

НАЧАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ CNG-БАЛЛОНОВ ДЛЯ CNG-ГАЗОВОЗОВ

В. В. Зайцев, проф., д-р техн. наук;
Вал. В. Зайцев, доц, канд. техн. наук

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Разработана методика начального проектирования CNG-баллонов, предназначенных для применения в качестве грузовых емкостей нового поколения газозовов — CNG-газовозов, которые будут перевозить метан под высоким давлением. Приведены свойства метана в зависимости от его температуры и давления. Даны результаты расчетов на прочность CNG-баллонов методом конечных элементов. Сделаны выводы и разработаны рекомендации по проектированию CNG-баллонов для CNG-газовозов.

Ключевые слова: CNG-баллон, CNG-газовоз, метан, проектирование, прочность, метод конечных элементов.

Анотація. Розроблено методику початкового проектування CNG-балонів, які призначені для використання в якості вантажних ємностей нового покоління газозовів — CNG-газовозів, які будуть перевозити метан під високим тиском. Наведено властивості метану в залежності від його температури і тиску. Дани результати розрахунків на міцність CNG-балонів методом кінцевих елементів. Зроблено висновки і розроблено рекомендації з проектування CNG-балонів для CNG-газовозів.

Ключові слова: CNG-балон, CNG-газовоз, метан, проектування, стійкість, метод кінцевих елементів

Abstract. The procedure of initial designing of CNG-balloons which will be applied in as cargo capacities of new generation of gas carriers — CNG-carriers which will transport methane under high pressure is developed. Properties of methane are indicated depending on his temperature and pressure. Results of strength analysis of CNG-balloons are given by a finite element method. Conclusions are made and recommendations on designing CNG-balloons for CNG-carriers are developed.

Keywords: CNG-balloon, CNG-carrier, methane, design, strength, finite element method

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Транспортировка природного газа через морские акватории является в настоящее время очень актуальным вопросом. Существует три технологии морского перемещения природного газа — подводными трубопроводами, газозовами в сжиженном состоянии (LNG-газовозы) и газозовами в сжатом состоянии (CNG-газовозы). Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки, но наиболее приемлема для Украины транспортировка природного газа в сжатом состоянии.

Технология CNG (Compressed Natural Gas) считается прорывной технологией транспортировки природного газа с помощью специальных CNG-газовозов. Основное конструктивное отличие CNG-газовозов от LNG-газовозов — их грузовые емкости. У CNG-газовозов грузовые емкости — это большое количество баллонов высокого давления, объединенных в грузовую систему. От того, насколько эффективно выполнено проектирование таких баллонов, зависят технико-экономические показатели CNG-газовозов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Существует большое количество публикаций, относящихся к исследованиям транспортировки, хранения и свойств природного газа. Например, теплофизические свойства метана, который является основной составляющей природного газа, подробно изложены в [1]. Проблемам проектирования, расчета и эксплуатации наземных емкостей высокого давления посвящены работы [2, 3, 6, 7]. Техничко-экономические вопросы проектирования систем морского перемещения газов и различных судов-газовозов освещены в [4, 5]. В патентах [8, 10] описаны новые концепции транспортировки сжатого природного газа с помощью специальных CNG-модулей и сам CNG-модуль [9].

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — разработка процесса начального проектирования CNG-баллонов для CNG-газовозов.

ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку CNG-баллоны являются сосудами высокого давления, основным нормативным документом, который регламентирует расчеты прочности таких конструкций, является ГОСТ 14249-89 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность».

В соответствии с ГОСТ 14249-89 толщина стенки, м, цилиндрической части баллона

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p},$$

где p — внутреннее избыточное давление, Па; D — диаметр баллона, м; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение, Па; φ_p — коэффициент прочности продольного шва (для бесшовных элементов сосудов и аппаратов $\varphi_p = 1$, числовые значения этих коэффициентов должны соответствовать значениям, приведенным в Приложении 5 ГОСТ 14249-89).

