

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КРУПНОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

УДК 665.632.078

**В.В. Василевич**, ООО «Трайсэл Солюшнс» (Мурманск, РФ),  
vasilevich@tricell.solutions

**П.О. Федосеев**, ООО «Трайсэл Солюшнс», fedoseev@tricell.solutions

**К.М. Бричка**, ФГБОУ ВО «Мурманский государственный технический университет» (Мурманск, РФ), xeniabrichka@gmail.com

**К.Х. Шотиди**, к. т. н., проф., ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина» (Москва, РФ), chotidi.k@gubkin.ru

Изучение различных проектов по сжижению газа, находящихся как на стадии строительства, так и на стадии предложения, показывает, что в течение следующего десятилетия ожидается значительное увеличение производственных мощностей по сжижению природного газа во всем мире. В статье рассматриваются современные технологии крупнотоннажного производства сжиженного природного газа (СПГ). Для проведения сравнительного анализа были взяты технологии  $C_3MR$  AP-X (AirProduct, США), являющаяся крупнотоннажной модификацией процесса  $C_3MR$ , и DMR (Shell, Нидерланды). Рассматриваемые технологии имеют два контура охлаждения: предварительный и основной. Главное отличие заключается в выборе предварительного охлаждения, а также приводов для компрессорного оборудования. В статье представлены принципиальные технологические схемы установок сжижения, отражены результаты исследования влияния различных факторов, определяющих общую энергетику системы. Приведено описание основных термодинамических процессов, происходящих в криогенных теплообменных аппаратах, в целях оценки энергоэффективности рассматриваемых технологий. Кроме того, в статье рассмотрены перспективы развития российского рынка СПГ, имеющего существенный потенциал для роста в данном сегменте мирового энергетического рынка. Отдельное внимание уделено основным преимуществам СПГ как перспективного энергоносителя.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ (СПГ), ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИЯ  $C_3MR$  AP-X, ТЕХНОЛОГИЯ DMR, СМЕШАННЫЙ ХЛАДАГЕНТ.

Рынок СПГ становится все более перспективным направлением развития современной энергетики в области энергоресурсов, несмотря на сложившуюся сложную ситуацию в мировой экономике. Природный газ в жидком состоянии занимает примерно в 600 раз меньший объем, чем в газообразном состоянии, что определяет возможность доставки СПГ в любую точку мира и делает его более ликвидным товаром, чем газ, поставляемый потребителям по трубопроводным газотранспортным сетям.

Преимущество в логистике позволяет производителям СПГ

осуществлять более эффективную маркетинговую стратегию, оперативно корректируя рынки сбыта в зависимости от колебаний спроса и предложения в том или ином регионе. Не менее важным преимуществом СПГ над другими энергоносителями (уголь, нефтепродукты и другие полезные ископаемые) является его экологичность. При качественной сепарации исходного сырья от тяжелых углеводородных фракций при сжигании СПГ в атмосферу выделяется минимальное количество загрязняющих веществ. Управляя содержанием широкой фракции легких углеводородов

(ШФЛУ), можно регулировать теплотворную способность продукции в зависимости от требований конкретного заказчика.

По мнению экспертов, в будущем на мировом рынке газа будет преобладать именно СПГ. За последние несколько лет доля России не превышает 5 % мирового производства [1]. Однако, согласно исследованиям аналитических компаний и прогнозу независимых экспертов, ожидаемый спрос на СПГ к 2035 г. будет расти, и Россия сможет завоевать уже до 12 % в этом сегменте рынка, а по некоторым оптимистическим прогнозам, к 2030 г. – до 20 % [2, 3].

