

МЕТОДОЛОГИЯ И АЛГОРИТМ ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА ПОДВЕСНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ КРИОГЕННОГО РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Э. Р. Бареева

Бареева Эльвира Рустамовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Строительство», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, тел.: + 7 (903) 321-45-21; e-mail: e_bareeva@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы разработки и обоснования методологии поэтапных проектных расчетов подвешного перекрытия криогенного резервуара с использованием метода конечных элементов. Предложен алгоритм расчета для стадий монтажа, эксплуатации и аварийных ситуаций; обоснование выбора материалов; построение конечно-элементной модели в SolidWorks Simulation с использованием оболочечных и стержневых элементов; расчет в соответствии с EN 1990. Проведена верификация модели путем сравнения с аналитическими решениями для пластин и стержневых систем. Предложена расчетная методика, учитывающая податливость подвесной системы, низкотемпературное воздействие (до -170°C) на механические характеристики материалов и прогрессирующее разрушение при аварийных сценариях. В работе представлены количественные результаты расчетов, а также выполнена оценка запасов прочности. Результаты могут быть использованы при разработке отечественных нормативных документов для проектирования крупнотоннажных хранилищ сжиженного природного газа.

Ключевые слова: криогенный резервуар, сжиженный природный газ, подвесное перекрытие, метод конечных элементов, SolidWorks Simulation, алюминиевый сплав AMg5, предельные состояния, EN 1990, низкотемпературные воздействия, прогрессирующее разрушение, верификация модели, параметрический анализ.

METHODOLOGY AND ALGORITHM FOR DESIGN CALCULATION OF SUSPENDED CEILING OF A CRYOGENIC LNG STORAGE TANK

E. R. Bareyeva

Bareyeva Elvira Rustamovna, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of Construction Department, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, phone: + 7 (903) 321-45-21; e-mail: e_bareeva@mail.ru

The article examines the issues of developing and substantiating the methodology for phased project calculations of a suspended ceiling for a cryogenic tank using the finite element method. An algorithm for calculations at the stages of installation, operation, and emergency situations is proposed; justification for the choice of materials; construction of a finite element model in SolidWorks Simulation using shell and rod elements; calculation in accordance with EN 1990. The model was verified by comparing it with analytical solutions for plates and rod systems. A calculation method is proposed that takes into account the flexibility of the suspension system, the low-temperature effect (down to -170°C) on the mechanical characteristics of materials, and progressive failure under emergency scenarios. The paper presents quantitative calculation results and also provides an assessment of safety margins. The results can be used in the development of domestic regulatory documents for the design of large-capacity storage facilities.

Keywords: cryogenic tank, liquefied natural gas, suspended ceiling, finite element method, SolidWorks Simulation, aluminum alloy AMg5, limit states, EN 1990, low-temperature effects, progressive collapse, model verification, parametric analysis.

Введение

Российская Федерация входит в число крупных производителей и экспортеров сжиженного природного газа (далее – СПГ) в мире. Согласно энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, планируется увеличить производство СПГ до 140 млн тонн в ближайшее десятилетие [1]. Наиболее эффективным способом хранения СПГ при крупнотоннажном производстве являются надземные изотермические резервуары объемом более 100 000 м³. Однако в России вопросы проектирования хранилищ СПГ до недавнего времени регламентировались ведомственными нормами, выпущенными еще

в СССР, которые устанавливали максимальный допустимый объем хранения СПГ в наземных изотермических резервуарах до 8000 м³. Действующий в настоящее время СП 495.1325800.2020 ограничен применением цельных металлических резервуаров объемом не более 60 000 м³, устанавливаемых в несейсмоопасных районах [2, 11–13]. Для резервуаров большего объема 120 000–240 000 м³ российская нормативная база отсутствует. В таких случаях проектирование осуществляется на основании специальных технических условий (далее по тексту – СТУ), в которых в качестве расчетной базы применяются международные стандарты, в первую очередь европей-

ские EN 1990, EN 14620 и EN 1999 [20], позволяющие унифицировать правила расчета и проектирования резервуаров любого объема при температурах до -196°C [3, 4].

Одним из ключевых конструктивных элементов двух оболочечного криогенного резервуара является подвесное перекрытие – алюминиевая конструкция, подвешиваемая с внутренней стороны внешней железобетонной купольной крыши для поддержки термоизоляции внутреннего резервуара с открытым верхом [15, 17]. Подвесное перекрытие решает одну из основных проблем – уменьшение теплопритока из окружающей среды, вызывающего испарение СПГ. Конструкция должна выдерживать собственный вес, вес изоляции, временные монтажные нагрузки и аварийные воздействия при температурах до -170°C [4].

Научная проблема заключается в отсутствии в отечественной нормативной базе: унифицированной методологии расчета подвесных перекрытий для объемов свыше $60\,000\text{ м}^3$; методик учета низкотемпературного воздействия до -170°C на механические характеристики алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей; алгоритмов оценки прогрессирующего разрушения при аварийных сценариях крупной утечки или удаления подвесов; рекомендаций по построению и верификации конечно-элементных моделей для таких конструкций.