Толщина стенки сферической части баллона, м,

$$s_{1p} = \frac{pR}{2[\sigma]\varphi - 0,5p},$$

где R — радиус кривизны сферической части баллона, м; φ — коэффициент прочности сварных швов выпуклых днищ.

CNG-газовозы и перевозимые ими CNG-баллоны могут эксплуатироваться в широком диапазоне значений давления и температуры метана. На начальных стадиях проектирования CNG-баллонов необходимо знать такое основное теплофизическое свойство метана как зависимость его плотности от температуры и давления. Учитывая, что такая зависимость не соответствует свойствам идеального газа, при проектировании CNG-баллонов необходимо использовать результаты экспериментальных исследований свойств метана подробно изложенные Н.Б. Варгафтиком в [1].

В соответствии с [1] зависимости плотности метана, $\rho_{мет}$, кг/м³, от температуры T , К, и давления p , МПа, в интересующем авторов диапазоне представлены в табл. 1.

На базе этих данных, разработаны алгоритм и программа, которые позволяют при заданных температуре и давлении метана определить его плотность. Программа интерполирует табличные данные с помощью кубических сплайнов. Зависимости плотности метана от температуры и давления в графическом виде показаны на рис. 1.

Используя требования ГОСТ 14249-89, данные о свойствах метана и математические зависимости для определения геометрических параметров цилиндрических и сферических фигур, получены зависимости для определения основных геометрических и эксплуатационных параметров CNG-баллонов.

Толщина цилиндрической части баллона, м,

$$t_u = \frac{P_{раб} 0,5D_B}{\varphi_w[\sigma_B] - 0,5P_{раб}}, \quad (1)$$

где $P_{раб}$ — рабочее давление в баллоне, МПа; D_B — внешний диаметр баллона, м; φ — коэффициент прочности сварных соединений; $[\sigma_B]$ — допускаемое напряжение в материале баллона, МПа.

Толщина сферической части баллона, м,

$$t_{сф} = \frac{P_{раб} 0,5D_B}{2z_w[\sigma_B] - 0,5P_{раб}}, \quad (2)$$

где z_w — коэффициент прочности сварных соединений.

Таблиця 1. Плотность метана

ρ , МПа	T , К									
	180	190	200	220	240	260	280	300	320	340
0,1	1,081	1,023	0,971	0,881	0,807	0,744	0,691	0,644	0,604	0,568
0,2	2,181	2,061	1,954	1,771	1,620	1,493	1,384	1,291	1,209	1,137
0,3	3,301	3,115	2,906	2,669	2,438	2,245	2,081	1,939	1,816	1,708
0,4	4,442	4,186	3,959	3,577	3,264	3,002	2,781	2,591	2,425	2,279
0,5	5,605	5,274	4,983	4,492	4,093	3,764	3,483	3,244	3,035	2,852
1,0	11,79	11,00	10,32	9,217	8,347	7,634	7,047	6,545	6,112	5,734
1,4	17,28	15,97	14,89	13,18	11,87	10,82	9,960	9,225	8,598	8,065
2,0	26,79	24,30	22,36	19,47	17,36	15,73	14,41	13,31	12,39	11,59
3,0	49,14	41,68	37,04	31,08	27,17	24,32	22,10	20,31	18,82	17,55
4,0	283,0	68,97	56,27	44,46	37,91	33,47	30,16	27,54	25,41	23,62
5,0	293,4	230,4	85,54	60,28	49,73	43,20	38,55	35,00	32,15	29,80
6,0	301,0	259,7	154,2	79,43	62,77	53,56	47,33	42,68	39,03	36,06
7,0	307,3	272,8	217,6	103,0	77,22	64,56	56,43	50,56	46,04	42,41
8,0	312,6	282,2	239,9	131,0	93,02	76,16	65,88	58,65	53,16	48,83
9,0	317,2	289,7	253,6	159,9	110,0	88,26	75,59	66,89	60,39	55,31
10	321,2	295,9	263,8	184,4	127,6	100,8	85,54	75,24	67,66	61,80
15	337,2	317,7	296,5	247,6	199,7	161,5	135,3	117,3	104,2	94,25
20	348,8	332,2	313,9	276,6	239,6	205,6	177,4	155,4	138,4	125,1
30	365,9	352,4	338,0	309,9	282,7	256,7	232,6	211,1	192,3	176,3
40	378,6	366,7	354,2	330,9	308,4	286,6	266,1	247,0	229,6	213,8

