

УДК 620.12.3.561

Голиков В.А., Бойко П.А.
ОНМА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ТАНКЕРОВ – ГАЗОВОЗОВ ПРИ МОРСКОЙ ПЕРЕВОЗКЕ МЕТАНА

По данным [1], (табл. 4.2, стр. 141) доля судов по морской доставке энергоносителей на 2013 год составляла: каменного угля (балкеры) – 42%; нефти и нефтепродуктов, включая нефтяные (Р) газы (G) (танкеры и PG) – 30%; природные (N) газы (танкеры газозовы NG) – 2,7%.

По заключению В.Г. Фастовского [2] энергетическая эффективность 1 м^3 природного газа (метана) в нормальных условиях (1,013 бар и 293 К) по отношению к другим видам топлива и энергии составляет: каменного угля – $1,34\text{ кг/м}^3$; углеводородного жидкого топлива – $0,1022\text{ м}^3/\text{м}$; электроэнергии – $10,5\text{ кВт/м}^3$.

Архитектурные типы газозовов (LPG/LNG) разнообразны [3]. Главные их размерения и ходкость определяются грузоподъемностью, которая, в свою очередь, зависит от типа грузовых танков, способа перевозки и энерговооруженности судна.

Так, отношение грузовместимости (WG) к дедвейту судна (ДС), $WG/ДС \in [1,0; 1,5\text{ м}^3/\text{т}]$, характерно для LPG газозовов с вкладными цилиндрическими и призматическими танками, а также комбинированным и изотермическим способом перевозки [4, табл. 16.2, стр. 491]. Энерговооруженность LPG газозовов (отношение мощности судового пропульсивного комплекса (НСПК/WG $\in [0,85; 0,76\text{ кВт/м}^3]$), а НСПК /ДС $\in [0,2; 0,86\text{ кВт/т}]$).

Для LNG газозовов с изотермическим способом перевозки, вкладными сферическими и мембранными танками НСПК $\approx 0,25\text{ кВт/м}^3$, а НСПК/ДС $\approx 2,0$) кВт/т.

Следует также отметить, что использование установок реконденсации газов в танках газозовов приводит к увеличению их энергоемкости в зависимости от вида газа [4]. Мощность приводов установок реконденсации газов (НПУР, кВт) в зависимости от вида газа и грузоместимости определяется линейными зависимостями:

- природного (сухого) газа - $N_{НПУР}^{PG} = 0,042WG + 100$;

- этилена - $N_{НПУР}^3 = 0,0205 WG - 225$;

- газ нефтяных скважин $N_{ПНП}^{PG} = 0,008$ ВтГ.

Вместе с тем, еще В.Г. Фастовский [2] отметил важность способов перевозки газообразного топлива, а также степени его сжижения, которая зависит от состава исходного газа, естественного давления в скважине, цикла сжижения и реконденсации. Его исследованиями доказано, что при проектировании крупных ожижительных установок следует, в первую очередь, добиваться минимума эксплуатационных энергетических затрат так как значительные технические изменения и капитальные затраты вполне себя оправдывают. По затратам энергии на получение одного килограмма жидкого метана для различных схем ожижения при оптимальном максимальном давлении сжатия в 200 бар, лидирующее место занял каскадный метод сжижения с расходом 0,7 кВт/кг жидкости, на пример Питке, в то время как этот показатель для цикла Линге находится в пределах 0,9 – 1,5 кВт/кг жидкости, а для цикла Гейландта его величина составила 1,01 кВт/кг жидкости. В системах повторного ожижения (реконденсации) для изотермического способа перевозки газов используется каскадный метод с использованием пароконденсационных, холодильных машин, машин Филлипа, которые работают по циклу Стирлинга, и газовых регенеративных турборасширительных машин, работающих по циклу Брайтона или его модификациями [4]. В последние годы для транспортирующегося из шельфовых месторождений природного газа (метана), используются системы транспортных средств CNG (Compressed natural gas) [5], которые отвечают простоте конструкции и универсальности использования. Однако проблема экономической эффективности CNG технологий остается открытой.

При проектировании газозовов использован дифференциальный метод оценки экономической эффективности газозовов как элемента технико – экономического анализа, позволяющий обосновать эффективность их строительства и эксплуатации [3].

Целевой функцией экономической эффективности газозовов приняты приведенные затраты на одну тонну провозной способности судна: $Z = C + EN (K + \Gamma)$, где C - себестоимость перевозки одной тонны груза, ден. ед./т; K – удельные капиталовложения одной тонны перевезенного груза, ден. ед./т; EN – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, отн. ед.; Γ - удельные оборотные средства заключенные в груз, ден. ед./т [3].

