

## ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ИСПАРЕНИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В УСЛОВИЯХ НАГРЕВА МАЛОГАБАРИТНОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ

Телгожаева Д.С.

Научный руководитель: Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
[Anain@sibmail.com](mailto:Anain@sibmail.com)

Рост производства и потребления сжиженного природного газа (СПГ) приводит к необходимости разработки специальных мероприятий по безопасному хранению и использованию СПГ [1]. Одной из задач, возникающих при хранении таких газов, является снижение потерь основного продукта от «испарения» [1]. Решение этой задачи невозможно только эмпирическим путем. Наиболее перспективным является разработка методов расчета параметров теплообмена в условиях испарения СПГ как в крупногабаритных резервуарах при длительном хранении, так и в малогабаритных емкостях при локальном интенсивном нагреве.

Цель настоящей работы – математическое моделирование процесса теплообмена в частично заполненной малогабаритной емкости при испарении сжиженного природного газа в условиях интенсивного локального нагрева.

Рассматривается задача теплопроводности в двухслойном полом цилиндре (рис.1.)

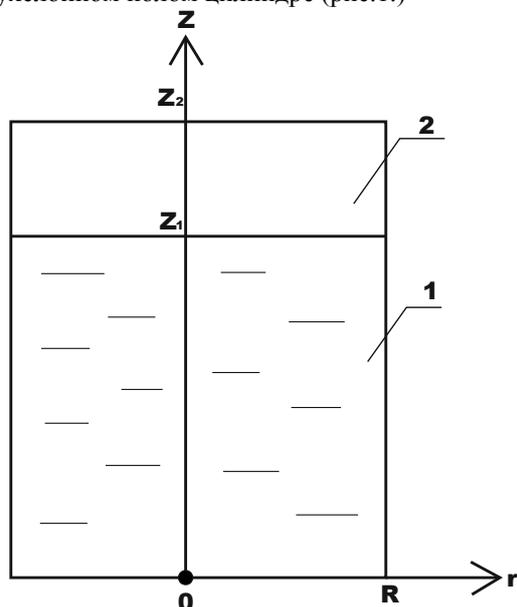


Рис. 1. Область решения задачи: 1- сжиженный газ; 2 – газ в газообразном состоянии.

Большую часть внутреннего объема цилиндра занимает СПГ. Около 15% объема занято природным газом в газообразном состоянии. Задача сформулирована в двумерной постановке в цилиндрической системе координат. В реальной практике возможен нагрев малогабаритной емкости с СПГ только на небольшом участке ее внешней поверхности. Поэтому на трех внешних

границах сформулированы различные граничные условия. Нижняя поверхность цилиндра теплоизолирована. На боковой поверхности (задача решена в осесимметричной постановке) заданы граничные условия первого рода (постоянная низкая температура). На верхней границе моделируются условия нагрева (задана температура, существенно превышающая начальную температуру области решения). Граничные условия четвертого рода заданы на границе раздела фаз. В этом условии учитывается теплота фазового перехода (испарения СПГ). Массовая скорость испарения рассчитывалась с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена, широко используемого при решении задач теплообмена в условиях интенсивного испарения жидкостей [2,3]. Интенсивное парообразование в области (2) (рис.1.) рассматривалось как процесс, в результате протекания которого поднимается давление в емкости. Природный газ считался теплопроводной сжимаемой жидкостью. Давление газов – продуктов испарения СПГ рассчитывалось с использованием уравнения состояния идеального газа.

Математическая модель исследуемого процесса имеет вид:

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right],$$

$$C_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right],$$

Здесь  $T$  – температура;  $C$  – теплоемкость;  $\lambda$  – теплопроводность;  $\rho$  – плотность;  $r, Z$  – координаты цилиндрической системы координат; индекс 1 соответствует сжиженному газу, 2 – газу в газообразном состоянии.