**Vasilevich V.V.**, Tricell Solutions LLC (Murmansk, RF), vasilevich@tricell.solutions

**Fedoseev P.O.**, Tricell Solutions LLC, fedoseev@tricell.solutions

**Brichka X.M.**, Murmansk State Technical University (Murmansk, RF), xeniabrichka@gmail.com

**Shotidi K.Kh.**, Ph. D., Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, RF), chotidi.k@gubkin.ru

### Comparative analysis of modern technologies of large-tonnage production of liquefied natural gas

An examination of the different gas liquefaction projects worldwide that are under construction or in the proposal stage shows the potential of substantially increase worldwide liquefaction capacity within the next decade. This paper addresses modern technologies of the large-tonnage production of liquefied natural gas (LNG). For comparative analysis were taken C<sub>3</sub>MR AP-X (Air Product, USA) which is the large-scale modification of C<sub>3</sub>MR process and DMR technology (Shell, the Netherlands) technologies. These technologies have two refrigeration circuits: preliminary and basic. The main difference between each liquefaction technologies is to select pre-cooling stage and actuators for the compressors. The paper presents the basic technological schemes of liquefaction plants, authors present researching results of the influence of various factors determining the total energy of the system. In addition, paper contains description of the main thermodynamic processes occurring in cryogenic heat exchangers in order to assess the energy efficiency of technologies. The paper describes the main trends of development of Russian LNG market with significant potential for growth in this segment of the global energy market. Special attention is paid to the main advantages of liquefied natural gas as a prospective energy source.

**KEY WORDS:** LIQUEFIED NATURAL GAS (LNG), ENERGY SAVING, ENERGY EFFICIENCY, C<sub>3</sub>MR AP-X TECHNOLOGY, DMR TECHNOLOGY, MIXED REFRIGERANT.

Более 93 % СПГ производится на заводах, размещенных в тропическом, субтропическом и даже экваториальном климатических районах. Согласно [4, 5] в мире планируется строительство 10 заводов, в том числе 8 – в Российской Федерации, в холодном и арктическом климате, который характеризуется наличием многолетней мерзлоты, резких колебаний температур, сильных ветров и других экстремальных условий.

Абсолютное большинство заявленных к строительству заводов СПГ планируют использовать технологии Air Product (США), что приводит к ряду осложнений, связанных непосредственно с введением экономических санкций. Поэтому весьма актуален вопрос увеличения доли продукции отечественного производства вследствие снижения зависимости России от импортных технологий, что, безусловно, благоприятно скажется как на технологическом, так и на экономическом развитии страны.

В крупнотоннажных технологических процессах сжижение природного газа осуществляется двумя способами: каскадным (каскад «пропан – этилен – метан») или

Таблица 1. Термодинамические параметры сырьевого газа и СПГ

Температура, °С	Давление, кПа	Фазовое состояние
Сырьевой газ		
20	6000	Газ
СПГ		
-165,5	101,3	Жидкость

Таблица 2. Компонентный состав сырьевого газа

Компонентный состав газовой смеси	Содержание компонентов в газовой смеси, %
Метан	94,455
Этан	3,055
Пропан	0,481
и-Бутан	0,121
н-Бутан	0,144
и-Пентан	0,047
н-Пентан	0,044
C <sub>6</sub> +	0,207
Азот	1,441
Диоксид углерода	0,005
Итого:	100

с внешним источником охлаждения в виде замкнутых холодильных циклов с использованием смешанных хладагентов.

Анализ информации по технологиям сжижения природного газа

показал, что более 80 % действующих заводов по производству СПГ применяют смешанный хладагент с предварительным пропановым охлаждением (C<sub>3</sub>MR), четверть приходится на модифи-

