

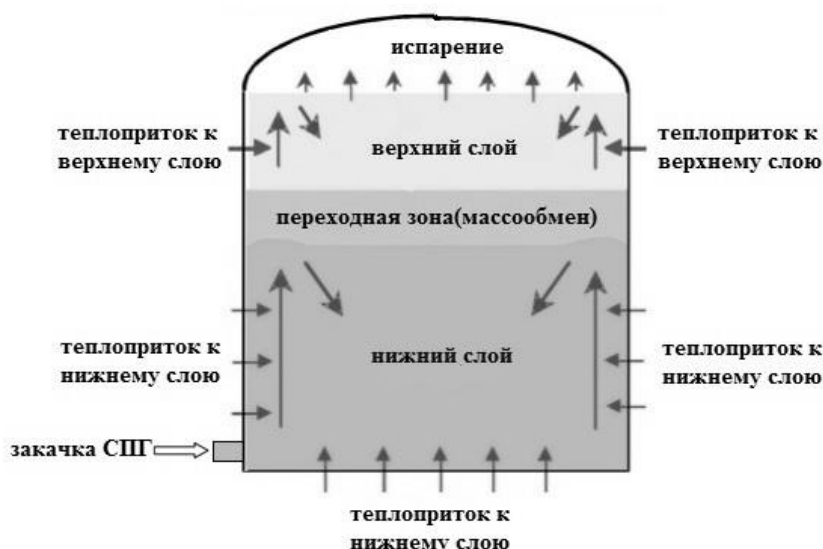


Рис. 1 Перемешивание слоев при закачке продукта в резервуар с процессами тепло- и массообмена

Меры по предотвращению ролловера:

- Партии СПГ с различной плотностью, хранить отдельно
- Загрузка резервуара со специальным оборудованием, такими как насадки способствующие смешиванию СПГ при загрузке (используется для береговых резервуаров).
- Следует избегать продолжительных остановок подачи СПГ при загрузке резервуара.
- Постоянно контролировать уровень испарения СПГ

Как было отмечено выше, причина явления переворачивания слоев - недостаточное смешивание поступающей в резервуар партии продукта с уже находящейся в нем жидкостью. Однако стратификация с дальнейшим вскипанием может также произойти при выдерживании СПГ в течение длительного времени в резервуаре без рециркуляции или при содержании азота в составе СПГ более 1 % (такая пороговая концентрация установлена по данным международных исследований явления rollover). Для предотвращения стратификации резервуар оснащается системой рециркуляции с использованием насосов, а налив продукта должен быть организован предпочтительно таким образом, чтобы более тяжелый продукт образовывал верхний слой и смешение фаз, происходило за счет естественной гравитации. Поэтому конструкция резервуара должна предусматривать системы верхнего и нижнего налива, а также средства контроля плотности и температуры на разных уровнях. Кроме того, как правило, предусматривается многоуровневая защита резервуара от превышения внутреннего избыточного давления газовой фазы, обеспечивающая сброс газа в атмосферу или на факел [3].

Чтобы предсказать параметры, при которых может произойти явление ролловера, необходимо провести математическое моделирование процесса. Математическое моделирование явления ролловера предполагает использование уравнений математической физики, характеризующих процессы переноса теплоты, массы и импульса в рамках термодинамики необратимых процессов.

Литература

1. Интернет-ресурсы: <http://lngas.ru/life-safety-lng/problemy-termodynamika-spg.html>.
2. Рахимов В.О. Метод расчёта теплогидравлического режима резервуара для хранения сжиженного природного газа / В.О. Рахимов, Г.Е. Коробков // Рассохинские чтения: материалы межрегионального семинара (3-4 февраля 2012 года) / под. ред. Н.Д. Цахая. – Ухта: УГТУ, 2012 – С. 312-316.
3. 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 11. – Москва: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013 – С. 57-61.

МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОБМЕНА СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ В ХРАНИЛИЩЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Р.Х. Агеев

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, г. Томск, Россия.

В настоящее время газовая промышленность России достигла высокого уровня как по добыче газа, так и по его реализации. Однако отсутствие магистральных газопроводов на некоторых территориях страны создает проблемы газификации таких регионов сетевым газом. Поэтому вполне обоснованной является необходимость

создания системы альтернативного трубопровода варианта транспортировки природного газа в сжиженном виде.

При проектировании комплексов по подготовке и использованию сжиженного природного газа (СПГ) неизбежно встает вопрос о выборе способа хранения значительных объемов СПГ. Практика строительства комплексов показывает, что на долю резервуаров для хранения СПГ приходится до 50% общих капиталовложений. Соответственно, к этим сооружениям должны предъявляться особые требования как при строительстве, так и при эксплуатации.

