

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ХРАНЕНИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ЗАМКНУТОМ ОБЪЁМЕ

*А.В. Грузин, В.В. Шалай, д.т.н., профессор,  
В.И. Крупников, инженер III категории,*

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

*В.В. Грузин, д.т.н., профессор, действительный член АН РК  
АО Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина*

**Резюме.** В закрытых резервуарах при нарушении теплового режима хранения сжиженного природного газа при интенсивном перемешивании слоёв продукта и его парообразовании возникает явление «ролловера». Для изучения особенностей этого явления и обеспечения безопасности инженерных объектов разработана математическая модель тепло- и массопереноса между слоями хранящегося сжиженного природного газа.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, хранение, резервуар, оборудование, стратификация, ролловер, процессы тепло- и массопереноса, температура, давление, плотность

### Введение

Современный опыт эксплуатации инженерных сооружений, предназначенных для хранения сжиженного природного газа (СПГ), предъявляет особые требования к существующим технико-технологическим комплексам хранения (ТТКХ), включающим в себя, как стационарные резервуары, установленные на специально подготовленные основания, так и оборудование, предназначенное для их заполнения и отгрузки, а так же оборудование, обеспечивающее безопасность хранения СПГ. Следует отметить, что одной из основных технологических проблем при эксплуатации таких хранилищ является возникновение в них явления стратификации жидкости,

которое может привести к повреждению резервуарного парка, стоимость которого составляет около 50 % стоимости всего ТТКХ [1, 2]. Данная ситуация объясняется тем, что процесс хранения СПГ в резервуаре характеризуется следующими особенностями (см. рисунок 1):

- наличием в хранилище продукта, находящегося в жидкой и газообразной фазах;

- зависимостью соотношения масс продукта в газообразной и жидкой фазах от температур  $T_A$  и  $T_L$ , соответственно газообразной и жидкой фаз, и давления  $p_A$  газообразной фазы;

- неизменностью общей массы хранимого продукта в виде компонентов из газообразной и жидкой фаз, не вступающих друг с другом в химическую реакцию;
- многокомпонентным характером СПГ с различными физико-химическими характеристиками (см. таблицу 1).

Таблица 1 Многокомпонентный состав сжиженного природного газа.

Газ	Формула	Молярная масса, г/моль	$T_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$	Объёмные доли в СПГ
Метан	$\text{CH}_4$	16,04	-161,58	0,92
Этан	$\text{C}_2\text{H}_6$	30,07	-88,6	0,04
Пропан	$\text{C}_3\text{H}_8$	44,1	-42,09	0,025
Азот	$\text{N}_2$	14,01	-195,8	0,015

Эксплуатация инженерных объектов нефтегазовой отрасли предъявляет особые требования соблюдения тепловых режимов при хранении сжиженного природного газа (СПГ) в резервуарах. Так, на безопасную эксплуатацию стационарных резервуаров при хранении СПГ оказывают существенное влияние [1, 2]:

- 1) состав и температурная стабилизация продукта в процессе его налива, хранения и опорожнения;
- 2) технико-технологические характеристики и конструктивные особенности хранилищ;
- 3) соблюдение особых требований в случае длительного хранения продукта, а так же при наливе в резервуар новой партии, физические параметры которой отличаются от уже имеющегося в хранилище СПГ.