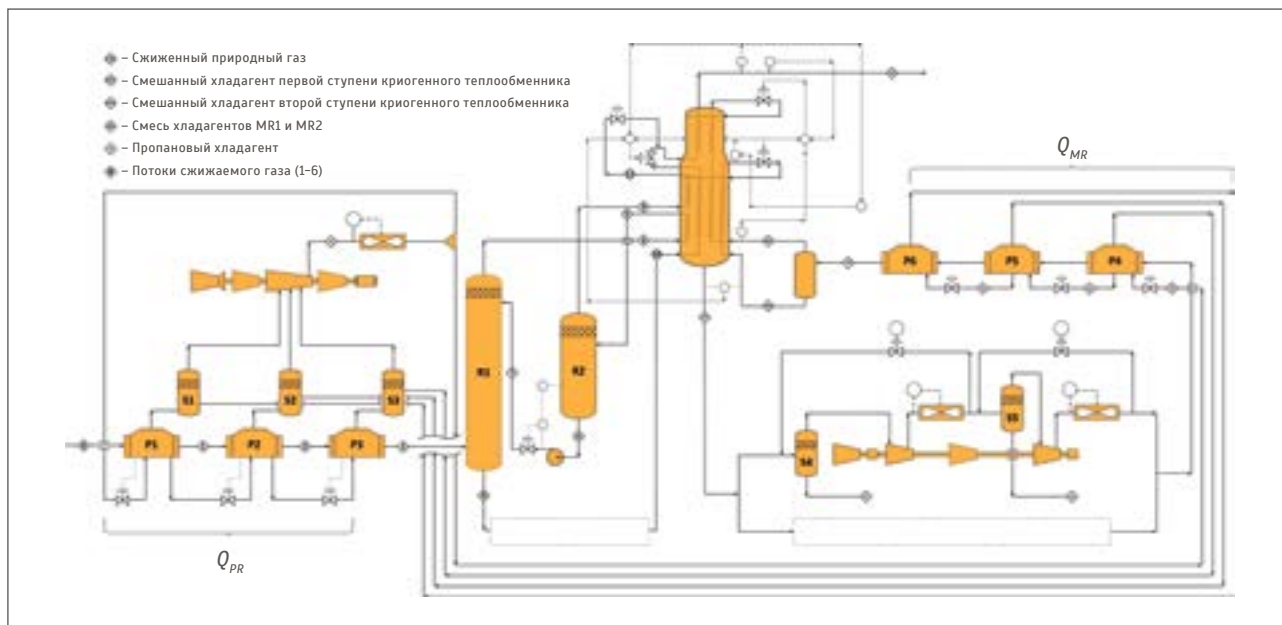


Рис. 1. Технологическая схема  $C_3MR$  AP-X

кации данной технологии (AP-X и технологию Split MR).

Недавно разработанную технологию  $C_3MR$  AP-X следует рассматривать как крупнотоннажную модификацию процесса  $C_3MR$ , позволяющую строить технологические линии производительностью свыше 5 млн т/год за счет применения дополнительного азотного

цикла для переохлаждения газа и более мощного привода. Еще одной технологией, нашедшей свое применение в средне- и крупнотоннажном производстве СПГ, является метод двухконтурного охлаждения смешанным хладагентом DMR [4]. Последние проекты по крупнотоннажному сжижению природного газа ис-

пользовали технологии  $C_3MR$  AP-X и DMR, поэтому в данной статье для сравнения были взяты именно эти две технологии.

Для проведения сравнительного анализа технологий производства СПГ  $C_3MR$  AP-X и DMR целесообразно привести условия сжижения природного газа к идентичным параметрам.

