

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВАРНЫХ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Б. Е. ПАТОН, М. М. САВИЦКИЙ, А. М. САВИЦКИЙ, А. А. МАЗУР

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua; sam@paton.kiev.ua

Дана оценка технических и экономических возможностей транспортировки природного газа морским путем с учетом конструкции современных газозовозов, условий их загрузки–разгрузки и маршрутов следования. Показана перспективность использования контейнерного варианта транспортировки газа в Украину. При этом сокращается до 6 мес. подготовительный период для начала поставки газа, поскольку производство легких автомобильных баллонов и газовых труб в Украине уже освоено. В дальнейшем следует предусмотреть строительство и применение специализированных газозовозов, оснащенных длинномерными металлопластиковыми баллонами, которые сравнимы с короткими трубопроводами, что позволяет снизить коэффициент запаса прочности до 1,75. В результате снижается металлоемкость баллонов и увеличивается объем перевозимого газа. Для создания таких баллонов перспективно применение высокопрочных сталей типа 30ХГСА. Библиогр. 22, табл. 5, рис. 7.

Ключевые слова: морская транспортировка природного газа; металлопластиковые баллоны; длинномерные баллоны; высокопрочные стали; сварка с повышенными скоростями нагрева; активирующие флюсы, экономические показатели

Сварка — энергозависимый процесс. Ее развитие неразрывно связано с решением проблем обеспечения энергоносителями, особенно природным газом, который по энергетическим и экологическим характеристикам, а также стратегическим запасам превосходит все современные энергоносители [1, 2].

Украина, имея самую развитую в Европе газотранспортную систему, испытывает большой дефицит газа. Из традиционных собственных источников Украина сейчас может удовлетворить лишь треть своих потребностей [2]. Поиск новых традиционных месторождений на суше и шельфе связан с глубинным бурением и требует развития технической базы. Нетрадиционные источники — газосланцы, угольные пласты и другие плотные коллекторы еще недостаточно изучены ни в плане газоносности, ни — рисков, а потому также требуют значительных финансовых и временных затрат [2]. Технология использования возобновляемых источников газа пока имеет локальное применение, о чем свидетельствует разрастание свалок.

Особое место среди нетрадиционных источников метана принадлежит газогидратам. В них содержится до 70 % всех его мировых запасов, а в экономической черноморской зоне Украины до $10^{14} \dots 10^{15} \text{ м}^3$ [3]. Однако промышленная разработка газогидратов еще не освоена, а ее освоение из-за опасности нарушения экологического равновесия на морском дне и выброса метана в околоземную атмосферу ведется крайне осторожно.

Не ускорят решение газовых проблем и предлагаемые КНР инвестиции в размере \$3,4 млрд для строительства в Донецкой, Луганской и Одесской областях заводов синтетического газа общей производительностью около 10 млрд $\text{м}^3/\text{год}$, а также \$3 млрд для строительства суперпорта с нефтяным и газовым терминалами. Последнее совпадает с намерениями украинских газодиверсифицировать газоснабжение за счет внешних закупок сжиженного природного газа (СПГ). Однако строительство приемного терминала для СПГ требует не только больших финансовых и временных затрат, но и долгосрочных контрактов для бесперебойного газоснабжения. Всего этого Украина не имеет, как не имеет и нормативно-правовой базы для строительства терминала для приема и переработки СПГ.

Более мобильной и менее затратной является технология поставок компримированного (сжатого) природного газа (КПГ).

Современные исследователи проблем газоснабжения доказывают [4–7], что при средних расстояниях (до 3000 мор. миль) и достаточной ($\geq 12 \text{ млн м}^3$) емкости грузовой системы высокого давления газозовозов КПГ — технология может быть более быстроосваиваемой и экономичной. Сжатый газ не требует столь глубокой очистки, затрат на сжижение, хранение и регазификацию (табл. 1, рис. 1) [7]. А для его приема не требуются высокотехнологичные и дорогие береговые



Таблица 1. Сопоставление цены на газ в зависимости от расстояния (данные University of Houston) [7]

Расстояние, миль	Вид газа, \$/1000 м ³		
	Сжиженный	Сжатый I	Сжатый II
500	355	272	272
1000	365	274...284	282...290
1500	375	306...310	315...326
2000	385	330...337	311...362
2500	395	344...390	350...398
3500	425	408...443	398...434
5000	465	484...549	470...543

Примечание: I. Объем газа 0,91·10⁶ м³; II — 0,15·10⁶. Стоимость газа — \$ 75/1000 м³; сжижение — \$ 40/1000 м³; газификация — \$ 40/1000 м³.

