

### ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ СТЕПЕНИ ВАКУУМИРОВАНИЯ, ДОПУСТИМОЙ ДЛЯ ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКИ

© 2021 И.Е. Адеянов, М.Ю. Александрова

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 20.01.2021

В статье излагается численный расчет гофрированной стенки трансформатора под давлением. Определяется допустимая степень вакуумирования бака волнистого трансформатора. Постановка задачи формулируется следующим образом: определить границу максимально допустимого давления при вакуумировании бака при различных геометрических размерах гофра. Максимальное эквивалентное напряжение при этом не должно превышать предел текучести и стенки гофра не должны смыкаться. Численный расчет проводится методом конечных элементов. Данный подход к расчету поведения гофрированной стенки под давлением может быть использован для определения максимально допускаемого внутреннего давления бака.

*Ключевые слова:* гофр, вакуумирование, метод конечных элементов.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-9-12

В процессе эксплуатации трансформатора стенки бака испытывают избыточное давление. Внутреннее давление создается в режиме работы трансформатора при нагреве, а наружное давление возникает при вакуумировании.

В случае капитального ремонта трансформатора или его транспортировки возникает вопрос о необходимости сушки изоляции обмоток трансформатора. Одним из наиболее распространенных в эксплуатации является способ сушки изоляции в собственном баке без масла с применением вакуумирования, допустимого для конструкции бака. Вакуумным насосом внутри бака создается разрежение, допустимое для данной конструкции бака.

Рассматриваемая в данной статье конструкция трансформатора, содержит гофрированные стенки, использующиеся для компенсации избыточного давления масла при нагреве. Гофрированная стенка под давлением имеет ограничения в условиях эксплуатации. Деформирование ее гофр в процессе эксплуатации должно быть упругим, а также гофры не должны схлопываться.

Наибольшую нагрузку гофрированная стенка испытывает в процессе вакуумирования. В зависимости от степени вакуумирования меняется и нагрузка на гофр. В данной работе определяется максимальная допустимая степень

вакуумирования для некоторых вариантов конструкции гофра.

Гофр представляет собой тонкостенную конструкцию, полученную гибкой листа (рисунок 1, а). Эскиз части гофра с указанием варьируемых размеров приведены на рисунке 1, б:  $b$  – глубина волны гофра;  $R$  – внутренний радиус гофра;  $\delta$  – толщина стенки гофра.

В работе [1] аналитический и численный расчет гофра производился с использованием балочной схемы. В данной работе используется более точно описывающая реальную конструкцию оболочечная схема расчета, учитывающая радиусы закругления гофра.

Расчет производится методом конечных элементов. В силу симметрии гофра и приложенных нагрузок, в расчетах используется половина гофра (рисунок 2). Кроме геометрической модели гофра на рисунке 2 присутствует абсолютно жесткая стенка. В качестве граничных условий приняты: условия симметрии по линиям гофра, лежащим в плоскости симметрии; жесткое закрепление по границам гофра, не лежащим в плоскости симметрии. Нагружение гофра производится равномерным наружным давлением.

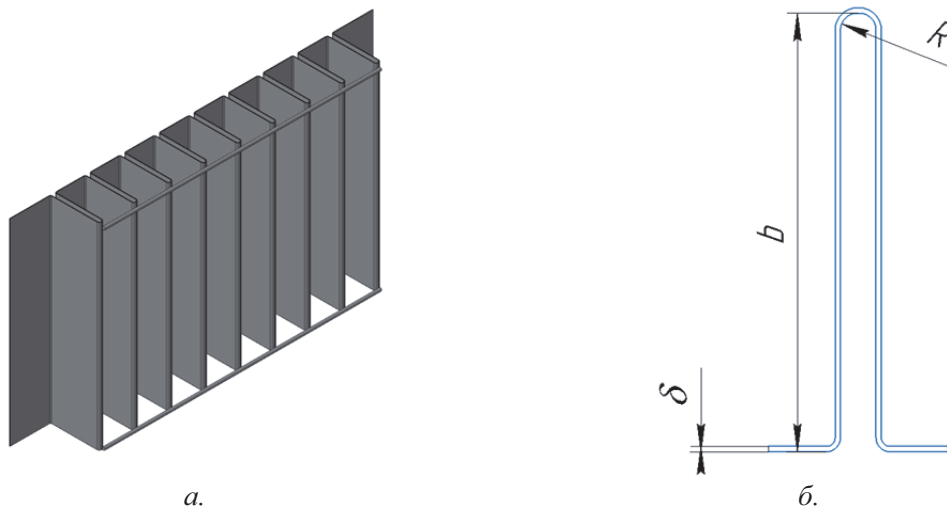
Геометрическая модель гофра разбита конечными элементами оболочечного типа [2], имеющими 4 узла с 6 степенями свободы в каждом узле: 3 перемещения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и 3 момента относительно этих осей (рисунок 3). Контакт между гофром и абсолютно жесткой поверхностью моделировался целевыми конечными элементами на стенке и контактными конечными элементами на гофре.