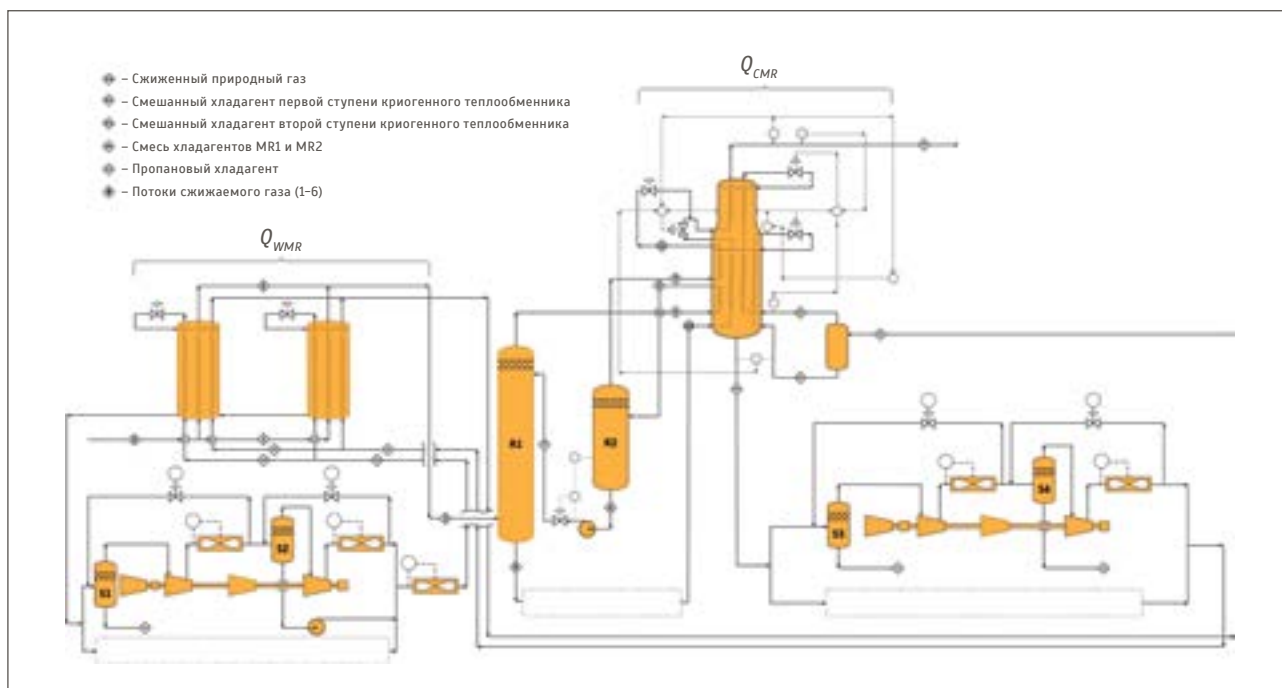


Рис. 2. Технологическая схема DMR

К таким условиям относятся: состав сжижаемой газовой смеси, термобарические условия сжижения, КПД компрессорных механизмов. В табл. 1 приведены температура, давление и фазовое состояние сырьевого газа, используемого для анализа производства СПГ, а также конечного продукта всех вышеуказанных технологий – СПГ. В табл. 2 представлен компонентный состав сырьевого газа.

Для оценки влияния начальных, промежуточных и конечных термобарических условий природного газа, количества охлаждающих контуров, состава смешанного хладагента и исследования термодинамических процессов, происходящих в криогенных теплообменных аппаратах, необходимо провести комплексный анализ влияния всех факторов, определяющих общую энергетику системы.

В целях описания основных термодинамических процессов был проведен анализ работ систем  $C_3MR$  AP-X (рис. 1) и DMR (рис. 2).

Для анализа процессов, происходящих в системе при фазовых переходах, использовалось уравнение состояния Пенга – Робинсона. Расчеты с применением данного уравнения позволяют определить параметры фазового перехода углеводородных систем, а также компонентный состав получающихся фаз:

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b) + b(V - b)}$$

где  $p$  – давление газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $V$  – молярный объем;  $T$  – температура;  $a, b$  – коэффициенты.

По результатам расчетов термодинамических параметров сырьевого газа (табл. 1, 2) построена диаграмма распределения  $PT$ -ус-

ловий в зависимости от приращения теплового потока в диапазоне 0,1–6,0 МПа (рис. 3). Каждой линии на диаграмме соответствует давление от 100 (нижняя линия) до 6000 (верхняя линия) кПа.

За 100 % принимается количество теплоты, которое необходимо отвести от природного газа при 0,1 МПа и температуре 20 °С для получения СПГ при давлении 0,1 МПа и температуре 165,5 °С. На технологической схеме  $C_3MR$  AP-X (рис. 1)  $Q_{PR}$  обозначает пропановый контур, охлаждающий природный газ,  $Q_{MR}$  является также пропановым контуром, но охлаждающим смешанный хладагент  $MR$ .

Технология  $C_3MR$  AP-X включает два контура охлаждения (рис. 4):

- пропановый контур  $Q_{PR}$  позволяет снизить температуру ПГ до  $T_{PR} = -34$  °С;
- контур смешанного хладагента  $Q_{MR}$  снижает температуру ПГ до  $T_{MR} = -156$  °С.



группа компаний  
**ГОРОДСКОЙ ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗ**

# Консультант №1 в России\*

\*1-е место в рейтинге  
«Консалтинг в области организации производства».  
По данным «Эксперт РА» (2004–2010, 2012 гг.)

