

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Тастандиева Ж.М.

Томский политехнический университет, г.Томск.

E-mail: [Anain@sibmail.ru](mailto:Anain@sibmail.ru)

Производство сжиженного природного газа (СПГ) ежегодно существенно (в 1,5 – 2 раза) увеличивается во многих государствах, ведущих разработку газовых месторождений. По мнению многих экспертов СПГ является, скорее всего, идеальным энергоносителем для большинства территорий планеты [1]. Но разработка технологий хранения (как в больших объемах, так и в малых по размерам емкостях), проводится в настоящее время, в основном, путем экспериментальной отработки [1]. Не разработаны математические модели, описывающие процессы тепломассопереноса в емкостях хранения СПГ в условиях его «захолаживания» с целью снижения «потерь основного продукта от испарения» [1] при длительном хранении. Во многом это обусловлено особенностями процессов фазовых превращений. При конденсации СПГ происходит интенсивное выделение теплоты в очень малой по размерам области вблизи границы раздела «жидкость-газ». Возникновение высоких градиентов температур в этой области существенно усложняет процесс численного анализа процесса теплопереноса в условиях интенсивных фазовых превращений.

Цель настоящей работы – решение задачи тепломассопереноса в условиях конденсации находящегося при низких температурах природного газа.

При постановке задачи принят ряд допущений, не накладывающих серьезных ограничений на общность модели, но позволяющих существенно упростить алгоритм и метод решения. Так предполагалось, что СПГ является однокомпонентной средой, и в качестве основной компоненты выбран метан. Термодинамические характеристики этого газа хорошо изучены, и он является хорошей моделью для анализа рассматриваемых процессов. Во многих реальных газах различных месторождений метан доминирует, поэтому принятое допущение достаточно обосновано. При решении задачи использована цилиндрическая система координат с неподвижной (во времени) границей раздела фаз. В реальной практике свободный объем емкостей для хранения СПГ мал (менее 10%). Поэтому при контроле за нерегламентным испарением сжиженного природного газа убыль массы последнего не может быть значительной из-за опасности подъема давления в хранилище выше предель-

но допустимого. Поэтому системы «захолаживания» должны начинать работу при достижении этого уровня давления. Соответственно, смещение границы раздела фаз не может быть значительным. Кроме выше приведенных допущений предполагалось, что теплофизические характеристики газа и в жидком и в газообразном состоянии не зависят от температуры. Последнее допущение также хорошо обосновано потому, что в хранилищах СПГ не может быть больших градиентов температуры. При слишком высоких возникает опасность роста давления выше предельно допустимого, при слишком резких подъемах затрачивается много энергии на «захолаживание».

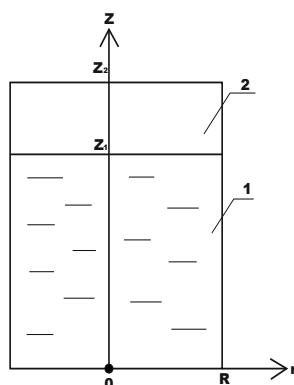


Рис. 1. Область решения задачи: 1- сжиженный газ; 2 – пары СПГ.

В рамках такой физической модели задача теплопереноса в системе «жидкость-газ» сводится к решению системы двух дифференциальных уравнений теплопроводности для двухслойного полого цилиндра, заполненного природным газом (рис.1.). Предполагалось, что боковая и нижняя торцевая поверхности цилиндра теплоизолированы, а по верхней границе осуществляется «захолаживание». На границе раздела фаз СПГ необходимо использовать граничные условия четвертого рода (равенство тепловых потоков и температур). Скорость испарения рассчитывалась по формуле Герца-Кнудсена-Ленгмюра, полученной для испарения в вакуум. Но ее достаточно часто применяют при решении различных задач тепломассопереноса и в условиях интенсивного испарения различных жидкостей (например [2]) в среде с давлением даже выше атмосферного.