сооружения. Загрузка газа может производиться непосредственно от ГТС или скважин на шельфе, а разгрузка через ГТС в газохранилища. В результате возможен компромиссный вариант, когда применение плавучего танкера — регазификатора и вынесенного в море за пределы акватории порта подводного буя типа STL (Submerged Turret Loading) позволит принимать и сжиженный, и сжатый газ. Это решение позволяет использовать как СПГ, так и КПП-технологии с той лишь разницей, что СПГ предварительно проходит через регазификатор в ГТС, а в КПП — напрямую. Такое решение проблемы газоснабжения позволит использовать колебание цен на спотовом рынке и ускорить диверсификацию поставок.

Кроме того, развитие КПП-технологии позволит ускорить освоение Черноморско-Азовского шельфа при добыче традиционного природного газа из малых и средних месторождений, от которых тянуть трубопроводы стоимостью около 9 млн грн./км к берегу экономически невыгодно. Применение КПП-газовозов (судов или барж) дает кардинальное решение проблемы доставки газа на берег. Апробирование этой технологии в США в 1960-е годы на больших расстояниях оказалось, однако, менее эффективным по сравнению с СПГ. Однако в связи с освоением шельфа и вхождением на газовый рынок более близких потребителей ситуация существенно изменяется.

Целью данной работы была оценка технических и экономических возможностей транспортировки природного газа морским путем с учетом конструктивных особенностей грузовых систем современных газовозов, условий их загрузки-разгрузки и маршрутов следования.

Исследования технических возможностей и экономической целесообразности применения КПП-технологии в Украине указывают на два варианта ее реализации. Первый основан на использовании существующих контейнеровозов, которые можно переоборудовать в газовозы, оснастив их контейнеры сварными цилиндрическими металлопластиковыми баллонами (рис. 2) [8, 9]. Техни-



Рис. 1. Ценовая составляющая для проектов КПП (а) и СПГ (б)ческие характеристики 20- и 40-футовых морских контейнеров и массогабаритные показатели комплектующих баллонов представлены в табл. 2.

Контейнерный вариант транспортировки газа в Украину позволяет сократить до 6 мес. подготовительный период для начала поставки газа, так как производство легких автомобильных баллонов и газовых труб в Украине уже освоено. Но на перспективу следует предусмотреть строительство и применение современных, специализированных газовозов, в которых есть возможность дальнейшего совершенствования грузовой системы. В качестве аналога здесь следует использовать комбинацию из двух проектов [5], дополнив их собственными разработками по металлопластиковым баллонам [8]. Проект «Coselle» предусматривает намотку в бухту трубы диаметром 156...162 мм и длиной до 10 миль, что, по решению береговой службы США, может рассматриваться как отрезок плавучего трубопровода с запасом прочности 1,75 вместо 2,5. Это позволяет снизить массу модуля (одной емкости), на 30 % увеличить количество модулей на судне, а соответственно, и суммарный объем грузовой системы.

Недостатком проекта является сложность изготовления бухт, что под силу всего трем-четырем заводам в мире. Поэтому представляется более целесообразным использовать идею, заложенную в проекте «Vortrans». Последним предусмотрена укладка длинномерных баллонов в герметичный охлаждаемый трюм вдоль корпуса судна. Авторы проекта предлагают повысить емкость грузовой системы газовоза за счет охлаждения баллонов с газом до -30 °С. При этом в результате снижения давления газа можно либо снизить металлоемкость баллонов, либо увеличить их вместимость.

Однако снижение рабочих температур, кроме энергопотерь, сопряжено, как известно, с повышением хрупкости высокопрочных сталей, которые могут дать максимальное улучшение массогабаритных характеристик баллонов. Поэтому здесь более целесообразно применить усиление стеклопластиком корпусов баллонов. Это позво-

лит избежать затраты на охлаждение при загрузке и подогрев при разгрузке, снизить их металлоемкость и исключить возможность охрупчивания и осколочного разрушения в случае образования усталостной или хрупкой трещины. Кроме того, длинномерные баллоны (200...300 м) можно рассматривать как лупинги (отводы трубопроводов), которые, как и магистральные трубопроводы, допускаются к эксплуатации с более низким запасом прочности. Опыт эксплуатации таких в густонаселенных регионах многих стран подтвержден многократно. Применяв же последовательную обвязку баллонов, их можно соединить в единый плавучий трубопровод [9, 10].