**УСЛУГИ  
СЛУЖБ  
ГЛАВНОГО  
ИНЖЕНЕРА**

**Экспертиза  
промышленной  
безопасности**

**Энергоаудит**

**Специальная  
оценка условий  
труда**

**Проектирование**

**Экологический  
аудит**

на правах рекламы

Работаем с предприятиями ПАО «Газпром» с 1998 года



Входит в GCE Group («ДжиСиИ Групп»).  
Международный консультант по организации производства

Санкт-Петербург: +7 (812) 334 5984 Москва: +7 (499) 176 8772  
[www.gce.ru](http://www.gce.ru)



На технологической схеме DMR (рис. 2)  $Q_{WMR}$  обозначает контур теплового смешанного хладагента, охлаждающий природный газ и смешанный хладагент  $CMR$ . Технология DMR также включает два контура охлаждения (рис. 5):

- контур теплового смешанного хладагента  $Q_{WMR}$  снижает температуру ПГ до  $T_{WMR} = -34$  °С;
- контур холодного смешанного хладагента  $Q_{CMR}$  снижает температуру ПГ до  $T_{CMR} = -156$  °С.

Как видно из  $T-Q$ -диаграмм состояния технологий  $C_3MR$  AP-X и DMR, процессы, проходящие в многопоточном криогенном теплообменном аппарате градиентного испарения, обеспечивающем сжижение ПГ, являются идентичными. Они обеспечивают оптимальную разность температур между охлаждаемым потоком ПГ и смешанным хладагентом. Диапазон рабочих давлений криогенного теплообменника определяет нагрузку систем компримирования. В связи с этим для сравнения энергоэффективности процессов сжижения технологий  $C_3MR$  AP-X и DMR необходимо оценить нагрузку на системы компримирования предохлаждающих контуров (для  $C_3MR$  AP-X – контур  $PR$ , для DMR – контур  $WMR$ ).

Сводные энергетические затраты для получения 1 кг СПГ по технологии  $C_3MR$  AP-X и технологии DMR представлены в табл. 3. Технология  $C_3MR$  AP-X выгоднее технологии DMR по энергетическим затратам на 1,6 %. Такая энергоэффективность достигнута за счет трех ступеней сброса давления в противовес одной ступени по технологии DMR.

В статье произведен сравнительный анализ энергетических затрат технологии  $C_3MR$  AP-X и DMR при приведении основных технологических режимов к идентичным. Основываясь на полученных результатах, можно предположить, что энергетическая нагрузка зависит только от контура предварительного ох-

