

УДК 621.642.8

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2018

Математическая модель процесса парообразования при испарении сжиженного газа из пролива

Н. М. Кочетов,

Новомосковский институт
повышения квалификации
руководящих работников
химической промышленности,
г. Новомосковск
Тульской обл.

А. Н. Кочетов,

Северо-Западное
управление Федеральной
службы по экологическому,
технологическому и атомному
надзору (Ростехнадзор),
г. Санкт-Петербург

Аннотация

В статье представлен анализ существующих моделей испарения сжиженных газов. В основу математической модели заложено уравнение энергетического баланса жидкости пролива при испарении. Дано решение уравнения, описывающего изменение температуры жидкости в процессе ее испарения.

Ключевые слова: испарение, кипение, парообразование, тепловой баланс, давление насыщенных паров.

Содержание

Введение

1. Теплообмен пролива жидкости с окружающей средой
2. Обзор существующих моделей испарения
3. Модель процесса испарения сжиженного газа

Заключение

Литература

Введение

Аварии на объектах химического профиля чреваты тяжелыми последствиями, связанными с поражением людей, разрушением промышленных зданий и уроном для окружающей среды. Выбросы могут вызвать взрывы, пожары и быть источником токсического поражения. Особую опасность представляют объекты, использующие сжиженные газы, вследствие высокой интенсивности испарения с образованием токсичных или взрывоопасных облаков.

Переход жидкости в газообразное состояние имеет следующие стадии: мгновенное вскипание жидкости, кипение пролива, а затем испарение жидкой фазы с поверхности пролива.

Сжиженный газ, находящийся под давлением при соответствующей температуре T , переходит в новое состояние термодинамического равновесия: его температура становится равной температуре кипения T_K при атмосферном давлении. В результате происходит выделение энергии, которая идет на вскипание жидкости с образованием паровой фазы. Для определения этой массы

паров (ΔM) используется уравнение энергетического баланса, которое в адиабатическом приближении выглядит:

$$C \cdot M \cdot T = r \cdot \Delta M + C(M - \Delta M) \cdot T_K, \quad (1)$$

где C — теплоемкость сжиженного газа; M — исходная масса сжиженного газа; r — удельная теплота парообразования сжиженного газа при температуре кипения и атмосферном давлении.

Оставшаяся жидкость, находящаяся при температуре кипения, продолжает кипеть за счет теплопритока от окружающей среды и определяется на этом этапе главным образом тепловым притоком от грунта.

Интенсивность парообразования в этом случае пропорциональна скорости теплопритока от грунта $q_{гр}(t)$.

Решение уравнения одномерной нестационарной теплопроводности твердого тела дает известную зависимость теплового потока от грунта с учетом длительности протекания процесса и физических свойств подстилающей поверхности:

$$q_{гр}(t) = \frac{\xi}{\sqrt{\pi \cdot t}} \cdot \Delta T, \quad (2)$$

где ξ — показатель тепловой активности грунта; ΔT — разность температур между поверхностью грунта ($T_{гр}$) и жидкостью, находящейся при температуре кипения T_K . Данная зависимость широко используется в материалах Ростехнадзора с 1988 г. [1].

Когда тепловой поток грунта перестает компенсировать затраты энергии на парообразование при кипении, наступает режим испарения, протекающий с изменением температуры жидкости [2—6]. Равенство теплового потока от грунта $q_{гр}(t)$ и необходимых затрат энергии на парообразование при испарении $q_{и}$ позволяет узнать эффективную длительность кипения жидкости. Знание длительности процесса кипения из пролива [7, 8, 15] дает возможность оценить долю этой стадии в образовании опасного облака.

