

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ИСТОЧНИКОВ НИЗКОПOTЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА КРИПРОДУКТОВ

**Введение.** В различных системах аэрокосмической техники, транспорта, а также в энергетических комплексах различного назначения в настоящее время широко используются криогенные жидкости. Основным преимуществом использования газов в криогенно-сжиженном состоянии является удобство их хранения, а также транспортировки и потребления (в том числе и как моторного топлива для транспортных средств) [1, 2].

Криогенные топлива и вещества используются в следующих областях:

- ✓ Авиационная техника.
- ✓ Автомобильная техника.
- ✓ Технологические процессы в производстве.
- ✓ Научные исследования.
- ✓ Биотехнологии.
- ✓ Криомедицина.

Важным условием применения криогенных веществ является их хранение и транспортировка с учетом их фазового состояния. Криогенные вещества могут находиться в жидком, газообразном и твердом состоянии. Во всех случаях существует возможность использовать низкотемпературный потенциал криопродукта. Механизм преобразования низкопотенциального тепла криопродукта будет осуществляться по схеме, представленной на рисунке 1. Если криопродукт находится в состоянии твердого тела, то схема преобразования низкопотенциального тепла криопродукта в случае использования его максимального низкотемпературного потенциала идет по схеме «А-В-С». Если криопродукт находится в жидком состоянии, то преобразование низкопотенциального тепла криопродукта происходит по схеме «В-С» (рисунк 1), а в случае состоянии криопродукта в состоянии пара при криогенных температурах – по схеме «С» [3].

В соответствии с этой схемой видно, что на эффективность использования низкопотенциальной энергии криопродукта влияет энергия потенциала его фазового перехода (удельная теплота плавления и теплота парообразования), физическое тепло, а также температура и давление.

Удельная теплота плавления криопродукта зависит от давления. При больших внешних давлениях вещество в процессе расширения должно совершать заметную работу против внешних сил. Криопродукты при плавлении расширяются, и удельная теплота их плавления при увеличении внешнего давления возрастает (кроме льда, висмута и галлия).

Удельная теплота парообразования криопродукта зависит от его давления и температуры. Известно, что увеличение давления кипения ведет к увеличению температуры кипения. При этом снижается удельная теплота парообразования.

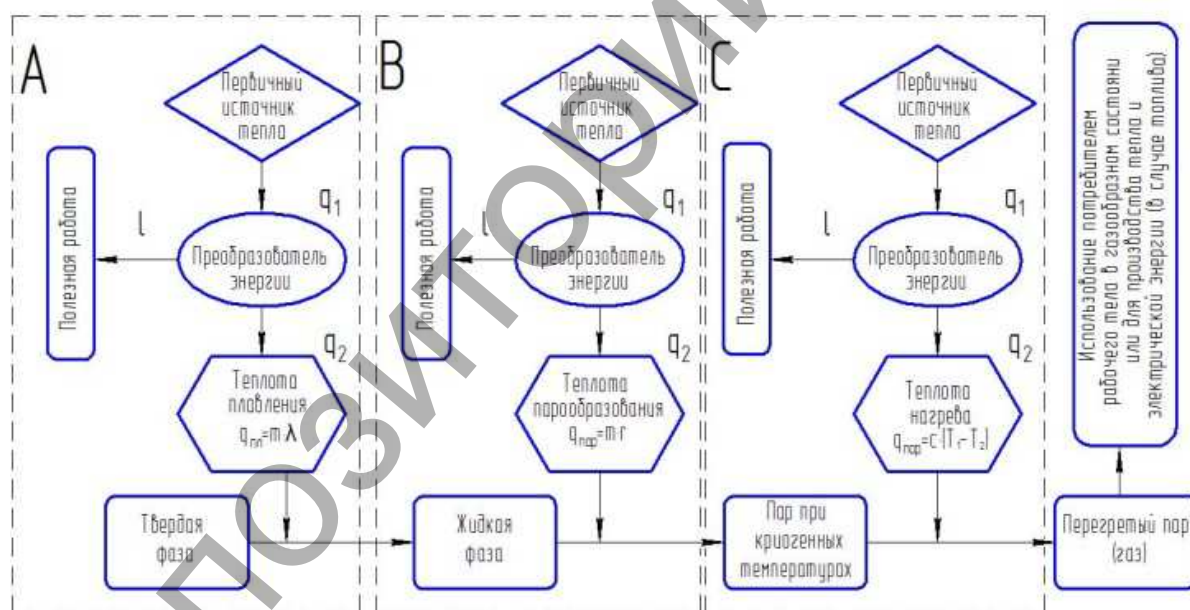


Рисунок 1 – Преобразование низкопотенциального тепла криопродукта в случае использования его максимального низкотемпературного потенциала