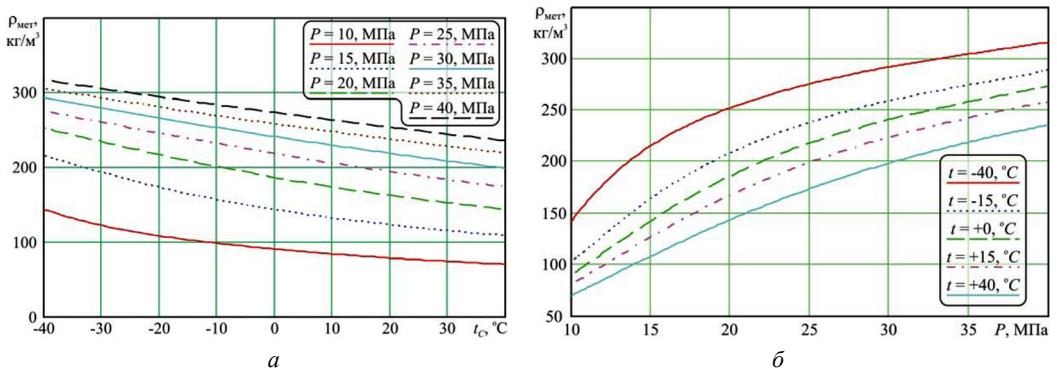


Рис. 1. Зависимость плотности метана от его температуры при 10...40 МПа (а) и давления при -40...+40 °С (б)

Таблиця 2. Характеристики материалов

Наименование материала	Марка материала	Допустимый предел прочности $[\sigma]$, МПа	Плотность ρ , кг/м ³
Сталь (St)	09Г2С	215	7820
	X80	314	7700
Титан (Ti)	BT3-1	540	4500
	ПТ-3В	357	4450
Алюминий (Al)	1561 Чаг-Ф	138	2700
Стеклопластик (Glasfas)	РВМН-10	510	2600
Углепластик (CFK)	T-700S	552	1700

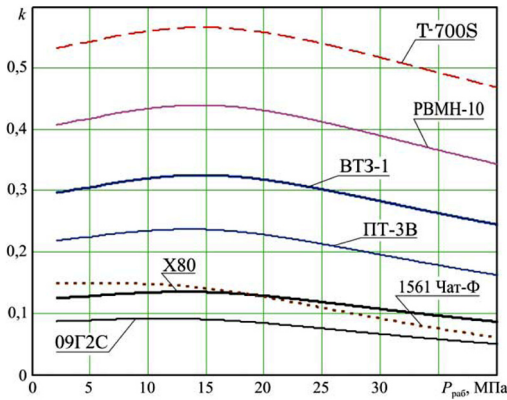


Рис. 2. Зависимость доли массы метана в полной массе баллона с метаном от рабочего давления и материала баллонов

Масса материала баллона, кг,

$$M_B = (S_{ц}t_{ц} + S_{сф}t_{сф}) \rho_B, \quad (3)$$

где ρ_B — плотность материала баллона, кг/м³; $S_{сф} = \pi D_B^2$, $S_{ц} = \pi D_B(L_B - D_B)$ — площа-

$$V_B = \frac{\pi (D_B - 2t_{ц})^2}{4} (L_B - D_B) + \frac{\pi (D_B - 2t_{сф})^3}{6}. \quad (4)$$

Масса метана в баллоне, кг,

$$M_{газ} = \rho_{мет} V_B, \quad (5)$$

где $\rho_{мет} = f(P_{раб}, T)$ — функция плотности метана, кг/м³, от температуры T , К и рабочего давления $P_{раб}$, МПа.