На сегодня действующие отечественные методики расчета интенсивности парообразования из пролива сжиженных газов [10—12] не учитывают вначале переход режима кипения в режим испарения, а затем понижение температуры жидкой фазы

в процессе ее испарения. Расчет ведут с использованием постоянных значений давления насыщенных паров, т.е. при температуре кипения жидкости. Как показано в работах [3, 9], пренебрежение этими факторами завышает результат в несколько раз. Все это обуславливает необходимость проведения численного моделирования процессов парообразования при кипении и испарении сжиженного газа из пролива на базе законов термодинамики и молекулярной физики.

1. Теплообмен пролива жидкости с окружающей средой

Как уже отмечалось выше, при выбросе сжиженного газа часть его диспергируется и мгновенно испаряется вследствие высвобождения внутренней энергии. Оставшаяся часть с температурой кипения T_K при атмосферном давлении разливается на твердой поверхности и проходит режим кипения, а затем режим испарения за счет тепла окружающей среды.

Теплообмен пролива с окружающей средой осуществляется через две границы раздела: «жидкость — воздушная среда» и «жидкость — грунт».

Тепловые потоки, влияющие на процесс парообразования из пролива к жидкости из воздушной среды, обусловлены:

- конвективным тепловым потоком воздушной среды q_a ;
 - коротковолновым излучением Солнца q_s ;
 - длинноволновым излучением из атмосферы $q_{ат}$,
- а также потерей тепла вследствие также длинноволнового излучения поверхности пролива жидкости q_p .

Через поверхность раздела «жидкость — грунт» поступает тепло от «горячей» поверхности грунта $q_{гр}$.

Схема основных тепловых потоков, влияющих на процесс парообразования, представлена на рис. 1.

Тепловой поток из атмосферы можно оценить, используя уравнение Ньютона — Рихмана:

$$q_a = \alpha_v \cdot (T_v - T_{ж}), \quad (3)$$

где α_v — коэффициент теплоотдачи; T_v и $T_{ж}$ — соответственно абсолютные температуры воздушной среды и жидкости пролива.

