

## ВНЕПЕЧНАЯ ОБЪЕМНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ЕМКостей ДЛЯ ХРАНЕния СЖИЖЕнного ГАЗА

*Дружинин Г.М.<sup>1,2</sup>, Лошкарев Н.Б.<sup>1,2</sup>, Хамматов И.М.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Уральский федеральный университет*

*имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,*

*<sup>2</sup>ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»,  
г.Екатеринбург*

**Ключевые слова:** высокотемпературный внепечной нагрев, термообработка, шаровые емкости для хранения нефтепродуктов, блочные дизельные горелки, автоматизация, контроль температуры.

**Аннотация.** Россия является одним из мировых лидеров по добыче и переработки нефти и газа и обладает колоссальным парком емкостей для хранения этих продуктов. Строительство больших емкостей для хранения нефтепродуктов и сжиженных углеводородных газов (СУГ) очень сложная и ответственная задача. Поскольку емкости объемом более 2000 м<sup>3</sup> сваривают непосредственно на месте эксплуатации, а, как известно, при сварке в месте шва возникают термические напряжения, которые необходимо снимать с помощью термической обработки, то проводить эту обработку приходится путем нагрева емкостей до температуры порядка 600...650 °С непосредственно на месте строительства.

## SECONDARY BULK HEAT TREATMENT OF LIQUEFIED GAS STORAGE TANKS

*Druzhinin G.M.<sup>1,2</sup>, Loshkariov N.B.<sup>1,2</sup>, Khammatov I.M.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin,*

*<sup>2</sup>Research Institute of metallurgical heat engineering, Ekaterinburg*

**Keywords:** high-temperature secondary heating, heat treatment, ball tanks for storage of petroleum products, block diesel burners, automation, temperature control.

**Abstract.** Russia is one of the world leaders in the production and processing of oil and gas and has a huge fleet of tanks for the storage of these products. Construction of large tanks for storage of petroleum products and liquefied petroleum gases (LPG) is a very difficult and responsible task. Since tanks with a volume of more than 2000 m<sup>3</sup> are welded directly at the site of operation, and, as is known, when welding in the seam there are thermal stresses that must be removed by heat treatment, then this treatment has to be carried out by heating the tanks to a temperature of about 600...650 °C directly at the construction site.

АО ПО «Уралэнергомонтаж», ведущее строительство шести шаровых резервуаров емкостью 5000 м<sup>3</sup> и массой 830 т каждый, на территории ЗАО «Таманьнефтегаз» (рисунок 1), привлекло к проведению термообработки ООО НПФ «Горелочный центр» и ОАО «ВНИИМТ».

В задачу входила разработка оборудования и проведение нагрева шаровой емкости с целью термической обработки по заданной технологии.

Было рассмотрены несколько вариантов применяемых технологии проведения термообработки сварных швов вне печи:

- локальный электронагрев швов под теплоизоляционным одеялом;

- объемный нагрев емкостей изнутри с помощью инъекционных горелок при теплоизоляции наружной поверхности.



Рис. 1. Строительство шаровых емкостей для хранения сжиженного газа

Анализ результатов нагрева шаров под термообработку такими способами показал низкую их эффективность и низкую равномерность нагрева, поэтому было предложено использовать для нагрева шаров изнутри блочные дизельные горелками большой мощности (рисунок 2). В блочных горелках воздух на горение подается встроенным в горелку вентилятором. По сравнению с инъекционными горелки это увеличивает кинетическую энергию потока продуктов сгорания, вводимых в объем шара, вследствие чего увеличивается интенсивность теплообмена между продуктами сгорания и внутренними стенками шара и выравниваются температуры газов, находящихся внутри емкости.



Рис. 2. Блочная дизельная горелка

Из расчета теплового баланса, в котором были учтены затраты теплоты на нагрев металла (сталь типа 09Г2С), потери теплоты в окружающую среду теплоизолированной поверхностью шара, и потери теплоты, с уходящими продуктами сгорания, был определен расход дизельного топлива. При этом скорость нагрева принимались, в соответствии с технологической инструкцией,

равной 50 °С/ч. Результаты расчетов расхода топлива и исходные данные приведены в таблице 1.