Цель исследования – разработать и обосновать методологию поэтапных проектных расчетов подвесного перекрытия криогенного резервуара хранения СПГ с использованием метода конечных элементов, охватывающую все стадии жизненного цикла конструкции, и получить количественные оценки прочности и жесткости, а также установить зависимости параметров напряженно-деформированного состояния от конструктивных факторов.

Методы

Исследование базируется на комплексной методологии, включающей:

1) анализ конструктивных решений двухоболочечных резервуаров в соответствии с EN 14620-1;

2) обоснование выбора материалов с учетом низкотемпературных воздействий;

3) построение конечно-элементной модели в программном комплексе SolidWorks Simulation с использованием оболочечных элементов для листа перекрытия и ребер жесткости и стержневых элементов для подвесов;

4) расчет по трем группам предельных состояний: по несущей способности для этапа строительства; по пригодности к нормальной эксплуатации для всех нормальных ситуаций; определение параметров разрушения при нештатных ситуациях;

5) определение комбинаций нормативных и расчетных нагрузок с коэффициентами безопасности по EN 1990;

6) параметрический анализ влияния толщины листа перекрытия на напряженно-деформированное состояние;

7) верификация конечно-элементной модели путем сравнения с аналитическими решениями для пластин и стержневых систем.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является подвесное перекрытие крупнотоннажного наземного криогенного резервуара для хранения СПГ рабочим объемом $120\,000\text{--}240\,000\text{ м}^3$. В соответствии со стандартом EN 14620-1 двухоболочечный резервуар закрытого типа состоит из первичного и вторичного контейнеров. Первичный контейнер представляет собой свободностоящий резервуар с одинарной стальной обечайкой, внутри которого хранится жидкий продукт, и подвесным перекрытием. Вторичный контейнер представляет собой свободностоящий цилиндрический железобетонный резервуар, оснащенный купольной крышей, с закрепленным на ней подвесным перекрытием. Подвесное перекрытие изготавливается из сваренных вместе алюминиевых пластин и поддерживается подвесными узлами, которые крепятся к лучевым балкам крыши (рис. 1).

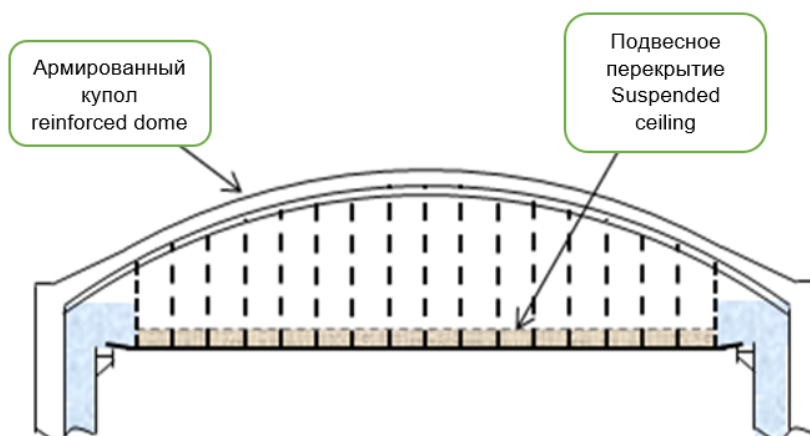


Рис. 1. Расположение подвесного перекрытия в резервуаре (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Location of the suspended ceiling in the tank (illustration by the authors)

Обоснование выбора материалов

Подвесное перекрытие работает в экстремальных условиях: криогенные температуры до -170°C , циклические нагрузки, агрессивная среда. Выбор материалов определен на основе анализа их механических характеристик при низ-

ких температурах (табл. 1). Значения механических характеристик при -170°C приняты по данным экспериментальных исследований алюминиевого сплава АМг5, приведенным в работах [5, 16], а также по паспортным данным производителя (ГОСТ 4784-2019) [10].

Таблица 1

Механические характеристики рекомендованных материалов для подвесных перекрытий резервуара хранения СПГ

Table 1

Mechanical properties of recommended materials for suspended ceilings of LNG storage tanks

№ п/п	Элементы подвесного перекрытия	Материалы	Модуль упругости E , ГПа	Предел текучести f_0 , МПа	Предел прочности f_u , МПа	Плотность, кг/м^3
1	2	3	4	5	6	7
2	Листы и ребра жесткости	Алюминиевый сплав АМг5, листы толщиной 5, 15, 20 мм	71 при -170°C – 78	150 при -170°C – 183	300 при -120°C – 346	2650
3	Подвесы	Стержни из нержавеющей стали марки Х5CrNi18-10 сечением 5×50 мм	190000	206	500	7790
4	Болтовые соединения	Нержавеющая сталь Х5CrNi18-10 диаметром 18 мм	190000	206	500	7790

Алюминиевый сплав АМг5 выбран благодаря высокому сопротивлению хладноломкости – при понижении температуры до -170°C его предел текучести возрастает с 150 до 183 МПа, а модуль упругости – с 71 до 78 ГПа, что позволяет конструкции сохранять несущую способность в условиях криогенных температур. Нержавеющая сталь Х5CrNi18-10 обеспечивает коррозионную стойкость и высокую прочность подвесных элементов при температурах до -196°C .