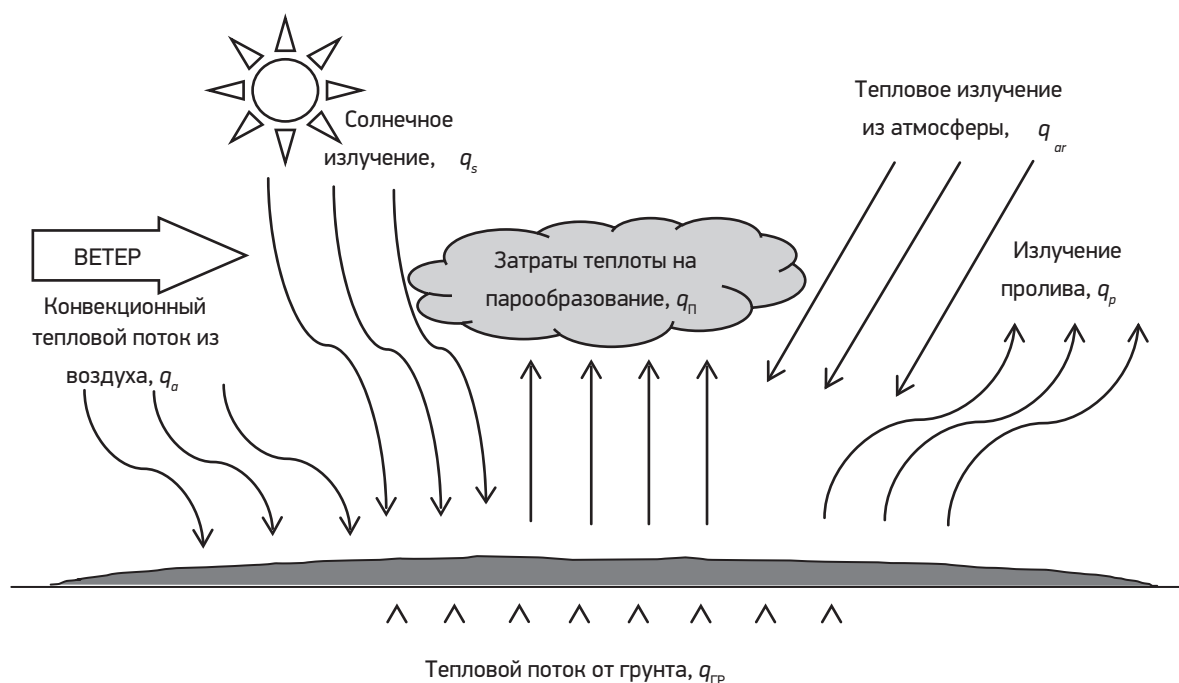


Рис. 1. Схема тепловых потоков

Поток коротковолнового излучения от Солнца q_s , зависящий от географического местоположения объекта (высоты солнцестояния, широты местности), коэффициента облачности, изменяющегося от 0 до 10, от временных параметров (от времени года и суток), можно оценить, используя [13].

Длинноволновое излучение атмосферы q_{ar} и потери тепла вследствие также длинноволнового излучения поверхности жидкости пролива подчиняются закону Стефана — Больцмана, согласно которому тепловые потоки являются функцией абсолютных температур:

$$\begin{aligned} q_{ar} &= (1 - r) \cdot f \cdot \sigma \cdot T_g^4; \\ q_p &= e \cdot \sigma \cdot T_{ж}^4, \end{aligned} \quad (4)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана

$$\left(\sigma = 2,04 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{р} \cdot \text{К}^4} \right);$$

r — коэффициент отражения жидкости длинноволнового излучения; f — коэффициент излучения атмосферы; e — степень черноты жидкости пролива.

Их влияние на процесс парообразования пренебрежимо мало.

Согласно известному соотношению (2), где $\sqrt{\xi} = \rho_{гр} \cdot c_{гр} \cdot \lambda_{гр}$ — показатель тепловой активности грунта ($\rho_{гр}$ — плотность, $c_{гр}$ — теплоемкость, $\lambda_{гр}$ — теплопроводность грунта), интенсивность теплопритока от грунта ($q_{гр}$) является функцией его физических свойств и в соответствии с решением одномерной теплопроводности затухает со временем ($q_{гр} \sim t^{-0,5}$).

Уравнение, описывающее суммарный поток тепла к слою жидкости из окружающей среды, имеет вид [4—6]:

$$q_{гр} + q_a + q_s - q_{ar} + q_p = q_{п}, \quad (5)$$

где $q_{п}$ — затраты на парообразование.

Представленный баланс выглядит несколько странно, т.к. тепловые потоки q_a , q_s , q_{ar} , q_p имеют постоянную скорость поступления во времени, тогда как поток от грунта затухает со временем.

Это уравнение справедливо для режима кипения жидкости, когда суммарный приток $\sum q(t) \geq I_K(t) r_{ж}$, где $I_K(t)$ — интенсивность парообразования в теку-

щий момент времени; $r_{\text{ж}}$ — удельная теплота парообразования жидкости.

В случае наступления режима испарения жидкости тепловые потоки q_a , q_s , q_p начинают зависеть от температуры жидкости, которая понижается со временем протекания процесса испарения.

Написание баланса для режима испарения жидкости из пролива усложняется, так как затраты на парообразование $I_{\text{к}}(t) \cdot r_{\text{ж}}$ будут состоять из притока тепла от окружающей среды $\sum q(t)$ и потерь собственной внутренней энергии $q_{\text{вн}}$, которая зависит от температуры и скорости отвода паров жидкости воздушным потоком, т.е. будем иметь:

$$q_{\text{п}}(t) = \sum q(t) + q_{\text{вн}}(t) = I_{\text{к}}(t) \cdot r_{\text{ж}}. \quad (6)$$

Теперь тепловые потоки $q_{\text{гр}}$, q_a , q_s , $q_{\text{ар}}$, q_p будут влиять только на скорость понижения температуры жидкости.