Хорошо известно, что одним из важных факторов опасности СПГ являются его низкая температура кипения, что не позволяет обеспечить его хранение без потерь, а также изменение состава (плотности) и температуры кипения СПГ при хранении за счет испарения более легкого компонента (метана). Данные факторы при пополнении хранилищ, имеющих остатки топлива, новой порцией СПГ, с плотностью и температурой, отличающейся от аналогичных параметров в остатке топлива, могут приводить к образованию стратифицированных макро слоев СПГ в хранилище [1,2]. При последующем протекании тепло- и массообменных процессов в слоях СПГ возможно возникновение режима интенсивного перемешивания (явление «ролlover») с практически мгновенным испарением больших масс СПГ и резким повышением давления в хранилище. Все это способствует и разрушению хранилища и интенсификации неблагоприятных технологических процессов [3]. Схематическая картина механизмов тепло- и массообмена указанного явления кратко проиллюстрирована на рис. 1.

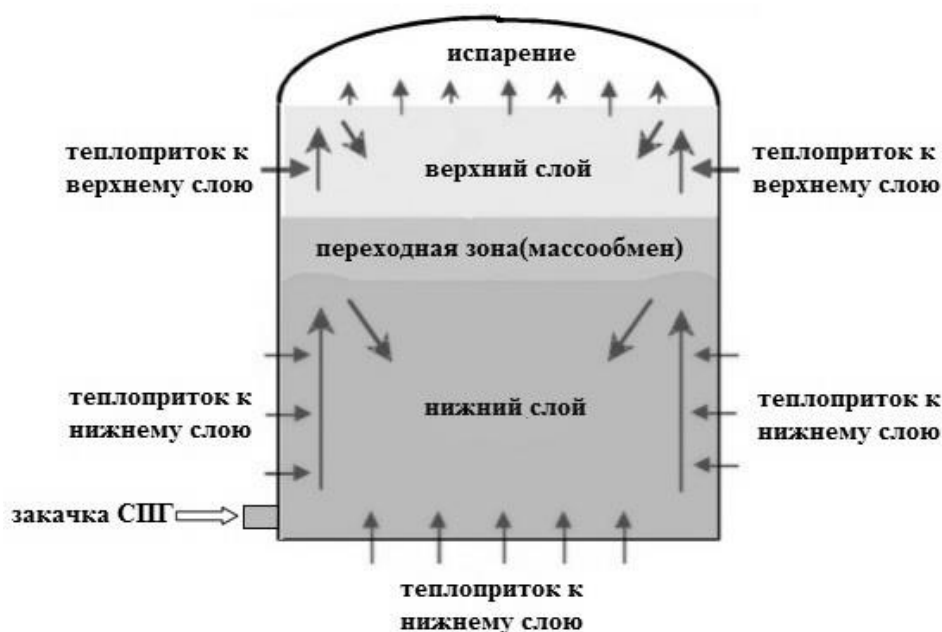


Рис. 1 Перемешивание слоев при загрузке продукта в резервуар с процессами тепло- и массообмена.

Заметим, что физическая модель процесса отличается тем, что при загрузке резервуара свойства продукта, уже хранящегося в изотермическом резервуаре (ИР), отличаются от свойств СПГ, закачиваемого в резервуар. В ИР, оборудованных системой нижнего налива, СПГ, имеющий большую плотность, образует нижний слой. СПГ, имеющий меньшую плотность, формирует верхний слой, который располагается над поверхностью нижнего, не перемешиваясь с ним. Перегреваясь относительно температуры насыщения за счет внешнего теплопритока через днище и стенки, продукт в нижнем слое при этом не имеет возможности компенсировать теплоприток за счет испарения, т.к. поверхность теплообмена закрыта нижним слоем. Однако имеют место процессы тепло- и массообмена двух слоев между собой и верхнего слоя с парогазовой фазой. В конечном итоге, в определенный момент времени после загрузки и образования стратификации, за счет описанных выше процессов плотности слоев выравниваются с последующей резкой интенсификацией процессов испарения продукта (суть явления ролlover).

Математическое моделирование явления ролloverа целесообразно проводить на базе уравнений математической физики, характеризующих взаимосвязанные нелинейные процессы переноса теплоты, массы и импульса. В частности, моделирование тепловой части задачи будем проводить с использованием уравнения энергии в энтальпийной форме [3]:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \nabla(\lambda \nabla T) - \text{div}[(h_1 - h_2)\vec{j}_1]; \quad (1)$$

Здесь $\rho = \sum_{i=1}^2 c_i \rho_i$ – плотность смеси, ρ_i – плотность i -го компонента смеси, $h = \sum_{i=1}^2 c_i h_i$ – удельная энтальпия смеси, h_i – удельная энтальпия i -го компонента смеси, λ – коэффициент теплопроводности смеси, T – температура смеси, $\vec{j}_1$ – плотность потока массы для первого компонента смеси, c_i – относительно массовая концентрация i -го компонента.

Заметим, что при моделировании неізотермических процессов в многокомпонентной системе следует учитывать дополнительные механизмы переноса тепла и массы, налагаемые на процессы «чистой» теплопроводности и диффузии, которые следуют из уравнения Онзагера [4]:

$$\vec{j}_i = \sum_k L_{ik} \bar{X}_k; \quad (2)$$

Здесь L_{ik} – кинетические коэффициенты Онзагера, $\bar{X}_k$ – термодинамическая движущая сила.