Табл. 1. Исходные данные и результаты расчета теплового баланса

Величины	Размерность	Значение величин
<b>Исходные данные:</b>		
Масса шара	кг	$G_M=830000$
Температура нагрева	°С	$t_k=610$
Топливо и теплота сгорания	кДж/кг	Дизельное, $Q_n^p=42400$
Марка стали		09Г2С
Скорость нагрева	°С/ч	50
<b>Результаты расчета</b>		
Объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 кг топлива	м <sup>3</sup> /кг	$V_\alpha=14,4$
Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности теплоизоляции	Вт/(м <sup>2</sup> *К)	$\alpha=12$
Температура отходящих газов (принималась)	°С	$t_{n2}=475$
Тепловая мощность горелки	кВт	$Q_r=16\ 000$
Время нагрева, при заданных конечной температуре и скорости нагрева	Час.	$\tau=610/50=12,2$ (или 43920 с)

На основании этих расчетов было проведено математическое моделирование процессов движения продуктов сгорания и теплообмена внутри шаровых емкостей с использованием программы «Solidworks» [1].

Первоначально были произведены расчеты теплообмена и движения газов при использовании одной горелки мощностью 16000 кВт, которая была установлена в патрубке диаметром 600 мм, расположенном внизу шара. Результаты этих расчетов приведены на рисунках 3 и 4.

Анализ приведенных результатов показывает, что струя, создаваемая одной горелкой большой мощности, обладает высокой кинетической энергией и создает условия для более интенсивного нагрева верхней части шара. Максимальная разность температур на внутренней поверхности шара между низом и верхом шара составляет примерно 200 °С, что неприемлемо для качественного равномерного нагрева металла. Поэтому было просчитан вариант использования для нагрева двух горелок меньшей мощности, что позволило бы уменьшить кинетическую энергию струй и снизить неравномерность нагрева.

В этом варианте расчета в нижней части шара были установлены 2 горелки в разные технологические отверстия диаметр которых был 600 мм, при этом мощность горелок составляла 8 МВт, каждая.

В результате расчета были получены линии тока продуктов сгорания и их температуры, представленные на рисунке 5. Как видно из этого рисунка, основной поток продуктов сгорания идет вдоль вертикальной оси шара, при этом

продукты сгорания имеют наивысшую температуру при выходе из горелок, и по мере приближения к верхней крышке их температура существенно падает. Это связано с отдачей теплоты излучением сравнительно холодным стенкам.

Дойдя до верхней крышки, поток продуктов сгорания практически равномерно начинает омывать стенки шара, опускаясь вниз, вследствие подсоса струями, выходящими из горелок. При этом газы интенсивно охлаждаются.