Таким образом, грузовую систему КПГ-газовозов можно усовершенствовать за счет либо снижения толщины стенки и, следовательно, металлоемкости без изменения рабочего давления, либо повышения рабочего давления при неизменных толщине стенки и металлоемкости [9].

Общеизвестно, что при нагружении внутренним давлением цилиндрического баллона с полусферическими днищами осевые напряжения

$$\sigma_o = \frac{r_{вн}}{2\delta} \frac{P_p}{\phi_{ш}} K_3 \quad (1)$$

в два раза ниже радиальных

$$\sigma_r = \frac{r_{вн}}{\delta} \frac{P_p}{\phi_{ш}} K_3, \quad (2)$$

где σ_o и σ_r — осевые и радиальные напряжения в стенках баллона соответственно, МПа; P_p — рабочее давление газа в баллоне, МПа; $r_{вн}$ — внутренний радиус баллона, мм; δ — толщина стенки металлического корпуса баллона, мм; $\phi_{ш}$ — коэффициент прочности шва.

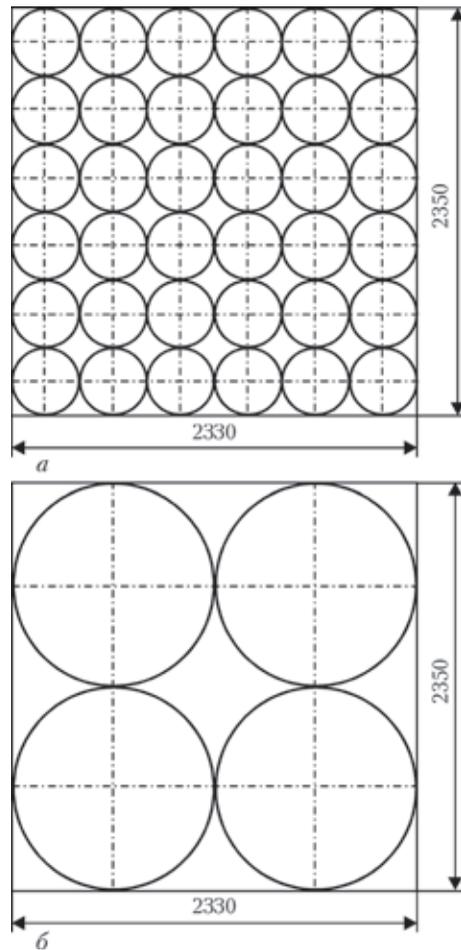


Рис. 2. Схема укомплектования контейнеров баллонами высокого давления (расположение горизонтальное): а — диаметр 390 мм; б — 1020

Следовательно, дополнительное упрочнение требуется только для цилиндрической части корпуса. Используя для этого более легкое (1,8...2,2 г/см³) сте-

Т а б л и ц а 2. Технические характеристики 20- и 40-футовых морских контейнеров и массогабаритные показатели комплектующих баллонов (материал лейнера — однонаправленный стеклопластик)

Материал оболочки	Диаметр баллонов, мм	Показатели	Рабочее давление, МПа					
			20		25		30	
			Размер контейнера, футов					
		20	40	20	40	20	40	
Термообработанная сталь 30ХГСА ($\sigma_b = 960$ МПа)	390	m/V баллона, кг/л	0,65	0,64	0,73	0,71	0,82	0,80
		Масса контейнера с баллонами, кг	15772	32232	17464	35328	19336	39324
		Объем газа в контейнере при 20°C, н.м ³	4176	8814	5220	11018	6264	13222
	1020	m/V баллона, кг/л	0,64	0,64	0,71	0,70	0,81	0,80
		Масса баллонов, кг	8856	19788	9824	21644	11208	24736
		Масса контейнера с баллонами, кг	11056	23688	12024	25544	13408	28636
	Объем газа в контейнере при 20°C, н.м ³	2770	6184	3460	7730	4152	9276	
Труба стальная ГОСТ 1078. Сталь Х80 ($\sigma_b = 640$ МПа)	1020	Объем баллона, л	3460	7730	3460	7730	3460	7730
		m/V баллона, кг/л	0,81	0,80	0,92	0,90	1,00	0,99
		Масса баллонов, кг	11160	24600	12732	27828	13840	30612
		Масса контейнера с баллонами, кг	13360	28500	14932	31728	16040	34512
		Объем газа в контейнере при 20°C, н.м ³	2770	6184	3460	7730	4152	9276

Примечание: н.м³ — м³ при нормальных условиях.