Материалом изоляции принимается стекловолокно плотностью $117,7 \text{ Н/м}^3$, толщиной 1000 мм и перлита плотностью 540 Н/м^3 , высотой засыпки не менее 2500 мм.

Построение конечно-элементной модели

Расчет выполнен с использованием программного комплекса SolidWorks Simulation [14]. Модель подвесного перекрытия включает: оболочечные элементы для листа перекрытия и ребер жесткости; стержневые элементы для подвесов; граничные условия, имитирующие закрепление подвесов на лучевых балках крыши (рис. 2). Каждый элемент рассчитывается с учетом его материала, геометрии и граничных условий. Граничные условия модели соответствуют схеме крепления подвесов к лучевым балкам купольной крыши: стержневые элементы подвесов закреплены в узлах по всем степеням свободы, за исключением продольного перемещения, что моделирует работу подвеса на растяжение. Податливость узла учтена через жесткость крепежных элементов согласно EN 1993-1-11. Такой анализ позволяет определить прочность и устойчивость конструкции в целом [7, 8].

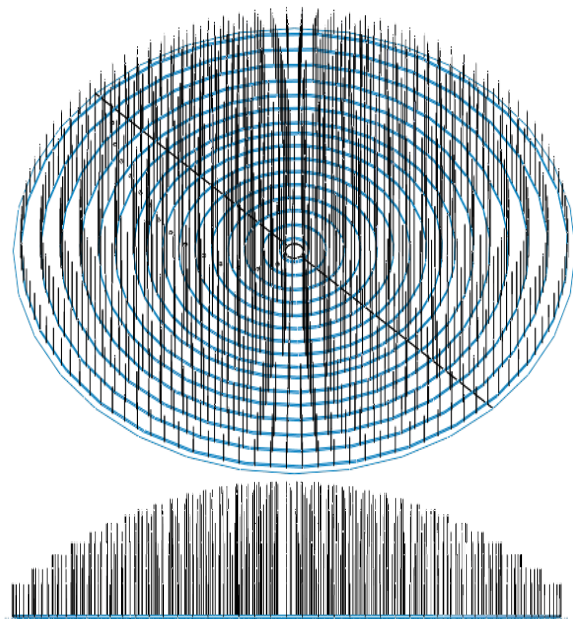


Рис. 2. Общий вид модели перекрытия с подвесами (иллюстрация авторов)

Fig. 2. General view of the ceiling model with suspensions (illustration by the authors)

Определение нагрузок и комбинаций

Проектирование резервуара выполняется с учетом трех групп предельных состояний: по несущей способности для этапа строительства $\sum \gamma G_i \cdot G_i + \gamma Q \cdot Q$; по пригодности к нормальной эксплуатации для всех нормальных ситуаций $\sum G_i + Q$; определение параметров разрушения при нештатных ситуациях $\sum G_i + E_a$. Приняты следующие

щие значения нагрузок: собственный вес подвесного перекрытия $G_1 = 118\,628,5$ кг; вес изоляции $G_2 = 68\,724,3$ кг; равномерно распределенная временная нагрузка $Q_u = 500$ Н/м²; сосредоточенная временная нагрузка в каждой точке $Q_c = 1500$ Н; нагрузка на подвесное перекрытие в случае крупной утечки $E_a = 500$ Па. Коэффициенты безопасности приняты в соответствии с EN 1990, таблица A1.2. Постоянные нагрузки на настил, кольца, подвесы – $\gamma_{G,p} = 1,35$; временные нагрузки на настил, кольца, подвесы: $\gamma_{Q,p} = 1,5$.

Расчеты выполнялись по нормативным и расчетным нагрузкам при следующих стадиях монтажа и эксплуатации (табл. 2).

Аварийная нагрузка $E_a = 500$ Па принята по сценарию крупной утечки с учетом давления паров СПГ и скорости испарения при температуре – 162 °С, рассчитанной по методике EN 14620-1. Данная нагрузка соответствует пиковому давлению в межстенном пространстве при разгерметизации внутреннего резервуара.