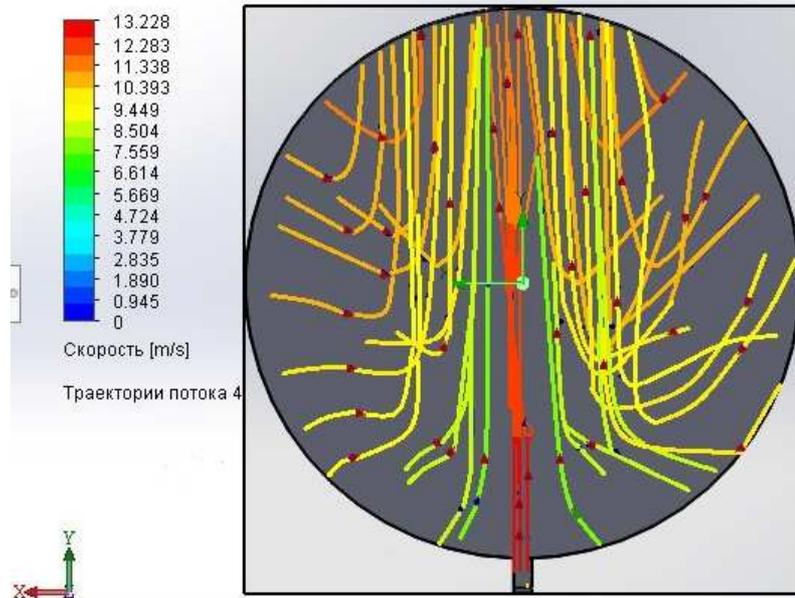


Рис. 3. Траектории движения продуктов сгорания при использовании одной горелки мощностью 16 МВт

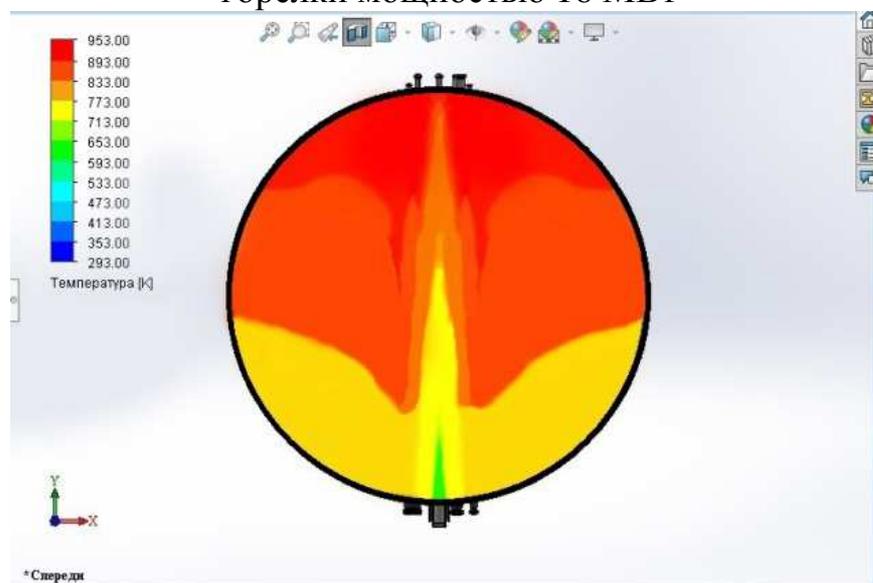


Рис. 4. Распределение температур газов в объеме шара при использовании одной горелки мощностью 16 МВт

Сложная траектория движения газов в рабочем пространстве свидетельствует о высокой степени турбулентности, которая способствует выравниванию температуры газов во всем объеме шара.

Это подтверждается результатами расчетов температурных полей - внутренней и внешней поверхности металла, а также температур на наружной поверхности теплоизоляции, которые показаны на рисунках 6...8.

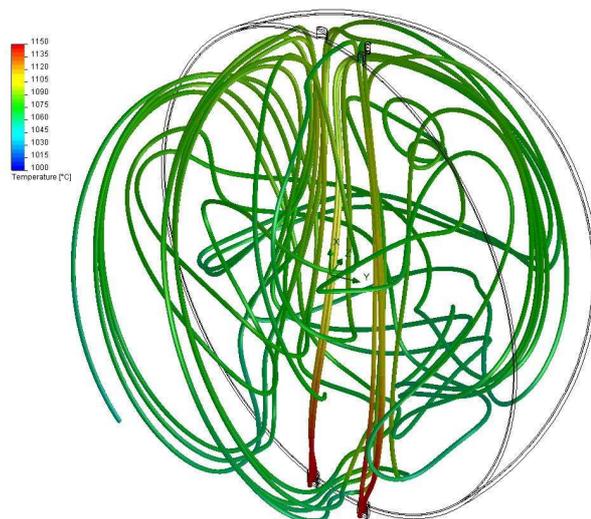


Рис. 5. Траектории движения и температуры продуктов сгорания при использовании двух горелок