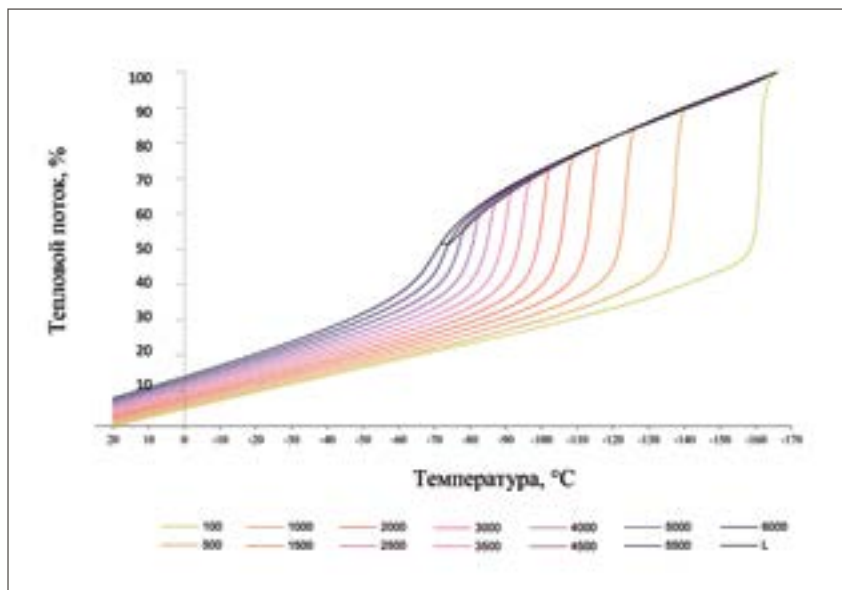


Рис. 3.  $T-Q$ -диаграмма состояния

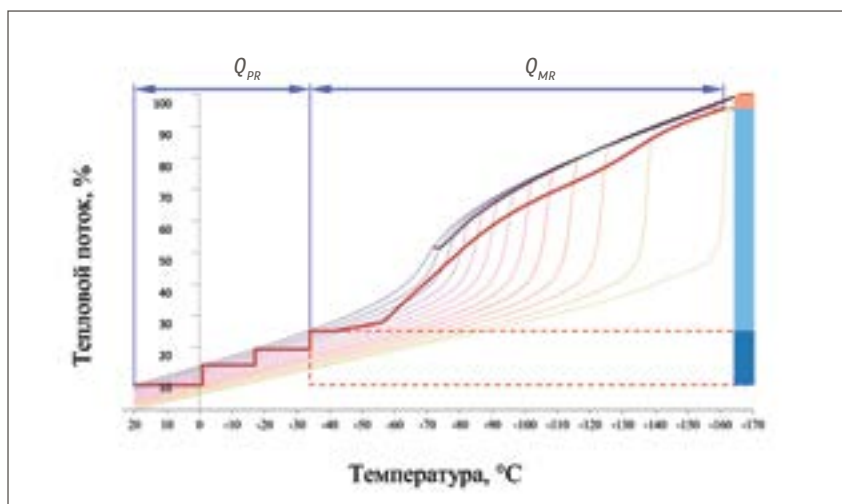


Рис. 4.  $T-Q$ -диаграмма состояния  $C_3MR$  AP-X

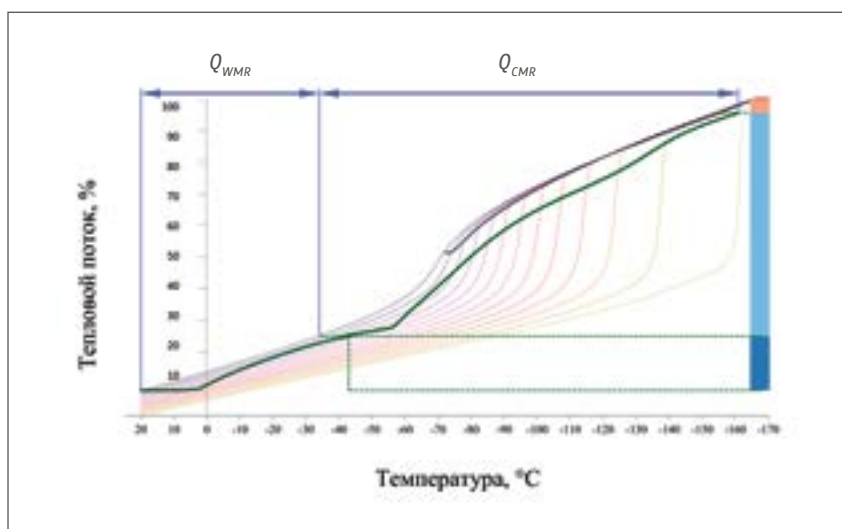


Рис. 5.  $T-Q$ -диаграмма состояния DMR

Таблица 3. Энергетические затраты получения 1 кг СПГ по технологиям C<sub>3</sub>MR AP-X и DMR

Компримирование хладагентов	Нагрузка, кВт/кг
<b>C<sub>3</sub>MR AP-X</b>	
Нагрузка MR	0,1999
Нагрузка PR1	0,0219
Нагрузка PR2	0,0197
Нагрузка PR3	0,0159
<b>Общая энергоэффективность</b>	<b>0,2574</b>
<b>DMR</b>	
Нагрузка CMR	0,1999
Нагрузка WMR	0,0617
<b>Общая энергоэффективность</b>	<b>0,2616</b>

