s$  – толщина стенки трубы, мм;  $R$  – допускаемое напряжение в стенке трубы;  $D$  – номинальный наружный диаметр трубы.

Для гладких труб было рассчитано эквивалентное напряжение на стенке трубы и получены зависимости напряжения от давления в интервале от 1 до 50 МПа (рис. 2). Например, для трубы  $13 \times 1,9$  изготовленной из алюминиевого сплава АМц, для которого  $\sigma_m = 110$  МПа допустимое давление в трубе составляет 24 МПа. Для той же трубы наибольшая величина пробного давления составляет 24,8 МПа. Таким образом, расхождение результатов, полученных при расчете, составило 3 %.

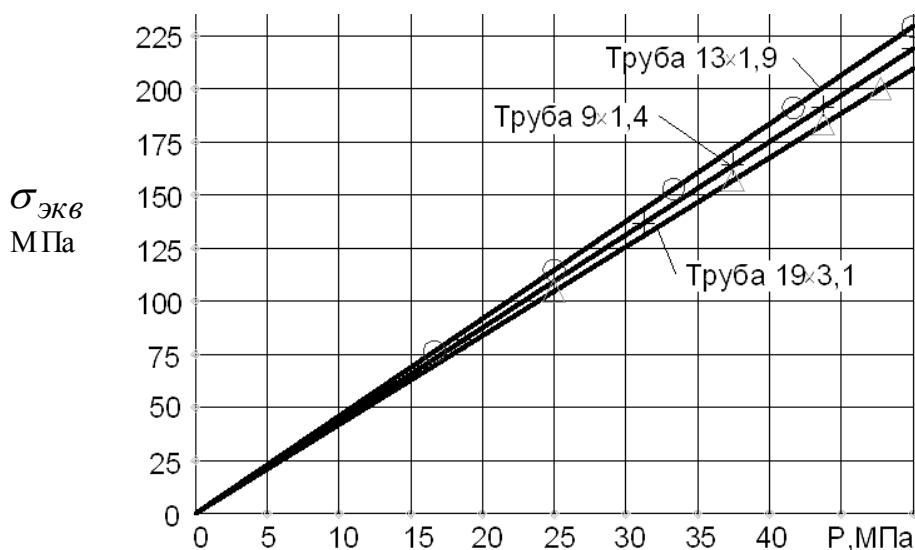


Рис. 2. Зависимость эквивалентного напряжения на стенке трубы от давления рабочей жидкости в трубе

Затем в SolidWorks была смоделирована труба  $13 \times 1,9$  под воздействием внутреннего давления, величина которого была принята равной максимально допустимому давлению, рассчитанному для материала АМц (24 МПа). С помощью COSMOSXpress установлено значение максимального эквивалентного напряжения на стенке трубы, составляющее 112,4 МПа, которое отличается от рассчитанного ранее значения на 2 %. Это подтверждает адекватность разработанной модели гладкой трубы и дает основания к применению ее для последующих экспериментов.

Имитация нагружения оребренных труб на ЭВМ также осуществлялась в два этапа. На первом этапе создавались твердотельные модели труб, и проверялась адекватность разработанных моделей. Так для трубы с параметрами: внутренний диаметр 9 мм, наружный диаметр 11,8 мм, наружный диаметр оребрения 18,2 мм, шаг оребрения 2,5 мм и толщиной ребра 0,3 мм ( $911,8 \times 18,2 \times 2,5 \times 0,3$ ) давление разрушения, полученное на ЭВМ, составило 27,4 МПа; для трубы  $13 \times 16,8 \times 26 \times 2,8 \times 0,5$  – 27,6 МПа; для трубы  $19 \times 25,2 \times 39 \times 3 \times 0,5$  – 27,5 МПа. Поскольку отклонение аналитических расчетов от численных результатов лежит в пределах  $\pm 5 \%$ , то компьютерную модель считаем адекватной и дальнейшее исследование оребренных труб проводим на ЭВМ.

Разработка приложения велась в среде Borland Delphi 7.0.

Разработанное АРМ состоит из трех модулей – проектного расчета, построения 3D-модели и анализа прочностных характеристик (рис. 3).