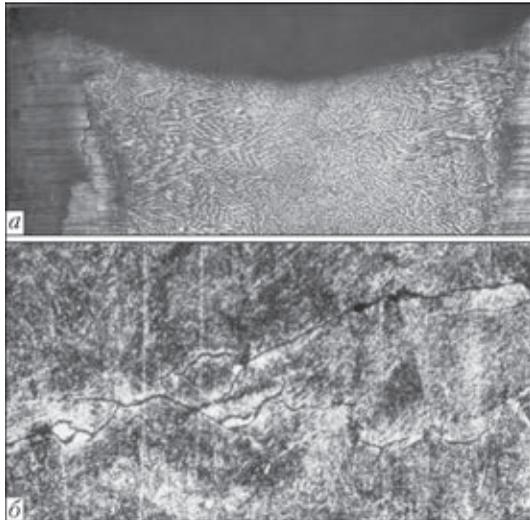


Рис. 3. Усталостные трещины в сварных соединениях стали 30ХГСА: *а* — макрошлиф сварного соединения; *б* — вторичная микроструктура сварного соединения ($\times 300$)

кловолокну, равнопрочное со сталью, можно на 35...40 % уменьшить массу баллона, вдвое увеличить его статическую прочность и в 3...5 раз циклическую долговечность [8]. Последнее обусловлено уменьшением влияния поверхностных концентраторов вследствие заполнения их связующим.

Современные высокопрочные стали позволяют, в зависимости от режимов термообработки,

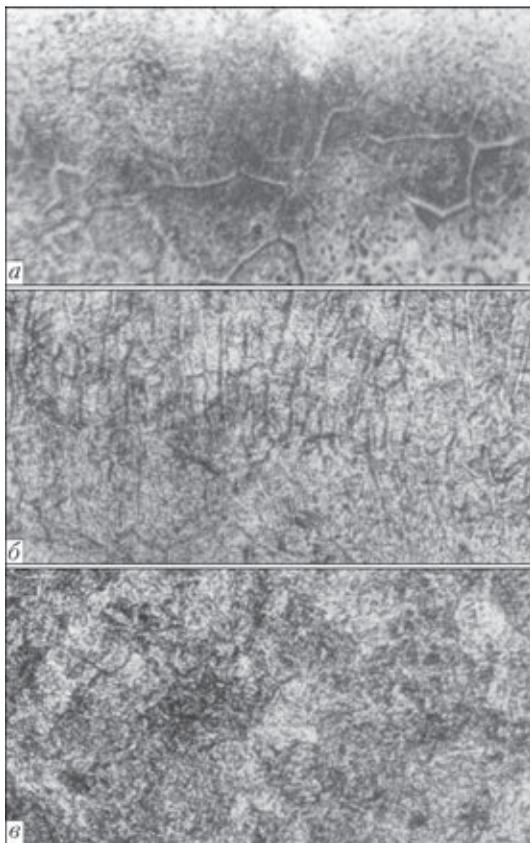


Рис. 4. Микроструктура ($\times 260$) сварного соединения: *а* — до закалки; *б* — после закалки; *в* — после термомеханической обработки

изменять прочностные характеристики от 600 до 2000 МПа [11]. При этом сварные соединения с идентичными по химическому составу швами в условиях статического нагружения могут быть равнопрочными с основным металлом [12]. Однако при малоцикловом нагружении ситуация изменяется. Долговечность (количество циклов нагружение–разгрузка) сварных соединений существенно зависит от локальных концентраций напряжений и микропластических деформаций вследствие повышенной по сравнению с основным металлом физической и химической неоднородностью, особенно у границы сплавления [13]. На рис. 3 представлены типичные усталостные трещины в участке перегрева пограничной зоны. Видно, что они связаны с кристаллическим строением металла, подвергавшегося воздействию термического цикла сварки. Для устранения неблагоприятных последствий этого воздействия понадобился комплекс технологических приемов улучшения структуры, включая термические циклы сварки и последующей обработки баллонов, особенно продольных швов, ориентированных перпендикулярно радиальным напряжениям.