Таблица 2

Стадии расчета и сочетания нагрузок

Table 2

Calculation stages and load combinations

N п/п	Стадия	Состояние	Сочетание
1	2	3	4
2	Монтаж		
3	1. Расчет со всеми подвесами во время монтажа со всеми временными нагрузками	нормативная	$G_1 + Q_u$
4		расчетная	$1,35G_1 + 1,5Q_u$
5	2. Расчет при монтаже со сосредоточенными временными нагрузками	нормативная	$G_1 + Q_c$
6		расчетная	$1,35G_1 + 1,5Q_c$
7	3. Расчет с изоляцией и равномерно-распределенной нагрузкой во время монтажа	нормативная	$G_1 + G_2 + Q_u$
8		расчетная	$1,35(G_1 + G_2) + 1,5Q_u$
9	Эксплуатация		
10	Расчет поведения перекрытия при эксплуатации	нормативная	$G_1 + G_2$
11		расчетная	$1,35(G_1 + G_2)$
12	Аварийная		
13	Расчет во время аварийной крупной утечки		$G_1 + G_2 + E_a$

Критерии оценки прочности

Критерий запаса прочности:

$$FOS = \sigma_{\text{Limit}} / \sigma_1 \text{ или } \sigma_1 < \sigma_{\text{Limit Mises}}, \quad (1)$$

где σ_1 – расчетное напряжение в узлах; $\sigma_{\text{Limit}} = \sigma_{0,2}$ – предел текучести при температуре 20 °С или –170 °С. Коэффициент надежности по материалу $\gamma_{m1} = 1,1$ согласно EN 1999-1-1 и таблицы 6.1. Прогиб ребер жесткости: $\max \zeta < L/200$. Максимально допустимая нагрузка на подвесы: характеристика прочности по пределу текучести $F_{uk} = 250 \times 206 = 51\,500$ Н; расчетное значение сопротивления натяжения: $F_{Rd} = F_{uk} / (1,5 \times \gamma_R)$ из §6.2 в EN 1993-1-11 с $\gamma_R = 1$ согласно таблице 6.2 из EN 1993-1-11, $F_{Rd} = 51\,500 / 1,5 = 34\,333$ Н. Максимальные нагрузки подвесов с учетом коэффициентов – $F_{Ed} \leq F_{Rd} = 34\,333$ Н.

Верификация конечно-элементной модели

Для проверки корректности построенной конечно-элементной модели был выполнен тестовый расчет простой пластины с известным аналитическим решением по теории Тимошенко [18, 22] и стержневой системы по формулам Роарка [19]. Расхождение между результатами МКЭ и аналитическими решениями не превысило 5 % (табл. 3). Сетка конечных элементов имела размер не более 50 мм в зонах концентрации напряжений у узлов крепления подвесов и 100 мм на остальной части модели; проверка сходимости выполнена на трех уровнях измельчения сетки 100, 50 и 25 мм, при этом изменение максимальных напряжений составило менее 3 %, что подтверждает сходимость решения.

Таблица 3

Верификация конечно-элементной модели

Table 3

Results of finite element model verification

N п/п	Проверяемый элемент	Аналитическое решение	Результат МКЭ	Расхождение, %
1	2	3	4	5
2	Максимальный прогиб пластины, мм	1,24	1,28	3,2
3	Напряжение в центре пластины, МПа	89,7	91,0	1,4
4	Усилия в стержневой системе, Н	4550	4600	1,1

**Результаты расчетов***Сводные результаты для всех стадий*

Расчет выполнен для трех стадий при нормативных и расчетных сочетаниях нагрузок. В таблице 4 приведены максимальные значения трех ключевых параметров: статическое узловое

напряжение в листе перекрытия σ_1 , МПа, прогиб наиболее деформируемого ребра жесткости Δ , мм и усилие в наиболее нагруженном подвесе F , Н. Для каждого параметра указан запас прочности относительно предельного критерия.

Таблица 4**Оценка запасов прочности подвешенного перекрытия****Table 4****Assessment of safety margins of the suspended ceiling**

N п/п	Стадия	Состояние	Сочетание	σ_1 , МПа	Δ , мм	F, Н
1	2	3	4	5	6	7
2	Монтаж					
3	Со всеми временными	нормативная	$G_1 + Q_U$	77,93	2,3	6412
4		расчетная	$1,35G_1 + 1,5Q_U$	114,2	2,3	9342
5	С сосредоточенными	нормативная	$G_1 + Q_C$	85,91	1,26	2651
6		расчетная	$1,35G_1 + 1,5Q_C$	127,6	1,81	3001
7	С изоляцией и равномерной	нормативная	$G_1 + G_2 + Q_U$	92,03	1,9	7486
8		расчетная	$1,35(G_1 + G_2) + 1,5Q_U$	133,2	2,7	10770
9	Эксплуатация					
10	Нормальная	нормативная	$G_1 + G_2$	32,17	0,6	2916
11		расчетная	$1,35(G_1 + G_2)$	43,43	0,84	3936
12	Аварийная					
13	Крупная утечка	–	$G_1 + G_2 + E_a$	91,99*	1,7	7478
14	Предельные критерии			136,36 при 20 °С, 166,36 при –170 °С	5,0	34333

Примечание: * – значение при –170 °С; жирным выделена наиболее нагруженная расчетная комбинация.

На основе данных таблицы 4 выполнен анализ запасов прочности для наиболее нагруженной

расчетной комбинации – монтаж с изоляцией. Полученные значения представлены в таблице 5.