Энергетическая эффективность систем ожижения и реконденсации определяется по холодильному коэффициенту холодильной машины, ее изотермическому к.п.д., коэффициенту сжижения газа, степени термодинамического совершенства каскадного цикла и др. [2, 4]. Обращает на себя внимание вывод В.Г. Фастовского [2] об определяющей роли свойств газов (метана), поведение которых формирует схемы каскадного метода ожижения. К таким свойствам можно отнести поведение паров метана, связанного с фазовым равновесием, от нормальной температуры кипения до критической при постоянном давлении и при многократном изменении плотности паров.

С термодинамических позиций свойства газов представлены намного проще, чем свойства жидкостей или твердых тел особенно, если они находятся при давлении, меньшем или равным атмосферному, и если их температура выше величины температуры конденсации. Поведение идеального газа может быть почти полностью описано с помощью известного линейного уравнения, отражающего газовый закон Авогадро ($PV = nRT$). Однако фазовые переходы газообразных веществ существенно изменяют представление о линейности этого уравнения [6, 7]. Табличные, графические и сложные аналитические формы представления термодинамических свойств газов создают проблемы в наблюдаемости за процессами фазовых превращений сухого природного газа, энергоэффективности его морской транспортировки и разработки новых технических решений по сжижению, если за единицу их оценки принять геометрическую величину – объем газа.

Целью настоящего исследования является переход от объемной оценки эффективности морских перевозок к более информативной – массовой, позволяющей установить степень наполняемости этих объемов, транспортируемым газом, т.е. традиционно оценивать грузоперевозку по грузоподъемности (т), а не по грузовместимости (m^3).

Научной гипотезой исследования стала возможность установления наблюдаемости за плотностью метана при его фазовых превращениях в процессах морской перевозки.

В задачи исследования входило установление аналитической или численной связи плотности метана с температурой и давлением в замкнутом объеме.

Решение задач исследования начинается с определения плотности газообразного метана с использованием абсолютной температу-

ры $T > T_{кр}$ (190,55 К) и давления $P \leq 900$ бар с погрешностью вычисления $\pm 0,05\%$ [6, формула (14), с. 19]:

$$pV = R^2 \times \left[\alpha(\rho) + \beta(\rho) \times T^2 \times 10^{-2} + \gamma(\rho) \times 10^4 \times T^{-2} \right],$$

$$\left. \begin{aligned} \text{здесь } \alpha(\rho) &= -289.425\rho \times 10^{-1} + 202.228\rho^2 \times 10^{-2} - \\ &- 472.007\rho^3 \times 10^{-3} + 423.007\rho^4 \times 10^{-4} - \\ &- 151.912\rho^5 \times 10^{-5} + 17.851\rho^6 \times 10^{-6}; \\ \beta(\rho) &= 100 + 58.914\rho \times 10^{-1} - 29.925\rho^2 \times 10^{-2} + \\ &+ 107.401\rho^3 \times 10^{-3} - 92.266\rho^4 \times 10^{-4} + \\ &+ 33.128\rho^5 \times 10^{-5} - 3.268\rho^6 \times 10^{-6}; \\ \gamma(\rho) &= -140.560\rho \times 10^{-1} - 308.685\rho^2 \times 10^{-2} + \\ &+ 1269.296\rho^3 \times 10^{-3} - 1238.265\rho^4 \times 10^{-4} + \\ &+ 425.446\rho^5 \times 10^{-5} - 53.452\rho^6 \times 10^{-6}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В уравнении (1) размерность pV - Дж/моль; p - бар; T - °К; ρ - моль/дм³; $R = 8,3143$ Дж/(моль \times град.). При переводе переменных следует помнить, что R [кДж (кгК)] = (16,043) R [Дж/(мольК)], ρV = [бар \times м³] = 0,224 PV [Дж/моль], а ρ [кг/м³] = 16,043 ρ [моль/дм³].

Давление насыщенных паров метана определяется по формуле, приведенной в [7, формула (3.5), стр. 65]:

$$P = 46.41 \exp \left[\frac{190.55}{T} (2.6154\sigma - 0.55128\sigma^{1.5} + 0.45389\sigma^3 - 0.27858\sigma^6) \right] \quad (2)$$

где $\sigma = 1 - 190,55/T$, причем $T \leq T_{кр}$.

Процедура определения P из формулы (1) предполагает организацию численного метода пошагового поиска величины P с последующим делением ее пополам с помощью итерациональных процедур с точностью ε до 10^{-4} бар.