Режим кипения заканчивается, как только теплопритока от окружающей среды $\sum q(t)$ станет не хватать на поддержание жидкости при температуре кипения, а затем не будет достаточно для образования и выхода пара из жидкости; наступает режим испарения. Это условие и является критерием смены режима кипения ([15], где подробно рассмотрен этот вопрос). При этом скорость парообразования становится равной интенсивности при испарении. Из условия равенства скоростей парообразования можно оценить длительность режима кипения:

$$\sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}} \cdot c_{\text{гр}} \cdot \lambda_{\text{гр}}}{\pi \cdot t}} \cdot \frac{T_{\text{гр}} - T_{\text{ж}}}{r_{\text{ж}}} = 10^{-6} \cdot \eta \cdot P_{\text{н}} \cdot \sqrt{\mu}, \quad (7)$$

где $P_{\text{н}}$ — давление насыщенных паров жидкости при температуре ее кипения; η — коэффициент, учитывающий скорость воздушного потока; μ — молекулярная масса вещества.

Авторы [3, 14] рекомендуют в качестве условия перехода к режиму испарения использовать не расход тепла на парообразование при испарении жидкости, а затраты тепла на диффузионный поток, определенный с помощью пристеночных функций из условия, что мольная доля пара на межфазной границе равна единице. Это утверждение вызывает сомнение, так как оно не отвечает физической сущности давно известных и хорошо изученных процессов парообразования при кипении и ис-

парении жидкости. Режим кипения зависит только от количества подведенного к жидкости тепла [1, 2, 7, 15].

Анализ, проведенный в работах [2, 3, 5, 6], о влиянии тепловых потоков из окружающей среды показал, что доминирующим фактором является теплоприток от грунта.

Влиянием теплового потока солнечной радиации q_s на интенсивность режима испарения можно пренебречь вследствие сильной зависимости от погодных условий, времени суток и малых значений. Среднесуточное значение потока солнечного излучения в ~ 70 раз меньше солнечной постоянной, равной 1367 Вт/м^2 .

Что касается теплового потока из атмосферы q_a для сжиженных газов, то здесь движение воздушного потока над зеркалом пролива приводит к его смешению с холодным паром испаряющейся жидкости, снижая температуру воздушного потока, и, соответственно, к падению притока тепла к зеркалу жидкости. Согласно [16] повышение температуры воздушного потока в интервале от 20 до 200°C незначительно увеличивает скорость испарения жидкого аммиака. Тепловой поток в работе [3] рекомендуют вычислять с помощью пристеночных функций, которые, к сожалению, не учитывают этого фактора.

В результате резко упрощается уравнение теплового баланса (5), который соблюдается во времени за счет пропорционального снижения интенсивности парообразования:

$$q_{\text{гр}}(t) = q_{\text{к}}(t) = I_{\text{к}}(t) \cdot r_{\text{ж}}. \quad (8)$$

Баланс позволяет оценить скорость парообразования во времени при кипении жидкости:

$$I_{\text{к}}(t) = \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}} \cdot c_{\text{гр}} \cdot \lambda_{\text{гр}}}{\pi \cdot t_{\text{к}}}} \cdot \frac{T_{\text{гр}} - T_{\text{ж}}}{r_{\text{ж}}}. \quad (9)$$

2. Обзор существующих моделей испарения

Вопросу моделирования процесса испарения сжиженных газов посвящен ряд работ [3—6, 14], в которых в основу модели положено уравнение температуры баланса пролива жидкости. Изменение температуры жидкости рекомендуют рассчитывать, решая уравнение:

$$\frac{dT_{\text{ж}}}{dt} = \frac{q_a + q_{\text{ГР}} + q_s - q_e - q_{\text{ар}} - I_{\text{и}} \cdot r_{\text{ж}}}{c_{\text{ж}} \cdot m_{\text{ж}}}, \quad (10)$$

где $c_{\text{ж}}$ — удельная теплоемкость жидкости пролива; $m_{\text{ж}}$ — масса жидкости, отнесенная к площади поверхности пролива.