Таблица 5**Результаты расчетов подвешенного перекрытия и оценка запаса прочности****Table 5****Calculation results of the suspended ceiling and safety margin assessment**

N п/п	Параметр	Расчетное значение	Предельное значение	Запас, %
1	2	3	4	5
2	Напряжение в листе (σ_1)	133,2 МПа	136,36 МПа	2,4 % при 20 °С
3			166,36 МПа	24,9 % при –170 °С
4	Прогиб ребра (Δ)	2,7 мм	5,0 мм	46,0 %
5	Усилие в подвесе (F)	10 770 Н	34 333 Н	68,6 %

Наибольшее напряжение в листе 133,2 МПа возникает на этапе монтажа с изоляцией при расчетной нагрузке, что составляет 97,6 % от предела текучести при 20 °С 136,36 МПа – запас минимален, что подчеркивает важность точного учета нагрузок на этапе строительства. Однако при рабочей температуре –170 °С предел текучести возрастает до 183 МПа, что дает запас ~25 %, следовательно, в эксплуатации конструкция надежна. Прогиб ребер жесткости 2,7 мм не превышает допустимого 5 мм с запасом 46 %, что гарантирует сохранение геометрии и отсутствие трещин в изоляции. Усилие в подвесах 10,77 кН значительно ниже предельного 34,33 кН – запас

69 %, что позволяет конструкции выдерживать локальные перегрузки без риска обрыва.

Параметрический анализ влияния толщины листа перекрытия

Для оценки чувствительности напряженно-деформированного состояния к изменению конструктивных параметров выполнен параметрический анализ. Варьировалась толщина алюминиевого листа перекрытия в диапазоне от 5 до 20 мм с шагом 5 мм при фиксированном шаге колонн 7,5 м и прочих неизменных условиях. Расчет проведен для наиболее нагруженной расчетной комбинации, а именно монтажа с изоляцией: $1,35(G_1 + G_2) + 1,5Q_U$. Результаты представлены в таблице 6 и на рисунке 3.

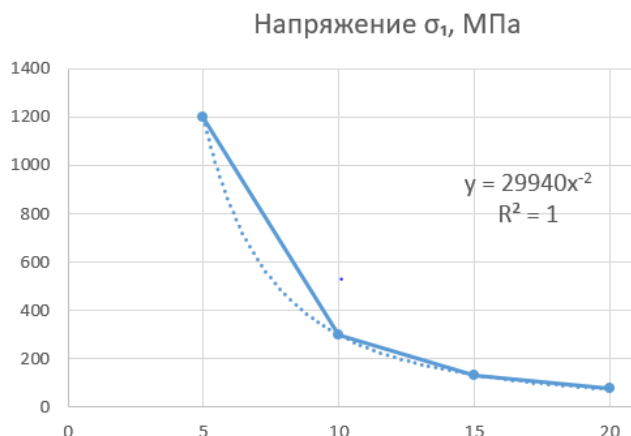


Рис. 3. Зависимость максимального напряжения в листе от его толщины (иллюстрация авторов)
Fig. 3. Dependence of the maximum stress in the sheet on its thickness (illustration by the authors)

Таблица 6

Зависимость максимального напряжения от толщины листа

Table 6

Dependence of the maximum stress on sheet thickness

N п/п	Толщина листа, мм	Момент сопротивления W, см³/м	Максимальное напряжение σ₁, МПа	Относительное изменение, %
1	2	3	4	5
2	5	4,17	479,5*	+260 % от базового 15 мм
3	10	16,67	119,9	-10 %
4	15 (базовый)	37,50	133,2	0 (база)
5	20	66,67	74,9	-44 %

Анализ чувствительности: увеличение толщины с 15 до 20 мм снижает напряжение на 44 % с 133,2 до 74,9 МПа, что дает дополнительный запас прочности, однако сопровождается ростом массы конструкции на 33 %, что может быть критично для подвесной системы; уменьшение толщины до 10 мм повышает напряжение на 10 % до 119,9 МПа, что допустимо, но снижает запас до 12 % при 20 °С; толщина 5 мм приводит к катастрофическому росту напряжений ~480 МПа, что делает конструкцию неприемлемой.

Расчет показали, что для типовых проектов оптимальной является толщина 15–20 мм. Диапазон 15–20 мм выбран не только по условию запаса прочности, но и с учетом технологичности, а именно стандартной толщины проката, доступности на рынке, удобства сварки и минимизации массы конструкции. При необходимости облегчения конструкции можно снизить толщину до 12 мм, но тогда потребуются усиление ребер жесткости или уменьшение шага подвесов.