$$T_1 = T_0, T_2 = T_0 \quad t = 0;$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0 \quad r = 0, 0 < Z < Z_1;$$

$$T_1 = T_k \quad r = R, 0 < Z < Z_1;$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial z} = 0 \quad Z = 0, 0 < r < R;$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial r} = 0 \quad r = 0, Z_1 < Z < Z_2;$$

$$T_2 = T_k \quad r = R, Z_1 < Z < Z_2;$$

$$T_2 = T_H \quad Z = Z_2, \quad 0 < r < R;$$

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= T_1 \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} + Q \cdot W \end{aligned} \right\} Z = Z_1, \quad 0 < r < R.$$

$$W = \frac{\beta}{1 - k \cdot \beta} \frac{(P^H - P)}{\sqrt{2\pi RT/M}};$$

$$P = \frac{\rho R_2 T}{M}.$$

Здесь  $T_k$  - температура внешней границы;  $T_H$  - температура источника нагрева;  $Q$ ,  $W$  - тепловой эффект и массовая скорость испарения СПГ, соответственно;  $\beta$  - безразмерный коэффициент испарения;  $k$  - постоянная;  $P^H$  - давление насыщенных паров газа;  $P$  - давление паров газа вблизи границы испарения;  $M$  - молекулярная масса природного газа;  $R_2$  - газовая постоянная;  $R$ ,  $Z_2$  - координаты внешней границы области;  $Z_1$  - координата границы раздела «жидкость - газ».

Сформулированная задача теплопроводности решена методом конечных разностей с использованием итерационного алгоритма [4], разработанного при решении задач тепломассопереноса в условиях зажигания горючих жидкостей при интенсивном испарении последних.

В связи с интенсивным поглощением теплоты в узкой области фазового перехода на границе раздела сред и, соответственно, возникновением больших градиентов температуры использовалась неравномерная и нерегулярная разностная сетка. Для обеспечения устойчивости и сходимости численного решения шаги по времени выбирались в диапазоне от  $10^{-2}$  с до  $10^{-6}$  с.

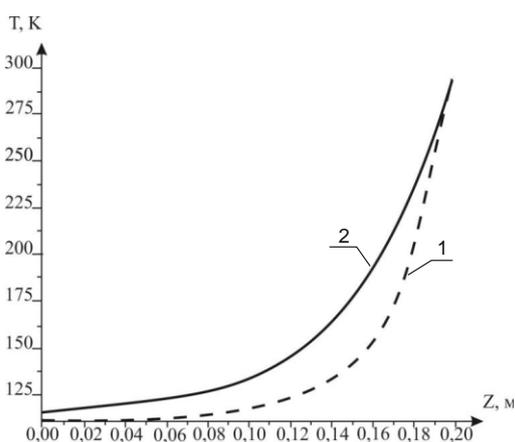


Рис. 2. Распределение температуры по высоте цилиндра в различные моменты времени: 1 -  $t = 300$  с, 2 -  $t = 3600$  с.

На рис. 2. приведено типичные распределения температур по  $Z$  в сечении  $r = 0$  на оси симметрии

цилиндра в различные моменты времени, полученные в результате численного решения системы сформулированных уравнений с соответствующими краевыми условиями.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что даже при относительно кратковременном повышении температуры на одной из границ области в результате интенсивного испарения СПГ возможен рост давления газов до значений, существенно превышающих допустимые (рис.3.). Быстрый подъем давления в случае нагрева верхней границы области, в которой находится газ, обусловлен экспоненциальной зависимостью скорости испарения СПГ от температуры.

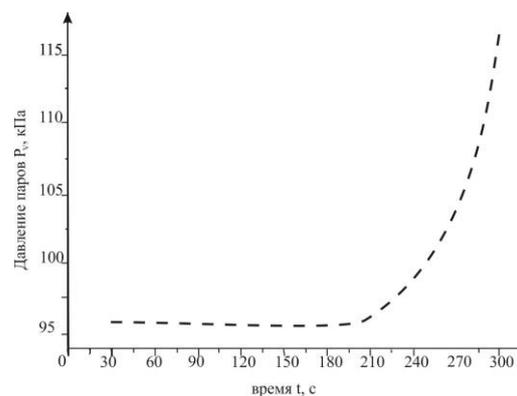


Рис. 3. Изменение давления паров газа во времени.

Разработанная математическая модель и методика расчета могут быть использованы при анализе условий хранения емкостей со сжиженными газами [5].

#### Литература:

1. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. - М.: 2009. - 639с.
2. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle-liquid fuel interface on the ignition characteristics// Journal of Engineering Thermophysics. 2009. Т. 18. № 2. С. 162-167.
3. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. 3D problem of heat and mass transfer at the ignition of a combustible liquid by a heated metal particle// Journal of Engineering Thermophysics. 2009. Т. 18. № 1. С. 72-79.
4. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle// International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Т. 53. № 5-6. С. 923-930.
5. Ренизов В.В., Парфенов В.А. Подземное хранение газа: состояние, проблемы и их решения// Газовая промышленность. 1997. № 2. С.17-19.