**Аксенова Дарья Константиновна**, магистрант института двигателей и энергетических установок Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

**Благин Евгений Валерьевич**, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

**Бурдина Яна**, магистрант института двигателей и энергетических установок Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

**Новиков Артем Витальевич**, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

**Согонова Ангелина Олеговна**, магистрант института двигателей и энергетических установок Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

**Уланов Дмитрий Александрович**, к.т.н., доцент, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

**Расчет теплоотрицательного потенциала криогена.** На основании обработки справочных данных составлена энергетическая диаграмма преобразования низкопотенциального тепла криопродукта в случае использования его максимального низкотемпературного потенциала при фазовых переходах для различных веществ.

На основании полученных данных проведем анализ использования низкопотенциальной энергии криопродуктов. Пусть криопродукт имеет температуру  $T_2=20-150$  К, а температура окружающей среды  $T_1=250-300$  К. Таким образом, два различных температурных уровня позволяют создать энергетическую машину. КПД такой системы по циклу Карно (рисунок 3), определяется следующим образом:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}; \quad (1)$$

$$\eta = \frac{l}{q_1}; \quad (2)$$

$$l = q_1 - q_2 \rightarrow q_1 = l + q_2; \quad (3)$$

$$l = \frac{q_2 \eta}{1 - \eta}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – термический коэффициент полезного действия,  $q_1$  – тепло, подводимое к преобразователю энергии из окружающей среды,  $q_2$  – криогенная энергия криопродукта (отводимое от преобразователя энергии тепло),  $l$  – располагаемая работа по циклу Карно.

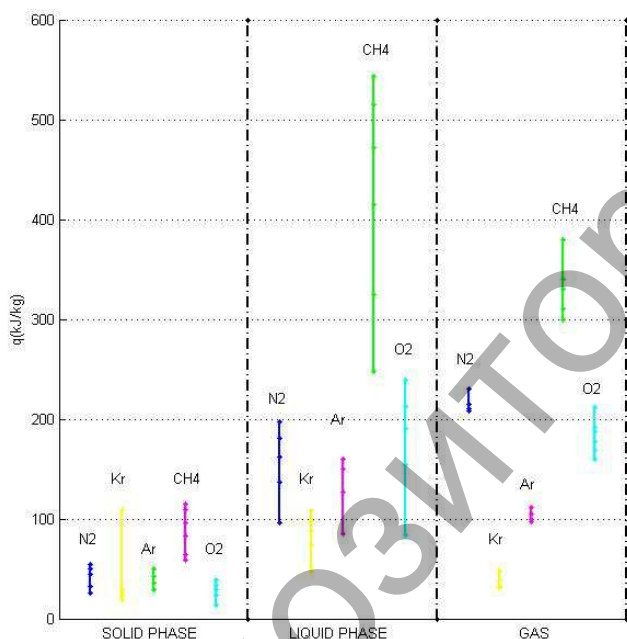


Рисунок 2 – Располагаемое низкопотенциальное тепло криопродукта при различных его фазовых состояниях

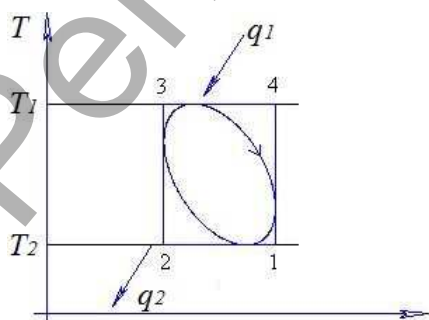


Рисунок 3 – Использование располагаемого низкопотенциального тепла в цикле Карно в качестве  $q_2$

Выполнение простейших вычислений (формулы 1–4) при всех представленных выше значениях низкопотенциального тепла криопродукта в различных фазовых состояниях (рисунок 2) позволяет получить располагаемую работу по циклу Карно при использовании в качестве низшего источника тепла скрытую теплоту криопродукта в различных фазовых состояниях (рисунок 4). На полученных диаграммах представлены энергетические характеристики при условиях использования веществ, которые указаны в таблице 1.