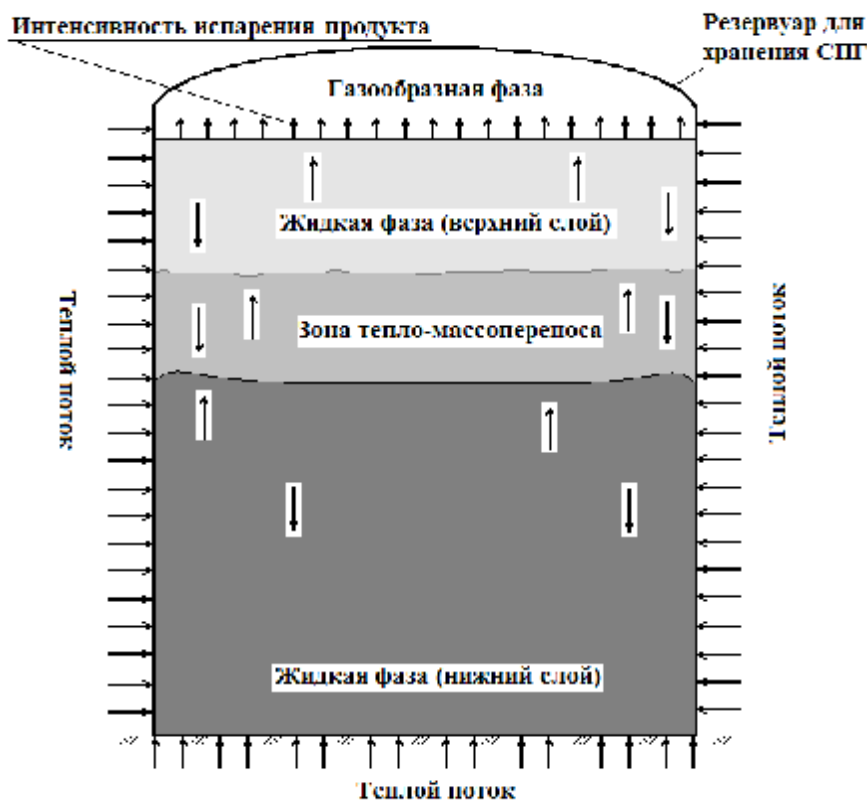


Рисунок 1 Закрытая неизолированная система «резервуар – жидкая фаза природного газа – газообразная фаза природного газа»

В процессе загрузки в резервуар новой партии СПГ, имеющей, как правило, большую плотность, образуется нижний слой, а из хранящегося продукта с меньшей плотностью, формируется верхний слой.

При этом данные слои СПГ не перемешиваются, то есть возникает явление стратификации. Такое состояние СПГ в неизолированном закрытом резервуаре представим в виде следующей сложной технической системы «резервуар – жидкая фаза (нижний слой) – жидкая фаза (верхний слой) – газообразная фаза» (см. рисунок 1).

В результате передачи тепла из внешней среды через стенки и днище резервуара происходит неравномерный нагрев двух жидких и газообразной фаз хранящегося в нем продукта. При этом в результате тепло- и массопереноса перемешивание слоев сопровождается интенсивным испарением продукта со значительным повышением давления в резервуаре, что может привести к его повреждению. Данное явление получило название «ролловера»

:

$$\begin{cases} \dot{M}_{A,1} + \dot{M}_{L,1} = 0 \\ \dot{M}_{A,2} + \dot{M}_{L,2} = 0 \\ \dots \\ \dot{M}_{A,i} + \dot{M}_{L,i} = 0 \\ \dots \\ \dot{M}_{A,N} + \dot{M}_{L,N} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $M_{A,i}$  – масса газообразной фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта;

$M_{L,i}$  – масса жидкой фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта;

и до настоящего времени изучено недостаточно. Учитывая изложенное следует отметить, что при различных входных параметрах моделирования сложной технической системы «резервуар – жидкая фаза (нижний слой) – жидкая фаза (верхний слой) – газообразная фаза» можно прогнозировать время наступления «ролловера» и возможное парообразование, чтобы предотвратить повреждение хранилища, а так же определить технологические и конструктивные пути решения данной проблемы [3]. Для моделирования указанных процессов создадим систему уравнений, включающую в себя уравнения неразрывности, баланса сил и сохранения энергии с учетом временного фактора хранения СПГ [4, 5, 6].

#### Учет фактора неразрывности хранившегося продукта

Систему уравнений неразрывности (сохранения массы) для продукта, состоящего из  $N$  компонентов, не вступающих друг с другом в химическую реакцию, предлагается записать в виде

$i$  – номер компоненты, изменяющийся от 1 до  $N$ ;  
 $N$  – количество компонент, входящих в СПГ;  
 $t$  – время.

Причём масса  $M$  всего хранимого продукта будет равна

$$M = \sum_{i=1}^N M_{A,i}(t) + \sum_{i=1}^N M_{L,i}(t). \quad (2)$$

Массу  $M_{ph,i}$  фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта можно вычислить как

$$M_{ph,i}(t) = \int_{(V_{ph})} \rho_{ph,i}(t) dV_{ph} = \int_{(V_{ph})} \rho_{ph,i}(t) dV_{ph,i} dV_{ph}, \quad (3)$$

где  $m_{ph,i}$  – местная масса фазы  $i$ -ой компоненты;

$\rho_{ph,i}$  – местная плотность фазы  $i$ -ой компоненты;

$V_{ph}$  – объём, занимаемый фазой хранимого продукта.