Экспериментально установлено, что для обеспечения требуемой долговечности [14] металлопластиковых баллонов со стальными корпусами необходимо обеспечить показатели пластичности и вязкости металла не ниже $\delta_5 \geq 12...15\%$, $\alpha_H \geq 80$ Дж/см². Комплексная термомеханическая обработка продольных швов как наиболее уязвимых и чувствительных к локальным концентрациям напряжений участков сварных корпусов улучшает их структуру (рис. 4) и обеспечивает требуемое сочетание пластичности и вязкости металла сварных соединений, увеличивая долговечность комбинированных баллонов (рис. 5).

При прочности стеклоровинга 940...1180 МПа стальная (30ХГСА) и композиционные оболочки квазиравнопрочны и при равной толщине после 15000 циклов нагружение–разгрузка сохраняют запас прочности $\geq 2,6 \sigma_B$. В случае использования

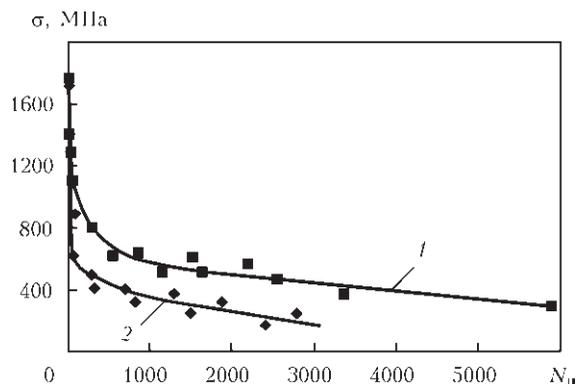


Рис. 5. Кривые работоспособности баллонов в условиях циклических нагрузок: *1* — после термомеханической обработки; *2* — после термической обработки

стали типа 09Г2С, прочность которой составляет около 490 МПа [15], для получения необходимого запаса прочности баллона требуется увеличивать толщину стенки стального корпуса почти в два раза, если усиливающая оболочка формируется только на цилиндре. Уменьшение толщины стенки корпуса баллона, как показали совместные исследования ИЭС и ИМех НАНУ, достигается формированием оболочки типа «кокон».

Реализовать намотку длинномерных баллонов в «кокон» сложно. Поэтому оптимальным решением здесь может быть либо увеличение толщины стенки трубы, либо предела прочности стали пропорционально диаметру баллона (выражения (1) и (2), рис. 6).

Высокопрочные стали типа 30ХГСА, имея высокие значения σ_b и σ_r , склонны к закалке на воздухе с образованием малопластичных структур, что при определенных условиях может вызвать образование трещин в сварных соединениях. Важно также отметить, что легированная кремнием сталь 30ХГСА имеет теплопроводность почти в 2,4 раза ниже таковой у железа [15, 16]. Это снижает интенсивность отвода тепла из зоны сварки и увеличивает продолжительность пребывания металла в интервале высоких температур, что усиливает развитие химической микронеоднородности металла шва, которая снижает механические свойства металла и его сопротивляемость образованию и развитию трещин [12, 17]. Поэтому целесообразность предварительного и сопутствующего подогревов стали 30ХГСА при сварке сомнительна. Более полезным, как показали исследования, является увеличение скорости охлаждения выше точки $A_{(r)}$ и некоторое замедление охлаждения соединения при температурах завершения распада аустенита с целью самоотпуска продуктов распада и повышения их пластичности.

Опыт сварки и термообработки сталей указанной группы [18–20] подтверждает, что отказ от подогрева позволяет формировать в соединениях мелкозернистые структуры мартенсита отпуска или бейнитно-мартенситной смеси только за счет параметров термического цикла сварки. Одним из методов решения этой проблемы является использование режимов сварки с повышенными (≥ 500 °C/с) скоростями нагрева металла, что достигается либо увеличением концентрации энергии в дуге, либо сокращением длительности нагрева при использовании дуги с более низкой концентрацией.