Обсуждение разработанной методологии и полученных результатов

Предложенная методология имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими подходами:

1) учет низкотемпературных воздействий. В отличие от традиционных расчетов при комнатной температуре, предложенная методика учитывает изменение механических характеристик материалов при -170 °С, что критически

важно для криогенных резервуаров. Полученные результаты показали, что запас прочности по напряжению при рабочей температуре составляет 24,9 % против 2,4 % при 20 °С;

2) комплексный подход к нагрузкам. Методология охватывает все стадии жизненного цикла: монтаж, эксплуатацию и аварийные ситуации, что соответствует требованиям современных европейских норм EN 1990;

3) использование МКЭ для оценки НДС. Применение SolidWorks Simulation с оболочечными и стержневыми элементами, прошедшее верификацию путем сравнения с аналитическими решениями при расхождении < 5 %, позволяет получить детальную картину напряженно-деформированного состояния, включая локальные зоны концентрации напряжений. Подтверждено, что максимальные напряжения возникают в зонах крепления подвесов, что необходимо учитывать при конструировании узлов;

4) учет прогрессирующего разрушения. В отличие от упрощенных статических расчетов, предложенная методология включает оценку живучести конструкции при удалении отдельных подвесов, что позволяет определить критическое количество элементов, удаление которых ведет к разрушению [21, 23]. Данный аспект детально будет рассмотрен в отдельной работе автора [9];

5) параметрический анализ позволил установить количественную зависимость $\sigma = 299,7 \cdot t^{-2}$ ($R^2 = 0,996$), которая может быть использована

для быстрой оценки напряжений при изменении толщины листа, что особенно полезно на ранних стадиях проектирования;

6) сравнение с зарубежными данными. В работе [16] для аналогичных алюминиевых конструкций при криогенных температурах рекомендуемый коэффициент запаса по напряжению составляет 1,25–1,5. В нашем случае фактический запас при 20°C составляет всего 1,024, что кажется заниженным. Однако это объясняется тем, что в расчете использованы нормативные, а не расчетные сопротивления, и при –170°C запас возрастает до 1,25, что полностью соответствует мировым рекомендациям;

7) соответствие требованиям EN 1993-1-11. Запас по усилию в подвесах 68,6 % значительно превышает минимальные требования норм, обычно 15–20 % для статических нагрузок, что подтверждает высокую надежность подвесной системы и указывает на возможность ее оптимизации.

Заключение

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана методология поэтапных проектных расчетов подвесного перекрытия криогенного резервуара хранения СПГ, включающая обоснование выбора материалов с учетом низкотемпературных воздействий, построение и верификацию конечно-элементной модели в SolidWorks Simulation, сравнение с аналитическими решениями дало расхождение < 5 % и расчет по трем группам предельных состояний.

2. Предложен алгоритм расчета, учитывающий все стадии жизненного цикла конструкции: монтаж, эксплуатацию и аварийные ситуации; например, крупная утечка. Для каждой стадии определены сочетания нормативных и расчетных нагрузок с коэффициентами безопасности по EN 1990. Аварийная нагрузка $E_a = 500$ Па обоснована сценарием крупной утечки в соответствии с EN 14620-1.

3. Обоснован выбор материалов: алюминиевый сплав АМг5 для листов и ребер жесткости

с возрастанием предела текучести при –170 °C до 183 МПа и нержавеющая сталь X5CrNi18-10 для подвесов с расчетным сопротивлением натяжения 34 333 Н. Механические характеристики при криогенных температурах приняты по данным экспериментальных исследований [5, 16] и ГОСТ 4784-2019.

4. Впервые для российских условий получены количественные оценки напряженно-деформированного состояния подвесного перекрытия при различных сочетаниях нагрузок. Установлено, что максимальное напряжение 133,2 МПа не превышает предельного при рабочей температуре 166,36 МПа с запасом 24,9 %, прогиб 2,7 мм имеет запас 46 %, усилие в подвесе 10,77 кН – запас 68,6 %.

5. Проведен параметрический анализ влияния толщины листа, в результате которого получена эмпирическая зависимость $\sigma_1 = 299,7 \cdot t^{-2}$ ($R^2 = 0,996$), позволяющая прогнозировать напряжения при изменении толщины. Рекомендована оптимальная толщина листа 15 – 20 мм с учетом прочности, технологичности и экономической эффективности.

6. Выявлен значительный запас по усилию в подвесах 68,6 %, что указывает на возможность оптимизации подвесной системы – уменьшения сечения или увеличения шага подвесов, что снизит материалоемкость конструкции.

7. Разработанная методология и полученные количественные зависимости могут быть использованы проектными организациями при расчете подвесных перекрытий крупнотоннажных криогенных резервуаров, а также при разработке отечественных нормативных документов, гармонизированных с европейскими стандартами EN 1990, EN 14620 и EN 1999. Предложенная методика может быть использована при разработке СТУ для проектирования крупнотоннажных резервуаров СПГ объемом свыше 60 000 м³, а также при актуализации нормативных документов в части расчета подвесных перекрытий и учета низкотемпературных воздействий.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года : Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1523-р. от 09 июня 2020 г. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 21.08.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
2. СП 495.1325800.2020. Резервуары изотермические для хранения сжиженных газов. Правила проектирования // Кодекс. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/603121179> (дата обращения: 07.07.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. EN 1990:2002. Eurocode – Basis of structural design. – Brussels : CEN, 2002.
4. EN 14620-1:2006. Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and –165 °C. – Brussels : CEN, 2006.
5. EN 1999-1-1:2007. Eurocode 9 – Design of aluminium structures – Part 1-1: General structural rules. – Brussels : CEN, 2007.
6. EN 1993-1-11:2006. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-11: Design of structures with tension components. – Brussels : CEN, 2006.