Система дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими краевыми условиями, записанная в цилиндрической неподвижной системе координат с началом на оси симметрии, 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.

$$\begin{aligned} T_1 &= T_0, \quad T_2 = T_0 \quad t = 0; \\ \frac{\partial T_1}{\partial r} &= 0 \quad r = 0, \quad 0 < Z < Z_1; \\ T_1 &= T_k \quad r = R, \quad 0 < Z < Z_1; \\ \frac{\partial T_1}{\partial Z} &= 0 \quad Z = 0, \quad 0 < r < R; \\ \frac{\partial T_2}{\partial r} &= 0 \quad r = 0, \quad Z_1 < Z < Z_2; \\ T_2 &= T_k \quad r = R, \quad Z_1 < Z < Z_2; \\ T_2 &= T_H \quad Z = Z_2, \quad 0 < r < R; \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial Z} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial Z} + Q \cdot W \left. \vphantom{\frac{\partial T_1}{\partial Z}} \right\} Z = Z_1, \quad 0 < r < R. \\ W &= \frac{\beta}{1 - k \cdot \beta} \frac{(P^H - P)}{\sqrt{2\pi RT/M}}; \quad P = \frac{\rho R_2 T}{M}. \end{aligned}$$

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

Краевая задача (1) – (7) решена методом конечных разностей с использованием итерационного алгоритма [3], разработанного при решении нелинейных задач тепломассопереноса при интенсивном испарении жидкости в условиях локального нагрева. Контроль над достоверностью результатов численного моделирования осуществлялся проверкой консервативности, использовавшейся разностной схемы аналогично [4]. Для выполнения условия консервативности применялись шаги разностной сетки по времени от  $10^{-2}$  с. до  $10^{-6}$  с.

При конденсации паров на поверхности раздела «жидкость – пар» возникает большой градиент температур в тонких приповерхностных слоях жидкой и паровой фаз природного газа, поэтому в соответствии с аналогом [3] использовалась неравномерная и нерегулярная разностная сетка.

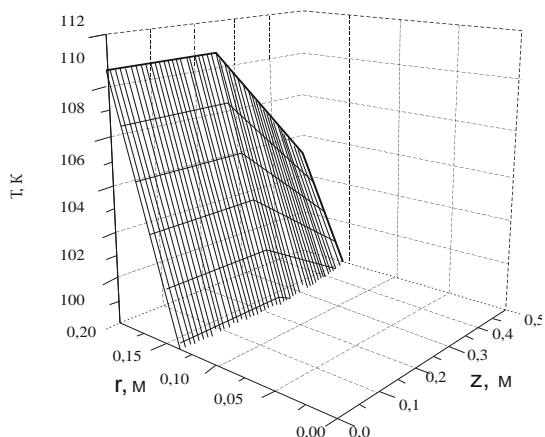


Рис.2. Распределение температуры  $T(r,z)$  в момент времени  $t = 100\text{с}$

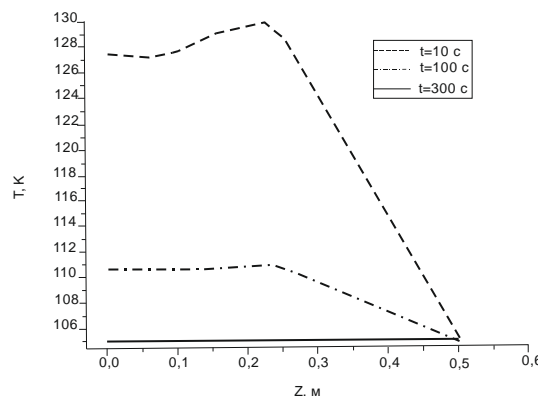


Рис.3. Распределение температуры по  $z$  при  $r = 0,14\text{м}$  ( $t = 100\text{с}$ )

На рис. 2-3 приведены типичные результаты численного исследования рассматриваемого процесса. Распределения температур (рис. 1-2) иллюстрируют достаточно большие их перепады по координате  $z$  в начальный период времени (до 30К). В дальнейшем с ростом  $t$  температурное поле становится по мере захлаживания все более однородным. Через 300 секунд (рис.2.) температура по высоте емкости выравнивается. На основании выполненных теоретических исследований можно сделать вывод о возможности достаточно быстрой (в течение нескольких минут) ликвидации условий для испарения основного продукта за счет охлаждения СПГ только на одной границе области.

На рис.4. приведена зависимость массовой скорости конденсации паров СПГ от температуры для двух характерных моментов времени. Хорошо видно, что понижение  $T$  на 20К приводит к изменению скорости фазовых превращений более чем в десять раз. Такой характер зависимости  $W(T)$  позволяет сделать вывод о возможности регулирования процесса «захлаживания» СПГ в условиях его частичного испарения с относительно малыми затратами энергии и в небольшие интервалы времени.