Полная масса баллона с газом, кг,

$$M_{B\Sigma} = M_B + M_{газ}. \quad (6)$$

Сравнительный объем газа при атмосферном давлении и комнатной температуре, м³,

$$V_{газ.1.атм} = V_B \frac{\rho_{мет}(P_{раб}, t_{раб})}{\rho_{мет}(P_{н}, t_{комн})}, \quad (7)$$

где $\rho_{мет} = f(P_{раб}, t_{раб})$ — плотность метана при рабочем давлении и рабочей температуре, кг/м³; $\rho_{мет} = f(P_{н}, t_{комн})$ — плотность метана при нормальном (атмосферном) давлении и комнатной температуре, кг/м³; $t_{комн} = 20$ °С.

Доля массы метана в полной массе баллона с метаном

$$k = \frac{M_{газ}}{M_{B\Sigma}}. \quad (8)$$

Для примера выполнен расчет параметров баллонов при $L_B = 1,084$ м и $D_B = 1,084$ м

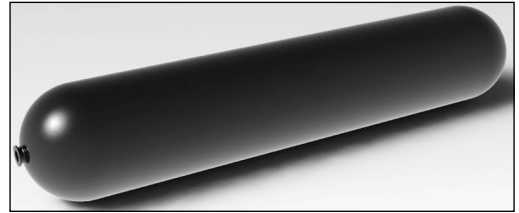


Рис. 3. Параметрическая 3D-модель CNG-баллона

ди поверхностей сферической и цилиндрической частей баллона, м²; — площадь поверхности части баллона, м²; L_B — длина баллона, м.

Внутренний объем баллона, м³,

для различных материалов (табл. 2) и различных значений рабочего давления.

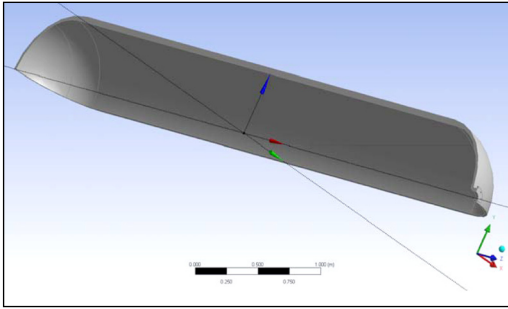
Влияние на величину k рабочего давления и материала баллонов показано на графиках рис. 2, построенных по результатам расчетов в соответствии с зависимостями (1) – (8).

Для выполнения проверочного расчета на базе предварительных расчетов разработана параметрическая 3D-модель CNG-баллона (рис. 3).

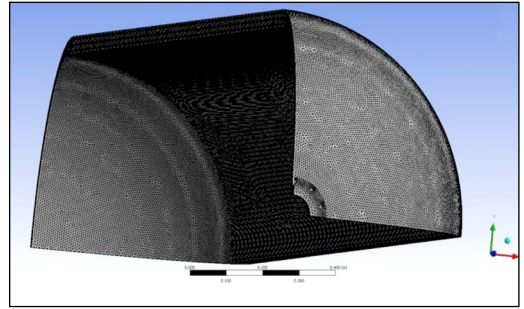
В качестве параметров приняты такие геометрические размеры баллона: длина цилиндрической части L_B ; наружный диаметр D_B ; толщина цилиндрической части t_0 ; толщина сферической части $t_{сф}$.

Параметрическая модель баллона позволила провести его проверочный расчет прочности с помощью метода конечных элементов при следующих исходных данных: $L_B = 5,619$ м; $D_B = 1,084$ м; $t_0 = 45,8$ мм; $t_{сф} = 22,4$ мм; $P_{раб} = 25$ МПа; материал — сталь X80.