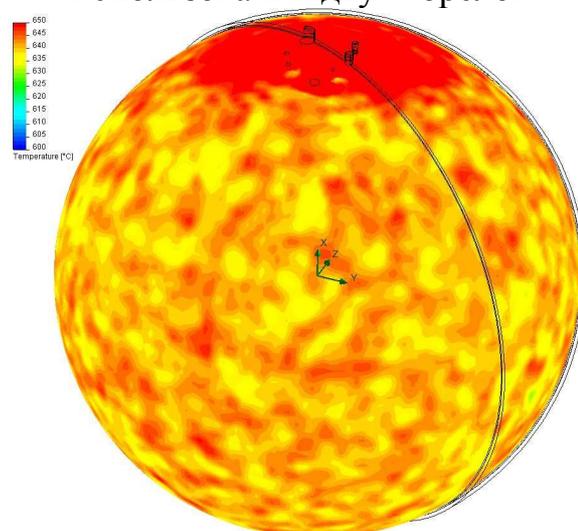


Рис. 6. Распределение температуры на внутренней поверхности металла, Вид сверху и с боку

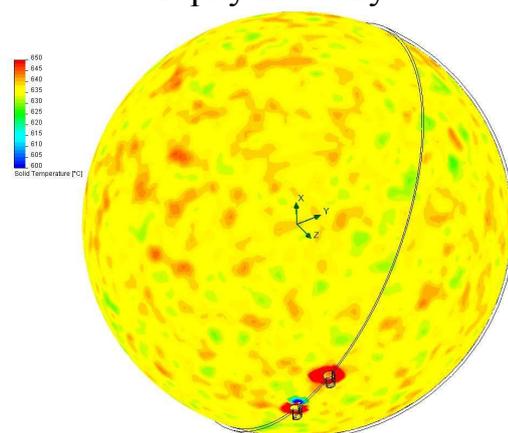


Рис. 7. Распределение температуры на наружной поверхности металла, Вид снизу и с боку

На основании результатов приведенных расчетов, было принято решение нагревать шаровые емкости с помощью двух горелок мощностью 8 МВт каждая. При этом горелки были размещены в специальных корзинах снизу шара в технологических патрубках (см. рисунок 9).