*Адеянов Игорь Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики.*

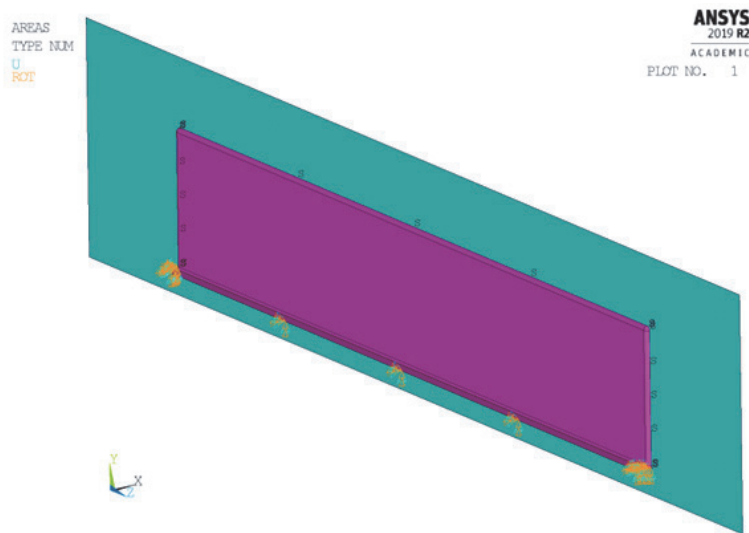
*E-mail: adigorev@gmail.com*

*Александрова Маргарита Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики.*

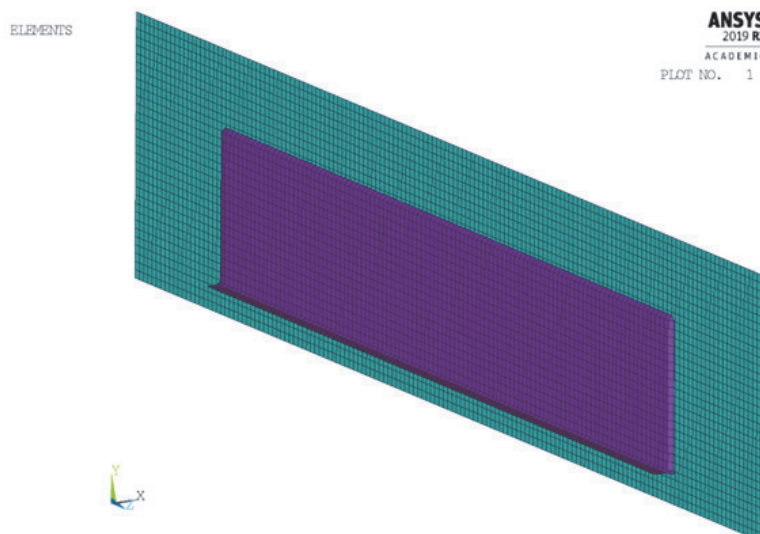
*E-mail: kris-maks@mail.ru*



**Рис. 1.** Гофрированная стенка:  
а – общий вид; б – сечение рассчитываемой части гофра



**Рис. 2.** Геометрическая модель половины гофра с граничными условиями и абсолютно жесткой стенкой



**Рис. 3.** Конечно-элементная модель половины гофра и абсолютно жесткой стенки

Механические свойства материала гофра (сталь 09Г2С) задаются следующими константами:  $E = 2 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup> – модуль продольной упругости материала гофра,  $\nu = 0,3$  коэффициент Пуассона,  $\sigma_T = 340$  МПа – предел текучести.