Для экономии ресурсов компьютера было учтено, что у баллона две плоскости симме-

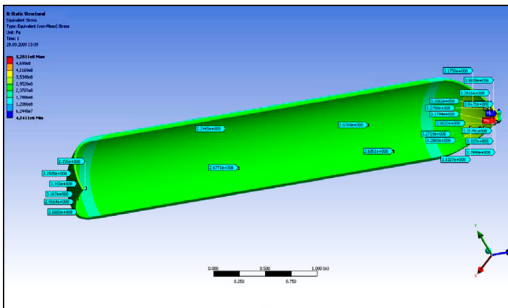


a

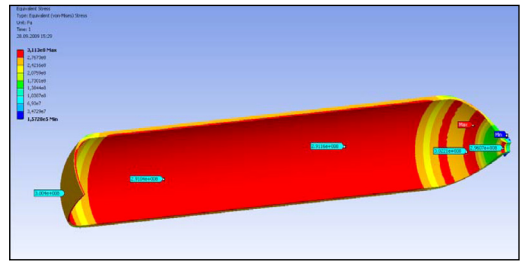


б

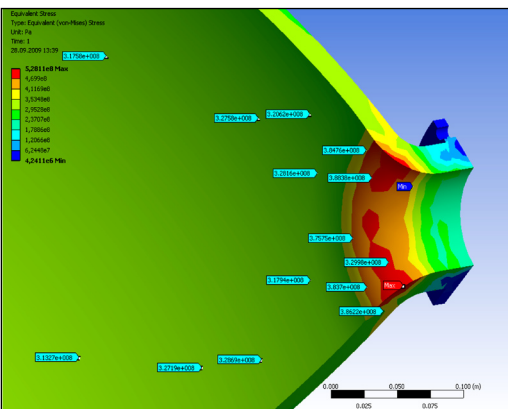
Рис. 4. Расчетная (*a*) и конечно элементная (*б*) модели CNG-баллона



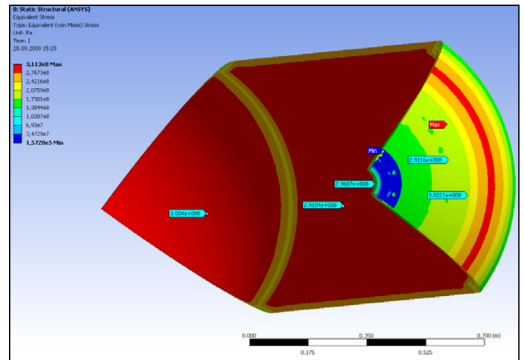
a



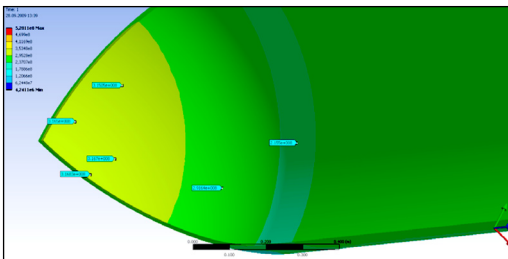
a



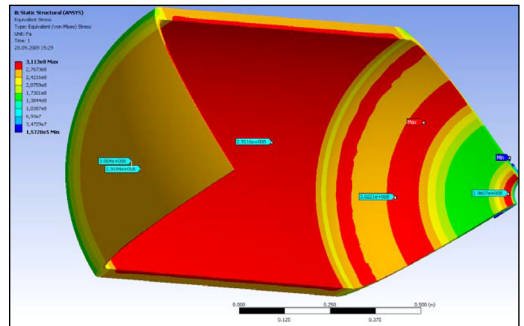
б



б



б



б

Рис. 5. Результаты проверочного расчета напряжений по Мизесу для CNG-баллона (*a*) в районах горловины (*б*) и полусферического днища (*в*)

Рис. 6. Результаты повторного проверочного расчета напряжений по Мизесу для CNG-баллона (*a*) вид на горловину (*б*) и на днище (*в*)

трии. Поэтому в качестве расчетной модели принята 1/4 от 3D-модели баллона (рис. 4,а), а недостающие части учтены соответствующими граничными условиями. Конечно-элементная модель баллона показана на рис. 4,б.