$dV_{ph,i}$  – элементарный объём, занимаемый фазой  $i$ -ой компоненты хранимого продукта и определяемый по формуле:

$$dV_{ph,i} = C_{ph,i} dV_{ph}, \quad (4)$$

где  $C_{ph,i}$  – объёмная концентрация фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта;

$dV_{ph}$  – элементарный объём, занимаемый фазой хранимого продукта.

Для описания изменения концентрации  $C$  компоненты хранимого продукта (диффузионных процессов) предлагается использовать второй закон Фика для неоднородной среды и коэффициента диффузии  $D = f(x, y, z)$ , являющегося функцией координаты:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \text{div}(D \times \text{grad} C) \quad (5)$$

Причём

$$\sum_{i=1}^N C_{ph,i} = 1 \quad (6)$$

и

$$V_{ph} = \sum_{i=1}^N dV_{ph,i}. \quad (7)$$

Изменение местной плотности  $\rho_{A,i}$  газообразной фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта в заданном объёме с течением времени будет определяться уравнением:

$$\frac{\partial \rho_{A,i}}{\partial t} = \frac{\partial \rho_{A,i}(p_A, T_A)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{A,i}(u_A)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{A,i}(L \hat{U}_A)}{\partial t}, \quad (8)$$

$$\frac{\rho_{A,i}(p_A, T_A)}{\rho_{A,i}(u_A)}$$

где  $\rho_{A,i}(p_A, T_A)$  – изменение местной плотности  $\rho_{A,i}$  газообразной фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта в заданном объёме с течением времени за счёт изменения её температуры  $T$  и давления  $P$ ;

$$\frac{\rho_{A,i}(u_A)}{\rho_{A,i}(L \dot{U} A)}$$

– изменение местной плотности  $\rho_{A,i}$  газообразной фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта в заданном объёме с течением времени за счёт механического переноса вещества;

$$\frac{\rho_{A,i}(L \dot{U} A)}{\rho_{A,i}}$$

– изменение местной плотности  $\rho_{A,i}$  газообразной фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта в заданном объёме с течением времени за счёт фазового перехода «жидкость-газ»;

Для описания поведения реального газа предлагается использовать уравнение:

$$p_A = Z(\bar{p}, \bar{T}) \rho_A R T_A, \quad (9)$$

где  $p_A$  – давление газа;

$\rho_A$  – плотность газа;

$R$  – газовая постоянная реального газа;

$T_A$  – температура газа;

$Z(\bar{p}, \bar{T})$  – фактор сжимаемости.

В свою очередь, газовая постоянная реального газа  $R$  равна:

$$R = \frac{R_0}{m}, \quad (10)$$

где  $R_0$  – универсальная газовая постоянная;

$m$  – молярная масса газа.

Фактор сжимаемости предлагается рассчитывать по аппроксимационной формуле [6]:

$$Z(\bar{p}, \bar{T}) = 1 - 0.4273 \times \bar{p} \times \bar{T}^{-3.668}, \quad (11)$$

где  $\bar{p}$  – приведённое давление;

$\bar{T}$  – приведённая температура.

Приведённое давление  $\bar{p}$  рассчитывается по формуле:

$$\bar{p} = \frac{p}{p_{кр}}, \quad (12)$$

где  $p_{кр}$  – критическое давление.

Приведённая температура  $\bar{T}$  рассчитывается по формуле:

$$\bar{T} = \frac{T}{T_{кр}}, \quad (13)$$

где  $T_{кр}$  – критическая температура.

Молярная масса  $m$  и критические параметры газовой смеси  $p_{кр}$  и  $T_{кр}$  вычисляются по следующим аддитивным формулам:

$$\left\{ \begin{aligned} m &= \sum_{i=1}^N C_{A,i} \times \eta_i \\ p_{кр} &= \sum_{i=1}^N C_{A,i} \times p_{кр,i} \\ T_{кр} &= \sum_{i=1}^N C_{A,i} \times T_{кр,i} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

где  $C_{A,i}$  – объемные концентрации компонентов, составляющих газовую смесь.

Зависимость плотности реального газа  $\rho_A$  от его температуры  $T_A$  и давления  $P_A$  будет иметь вид:

$$\rho_A = \frac{P_A}{Z(\bar{p}, T) R T_A} \quad (15)$$

Для описания влияния механического переноса вещества на его плотность  $\rho$  предлагается использовать зависимость:

$$-\frac{\nabla \rho}{\rho} = \rho \times \text{div}(\vec{u}) + \vec{u} \times \text{grad}(\rho), \quad (16)$$

где  $\vec{u}$  – вектор скорости движения вещества.