После суммирования тепловых потоков уравнение приобретает вид:

$$\frac{dT_{\text{ж}}}{dt} = \frac{\sum q(t) - I_{\text{и}}(t) \cdot r_{\text{ж}}}{c_{\text{ж}} \cdot m_{\text{ж}}}. \quad (11)$$

Для обеспечения работоспособности представленного уравнения необходимо выяснить условие, отвечающее режиму испарения жидкости, так как оно указывает, что понижение температуры жидкости имеет место и при режиме кипения жидкости. Режим испарения наступает, когда $\sum q(t) \leq I_{\text{и}}(t) \cdot r_{\text{ж}}$, что подтверждает выводы [7, 15].

Главный недостаток математической модели по расчету изменения температуры жидкости в режиме испарения — не учитывается уменьшение массы жидкости $m_{\text{ж}}$, которое возможно вплоть до полного испарения с течением времени.

В уравнении (10) кроме расходов энергии на парообразование при испарении $I_{\text{и}} \cdot r_{\text{ж}}$ рекомендуют [5] учитывать и потери тепла с образовавшимися парами $c_{\text{ж}} \cdot T \cdot I_{\text{и}}$, что вызывает сомнение.

В то же время [14] учитывает тепловой поток из объема жидкости к поверхности пролива, так как считает, что при испарении аммиачной воды изменение массы испаряющегося компонента зависит как от интенсивности массового потока с поверхности пролива в атмосферу, так и от скорости массового потока компонента из основного объема жидкости на ее поверхность (см. (1)). Здесь явно нарушается физическая сущность закона неразрывности массового потока. Скорость процесса массопередачи определяется лимитирующей стадией. Поэтому представленный материал требует доказательства, что лимитирующей стадией является скорость отвода паров с поверхности пролива, а не диффузионный процесс переноса компонента из объема жидкости к ее поверхности. В проливе, т.е. в «стоячей воде», полное перемешивание жидкости не имеет места.

Для оценки применимости рекомендуемой модели испарения в работе [14] используются данные, представленные на рис. 3. и 4. При испарении аммиачной воды в течение первого часа происходит резкое снижение температуры жидкости до минус 7 °С, а затем идет ее повышение до исходной температуры плюс 12 °С. В этом случае, соответственно, и скорость парообразования будет падать, а затем возрастать вследствие падения и роста давления насыщенных паров жидкости. Парообразование при испарении жидкости протекает за счет потери внутренней энергии и, естественно, с понижением температуры и скорости процессов, что подтверждают данные на рис. 3а и 4а, где скорость парообразования постепенно понижается.

В работе [3] при проверке достоверности математической модели парообразования из пролива представлены данные сжиженных азота (рис. 3.1 и 3.2), метана (рис. 3.3) и аммиака (рис. 1.4) без учета возможности влияния воздушного потока с окружающей среды на режим парообразования. При этом отсутствуют значения критериев, подтверждающих режимы исследуемых протекающих процессов.

Для сжиженного хлора (рис. 4.24) парообразование протекает в режиме кипения при скорости 1 м/с, а при скорости 5 м/с отсутствует этот режим, т.е. после образования пролива наступает режим испарения.

Аналогичная картина и при проливе сжиженного бутана на бетон (рис. 4.2): при скоростях ветра 2 и 3 м/с температура жидкости начинает снижаться через 100 и 60 сек. соответственно. Материал, рассчитанный по предлагаемой модели [3], указывает на наличие двух последовательно протекающих режимов парообразования. К сожалению, при этом везде отсутствуют значения необходимых критериев, подтверждающих режим парообразования.