Результаты проверочного расчета приведены на рис. 5.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проверочный расчет показал следующее: максимальные напряжения в горловине превышают допустимые напряжения на 68 %, в полусферическом днище - на 1 % в цилиндрической части они на 15 % ниже допустимых напряжений. Результаты проверочного расчета позволили разработать следующие рекомендации по проектированию CNG-баллонов для CNG-газовозов: на 1 мм увеличить толщину полусферических оконечностей бал-

лона; на 3 мм уменьшить толщину цилиндрической части баллона; усилить конструкцию горловины. Повторный проверочный расчет, выполненный после внесения в конструкцию указанных изменений, показал удовлетворительный результат, в измененной конструкции баллона напряжения не превышают допустимые и конструкция не переутяжелена (рис. 6)

ВЫВОДЫ

1. Для CNG-газовозов целесообразно применять баллоны, изготовленные из стеклопластика или углепластика, так как именно для этих материалов доля массы метана в полной массе баллона с метаном наибольшая по сравнению с металлическими баллонами. 2. предложенную последовательность расчетов, можно использовать как методику для начального проектирования CNG-баллонов для CNG-газовозов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
- [2] *Веревкин С.И., Корчагин В.А.* Газгольдеры. — М.: Стройиздат, 1966. — 240 с.
- [3] *Григорьев Л.Я.* Судовые сосуды, работающие под давлением (определение напряжений и деформаций). — Л.: Судостроение, 1965. — 196 с.
- [4] *Зайцев В.В., Еганов А.Е., Тольшев Э.В.* Технично-экономические вопросы проектирования и строительства систем морской транспортировки газов: Учебное пособие. — Николаев: УГМТУ, 2002. — 150 с.
- [5] *Зайцев В.В., Коробанов Ю.Н.* Суда-газовозы. — Л.: Судостроение, 1990. — 304 с.
- [6] *Лессинг Е.Н., Лилеев А.Ф., Соколов А.Г.* Стальные листовые конструкции. — М.: Госстройиздат, 1956. — 480 с.
- [7] Металлические конструкции. — 4-е изд., перераб. / Под общ. ред. Е.И. Беленя. — М.: Стройиздат, 1973. — 688 с.
- [8] Патент 33882 Україна, МПК (2006) F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу / С.І. Крижанівський, В.В. Зайцев, Г.Ф. Романовський, О.М. Карпаш, М.І. Гончарук, Д.В. Зайцев, Вал.В. Зайцев; С.І. Крижанівський, В.В. Зайцев, Г.Ф. Романовський, О.М. Карпаш, М.І. Гончарук, Д.В. Зайцев, Вал.В. Зайцев. — № u200804626; Заявл. 10.04.08; Опубл. 10.07.08 // Промислова власність, 2008. — Бюл. № 13.
- [9] Пат. 42693 Україна, МПК(2009) B67D 5/00 F17C 1/00. Транспортний CNG-модуль / С.І. Крижанівський, В.В. Зайцев, Вал.В. Зайцев, Д.В. Зайцев; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. — № u200903995; Заявл. 23.04.09; Опубл. 10.07.09 // Промислова власність. — 2009. — Бюл. № 13.
- [10] Патент 42694 Україна, МПК (2009) B67D 5/00 F17C 1/00. Спосіб морського транспортування стиснутого природного газу в CNG-модулях / С.І. Крижанівський, В.В. Зайцев, Вал.В. Зайцев, Д.В. Зайцев; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. — № u200903996; Заявл. 23.04.09; Опубл. 10.07.09 // Промислова власність. 2009. — Бюл. № 13.