Для описания фазового перехода вещества предлагается использовать уравнение Клайперона-Клаузиуса [7]:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{l(T)}{T(v_{ph2} - v_{ph1})}, \quad (17)$$

где  $v_{ph1}$  и  $v_{ph2}$  – удельные объёмы соответственно исходной и получающейся фаз;

$l(T)$  – удельная теплота фазового перехода;

$T$  – температура вещества;

$P$  – давление.

В свою очередь, удельный объём фазы  $v_{ph}$  рассчитывается по формуле:

$$v_{ph} = \frac{1}{\rho_{ph}}, \quad (18)$$

где  $\rho_{ph}$  – плотность фазы.

Преобразуем уравнение (17) с учётом (18) относительно плотности  $\rho_{ph2}$  получающейся фазы, имеем

$$\rho_{ph2} = \frac{\rho_{ph1} T dp}{T dp + \rho_{ph1} l(T) dT}. \quad (19)$$

Таким образом, с учётом уравнений (15), (16) и (19) уравнение (8) будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial \rho_{A,i}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_{A,i}}{\rho} Z(\bar{p}, \bar{T}) R_i T_A \right) + \left( \mathbf{r}_{A,i} \times \text{div}(\mathbf{u}_A) + \mathbf{u}_A \times \text{grad}(\rho_{A,i}) \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_{L,i} T_A dp_A}{\rho T_A dp_A + \rho_{L,i} |i(T_A) dT_A} \right) \quad (20)$$

Изменение местной плотности  $\rho_{L,i}$  жидкой фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта в заданном объёме с течением времени будет определяться уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial \rho_{L,i}}{\partial t} = \frac{\partial \rho_{L,i}(u_L)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{L,i}(A \hat{U} L)}{\partial t}, \quad (21)$$

где  $\frac{\partial \rho_{L,i}(u_L)}{\partial t}$  – изменение местной плотности  $\rho_{L,i}$  жидкой фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта в заданном объёме с течением времени за счёт механического переноса вещества;

$\frac{\partial \rho_{L,i}(A \hat{U} L)}{\partial t}$  – изменение местной плотности  $\rho_{L,i}$  жидкой фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта в заданном объёме с течением времени за счёт фазового перехода «газ-жидкость»;

С учётом уравнений (16) и (19) уравнение (21), отражающее зависимость изменения местной плотности  $\rho_{L,i}$  жидкой фазы  $i$ -ой компоненты хранимого продукта в заданном объёме с течением времени будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial \rho_{L,i}}{\partial t} = - \left( \mathbf{r}_{L,i} \times \text{div}(\mathbf{u}_L) + \mathbf{u}_L \times \text{grad}(\rho_{L,i}) \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_{L,i} T_L dp_L}{\rho T_L dp_L + \rho_{L,i} |i(T_L) dT_L} \right) \quad (22)$$

Распределение давления  $\rho_{L,x}$  жидкой фазы (см. рисунок 1) по глубине  $x$  хранимого продукта с учётом расположения начала отсчёта системы координат на поверхности раздела фаз определяется зависимостью:

$$p_{L,x} = p_{A,0} + \int_0^x \rho_L(x) g dx \quad (23)$$

### Учет баланса сил для жидких фаз вещества в системе

Для формирования представлений о движении слоев жидких фаз хранимого топлива используем уравнение Навье – Стокса для описания вязкой ньютоновской жидкости. В векторном виде для несжимаемой жидкости оно имеет вид [8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} &= - (\mathbf{u} \times \tilde{\mathbf{N}}) \mathbf{u} + n \mathbf{D} \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \tilde{\mathbf{N}} p + \mathbf{f} \\ \tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{u} &= 0 \end{aligned}, \quad (24)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор скорости движения вещества;

$\vec{f}$  – вектор массовых сил;

$n$  – коэффициент кинематической вязкости.

Таким образом, уравнение баланса сил вдоль оси OX для жидкой фазы хранящегося продукта можно записать в виде:

$$\rho_L \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \rho_L g - \frac{\partial p_L}{\partial x} + h_L \frac{\partial^2 u_{L,x}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{L,x}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_{L,x}}{\partial z^2} \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \quad (25)$$

где  $\rho_L$  – местная плотность жидкой фазы продукта;

$g$  – ускорение свободного падения;

$p_L$  – местное статическое давление жидкой фазы продукта;

$h_L$  – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы;

$u_{L,x}$  – проекция вектора скорости жидкой фазы на ось OX.