Можно отметить, что как показывают результаты проведенных численных исследований, возможна локализация источника охлаждения на одной из поверхностей емкости для хранения СПГ с использованием технологий [5,6]. В этом случае сформулированная выше постановка задачи может быть существенно дополнена и расширена за счет учета процессов свободной конвекции паров. Так, например, при размещении источника «захлаживания» на верхней горизонтальной (или боковой

вертикальной) стенке емкости может быть по аналогии с [7,8] сформулирована сопряженная задача теплопереноса в полости, ограниченной металлическими стенками и сжиженным природным газом. В этом случае свободная конвекция будет существенно интенсифицировать процесс охлаждения паров. Соответственно, затраты энергии на «захолаживание» в условиях интенсификации теплопереноса (за счет конвекции) могут быть существенно уменьшены. Также возможно снижение периодов времени на проведение этой технологической операции.

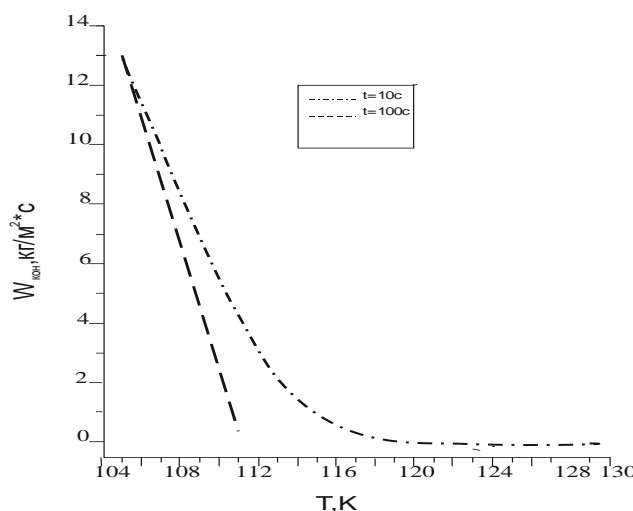


Рис.3. Зависимость скорости конденсации от температуры для двух характерных моментов времени

В заключении можно отметить, что результаты выполненных исследований создают определенные предпосылки для оптимизации технологических операций, соответствующих хранению сжиженного природного газа.

#### Список литературы:

1. Брагинский О.Б. Нефтегазовый комплекс мира. – М.: Нефть и газ, 2006. – 246 с.
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. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. – М.: 2009. – 639с.
6. Ремизов В.В., Парфенов В.А. Подземное хранение газа: состояние, проблемы и их решения// Газовая промышленность. 1997. № 2. С.17-19.

7. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Mathematical modeling of complex heat transfer in a rectangular enclosure // Thermophysics and Aeromechanics. – 2009. – V. 16. – № 1. – P. 119–128.
8. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. New approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment // Russian Microelectronics. – 2008. – V.37. – № 2. – P.131–138.

*УДК 504.06:621.181:622.612*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОТЛОВ С ВВОДОМ ВТОРИЧНОГО ТОПЛИВА**

Тринченко А. А., к.т.н, Кадыров М.Р.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

E-mail: [kadyrov-marsel@mail.ru](mailto:kadyrov-marsel@mail.ru)

Основной задачей “Экологической программы” в области теплоэнергетики является определение путей и условий, при которых надежное энергообеспечение существующих и планируемых нагрузок потребителей не приведет к увеличению техногенного влияния на окружающую среду. Одной из основных проблем, препятствующих широкому применению угля в российской энергетике, в настоящее время является обеспечение допустимых концентраций вредных веществ в выбрасываемых газах, т.к. по содержанию вредных компонентов отечественные угли в среднем в 2 раза хуже, чем используемые в США и странах Западной Европы. Поэтому повышение использования угля в России связано с применением современных, экологически безопасных технологий сжигания.

В целях снижения вредных выбросов электростанций в атмосферу в “Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2020 года” [1] предусмотрено, что на вновь вводимом энергетическом оборудовании объемы мероприятий по охране окружающей среды должны обеспечивать ограничение в соответствии с нормативами удельных выбросов оксидов серы, оксидов азота и твердых частиц (летучей золы). На существующих тепловых электростанциях предусматривается проведение мероприятий по внедрению технологических методов подавления оксидов азота в процессе сжигания топлива. Таким образом, развитие российской энергетики на основе современных технологий сжигания, повышение доли твердого топлива в энергетическом балансе страны с одновременным снижением экологической нагрузки при его использовании является весьма важной и актуальной задачей.