Эффективным средством повышения концентрации нагрева являются активирующие флюсы [21, 22]. Тепловая мощность дуги при сварке плавящимся электродом обычно в 2-3 раза выше, чем неплавящимся — при одинаковых сварочных

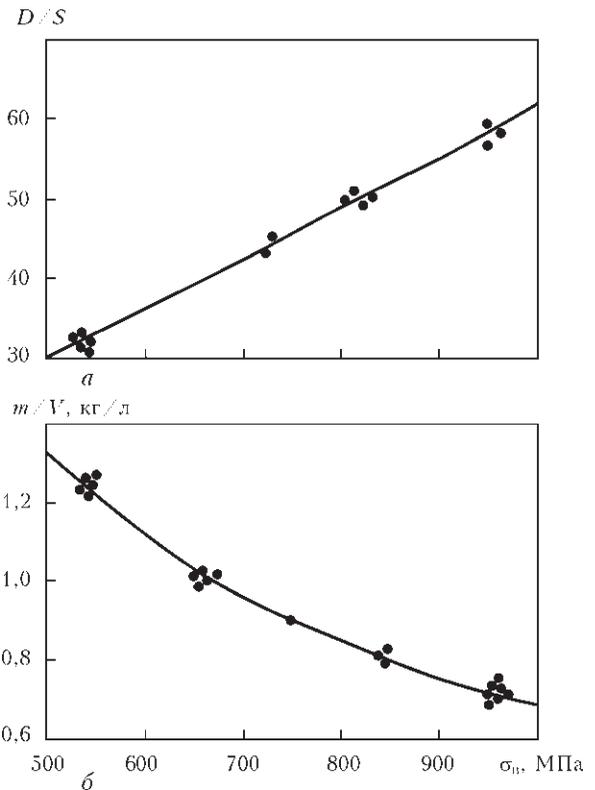


Рис. 6. Влияние прочности стали на соотношение диаметра трубы к толщине стенки (а) и массы баллона к его объему (б) токах. Поэтому для получения равнозначного эффекта неплавящимся электродом с активирующим флюсом выполняют со скоростями примерно в 2-3 раза меньшими, чем сварку плавящимся электродом в защитных газах с активирующим флюсом. При этом максимальное влияние на кинетику формирования структуры в первом случае достигается при толщине металла до 6 мм, когда скорости нагрева металла составляют $\geq 600...700$ °C/с. С увеличением толщины металла скорости нагрева при сварке неплавящимся электродом с активирующим флюсом резко снижаются, поэтому целесообразно выполнять сварку плавящимся электродом в защитных газах с активирующим флюсом. Она позволяет сваривать за один проход металл толщиной 10...20 мм, со скоростями нагре-

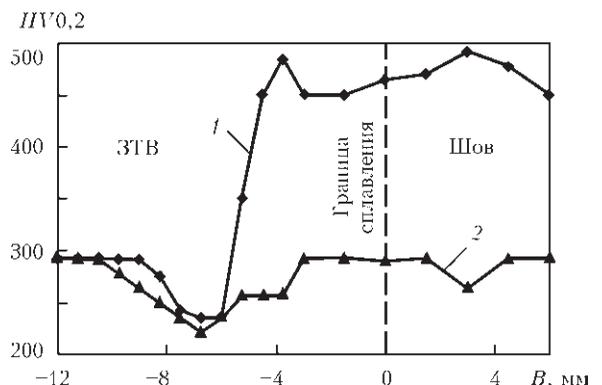


Рис. 7. Влияние местного отпуска на микротвердость в металле шва и ЗТВ: 1 — после сварки; 2 — после местного отпуска



Таблица 3. Варианты баллонов для грузовой системы специализированных КПП-газовозов (планируемая масса трубопроводов на судне 85,5 тыс. т)

Параметр	K_3			
	2,5		1,75	
	σ_R , МПа			
	640	960	640	960
Типоразмер труб	МП1220×27,06	МП1220×18,04	МП1220×18,3	МП1220×12,2
Длина трубопроводов на судне, км	77,2203	07,9273	106,4463	145,0136

Таблица 4. Техничко-экономические показатели морской транспортировки 10 млрд м³ газа в год на расстояние 1 тыс. км

Агрегатное состояние газа	Инвестиции, млн дол. США (место)		Эксплуатационные затраты, млн дол.				Сумма затрат за 20 лет [2]+[6], млн дол. (место)	
			За 1 год (место)		За 20 лет (место)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NgH (кристаллогидраты)	2644 (V)		606 (V)		12120 (V)		14764 (V)	
LNg (сжиженный газ)	2030 (IV)		243 (II)		4860 (II)		6890 (III)	
CNg (сжатый газ, $K_3 = 1,75$)	1348 (II)		210 (I)		4200 (I)		5548 (I)	
CNg (сжатый газ, $K_3 = 2,5$)	1771 (III)		282 (IV)		5720 (IV)		7491 (IV)	
CNg (аренда контейнеровозов)	1251 (I)		270 (III)		5400 (III)		6651 (II)	

ва ≥ 3000 °C/с, что существенно уменьшает время пребывания металла в области высоких температур в период нагрева, а также сокращает объемы перегретого металла.