Полученные данные позволяют их применять для решения задач повышения энергоэффективности криогенных систем за счет использования их низкопотенциального тепла.

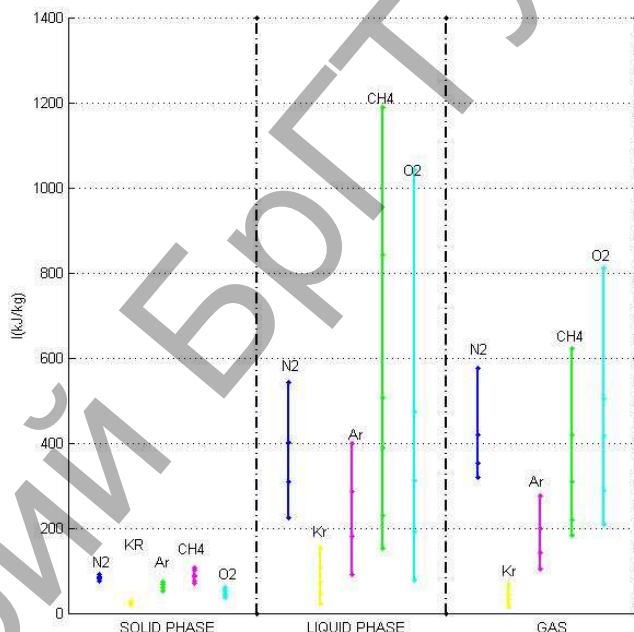


Рисунок 4 – Располагаемая работа по циклу Карно при использовании в качестве низшего источника тепла криопродукта в различных фазовых состояниях

**Расчет  $T-q_2$  диаграммы.** Полученные данные, представленные в таблице 1 и на рисунках 2, 3, 5, 6, позволяют оценить полный располагаемый потенциал низкопотенциального тепла криогенных веществ. Для расчета энергетических установок, позволяющих получать дополнительную энергию за счет низкопотенциального тепла криопродукта необходимо разработать  $T-q_2$  и  $T-l$  диаграммы.

Алгоритм построения  $T-q_2$  диаграммы заключается в следующем:

Начальной точкой для построения  $T-q_2$  диаграммы является точка состояния равновесия с окружающей средой  $T_0$ , у которой низкотемпературный потенциал  $q_2$  равен 0. По определению для 1 кг вещества:

$$q_2 = \int_{T_x}^{T_0} c_x dT. \quad (5)$$

Данное выражение справедливо для нагрева однофазной среды с подстановкой соответствующей теплоемкости.

Например, при изобарном нагреве (все дальнейшие диаграммы будут строиться именно для изобарного нагрева криопродукта) это выражение превращается в:

$$q_2 = \int_{T_x}^{T_0} c_p dT. \quad (6)$$

а) С учетом этого строится кривая низкотемпературного тепла либо путем интегрирования уравнения (2) с учетом зависимости теплоемкости от температуры, либо разбивается на участки и методом линейной интерполяции рассчитываются значения низкотемпературного потенциала для диапазона температур от окружающей среды до температуры кипения:

$$T_0=300; q_{20}=0;$$

Таблица 1 – Термодинамические параметры и характеристики процессов преобразования криогенной энергии при фазовых переходах для различных веществ