Расчет производится шагами по наружному давлению от  $p = 0$  до максимального значения  $p = 1$  кг/см<sup>2</sup>, соответствующего полному вакууму. В качестве допустимого давления (степени вакуумирования) в итоге выбирается такая максимальная величина давления, при которой выполняются одновременно 2 условия: 1) максимальное эквивалентное напряжение не превышало предела текучести; 2) стенки гофра не схлопывались, т.е. нет соприкосновения стенки гофра и абсолютно жесткой поверхности.

Задача решается как физически и геометрически нелинейная с учетом неупругих свойств материала гофра.

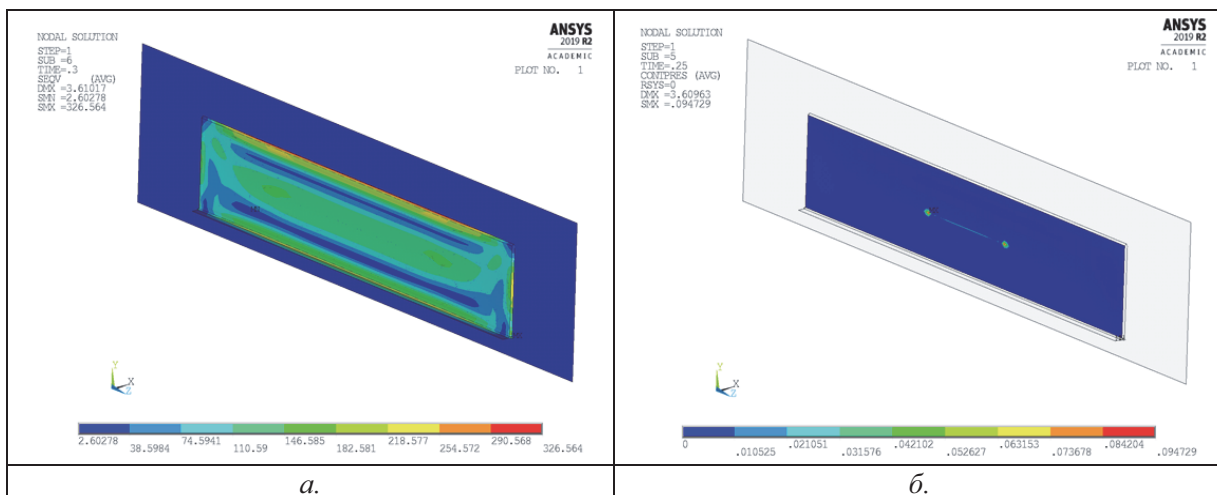
Поле эквивалентных напряжений для одного из выполненных расчетов в качестве примера приведено на рис. 4, а. Для того же варианта рас-

чета на рис. 4, б показан момент схлопывания стенок гофра, о чем можно судить по появившемуся контактному давлению между гофром и абсолютно жесткой поверхностью.

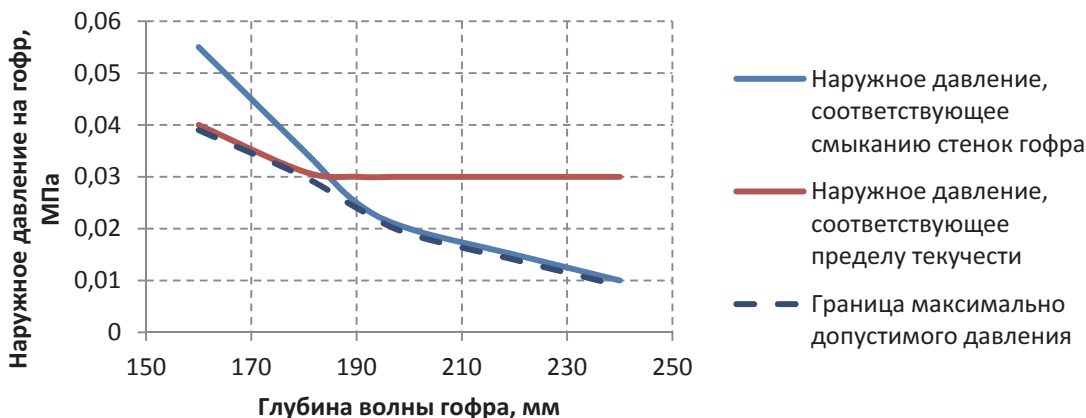
Результаты проведенных численных расчетов представлены в виде графиков на рис. 5-6.