Согласно данным рис. 4.17 и 5.14, при всех скоростях и ветре от 1 до 5 м/с падение температуры сжиженного аммиака происходит сразу после образования пролива, т.е. парообразование из пролива идет в режиме испарения. В то же время данные рис. 1.4 утверждают, что имеет место только режим кипения. Следовательно, методика дает два разных результата для одних и тех же условий эксперимента. О какой достоверности модели может идти речь?

3. Модель процесса испарения сжиженного газа

Рассмотрим поведение жидкости пролива с учетом доминирующего теплового потока от грунта. За малый промежуток времени Δt происходит испарение массы жидкости ΔM и расходуется энергия $q_{\text{ГР}}(t) = r_{\text{ж}} \cdot \Delta M(t)$. Эта энергия компенсируется за счет теплового потока от грунта $q_{\text{ГР}}(t)$ и внутренней энергии остывания, т.е. оставшейся массы жидкости $c_{\text{ж}} [(M - \Delta M(t)) \cdot (T_{\text{К}} - T_{\text{ж}}(t))]$. Согласно закону сохранения энергии для массы жидкости, отнесенной к единице поверхности испарения S , следует:

$$r_{\text{ж}} \cdot \Delta M(t) = c_{\text{ж}} \left[\frac{M}{S} - \Delta M(t) \cdot (T_{\text{К}} - T_{\text{ж}}(t)) \right] + q_{\text{ГР}}(t).$$

Откуда и получаем интегро-дифференциальную зависимость изменения температуры поверхностного слоя жидкости при испарении жидкости:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{r_{\text{ж}} \cdot \Delta M(t) - q_{\text{ГР}}(t)}{c_{\text{ж}} \left[\frac{M}{S} - \int_0^t \Delta M(t) \cdot dt \right]}. \quad (12)$$

При этом интенсивность испарения оценивается:

$$\Delta M(t) = I_{\text{И}}(t) = k \cdot \eta \cdot P_{\text{Н}}(t) \cdot \sqrt{\mu}, \quad (13)$$

где k — коэффициент приведения размерности уравнения к системе СИ; η — коэффициент, учитывающий влияние скорости воздушного потока [10]; $P_{\text{Н}}(t)$ — давление насыщенных паров в зависимости от температуры жидкости, где используется уравнение Клапейрона — Клаузиуса:

$$P_{\text{Н}}(t) = P_{\text{Н}} \cdot \exp \left[\frac{r_{\text{ж}} \cdot \mu}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{К}}} - \frac{1}{T(t)} \right) \right], \quad (14)$$

а тепловой поток от грунта оценивается согласно зависимости:

$$q_{\text{ГР}}(t) = \sqrt{\frac{\rho_{\text{ГР}} \cdot c_{\text{ГР}} \cdot \lambda_{\text{ГР}}}{\pi}} \cdot \frac{T_{\text{ГР}} - T_{\text{ж}}}{\sqrt{t}}. \quad (15)$$

Результаты решения уравнения (12) представлены на рис. 2, где показано поведение пролива сжиженного аммиака на бетонную поверхность с температурой 20 °С при скоростях воздушного