лаждения, а разница  $\pm 2\%$  может быть достигнута оптимизацией составов хладагентов и изменением режимов компримирования. Существенное различие технологий заключается в упрощении контура предварительного охлаждения по технологии DMR, его высокой гибкости к изменению условий окружающей среды. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черный Д.С. Анализ рынка сжиженного природного газа в России // NovalInfo.Ru. 2015. № 33-2. С. 107-109.
2. Звуйковский Н. Сдержанный оптимизм: Обзор российских СПГ-проектов // Oil & Gas Journal Russia. 2016, март. С. 50-54.
3. Разумова Ю.В., Шарощенко И.В., Бондаренко А.Ю. Внутренний рынок сжиженного природного газа: современное состояние, конъюнктурные тенденции // НАУКОВЕДЕНИЕ: Интернет-журнал. 2015. Т. 7. № 2. С. 1-14.
4. Мещерин И.В., Настин А.С. Анализ технологий получения сжиженного природного газа в условиях арктического климата // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. 2016. № 3 (284). С. 144-157.
5. Голубева И.А., Мещерин И.В. Производство сжиженного природного газа: вчера, сегодня, завтра // Мир нефтепродуктов. 2016. № 6. С. 4-13.

#### REFERENCES

1. Cherniy D.S. Analysis of the Liquefied Natural Gas Market in Russia. NovalInfo.Ru, 2015, No. 33-2, P. 107-109. (In Russian)
2. Zvujkovsky N. Cautious Optimism Overview of Russian LNG Projects. Oil & Gas Journal Russia, 2016, March, P. 50-54. (In Russian)
3. Razumova Yu.V., Sharoshchenko I.V., Bondarenko A.Yu. Domestic Liquefied Natural Gas Market: Current Status, Market Trends. NAUKOVEDENIE = Science Studies (online magazine), 2015, Vol. 7, No. 2, P. 1-14. (In Russian)
4. Meshcherin I.V., Nastin A.S. Analysis of Technologies for Producing Liquefied Natural Gas in Arctic Climate Conditions. Trudy RGU нефти i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkona = Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), 2016, No. 3 (284), P. 144-157. (In Russian)
5. Golubeva I.A., Meshcherin I.V. Production of Liquefied Natural Gas: Yesterday, Today, Tomorrow. Mir nefteproductov = World of oil-products, 2016, No. 6, P. 4-13. (In Russian)

## ПСИ-2500

### МЕГАОММЕТР



- Измерение сопротивления изоляции от 0,01 МОм до 10 ГОм;
- Испытательные напряжения: 250, 500, 1000 и 2500 В;
- Измерение переменного напряжения до 700 В;
- Автоматический расчет коэффициента абсорбции;
- Индикация остаточного напряжения на объекте по окончании измерения и автоматическое его снятие.



## ТРАССОИСКАТЕЛИ «СТАЛКЕР»

### 75-14, 15-14 и 75-12, 15-12

Локализация и диагностика подземных газопроводов.

#### ПРИЕМНИК ПТ-14:



**GPS**  
Выноска подземных трасс с последующим наложением на карту.

• **АКТИВНЫЕ ЧАСТОТЫ:**  
273 Гц, 1024 Гц, 8928 Гц, 33 кГц.

#### ФУНКЦИЯ "КОМПАС"



Схематическое отображение коммуникации на дисплее приемника.

• **ПАССИВНЫЕ ЧАСТОТЫ:**  
Эфир 48 Гц - 14 кГц;  
Радио 10 - 36 кГц;  
50 Гц; 100 Гц; 300 Гц.

#### ПРИЕМНИК ПТ-12:

• **АНТИБЛИКОВЫЙ ДИСПЛЕЙ;**  
• **АКТИВНЫЕ ЧАСТОТЫ:**  
1024 Гц, 8928 Гц, 33 кГц.

• **ПАССИВНЫЕ ЧАСТОТЫ:**  
Эфир 48 Гц - 14 кГц;  
Радио 10 - 36 кГц;  
50 Гц.

#### ГЕНЕРАТОР ГТ-15:

- Мощность 10 Вт;
- Встроенный индуктор для бесконтактной подачи сигнала в коммуникацию.

#### ГЕНЕРАТОР ГТ-75:

- Мощность 75 Вт.



на правах рекламы



## РАДИО-СЕРВИС

426000, г. Ижевск, а/я 10047, ул. Пушкинская, 268  
тел.: (3412) 43-91-44, факс: (3412) 43-92-63  
e-mail: office@radio-service.ru, www.radio-service.ru