Определение величины плотности жидкого метана при заданных значениях температуры $T_{ж}$ и давления $P_{ж}$, производится по формуле Кардано с использованием эмпирической формулы уравнения равновесного состояния [6, формула (22), стр. 33]:

$$P_{ж} = D(T)\rho_{ж}^2 \times 10^{-4} - B(T)\rho_{ж}^4 \times 10^{-8} - C(T)\rho_{ж}^6 \times 10^{-12} \quad (3)$$

Формула Кардано предназначена для решения уравнения третьей степени, вида: $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$ представленная как $y^3 + \rho y + g = 0$ при условии $x = y - b / (3a)$

$$P = -\frac{b^2}{3a^2} + \frac{c}{a} \quad \text{и} \quad g = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a}.$$

Для этого выражение (3) следует преобразовать путем замены переменных:

$$x = \rho_{\text{ж}}^2; a = A(T) \times 10^{-4}; b = B(T) \times 10^{-3}; c = C(T) \times 10^{-12}; d = P_{\text{ж}}, \text{ здесь:}$$

$$A(T) = -3260.007 + 27.9641T_{\text{ж}} - 0.1056114T_{\text{ж}}^2 + 145.332 \times 10^{-6}T_{\text{ж}}^3 + 159521T_{\text{ж}}^{-1} - 4070410T_{\text{ж}}^{-2}$$

$$B(T) = 31.4 - 0.4236T_{\text{ж}} + 0.001232T_{\text{ж}}^2$$

$$C(T) = -0.65 + 0.0112T_{\text{ж}} - 3 \times 10^{-5}T_{\text{ж}}^2$$

Процедура преобразования уравнения третьей степени в формулу Карно выглядит следующим образом:

- уравнение третьей степени делится на коэффициент при старшей степени: $x^3 + bx^2 / a + cx / b + cx / b + d / a = 0$

- последнее выражение представляется в виде $x^3 + Ax^2 / a + Bx + c = 0$;

- происходит замена переменных $x = y - 3 / A$, тогда

$$y^3 + \left(B - \frac{A^2}{3} y + \left(c + \frac{2A^2}{27} - \frac{AB}{3} \right) \right) = 0;$$

- решение данного уравнения после замены

$$P = B - A^2 / 3; g = c + 2A^3 / 27 - AB / 3, \text{ представляется как:}$$

$$y = \sqrt[3]{-0.5g + \sqrt{0.25g^2 + P^3 / 27}} + \sqrt[3]{0.5g - \sqrt{0.25g^2 + P^3 / 27}}.$$

В окончательном виде (кг/м³):

$$\rho_{\text{ГЖ}} = \sqrt{x} = \sqrt{y - 3A}. \quad (4)$$

Следует отметить, что уравнение (3) справедливо в диапазоне $P_{\text{Гж}} \in [0; 500 \text{ бар}]$ и $T_{\text{ж}} \in [100; 190 \text{ К}]$, причем при $P_{\text{Гж}} \leq 200 \text{ бар}$ вычисленная погрешность составляет $0,1 \div 0,2\%$, при $P_{\text{ж}} > 200 \text{ бар}$ до $0,4\%$, а в критической зоне при $P_{\text{Гж}} = 46 \pm 5 \text{ бар}$, $T_{\text{Гж}} = 191 \pm 5 \text{ К}$ погрешность расчетов доходит до 2% .

Плотность жидкого метана на линии затвердевания ($T_{ж} = 90,66\text{K}$) можно определить по уравнению (1) при давлении (бар) стр определяемом из [7, формула (3, 6),. 66]:

$$P_{\lambda} = 1753 \left[10.16 \times 10^{-4} (T - 18.16)^{1.50883} - 1 \right] \quad (5)$$

Графическая интерпретация уравнений (1) ÷ (5) представлена на рис. 1 [6, рис. 53, стр. 135].