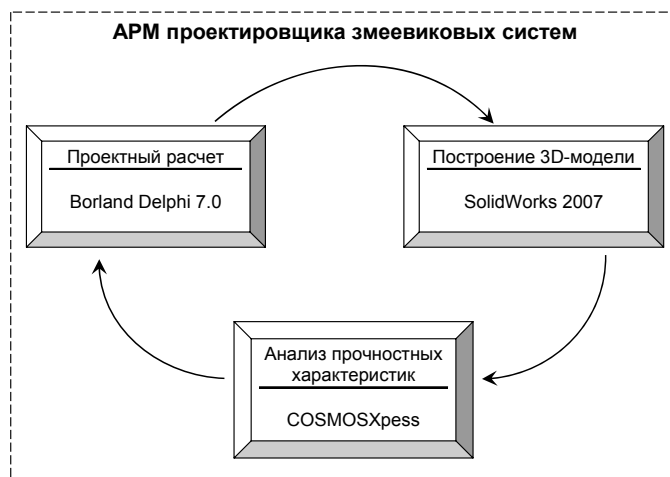


Рис. 3. Структурная схема автоматизированного рабочего места

Работа программного приложения реализована в режиме последовательных окон. Вначале выполняется проектировочный расчет, для которого задаются исходные данные, указанные в расчетной схеме (рис. 2). В программе рассчитывается минимальный радиус гiba оребренной трубы по формуле (4).

Полученные геометрические данные через механизм СОМ-модели передаются в SolidWorks, где реализована 3D-модель змеевиковой системы. Поскольку геометрические характеристики заданы параметрическим способом, то происходит автоматическая перестройка трехмерной модели.

Анализ прочностных характеристик осуществляется с помощью COSMOSXpress. Дополнительной передачи данных для расчета не требуется, поскольку это приложение интегрировано в Solid Works. Для расчета модели в COSMOSXpress задаются материал трубы, тип закрепления, вид нагрузки и ее значение. Результаты расчета в графическом и числовом виде записываются в файл и анализируются. При необходимости расчет повторяется с другими исходными данными.

Разработанное АРМ было использовано для проведения численного эксперимента. Целью дальнейшего исследования являлось сравнение прочностных характеристик гладких и оребренных труб. Например, гладкая труба с диаметром условного прохода 9 мм и толщиной стенки 1,4 мм сравнивалась с аналогичной оребренной трубой, выполненной в пяти исполнениях с высотой оребрения 0,6; 1,4; 3,2; 4,5; 5,8 мм. Трубы подвергались воздействию внутреннего давления величиной 20 МПа. При этом фиксировалось максимальное эквивалентное напряжение на стенке трубы.

В результате установлено, что оребрение оказывает подкрепляющий эффект на поверхности труб любого типоразмера. Так, для трубы 9 × 1,4 наличие оребрения высотой 0,6...5,8 мм позволило снизить напряжение на стенке в 1,04...1,17 раза соответственно; для трубы 13 × 1,9 с оребрением высотой 0,6...8,6 мм эти показатели составили 1,08...1,3 раза; для трубы 19 × 3,1 с оребрением 0,9...12,9 мм эти показатели составили 1,06...1,27 раза.

Для определения зависимости максимального эквивалентного напряжения в трубе от толщины стенки исследовались твердотельные модели труб, отличающиеся внутренним диаметром и имеющие одинаковую толщину стенки, а также толщину, шаг и высоту оребрения. Исследовались трубы диаметром условного прохода 9, 13 и 19 мм с толщиной стенки 1,4 мм, шагом оребрения 2,5 мм, толщиной ребра 0,3 мм, высотой оребрения 3,2 мм.

По результатам проведенных экспериментов были построены графики, отражающие зависимость максимального эквивалентного напряжения в трубе от высоты оребрения (рис. 4, а), а также зависимость максимального эквивалентного напряжения в трубе от внутреннего давления и диаметра трубы (рис. 4, б).