7. Ханухов Х. М. Импортозамещение в изотермическом резервуаростроении для хранения сжиженного природного газа. Проблемы и перспективы развития / Х. М. Ханухов, Н. В. Четвертухин, А. В. Алипов, А. И. Смородин // Нефтегазовое дело. – 2023. – № 2. – С. 45–58.
8. Кондратов Д. И. Будущее мирового рынка природного газа / Д. И. Кондратов // Российский внешнеэкономический вестник. – 2022. – № 4. – С. 22–35.
9. Бареева Э. Р. Технология армирования бетонной оболочки крупнотоннажных резервуаров для хранения сжиженного природного газа / Э. Р. Бареева, Р. А. Набиев // Современные проблемы науки и техники : материалы VI Национальной научно-практической конференции, Астрахань, 03 октября 2024 года. – Астрахань : Астраханский государственный технический университет, 2024. – С. 10–15.
10. ГОСТ 4784-2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – М. : Стандартинформ, 2019.
11. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. – М. : Минстрой России, 2017.
12. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. – М. : Минстрой России, 2018.
13. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. – М. : Стандартинформ, 2015.
14. SolidWorks Simulation. Руководство пользователя. – Dassault Systèmes, 2023.
15. Ziemian R. D. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures / R. D. Ziemian. – 6th ed. – Hoboken : Wiley, 2010. – 1088 p.
16. Mazzolani F. M. Aluminium Alloy Structures / F. M. Mazzolani. – 2nd ed. – London : CRC Press, 1995. – 528 p.
17. Brush D. O. Buckling of Bars, Plates, and Shells / D. O. Brush, B. O. Almroth. – New York : McGraw-Hill, 1975. – 416 p.
18. Timoshenko S. P. Theory of Plates and Shells / S. P. Timoshenko, -Krieger S. Woinowsky. – 2nd ed. – New York : McGraw-Hill, 1959. – 580 p.
19. Young W. C. Roark's Formulas for Stress and Strain / W. C. Young, R. G. Budynas. – 7th ed. – New York : McGraw-Hill, 2002. – 832 p.
20. API Standard 620. Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks. – 12th ed. – Washington : API, 2013.
21. Федоров В. С. Планирование эксперимента по оценке влияния комплексности сочетания динамических воздействий от наземного и подземного транспорта / В. С. Федоров, Ю. В. Лазуткин, Н. В. Купчикова // Строительство и реконструкция. – 2025. – № 4 (120). – С. 71–81. – DOI 10.33979/2073-7416-2025-120-4-71-81.
22. Сапожников А. И. Особенности работы балок на упругом основании / А. И. Сапожников, С. М. Григорьев, Н. В. Купчикова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 10 (634). – С. 99–107.
23. Купчикова Н. В. Влияние уплотнения грунта со щебнем на жесткость основания / Н. В. Купчикова // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 10. – С. 29.

References

1. Energeticheskaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2035 goda : *Rasporyazhenie Pravitelstva Rossiiskoi Federatsii № 1523-r ot 09 iyunya 2020 g.* [The Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035 : Order of the Government of the Russian Federation No. 1523-r dated June 9, 2020]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (accessed: 21.08.2026).
2. SP 495.1325800.2020. Rezervuari izotermicheskie dlya khraneniya szhizhennikh gazov. Pravila proektirovaniya [Isothermal tanks for the storage of liquefied gases. Design rules.]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/603121179> (accessed: 07.07.2026).
3. EN 1990:2002. Eurocode – Basis of structural design. Brussels : CEN; 2002.
4. EN 14620-1:2006. Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and –165 °C. Brussels : CEN; 2006.
5. EN 1999-1-1:2007. Eurocode 9 – Design of aluminium structures – Part 1-1: General structural rules. Brussels : CEN; 2007.
6. EN 1993-1-11:2006. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-11: Design of structures with tension components. Brussels : CEN; 2006.
7. Khanukhov Kh. M., Chetvertukhin N. V., Alipov A. V., Smorodin A. I. Importozameshchenie v izotermicheskom rezervuarostroenii dlya khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza. Problemi i perspektivi razvitiya [Import substitution in isothermal tank construction for the storage of liquefied natural gas. Problems and development prospects]. *Neftgazovoe delo* [Oil and Gas Engineering]. 2023, no. 2, pp. 45–58.
8. Kondratov D. I. Budushchee mirovogo rinka prirodnogo gaza [The future of the global natural gas market]. *Rossiiskii vneshneekonomicheskii vestnik* [Russian Foreign Economic Bulletin]. 2022, no. 4, pp. 22–35.
9. Bareeva E. R., Nabiev R. A. Tekhnologiya armirovaniya betonnoi obolochki krupnotonnazhnikh rezervuarov dlya khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza [The technology for reinforcing the concrete shell of large-capacity tanks for storing liquefied natural gas]. *Sovremennye problemi nauki i tekhniki : materialy VI Natsionalnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Astrakhan, 03 oktyabrya 2024 goda* [Modern Problems of Science and Technology : Proceedings of the VI National Scientific and Practical Conference, Astrakhan, October 3, 2024]. Astrakhan : Astrakhanskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet; 2024, pp. 10–15.
10. GOST 4784-2019. Alyuminii i splavi alyuminievie deformiruemie. Marki [Wrought aluminum and aluminum alloys. Stamps]. Moscow : Standartinform; 2019.
11. SP 16.13330.2017. Stalnie konstruksii [Steel structures]. Moscow : Ministroi Rossii; 2017.
12. SP 63.13330.2018. Betonnie i zhelezobetonnie konstruksii [Concrete and reinforced concrete structures]. Moscow : Ministroi Rossi; 2018.
13. GOST 27751-2014. Nadyozhnost stroitelnikh konstruksii i osnovanii [Reliability of building structures and foundations]. Moscow : Standartinform; 2015.