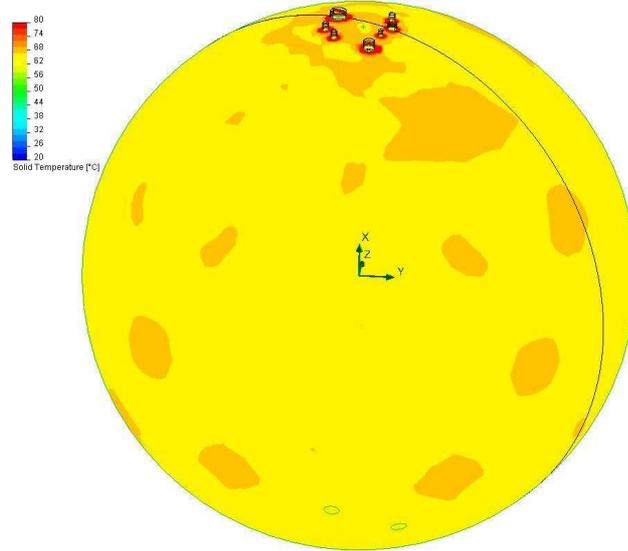


Рис. 8. Распределение температуры на наружной поверхности футеровки

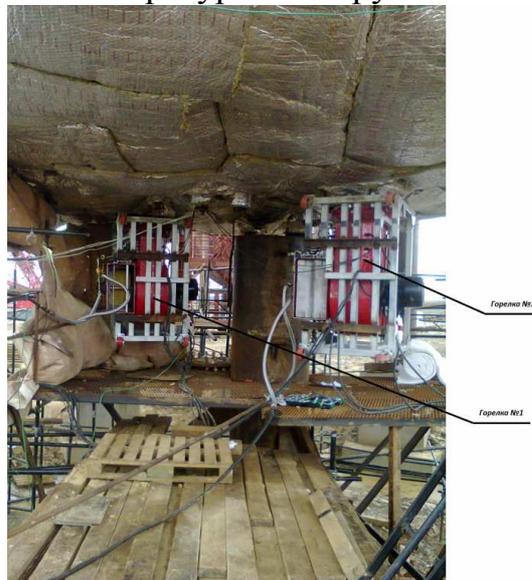


Рис. 9. Размещение блочных горелок при нагреве шара

Для контроля температур и их регулирования на внутренней поверхности шара были размещены 4 термоэлектрических термометра типа К, верхний из которых был регулирующим (см. рисунок 10).

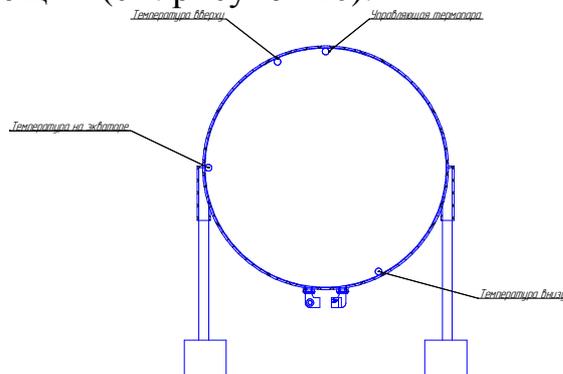


Рис. 10. Расположение контрольных и управляющей термопар на внутренней поверхности шара

Результаты нагрева шара двумя горелками показали, что шар объемом  $5000\text{м}^3$  с толщиной стенки 58...64 мм и массой 830 т, был нагрет с целью

термообработки после сварки, до заданной температуры 595...635 °С со скоростью 50 °С/ч. Управление нагревом шара осуществлялось в автоматическом режиме. Перепад температур по внутренней поверхности во время нагрева не превышал 45°С (см. Рисунок 11 и рисунок 12), а во время выдержки – 30 °С, что соответствует техническим требованиям и расчетам температурного поля, проведенным в пакете прикладных программ “Solidworks” и представленных выше.

Следует отметить, что во время выдержки температура внутренней поверхности стенки продолжала повышаться, однако, практически не превысила допустимых значений. Это связано с большой инерционностью металла. В конце выдержки перепад температур по внутренней поверхности шара составлял 24 °С, при допустимом перепаде 40 °С. На наружной поверхности металла температуры оказались на 15...20 °С ниже, чем на внутренней его поверхности. При этом температуры наружной поверхности низа отличались от соответствующих температур внутри на 30...40 °С, что можно объяснить несколькими причинами:

1. Шар установлен практически на побережье моря, где постоянно дуют сильные холодные ветры. Поскольку шар имеет достаточно большую поверхность и обтекаемую форму, то при обдуве его ветром, именно под шаром скорость ветра возрастает, что приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи и увеличению съема теплоты, а значит и понижению температуры наружной поверхности именно в нижней части шара.

2. Монтаж теплоизоляции проводился несколько дней, в течении которых шли дожди. Поэтому теплоизоляция намокала, а влага, под действием сил тяжести, стекала именно в нижнюю часть теплоизоляции, и не высохла полностью к началу термообработки. Это могло привести к дополнительным потерям теплоты на испарение влаги именно в нижней части шара.