Уравнение баланса сил вдоль оси OY для жидкой фазы хранящегося продукта имеет следующий вид:

$$\rho_L \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \frac{\partial p_L}{\partial y} + h_L \frac{\partial^2 u_{L,y}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{L,y}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_{L,y}}{\partial z^2} \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \quad (26)$$

Уравнение баланса сил вдоль оси OZ для жидкой фазы хранящегося продукта имеет следующий вид:

$$\rho_L \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = - \frac{\partial p_L}{\partial z} + h_L \frac{\partial^2 u_{L,z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{L,z}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_{L,z}}{\partial z^2} \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \quad (27)$$

Местная плотность фазы продукта  $\rho^{ph}$  равна:

$$\rho^{ph} = \sum_{i=1}^N \rho^{ph,i} \quad (28)$$

Применительно сжимаемой среде в виде газообразной фазы хранимого продукта (см. рисунок 1) уравнение Навье – Стокса будет иметь следующий вид (проекция на ось OX):

$$\rho_A \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \rho_A g - \frac{\partial p_A}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2h_A \frac{\partial u_{A,x}}{\partial x} - \frac{2}{3} h_A \tilde{N} \times u_{A,x} \right) \frac{\partial \rho}{\partial \rho} + \frac{\partial}{\partial y} \left( h_A \frac{\partial u_{A,x}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h_A \frac{\partial u_{A,y}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h_A \frac{\partial u_{A,x}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h_A \frac{\partial u_{A,z}}{\partial x} \right) \quad (29)$$

где  $\rho_A$  – местная плотность газообразной фазы продукта;

$g$  – ускорение свободного падения;

$p_A$  – местное давление газообразной фазы продукта;

$h_A$  – коэффициент динамической вязкости газообразной фазы;

$u_{A,x}$ ,  $u_{A,y}$ ,  $u_{A,z}$  – соответственно, проекция вектора скорости газообразной фазы на ось OX, OY и OZ.

Уравнение баланса сил вдоль оси OY для газообразной фазы имеет следующий вид:



$$r_A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \frac{\partial p_A}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,y}}{\partial t} \right) - \frac{2}{3} h_A \tilde{N} \times \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u_{A,y}}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,y}}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,y}}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,y}}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,y}}{\partial y} \right) \right) \quad (30)$$

Уравнение баланса сил вдоль оси OZ для газообразной фазы имеет следующий вид:

$$r_A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = - \frac{\partial p_A}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,z}}{\partial t} \right) - \frac{2}{3} h_A \tilde{N} \times \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u_{A,z}}{\partial z} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,z}}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,z}}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,z}}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho_A}{\rho} \frac{\partial u_{A,z}}{\partial z} \right) \right) \quad (31)$$

### Учет сохранения энергии в системе

В связи с тем, что исследуемая среда находится около точки фазового перехода и её теплоёмкость может существенным образом изменяться, уравнение сохранения энергии необходимо разрешать через энтальпии фаз хранимого СПГ. По характеру взаимодействия с окружающей средой резервуар в процессе хранения СПГ в общем случае представляет собой закрытую неизолированную систему, обменивающуюся с внешней средой только энергией. В соответствии с первым законом термодинамики энергия  $dQ$ , поступающая из внешней среды в закрытую систему, состоящую из двух фаз, тратится на изменение энтальпии  $dH_L$  жидкой фазы и энтальпии  $dH_A$  газообразной фазы:

$$dQ = dH_L + dH_A \quad (32)$$

Для случая стратификации хранимого СПГ на два горизонтальных слоя изменение энтальпии  $dH_L$  жидкой фазы предлагается записать в виде [5, 9]:

$$dH_L = \frac{\left[ \tilde{N}^2 T + \operatorname{div} \left( \frac{\partial}{\partial t} (H_{L1} - H_{L2}) \right) r D \tilde{N} m + k_T \frac{\tilde{N} T}{T} + k_p \frac{\tilde{N} p}{p} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]}{r} dt, \quad (33)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$T$  – температура;

$p$  – давление;

$H_{L1}$ ,  $H_{L2}$  – энтальпия соответственно нижнего и верхнего горизонтально-го слоя СПГ;

$r$  – средняя плотность хранимого СПГ;

$D$  – коэффициент взаимодиффузии;

$m$  – масса хранимого СПГ;

$k_T$  – термодиффузионное отношение;

$k_p$  – бародиффузионное отношение.