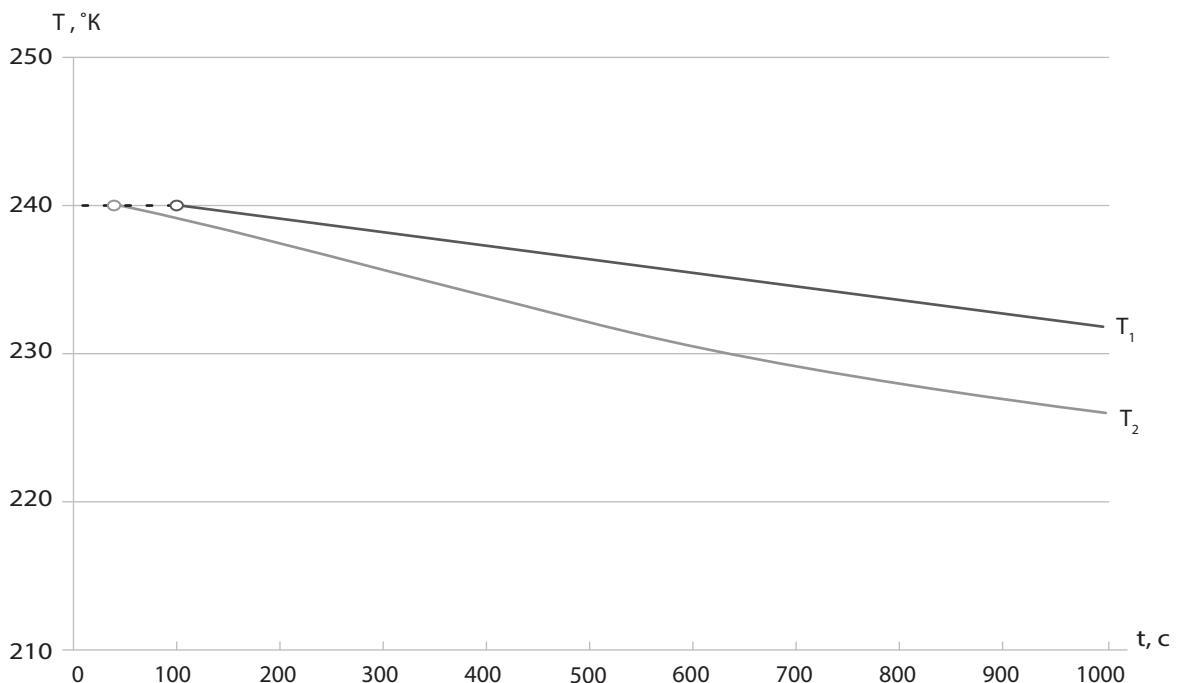


Рис. 2. Изменение температур (T_1 и T_2) пролива сжиженного аммиака на бетонную поверхность во времени соответственно при скоростях воздушного потока 1 м/с и 2 м/с

потока 1 м/с и 2 м/с. Режим кипения, протекающий при температуре минус 33,4 °С, наступает сразу после образования пролива и длится до падения интенсивности теплового потока от грунта до необходимых затрат внутренней энергии на парообразование в зависимости от скорости воздушного потока. Следовательно, согласно уравнению (7), длительность режима кипения — 115 сек. при скорости воздушного потока 1 м/с и 55 сек. при скорости 2 м/с.

В процессе испарения сжиженного газа имеет место изменение во времени соотношения поступающего теплопритока от окружающей среды и недостающего расхода внутренней энергии на парообразование. При этом наблюдается плавное понижение температуры жидкости в процессе протекания парообразования вследствие снижения интенсивности теплового потока от грунта (см. уравнение (2) и соответственно постепенного увеличения доли внутренней энергии на парообразование. Скорость понижения температуры жидкости зависит от скорости падения величины этого соотношения.

Однако авторы модели [3, рис. 5.14] утверждают, что при всех скоростях воздушного потока наступает резкое, практически вертикальное падение температуры сжиженного аммиака, сразу же после образования пролива, т.е. парообразование из пролива идет в режиме испарения. При этом авторы снова не представили параметры рекомендуемого критерия $J_{g \max}$, подтверждающего данный режим парообразования. Анализ причин такого протекания режима испарения из пролива также отсутствует.

Естественно, в случае учета тепловых потоков солнечной радиации, воздушного потока будет происходить более медленное снижение температуры жидкости пролива. С понижением температуры жидкости при ее испарении происходит снижение и массовой скорости образования паров. В случае определения влияния тепла воздушного потока на процесс испарения в моделях [4, 5] с помощью уравнения Ньютона — Рихмана (3) необходимо учитывать температуру воздушного потока после перемешивания с парами жидкости.