Известно, что увеличение скоростей нагрева высокопрочного металла сопровождается ускоренным его охлаждением и, следовательно, закалкой с образованием зоны повышенной твердости (рис. 7, кривая 1). Твердость металла в зоне при этом превышает твердость термоулучшенного основного металла в 1,5...2,0 раза. Поэтому для судов высокого давления, в соответствии с требованиями [14], предусмотрен местный отпуск сварных соединений. Его задача максимально нивелировать разницу между твердостью упрочненного до 900...1000 МПа металла и твердостью металла шва и ЗТВ (рис. 7, кривая 2). При этом, как следует из приведенного рисунка, зона разупрочнения практически не изменяет своих характеристик, но и не выходит за пределы допустимых твердости и прочности, т. е. ее работоспособность соизмерима с таковой у основного металла. По абсолютному значению прочность металла в зоне разупрочнения ниже прочности основного металла всего на ≤ 10 %, а ударная вязкость при этом выше почти в 2 раза. Исследования штампован-

Таблица 5. Рейтинг способов морской транспортировки 10 млрд м³ природного газа в год в зависимости от дальности перевозок

Агрегатное состояние газа	Дальность перевозок, км				
	620	1000	2000	3000	5000
NgH (кристаллогидраты)	V	V	V	V	V
LNg (сжиженный газ)	IV	III	II-I	I	I
CNg (сжатый газ, $K_3 = 1,75$)	I	I	I-II	II	II
CNg (сжатый газ, $K_3 = 2,5$)	III	IV	IV	IV	IV
CNg (аренда контейнеровозов)	II	II	III	III	III

ных днищ показало, что локальное снижение запаса прочности в указанных пределах не влияет на работоспособность изделия. Кроме того, увеличение на 15 % рабочих нагрузок при испытании баллонов не приводит к уменьшению их запаса прочности. Это может служить предпосылкой для повышения рабочего давления в баллонах, при котором расчетный запас прочности можно допустить до 1,75. Это позволит лучше использовать резервы, заложенные в конструкции баллонов за счет того, что в расчетах обычно принимаются минимальные показатели механических свойств, полученные при одноосном растяжении. В условиях двухосного растяжения они выше. Характеристики баллонов с запасами прочности 2,5 и 1,75 представлены в табл. 3.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны алгоритм и необходимое программное обеспечение, позволяющие выполнять многофакторную технико-экономическую оценку предлагаемых вариантов транспортировки газа, определять необходимые капитальные и эксплуатационные затраты в зависимости от объемов и дальности транспортировки газа, его агрегатного состояния, размера судов и типа грузовой системы газозовов, акватории плавания, условия прохождения проливов и каналов, портовых и прочих сборов.

Капиталовложения включали постройку приемного терминала (его береговой и рейдовой части), строительство необходимого количества танкеров. Кроме строительства новых судов были рассмотрены варианты аренды, в том числе с их переоборудованием и установкой газотранспортной системы.

Рассматривались следующие варианты

маршрутов доставки газа различной дальности, в том числе с морских скважин на Азово-Черноморском шельфе (220 км), в пределах акватории Черного моря (Супса–Феодосия, 620 км), варианты с выходом за пределы Черного моря: Египет — Ильичевск (1971 км); Шиккда — Ильичевск (2843 км); Шарджи — Ильичевск (7384 км).

Рассматривались варианты транспортировки кристаллогидратов (NgH), сжиженного газа (LNg), сжатого газа (CNg) с коэффициентами запаса прочности судовой газотранспортной системы $K_3 = 2,5$ и $1,75$ и аренды судов для контейнерной перевозки сжатого газа. Результаты расчетов, проведенных в табл. 4, 5, позволили сделать следующие выводы.

Для обслуживания Азово-Черноморского шельфа однозначно может быть рекомендована транспортировка сжатого газа (КПГ). Капиталовложения и годовые текущие затраты при этом в 1,5...2,0 раза ниже, чем при сжиженном газе.