Вещество	Параметр	Твердая фаза	Жидкая фаза	Газовая фаза
Водород (H <sub>2</sub> )	P <sub>min</sub> ...P <sub>max</sub> , МПа	0,1...54,6	0,09...1,1	0,09...1,1
	T <sub>min</sub> ...T <sub>max</sub> , К	T=13,8...80	20...32	20...35
	q <sub>2</sub> , кДж/кг	58,6...338	419...921	35...400
	I, кДж/кг	1172,8...887,3	12433,5...3378	5400...2550
Азот (N <sub>2</sub> )	P <sub>min</sub> ...P <sub>max</sub> , МПа	0,1... 3,0	0,17...2,52	0,17...2,52
	T <sub>min</sub> ...T <sub>max</sub> , К	63...120	77,4...120	80...120
	q <sub>2</sub> , кДж/кг	25,5...54	95,7...197,6	208...219
	I, кДж/кг	91,9...76,5	542,8...224,2	574,9...319,6
Криптон (Kr)	P <sub>min</sub> ...P <sub>max</sub> , МПа	0,1...2,4	0,1...4,22	0,1...4,22
	T <sub>min</sub> ...T <sub>max</sub> , К	116,6...180	120...200	120...200
	q <sub>2</sub> , кДж/кг	19,5...30,1	47,8...107,9	31...48
	I, кДж/кг	29...18,4	152,9...21,5	68...14
Аргон (Ar)	P <sub>min</sub> ...P <sub>max</sub> , МПа	0,1...3,16	0,1...3,16	0,1...3,16
	T <sub>min</sub> ...T <sub>max</sub> , К	83...140	83...140	83...140
	q <sub>2</sub> , кДж/кг	29,5...49,7	85,6...159,6	97...111
	I, кДж/кг	73,6...53,3	398...91,7	276,8...103,9
Метан (CH <sub>4</sub> )	P <sub>min</sub> ...P <sub>max</sub> , МПа	0,1...3,6	0,012...3,24	0,012...3,24
	T <sub>min</sub> ...T <sub>max</sub> , К	90...180	91...180	110...180
	q <sub>2</sub> , кДж/кг	38,8...115,2	152...1188,3	300...380
	I, кДж/кг	86,2...70,4	1188,3...152	621,8...183,3
Кислород (O <sub>2</sub> )	P <sub>min</sub> ...P <sub>max</sub> , МПа	0,1...4,0	0,01...4,2	0,01...4,2
	T <sub>min</sub> ...T <sub>max</sub> , К	54...150	54...150 К	54...150
	q <sub>2</sub> , кДж/кг	13,9...39	83,9...23 8,7	160...212
	I, кДж/кг	60,7...36,4	1043,2...78,3	812,7...208

$$T_1=290; q_{21} = \frac{c_{p0} + c_{p1}}{2} (300 - 290);$$

$$T_2=280; q_{22} = q_{21} + \frac{c_{p1} + c_{p2}}{2} (290 - 280).$$

И таким образом до достижения температуры кипения.

б) Фазовые переходы представляются собой изотермические процессы, так что на T-q<sub>2</sub> диаграмме такой процесс изображается горизонтальной линией с температурой, равной температуре кипения, и q<sub>ж-г</sub>=r, т. е. разница между низкотемпературными потенциалами жидкого и газообразного криопродукта равна теплоте парообразования при заданном давлении.

После этого строится кривая нагрева для жидкой фазы аналогично пункту (а), вслед за чем повторяется процесс фазового перехода «жидкость - твердое тело» согласно пункту (б), и наконец, кривая заканчивается нагревом твердого тела, также аналогично пункту (а).

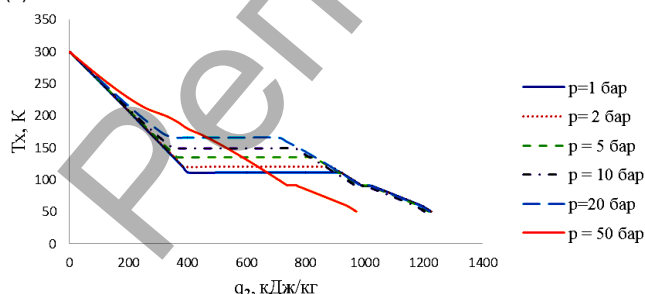


Рисунок 5 – T-q<sub>2</sub> диаграмма для метана

Для построения T-I – диаграммы криоагента используются данные, полученные в T-q<sub>2</sub> диаграмме, а также расчетные соотношения 1–4.

На основании этой методики были построены T-q<sub>2</sub> и T-I диаграммы для метана, которые представлены соответственно на рисунке 5.