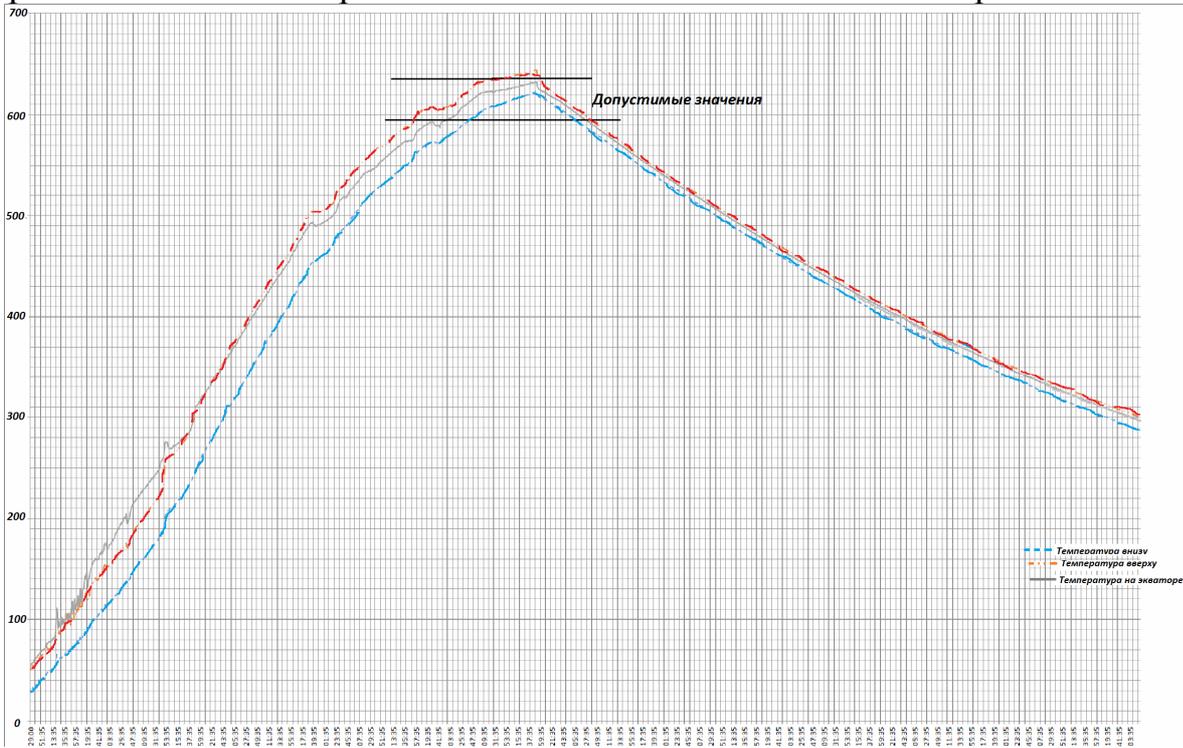


Рис. 11. Изменение температуры на внутренней поверхности шара за время нагрева, выдержки и регулируемого охлаждения

Приведенные результаты нагрева шаровой емкости с целью ее термической обработки показывают, что проведенные расчеты расходов топлива и распределения температур по поверхности шара адекватно отображают процесс нагрева, а результаты практически совпадают с результатами, полученными в ходе нагрева. Температурные режимы нагрева соответствуют техническому заданию, что свидетельствует о том, что подобные емкости следует нагревать не одной горелкой, а, как минимум двумя.

**Выводы.** Разработана мобильная система нагрева с целью внепечной термической обработки сварных металлических емкостей различного объема (2000 м<sup>3</sup> и более), включающая горелочные устройства на газообразном или жидком топливе, блок автоматического управления тепловой мощностью горелок и контрольные термопары для поддержания заданного режима.

Опыт нагрева шаровой емкости объемом 5000 м<sup>3</sup> показал, что данная система позволяет реализовать заданный темп нагрева и обеспечить необходимую равномерность температур по всей поверхности емкости.

#### **Список литературы**

1. Алямовский А.А. SolidWorks. COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2004. 432с.

#### Сведения об авторах:

*Дружинин Геннадий Михайлович* – д.т.н. профессор, УрФУ, директор по науке и технике ОАО «ВНИИМТ», г.Екатеринбург;

*Лошкарев Николай Борисович* – к.т.н., доцент УрФУ, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИМТ», г.Екатеринбург;

*Хамматов Идышат Маулитович* – к.т.н., ведущий инженер ОАО «ВНИИМТ», , г.Екатеринбург.