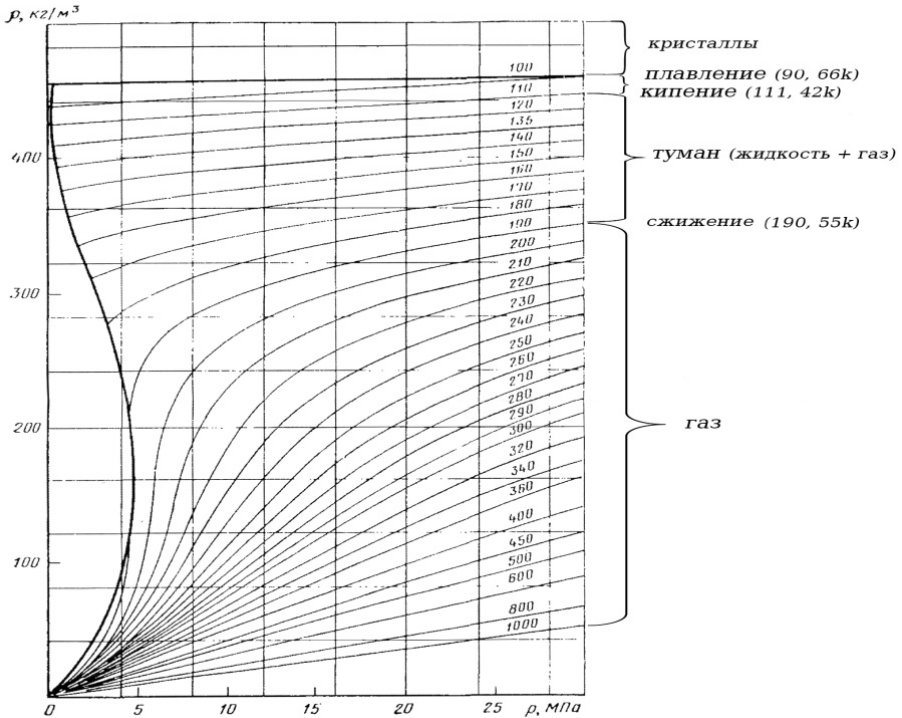


Рис. 1 Зависимость плотности метана от давления и температуры

Анализ кривых наклона указывает на квазилинейную связь между плотностью и давлением метана. В то время как зависимость его плотности от температуры не линейная. Угол наклона линии плотности относительно давления $\rho = f(P)$ при $T = \text{const}$, не превышает 30° , тогда как начальный угол функции $\rho = f(T)$ при $P = \text{const}$ стремится к 90° . Так как коэффициент при линейной части функции ρ представляет тангенс указанных углов, то следует ожидать значи-

тельно большего изменения плотности метана при изменении T , чем при изменении P . Если при $T = 293$ К и $P = 200$ бар, $\rho \approx 165$ кг/м³, то при $P = 1$ бар, $T = 100$ К, $\rho = 440$ кг/м³, а при $T = 100$ К и $P = 200$ бар, $\rho \approx 460$ кг/м³.

При рассмотрении мореходных качеств судов для обеспечения их плавучести требуется знание общей грузоподъемности ($P_{гр}$), а не только грузовместимости ($V_{гр}$) так как $P_{гр} = \rho_{гр} V_{гр}$.

Из линейности аргументов функции $P_{гр}(\rho_{гр}, V_{гр})$ следует, что при одной и той же грузоподъемности танкеров – газозовов CNG и LNG первому требуется грузовместимость в 2,5 – 2,7 раз больше, чем для LNG. Кроме этого, следует учитывать необходимость дожатия газа до 200 бар в обоих вариантах морской перевозки [3, 5], но если для CNG при строительстве требуется только увеличение капитальных затрат, то для LNG существенным остаются и эксплуатационные расходы на ожижение газа при морской перевозке.

Заключение

Количественное представление характеристик газа претерпевающего фазовые превращения, позволяет более полно оценить не только преимущество условий его хранения при морской перевозке, но и мореходные качества транспортного флота.

Дальнейшее упрощение методов определения термодинамических характеристик энергоэффективности природного газа позволяет приступить к изучению переходных процессов не только в системах сжижения, но и организации рабочих циклов тепловых двигателей работающих на перевозимом газе, включая и процессы автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Примачева Н.Н. Антикризисное управление в торговом судоходстве [Текст] Н.Н. Примачева, Е.В. Сенько, Т.Н. Фрасинюк, под общей ред. Н.Т. Примачева. – Одесса: НИРЭЭН НАНУ, 2015. – 306с.
2. Фастовский В.Г. Метан [Текст] / В.Г. Фастовский, под ред. И.П. Раппопорта. – М. – Л.: Изд. нефть и горнотопл. литер., 1947. – 154 с.
3. Зайцев В.В. Суда – газозовы [Текст]/ В.В. Зайцев, Ю.А. Коробанов. – Л.: Судостроение, 1990.- 304 с.

4. Загруйко В.О. Суднова холодильна техніка [Текст]/ В.О. Загруйко, О.А. Голиков. – К.: Наукова думка, 2002. – 575 с.
5. Зайцев В.В. Концепция использования технологий CNG для транспортировки газа из шельфовых месторождений Чорного моря [Текст]/Вл.В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, Дм. В. Зайцев / International Scientific Conference // Science and Technology for sustainable maritime development 13 – 14 2015 May, Nikola Vapsarov Naval Academy, Varna, Bulgaria. – p.p. 105 – 110.
6. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана: ГСССД. Серия монографии [Текст]/ В.А. Загорученко, А.М. Журавлев. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 348 с.
7. Термодинамические свойства метана: ГСССД: Серия монографии [Текст]/ В.В. Сычев, А.А. Васерман, В.А. Загорученко, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 348 с.