**Заключение.** В результате выполненной работы исследованы следующие вопросы:

1. Определены располагаемое низкопотенциальное тепло и располагаемая работа по циклу Карно при использовании в качестве низшего источника тепла криопродуктов в различных фазовых состояниях для шести рабочих тел.
2. Предложена методика построения T-q<sub>2</sub> и T-I диаграмм для криогенных рабочих тел.
3. На основании этой методики были построены T-q<sub>2</sub> и T-I диаграммы для метана, которые можно использовать для расчета энергетических установок, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта для получения дополнительной энергии.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cryogenmash.ru/tpl/Catalogue\\_CM\\_2014.pdf](http://www.cryogenmash.ru/tpl/Catalogue_CM_2014.pdf).
2. Новотельнов, В.Н. Криогенные машины [Текст]: учеб. для вузов / В.Н. Новотельнов, А.Д. Суслов, В.Б. Полтараус – СПб.: Политехника, 199. – 335 с.
3. Zhang, G. Utilization of LNG cryogenic energy in a proposed method for inlet air cooling to improve the performance of a combined cycle [Текст] / G. Zhang, W. Xu, Y. Yang, D. Zhang // Energy Procedia. – 2014. – Volume 61. – P. 899–903.
4. Blagin, E.V. Estimation of the energy efficiency of cryogenic filled tank using in different system and devices[Текст] / E.V. Blagin, A.I. Dovgyallo, S.O. Nekrasova, D.V. Sarmin, D.A. Uglanov // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Volume 101. – P. 537–544.
5. Xiong, Y. A novel CO2-capturing natural gas combined cycle with LNG cold energy utilization[Текст] / Y. Xiong, P. Luo, B. Hua // Energy Procedia. – Volume 61. – 2014. – P. 899–903.

Материал поступил в редакцию 28.11.2016

In article thermodynamic parameters and characteristics of processes of transformation of cryogenic energy for various substances are determined. The technique of creation of the energy charts necessary for calculation of the power stations using low-potential heat of a cryoproduct for receipt of additional energy is stated. The method of increase in overall performance of these power stations and a method of its implementation is specified that can be used in the industry.

УДК 621.56

Аксенова Д.К., Бурдина Я., Новиков А.В., Согонова А.О., Угланов Д.А.

## СНИЖЕНИЕ ПОТЕРИ КРИОПРОДУКТА ПРИ ЕГО ХРАНЕНИИ В РЕЗЕРВУАРАХ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН

**Введение.** Во многих системах аэрокосмической техники, транспорта, а также в энергетических комплексах различного назначения в настоящее время широко используются криогенные жидкости.

Для накопления, хранения и выдачи криогенной жидкости в составе энергетических систем используются криогенные резервуары. Это сферические и цилиндрические резервуары (вертикальные или горизонтальные) объемом до 250 м<sup>3</sup> и 1440 м<sup>3</sup> [1].

Форма резервуаров выбирается с учетом их назначения, удобства изготовления, перевозки и эксплуатации. Дополнительное влияние на форму резервуаров оказывает стремление к уменьшению теплопритоков к хранимой жидкости. С точки зрения обеспечения минимальных теплопритоков предпочтительна сферическая форма сосудов, поскольку для сферы отношение поверхности к объему  $S/V$  минимально по сравнению с другими геометрическими формами. Однако при сферической форме сосудов недостаточно эффективно используются рабочие площади и объемы. В связи с этим кроме сосудов сферической формы широко применяются вертикальные и горизонтальные цилиндрические резервуары, форма которых в лучшей степени учитывает габаритные размеры транспортных средств, позволяет более рационально использовать производственные площади, дает возможность за счет изменения длины обечайки выпускать ряд однотипных резервуаров разного объема.