Заключение

Представлен анализ существующих моделей испарения сжиженных газов из пролива. Основным фактором, обуславливающим охлаждение жидкости в процессе испарения, является теплообмен с подстилающей твердой поверхностью. На базе закона сохранения энергии с учетом доминирующего теплового потока от грунта предложено уравнение, решение которого позволяет оценить изменение температуры жидкости в процессе ее испарения.

Литература

1. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожарных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. М., Металлургия, 1988, утвержденные Госгортехнадзором СССР 06.10.1988.
2. Кочетов Н.М. Моделирование процесса парообразования сжиженных газов при их аварийном разливе // Проблемы анализа риска. Том 6. 2009. № 3. С. 64—71.
3. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Основы прогнозирования последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов. Монография. Казань: ИНИТУ, 2013. С. 156.
4. Peter I. Kawamura, Mackay Donald. The evaporation of volatile liquids // Journal of Hazardous Materials Original Research Article, Volume 15, Issue 3, 1987. P. 343—364.
5. Хлуденев С.А. и др. Некоторые аспекты кинетики испарения опасных веществ с поверхности аварийных проливов // Бурение и нефть. 2010. № 5. С. 55—58.
6. Воротилин В.П., Горбулин В.Д. Математическое моделирование испарения сжиженного газа при аварийном разливе на открытых пространствах // Химическая промышленность. 1992. № 6. С. 354—359.
7. Кочетов Н.М. О методиках оценки потенциальной опасности при проектировании технологических процессов // Проблемы анализа риска. Том 6. 2009. № 2. С. 64—71.
8. Богач В.В. и др. Об эффективной длительности процессов испарения. Вестник Казанского технологического университета. 2015. Том 12 (18). С. 44.
9. Тищенко Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распространение в воздухе. М.: Химия. 1991. С. 368.
10. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезо-

пасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденные Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.03.2013 № 96 (взамен ПБ от 05.05.2003 № 09-540-03 «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденных Постановлением Госгортехнадзора России от 05.05.2003 № 29).

11. Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения аварий выбросов опасных веществ», утвержденное Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.04.2015 № 158 (взамен РД 03-26-2007 «Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ», утвержденному Приказом Ростехнадзора от 14.12.2007 № 859).
12. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта», утвержденные Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.07.2013 № 306.
13. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
14. Салин А.А. Методика прогнозирования последствий аварийных проливов бинарных растворов. Автореферат диссертации на соискание кандидата технических наук: 05.26.2003. Казань. 2013. 20 с.
15. Кочетов Н.М., Кочетов А.Н. Об эффективной длительности процесса парообразования при кипении жидкости из пролива // Проблемы анализа риска. Том 13. 2016. № 5. С. 12—19.

16. D. Burgess, J.N. Murphy, M.G. Zabetakis, H.E. Perlee. Volume of flammable mixture resulting from the atmospheric dispersion of a leak or spill // Journal of Hazardous Materials Original Research Article. Fifteenth Symposium International Combustion. The Toshi Center Hall Tokyo, Japan. Volume 15, Issue 1, 1974. P. 289—303.

Сведения об авторах

Кочетов Николай Михайлович: кандидат технических наук, доцент, Новомосковский институт повышения квалификации (НИПК)

Количество публикаций: более 100, из них 3 учебно-методических. Соавтор 2 нормативных документов в области промышленной безопасности

Область научных интересов: экологическая и промышленная безопасность

Контактная информация:

Адрес: 301650, Тульская обл., г. Новомосковск, ул. Комсомольская, д. 35, кв. 52

Тел.: +7 (962) 273-96-99

E-mail: galnik1947@yandex.ru

Кочетов Александр Николаевич: Северо-Западное управление Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор)

Количество публикаций: более 30

Область научных интересов: нормативно-правовое регулирование в области обеспечения промышленной и экологической безопасности территорий

Контактная информация:

Адрес: 195276, г. Санкт-Петербург, пр. Просвещения, д. 68-1-53

Тел.: +7 (965) 749-43-60

E-mail: himstroy212@mail.ru