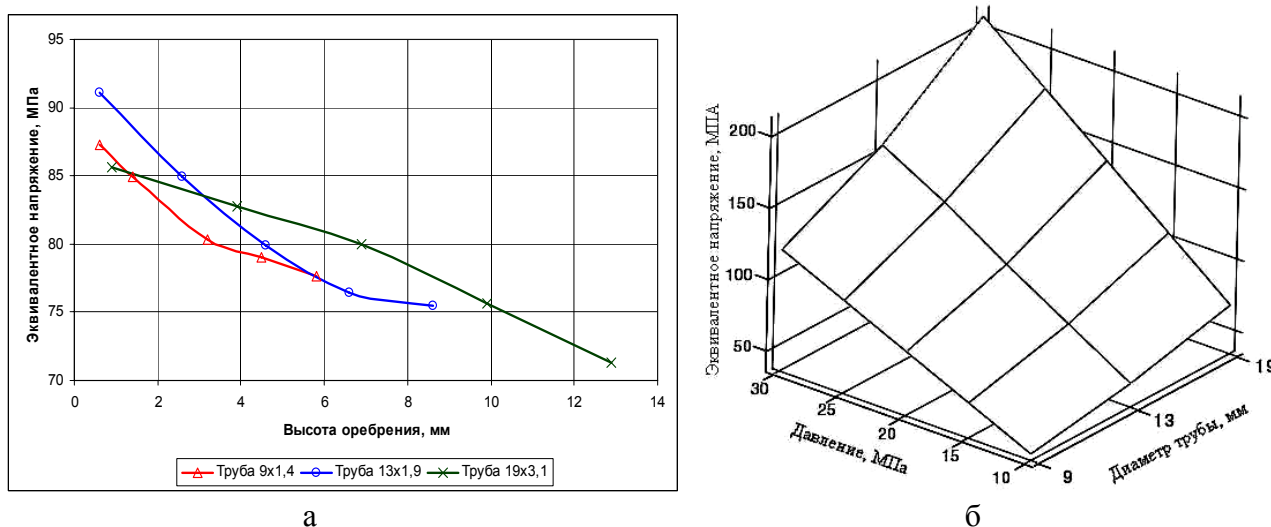


Рис. 4. Зависимость максимального эквивалентного напряжения в трубе от высоты оребрения, внутреннего давления и диаметра трубы

### ВЫВОДЫ

Разработанное АРМ проектировщика змеевиковых систем позволяет выполнить геометрические и прочностные расчеты проектируемых систем, а также проводить дополнительные исследования. Созданные параметрические модели труб позволяют установить распределение напряжений по сечению оребренной трубы и закономерности влияния подкрепляющего эффекта оребрения и жесткости ребра трубы. Установлено, что для оребренных труб максимальное напряжение в стенке трубы уменьшилось на 4...26 % соответственно по сравнению с гладкой трубой того же типоразмера.

Также установлено, что при заданных ограничениях при увеличении металлоемкости змеевикового элемента на 10 % за счет формирования оребрения его прочность повышается на 30...40 %. Таким образом, формирование оребрения позволяет повысить эксплуатационные характеристики змеевиковых систем и уменьшить их металлоемкость в 3...4 раза.

Это позволяет для заданных условий работы осуществить отбор рациональных сочетаний типоразмера оребренной трубы и материала, из которого она будет изготовлена.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков В. В. *Алюминиевые радиаторы автотракторных двигателей* / В. В. Бурков. – М., Л : Машиностроение, 1964. – 200 с.
2. *Эффективный пластинчатый конденсатор* / Л. Л. Товажнянский, В. О. Цибульник, А. Р. Ястребинецкий [та ін.] // *Вісник ХПІ*. – 1978. – № 97. – С. 24–27.
3. Пат. 9668А Украина. *Способ гибки труб*. Оубл. Б.И. *Промышленная собственность*, 1996. – № 3.
4. Ястребенецкий А. Р. *Влияние шага гофров на процесс конденсации паров в каналах пластинчатых теплообменников* / А. Р. Ястребенецкий, В. А. Цибульник, Л. Л. Товажнянский // *Вестник ХПИ*. – 1973. – № 83. – С. 13–16.
5. Захаров Н. В. *Новая технология гибки монометаллических цельнооробренных труб* / Н. В. Захаров, В. А. Немчунов, А. И. Ремнев, А. А. Макогон // *Вестник ХГУ*. – 2000. – Вып. 110. – С. 55–69.
6. Петривный В. Н. *К вопросу о расчете радиусагиба оребренных труб* / В. Н. Петривный, А. И. Ремнев // *Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ*. – Суми, 2004. – С. 172.
7. Ковтун А. Д. *Определение деформации стенок и изгибающих моментов при холодной гибке труб* / А. Д. Ковтун. – М. : Судостроение, 1963. – 254 с.
8. Гоголев А. Я. *Расчет трубных досок теплообменников по предельным нагрузкам* / А. Я. Гоголев // *Энергомашиностроение*. – 1963. – № 4. – С. 8–12.
9. Ремньов О. І. *Вплив зусилля деформування на герметичність і міцність з'єднань з натягом* / О. І. Ремньов, В. М. Петрівний // *Вісник СНАУ*. – 2001. – № 7. – С. 110–115.