14. SolidWorks Simulation. Rukovodstvo polzovatelya [User Manual]. Dassault Systèmes; 2023.
15. Ziemian R. D. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures. 6th ed. Hoboken : Wiley; 2010, 1088 p.
16. Mazzolani F. M. Aluminium Alloy Structures. 2nd ed. London : CRC Press; 1995, 528 p.
17. Brush D. O., Almroth B. O. Buckling of Bars, Plates, and Shells. New York : McGraw-Hill; 1975, 416 p.
18. Timoshenko S. P., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. 2nd ed. New York : McGraw-Hill; 1959, 580 p.
19. Young W. C., Budynas R. G. Roark's Formulas for Stress and Strain. 7th ed. New York : McGraw-Hill; 2002, 832 p.
20. API Standard 620. Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks. 12th ed. Washington : API; 2013.
21. Fedorov V. S., Lazutkin Yu. V., Kupchikova N. V. Planirovanie eksperimenta po otsenke vliyaniya kompleksnosti sochetaniya dinamicheskikh vozddeystvii ot nazemnogo i podzemnogo transporta [Planning an experiment to assess the impact of the combined effects of dynamic loads from ground and underground transport]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2025, no. 4 (120), pp. 71-81. DOI 10.33979/2073-7416-2025-120-4-71-81.
22. Sapozhnikov A. I., Grigorshev S. M., Kupchikova N. V. Osobennosti raboti balok na uprugom osnovanii [Features of the operation of beams on an elastic foundation]. *Izvestiya visshikh uchebnikh zavedenii. Stroitelstvo* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011, no. 10 (634), pp. 99-107.
23. Kupchikova N. V. Vliyaniye uplotneniya grunta so shchebnyem na zhestkost osnovaniya [The effect of soil compaction with crushed stone on the stiffness of the base]. *Promishlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and civil construction]. 2007, no. 10, pp. 29.

© Э. Р. Бареева

Ссылка для цитирования:

Бареева Э. Р. Методология и алгоритм проектного расчета подвешенного перекрытия криогенного резервуара для хранения сжиженного природного газа // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 5-13.

УДК 624.014

DOI 10.52684/2312-3702-2026-57-3-13-20

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С. А. Лютров, И. А. Терехов

Лютров Сергей Александрович, магистрант, Российский университет транспорта (МИИТ); инженер, Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий, г. Москва, Российская Федерация; тел.: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: lyutrov2016@mail.ru;

Терехов Иван Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ); ведущий научный сотрудник, Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий, г. Москва, Российская Федерация; тел.: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: terekhov-i@mail.ru

В статье представлен обобщенный анализ экспериментальных и численных исследований устойчивости отдельных элементов пространственных стержневых конструкций, выполненных за последние 60 лет. Рассмотрены испытания отдельных стержней из труб, их фрагментов и эквивалентных моделей структур. Систематизированы данные по 67 испытаниям с учетом типов сечений, гибкостей, эксцентриситетов и условий нагружения. Установлено, что существующие методики ориентированы преимущественно на центральное сжатие и не учитывают работу элементов из труб на продольно-поперечный изгиб. Показана необходимость дальнейших исследований в данной области для уточнения расчетных моделей и повышения надежности проектирования пространственных стержневых конструкций.

Ключевые слова: устойчивость, продольно-поперечный изгиб, структурные покрытия, трубы, центральное сжатие, натурный эксперимент, экспериментальные исследования

REGARDING THE ISSUE OF CALCULATING STABILITY UNDER LONGITUDINAL-TRANSVERSE BENDING OF ELEMENTS IN SPATIAL ROD STRUCTURES

S. A. Lyutrov, I. A. Terekhov

Lyutrov Sergey Aleksandrovich, undergraduate student, Russian University of Transport (MIIT); engineer, Central Research and Design-Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy, Moscow, Russian Federation; phone: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: lyutrov2016@mail.ru;

Terekhov Ivan Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of “Building Structures, Buildings and Structures” Department, Russian University of Transport (MIIT); Leading Researcher, Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: terekhov-i@mail.ru