При хранении возникают потери криопродукта за счет неидеальности теплоизоляции и теплопритоков из окружающей среды. При хранении криопродукта из-за уноса массы изменяется его теплосодержание. Можно произвести расчет потери низкотемпературного тепла криопродукта в сутки, при хранении по следующим соотношениям:

$$\Delta m = m_{\Sigma} \cdot \frac{\Theta}{100}, \quad (1)$$

$$Q_{исп} = \Delta m \cdot r + c_p \cdot \Delta m \cdot (T_k - T_{окр}), \quad (2)$$

где  $\Delta m$  – масса испаряемого криопродукта в сутки,  $m_{\Sigma}$  – масса хранимого криопродукта;  $\Theta$  – потери продукта от испарения в сутки, %  $Q_{исп}$  – низкопотенциальное тепло испаряемого криопродукта;  $r$  – теплота испарения криопродукта;  $T_k$  – температура криопродукта;  $T_{окр}$  – температура окружающей среды.

Испаряемый криопродукт обладает достаточно высоким потенциалом низкотемпературной энергии [2–4], который можно использовать в качестве «холодильника» в тепловой машине, работающей по циклу Карно. Потери располагаемой энергии  $L_{расп}$  в сутки при условии использования низкопотенциального тепла криопродукта по циклу Карно рассчитывается следующим образом:

$$L_{расп} = \frac{Q_{исп} \cdot \eta}{1 - \eta}, \quad (3)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_e}. \quad (4)$$

**Характеристики различных типов резервуаров.** Выполнен анализ основных технических характеристик, а также проведены расчёты энергетических потерь в системах хранения криопродуктов по горизонтальным цилиндрическим и вертикальным цилиндриче-

ским резервуарам с экранно-вакуумной изоляцией для различных криогенных продуктов, выпускаемых промышленностью. В таблице 1 приводятся данные для резервуаров с давлением хранения криопродукта 0,6 МПа, а в таблице 2 – для резервуаров с давлением хранения криопродукта 1,7 МПа.

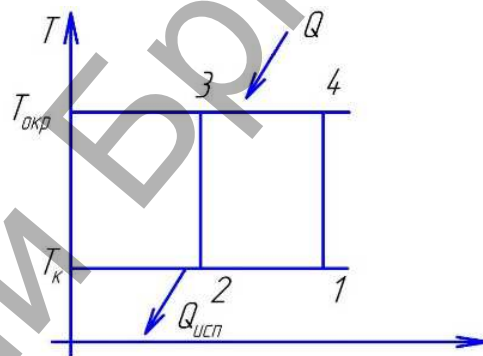


Рисунок 1 – Термодинамический цикл тепловой машины

Учитывая данные, представленные в таблицах 1 и 2, построены зависимости массогабаритных и энергетических характеристик криогенных резервуаров и систем в зависимости от их объема, а также давления хранения.

Потери от испарения в резервуаре в значительной степени зависят от его габаритов и конструкции. При выборе изоляции необходимо учитывать используемую жидкость и то, что толщина изоляции при увеличении объема емкости сосуда обычно возрастает медленнее, чем диаметр сосуда.

В настоящее время накоплен значительный опыт проектирования и изготовления высокоэффективных резервуаров – цистерн для криогенных жидкостей.

В таблицах 1 и 2 представлены основные массогабаритные характеристики резервуаров для хранения криопродуктов, на основании которых построены потери их низкопотенциального тепла и располагаемой энергии при условии использования низкопотенциального тепла по циклу Карно. Также определены удельные объемные суточные потери низкопотенциального тепла криопродукта в зависимости от объема резервуара и удельные объемные суточные потери располагаемой энергии при условии использования низкопотенциального тепла по циклу Карно. Они определяются следующим образом:

$$q_v = Q_{ev} / V; \quad (5)$$

$$l_v = L_{out} / V, \quad (6)$$

где  $q_v$  – удельные объемные суточные потери низкопотенциального тепла криопродукта;  $l_v$  – удельные объемные суточные потери располагаемой энергии при условии использования низкопотенциального тепла по циклу Карно;  $V$  – объем резервуара.

Соответственно зависимости  $Q_{исп}$ ,  $L_{расп}$ ,  $q_v$ ,  $l_v$  от объема цилиндрического резервуара при давлении хранения 0,6 МПа представлены на рисунках 2а–5а (вертикальные) и 2б–5б (горизонтальные). Аналогичные зависимости представлены на рисунках 6–9 для криогенных вертикальных резервуаров при давлении хранения 1,7 МПа.