Изменение энтальпии  $dH_A$  газообразной фазы предлагается записать в виде [9]:

$$dH_A = C_p(T) dT + V_A dp_A, \quad (34)$$

где  $C_p(T)$  – теплоёмкость газообразной фазы при постоянном давлении.

Система уравнений математической модели тепло- массопереноса, учитывающая фактор неразрывности хранящегося продукта, баланс сил для жидких фаз вещества и сохранения энергии в закрытой неизолированной системе «сжиженный природный газ (СПГ) - природный газ», позволила осуществить предварительную оценку степени влияния термического сопротивления изоляции хранилища, его формы и геометрических размеров, а так же физических характеристик хранимого продукта на время наступления явления ролловера.

Кроме этого, предлагаемая математическая модель в результате

изменения входных параметров позволит количественно оценить пространственное распределение температуры, как непосредственно в конструкции резервуара, так и в окружающем грунтовом пространстве его основания. Предварительные данные, полученные в ходе решения тестовой задачи, подтвердили корректность предлагаемого подхода в описании процессов тепло-массопереноса при хранении сжиженного природного газа в замкнутом объёме.

На рисунке 2 представлены результаты численного моделирования влияния постоянного теплопритока через боковую поверхность и днище

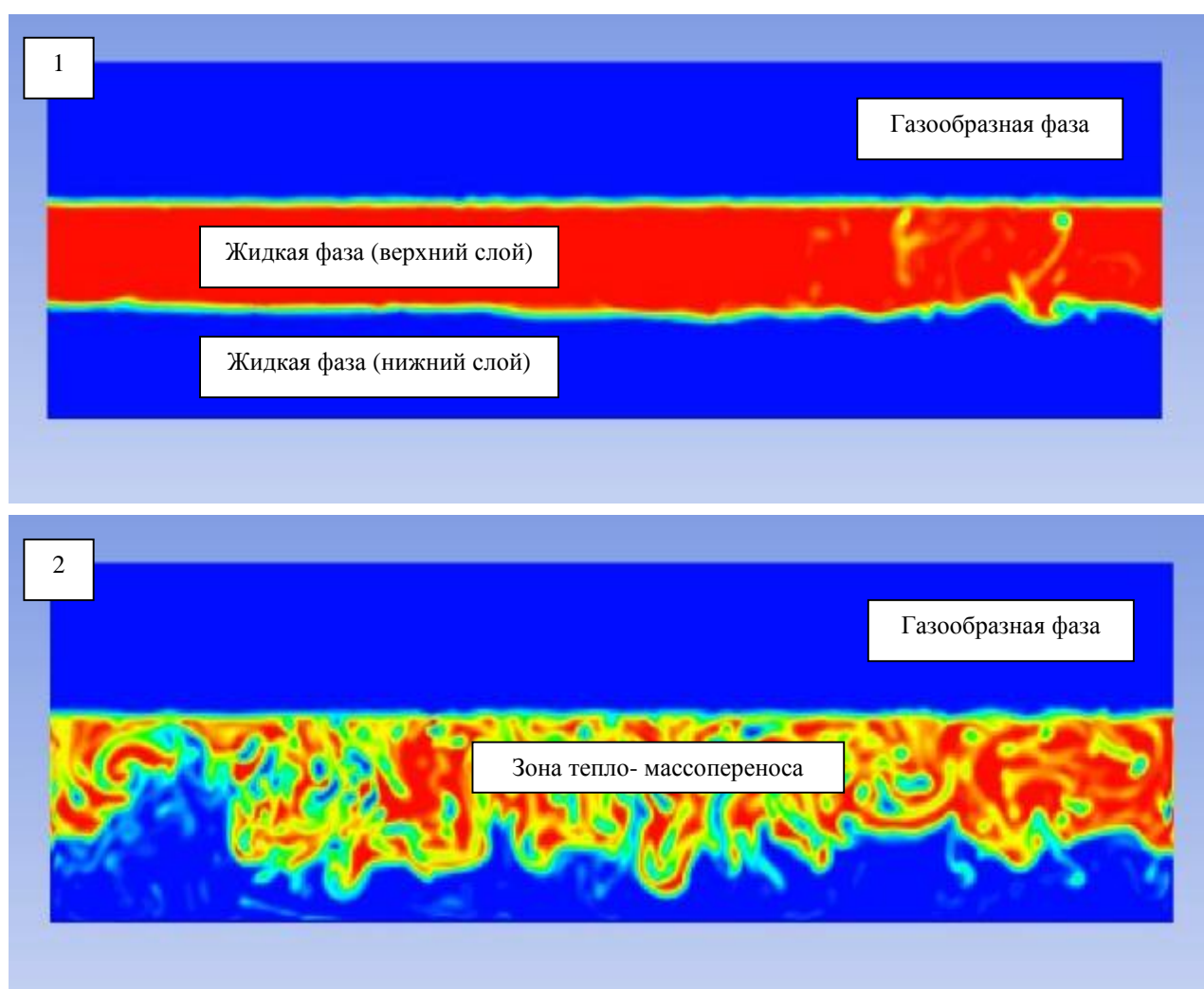


Рисунок 2 Имитационная модель тепло- массопереноса в стратифицированной жидкой фазе: 1 - начальная фаза процесса; 2 - развитие процесса тепло-массопереноса с течением времени

резервуара на процессы тепломассопереноса в закрытой неизолированной системе «сжиженный природный газ (СПГ) - природный газ», содержащей стратифицированную жидкую фазу.

### **Заключение**

Целью представленной математической модели закрытой неизолированной системы «сжиженный природный газ (СПГ) - природный газ», описывающей тепло- и массоперенос при хранении сжиженного природного газа, является оценка технико-технологических параметров и характеристик процесса хранения продукта и эксплуатации инженерных сооружений нефтегазовой отрасли. Для оценки степени влияния термического сопротивления изоляции хранилища, его формы и геометрических размеров, а так же физических характеристик хранимого продукта на момент времени воз-