Полученные результаты наглядно демонстрируют влияние глубины волны гофра а также внутреннего радиуса гофра на допустимую степень вакуумирования. При увеличении глубины волны гофра допускаемая степень вакуумирования сначала определяется пределом текучести материала гофра, а затем смыканием стенок гофра. При увеличении внутреннего радиуса гофра допускаемая степень вакуумирования сначала определяется смыканием стенок гофра, а затем пределом текучести материала гофра.

Данный расчет актуален при выборе степени разряжения внутри бака при вакуумировании современных трансформаторов, в которых отсутствуют расширительные баки и термосифон-



**Рис. 4.** Результаты расчета гофрированной стенки ( $b=200$  мм,  $R=3$  мм,  $\delta=1,2$  мм): а – распределение эквивалентного напряжения в гофре на шаге нагружения ( $p = 0,3$  кг/см<sup>2</sup>), предшествующем возникновению напряжений, превышающих предел текучести; б – распределение контактного давления в гофре на шаге нагружения ( $p = 0,4$  кг/см<sup>2</sup>), соответствующем возникновению этого давления



**Рис. 5.** Зависимость допускаемого наружного давления на гофр от глубины волны гофра

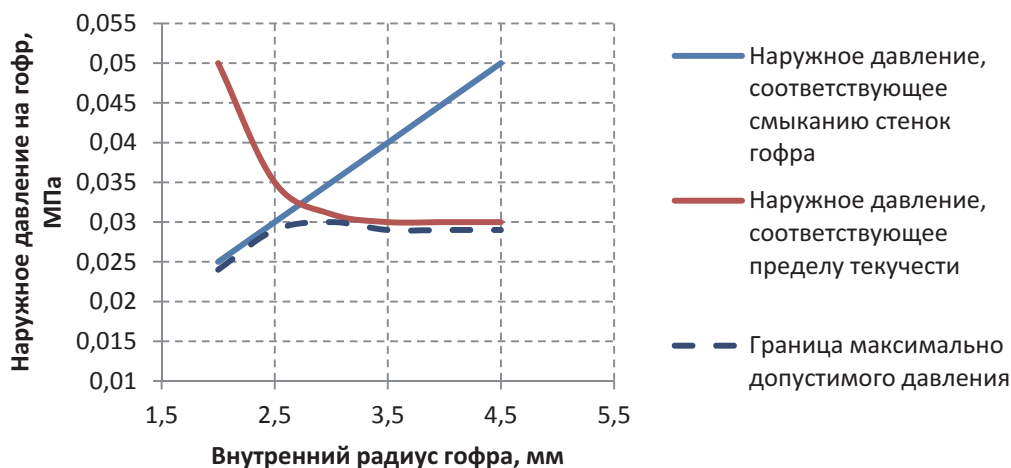


Рис. 6. Зависимость допускаемого наружного давления на гофр от внутреннего радиуса гофра

ные фильтры, а увеличение объема масла при нагреве воспринимается упругими гофрами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адеянов, И.Е. Расчет гофрированной стенки на прочность и жесткость аналитическим и численным методами / И.Е. Адеянов, М.Ю. Александрова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. № 2. – С. 81-85.
2. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг. – М.: Недра, 1974.
3. Бруйка, В.А. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учебное пособие. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара: Самар. гос. техн.ун-т, 2013. – 148 с.

#### NUMERICAL CALCULATION OF THE VACUUM DEGREE FOR A CORRUGATED WALL

© 2021 I. E. Adeyanov, M. Y. Alexandrova

Samara State Technical University

The article presents a numerical calculation of the corrugated wall of a transformer under pressure. The permissible degree of evacuation of the wavy transformer tank is determined. The statement of the problem is formulated as follows: to determine the limit of the maximum allowable pressure during the evacuation of the tank with different geometrical dimensions of the corrugation. In this case, the maximum equivalent stress should not exceed the yield point and the walls of the corrugation should not close. Numerical calculation is carried out by the finite element method. This approach to calculating the behavior of a corrugated wall under pressure can be used to determine the maximum allowable internal pressure of the tank.

Key words: corrugation, evacuation, finite element method.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-9-12

Igor Adeyanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanics. E-mail: adigorev@gmail.com  
Margarita Aleksandrova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics. E-mail: kris-maks@mail.ru