При увеличении плеча транспортировки до 620 км (что включает все возможные маршруты в пределах акватории Черного моря) преимущество сжатого газа перед сжиженным по капиталовложениям составляет 1,2 раза, а текущие затраты практически выравниваются.

Для вариантов, связанных с выходом за пределы Черного моря через Босфор, Дарданеллы, а тем более за пределы Средиземного моря через Суэцкий канал, однозначно может быть рекомендован вариант транспортировки газа в сжиженном состоянии. На плече 2000 км сохраняется еще равенство капиталовложений, но текущие затраты снижаются на 10 %. Соответственно на плече 3000 км капиталовложения и текущие затраты снижаются на 15 %, на плече более 7000 км капиталовложения снижаются на 40 %, а текущие затраты на 30 %.

1. *Метан* – топливо 21 века! www.neoplan.ru/news/Metan.16.05.2012.
2. *Як оцінюють* майбутнє газовидобутку в Україні. Українська енергетика 23.05.2013. <http://ua-energy.org/post/32050>. – С. 4.
3. *Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України* // І. М. Карп, Д. О. Єгер, Ю. О. Зарубін та ін. – Київ: Наук. думка, 2006. – 305 с.

4. *Вотинцев А. В.* Транспортировка сжатого природного газа // Газовая пром-сть. – 2007. – № 2. – С. 62–63.
5. *Рен Ч. Г., Зеленовская Е. В.* Обзор существующих методов транспортировки природного газа на дальние расстояния и оценка их применимости // Нефть, Газ и Бизнес. – 2011. – № 3. – С. 3–9.
6. *Морская транспортировка сжатого природного газа* // Морская биржа. – 2006. – № 2(16) – С.65–69.
7. www.uh.edu/news-events/media-publications.
8. *Патон Б. Е., Савицкий М. М., Савиченко А. А.* Конструкция и технология изготовления баллонов высокого давления // Автомат. сварка. – 1995. – № 9. – С. 5–8.
9. *Определение параметров облеженных стальных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов* / М. М. Савицкий, А. М. Савицкий, В. А. Супруненко и др. // Вісник НУК. Електронне видання. – 2013. – № 1. – С. 4–14.
10. *Декларац.* пат. на корисну модель 67664 Україна, МПК F17C 5/00 Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом / Б. Є. Патон, Є. І. Крижанівський, М. М. Савицький та ін.; Заяв. 08.12.11; Опубл. 27.02.12; Бюл. № 4.
11. *Потак Я. М.* Высокопрочные стали. – М.: Металлургия, 1972. – 208 с.
12. *Макара А. М.* О равнопрочности сварных соединений высокопрочных сталей // Новые проблемы сварочной техники. – Київ: Техніка, 1964. – С. 247–268.
13. *Труфяков В. И.* Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 215 с.
14. *Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском.* – К.: Основа, 2007. – 373 с.
15. *Марочник сталей и сплавов* / Под ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
16. *Зиновьев Б. Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
17. *Стеренбоген Ю. А., Петров П. Ф.* Влияние температурного интервала кристаллизации на склонность сталей к образованию кристаллизационных трещин при сварке // Автомат. сварка. – 1979. – № 7. – С. 10–13.
18. *Влияние* стадии нагрева на формирование структуры сварных соединений закаливающихся сталей / А. М. Савицкий, В. Г. Васильев, М. М. Савицкий, В. Н. Вашенко // Там же. – 2005. – № 1. – С. 19–21.
19. *Савицький О. М.* Вплив швидкісних нагрівів на структуру вуглецевих сталей при локальній термічній дії // Металознавство та обробка металів. – 2005. – № 4. – С. 33–35.
20. *Физические основы электротермического упрочнения сталей* / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадеров, В. И. Трефилов. – Киев: Наук. думка, 1973. – 336 с.
21. *Дудко Д. А., Савицкий А. М., Савицкий М. М.* Сварка плавящимся электродом в защитных газах с применением активирующего флюса // Автомат. сварка. – 1996. – № 10. – С. 54–55.
22. *Применение* активных флюсов и активных газов для повышения эффективности дуговой и плазменной сварки / Б. Е. Патон, М. М. Савицкий, В. С. Гвоздецкий и др. // Там же. – 2003. – № 5 – С. 3–6.

Поступила в редакцию 09.04.2014