никновения явления ролловера установлена зависимость распределения давления  $p_{L,x}$  жидкой фазы по глубине хранящегося продукта. Ожидается, что рациональный выбор технологических мероприятий и конструктивных параметров изотермических резервуаров на основе данных численного моделирования позволит исключить как риск возникновения явления «ролловера» в хранилищах СПГ, так и вероятность возникновения и развития критических напряжений в их конструкциях и потерю устойчивости грунтового основания.

### **Список литературы**

1. A.V. Gruzin, V.V. Tokarev, V.V. Shalai, Yu.V. Logunova, The Artificial Additives Effect to Soil Deformation Characteristics of Oil and Oil Products Storage Tanks Foundation, *Procedia Engineering*, 113 (2015). P. 158-168.
2. Васильев, Г.Г. Особенности обеспечения безопасной эксплуатации крупногабаритных изотермических резервуаров для хранения сжиженного природного газа / Г.Г. Васильев, С.Г. Иванцова, А.И. Рахманин // Газовая промышленность. – Выпуск: 11. – Москва: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. С. 57-61.
3. Baker N, Creed M. Stratification and rollover in liquefied natural gas storage tanks. *Trans IChemE*, 74, 1996. P. 25–30.
4. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х книгах. Пер. с англ. – Москва: Мир, 1991. – 678 с.
5. Королев Н.С. К построению математической модели явления ролловер в хранилище СПГ // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/345773.html> (дата обращения 23.12.2016).
6. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта углеводородов// – М.: ГУП "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 210 с.

7. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 т. Том II. Термодинамика и молекулярная физика – Издание 5-е, исправленное и дополненное. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 544 с.

8. Победря Б.Е., Георгиевский Д.В. Основы механики сплошной среды. Курс лекций. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 272 с.

9. Пригожин И., Конденуди Д. Современная термодинамика. М.: Мир, 2002, 462 с.

### **Резюме**

Резервуарларда сұйытылған табиғи газдарды қауіпсіз сақтау үшін «ролловер» құбылысын зерттеу қажет. Бұл құбылыс өнім қабаттарының араласуы мен булану үрдісінде пайда болады. Мақалада сұйытылған табиғи газ жылу қабаттары және массаларының араласуының математикалық моделі құрылған.

### **Summary**

We need to study the phenomenon of «rollover» for secure storage in the tanks of liquefied natural gas. This phenomenon occurs during the mixing and vaporization of the product layers. To study this phenomenon in an article the mathematical model of heat and mass transfer between the layers of liquefied natural gas.