Данное обстоятельство приводит к строгой формулировке диффузионных и тепловых процессов с дополнительными скрещивающимися эффектами. Для потока массы i -ой компоненты, наряду с концентрационной диффузией, имеем перенос массы эффектами второго порядка вследствие термодиффузии и бародиффузии в виде:

$$\vec{j}_i = -\rho \left(D_i \nabla m_i + \frac{D_{Ti}}{T} \nabla T_i + \frac{D_{Bi}}{p} \nabla p_i \right) = -\rho D \left(\nabla m_i + k_{Ti} \frac{\nabla T}{T} + k_{Bi} \frac{\nabla p}{p} \right); \quad (3)$$

Здесь: D_i – коэффициент взаимодиффузии; D_{Ti} , D_{Bi} – коэффициенты термо- и бародиффузии; m_i – молярная концентрация; p – давление; k_{Ti} – и k_{Bi} – коэффициенты термо- и бародиффузионного соотношений соответственно.

Из (1) – (3) видно, что для детального анализа тепловых процессов необходимо предварительно рассматривать гидродинамическую и диффузионную задачу, суть которых сводиться к следующим положениям.

Предполагается, что в явлении ролловера возможны локальные конвективные процессы, которые способны приводить к неустойчивым и переходным ламинарно-турбулентным течениям [5]. Тогда вместе с уравнением энергии (1) необходимо рассматривать гидродинамическую и диффузионную задачи в описании, которых следует включать: уравнения диффузии массы индивидуальной компоненты:

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial c_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-j_{ij}) + \dot{\omega}_i. \quad (4)$$

И глобальное уравнение неразрывности (закона сохранения массы смеси):

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

Заметим, что в условиях интенсивных турбулентных процессов переноса импульса для определения поля скорости необходимо привлекать динамические уравнения Рейнольдса (суть осредненные уравнения Навье-Стокса):

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ji} - \rho \overline{u_i' u_j'}); \quad (6)$$

Здесь обозначено: $\tau_{ji} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – компоненты тензора вязких напряжений ньютоновской среды; $\rho \overline{u_i' u_j'}$ – компоненты полного тензора напряжения Рейнольдса.

С целью получения детальной информации о тепловых процессах в режиме внутрифазных и межфазных взаимодействий при анализе сложных нелинейных, неізотермических, многокомпонентных систем часто наряду с удельной энтальпией (h) обращаются к полной энтальпии (H) смеси. В данной работе, для ее определения тепловая часть формулируется уравнением вида:

$$\rho \frac{DH}{Dt} = -\nabla_i Q_i + 2\mu S^2, S^2 = (\nabla_i) \bar{U}, \dot{S} = \frac{1}{2} (U_{ij} + U_{ji}); \quad (7)$$

$$\text{Здесь принять: } \vec{Q} = -\lambda \nabla T + \sum_{i=1}^N c_i h_i + p \sum_{i=1}^N \frac{k_i^T \vec{j}_i}{(\rho c_i)}; \quad (8)$$

$$\vec{j}_i = -\rho C_i \left\{ \sum_{m=1}^N D_{im} \left[\nabla \left(C_m \frac{W}{W_i} \right) + C_i \left(\frac{W - W_m}{W_m} \right) \nabla (\ln p) \right] + D_i^T \nabla (\ln T) \right\}. \quad (9)$$

В результате исследования явления ролловера в рамках пространственных процессов переноса в резервуаре СПГ установлено, что увеличение внешнего теплового потока сокращает время до начала процесса ролловера. Показано, что в математическом моделировании ролловера существенную роль играют механизмы конвективного тепло- и массообмена, прямые и перекрестные процессы диффузионного переноса теплоты и массы, а также скорость закачки. Кроме того, расчеты показывают, что в рамках применяемой в РФ системы нижнего налива сжиженного газа существует опасность для безаварийного функционирования технологического процесса [6], так как даже при незначительных отличиях в физических свойствах закачиваемого и хранимого СПГ происходит расслоение и последующее самопроизвольное перемещение слоев с интенсивным вскипанием.

Литература

1. Королев Н.С. К построению математической модели явления ролловер в хранилище СПГ // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3.
2. Королев Н.С. Математическое моделирование явления ролловер в системах хранения сжиженного природного газа // Актуальные проблемы российской космонавтики: материалы XXXVII академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН, 2013. С. 383-384.
3. May E.F. Fluid Science for improved LNG Production and shipping. Presentation of the University Of Western Australia, 2010.
4. Гиршфельдер Д., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., Иностран. Литература, 1961. 1126 с.
5. Kharlamov S.N. Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamical Processes in Pipelines. Rome, Italy: Publ. House "Ionta", 2010. 263p.
6. ПБ 09-566-03 Правила безопасности для складов сжиженных углеводородных газов и легковоспламеняющихся жидкостей под давлением. Москва, ПИО ОБТ, 2003.