

УДК 621.642.8

ISSN 1812-5220  
© Проблемы анализа риска, 2016

# Об эффективной длительности процесса парообразования при кипении жидкости из пролива

**Н. М. Кочетов,**

Институт повышения квалификации руководящих работников химической промышленности, г. Новомосковск

**А. Н. Кочетов,**

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

**Аннотация**

В статье проанализированы действующие нормы и правила на возможность их использования при расчете эффективной длительности кипения жидкости из пролива. Рассмотрены условия протекания процессов кипения и испарения, что позволило оценить эффективную длительность процесса кипения.

**Ключевые слова:** испарение, кипение, материальные и тепловые потоки.

**Содержание**

Введение

1. Анализ отечественных норм и правил
2. Физические основы процессов кипения и испарения
3. Эффективная длительность кипения жидкости из пролива

Заключение

Литература

**Введение**

Энергонасыщенность современных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий достигает сотен тысяч взрывоопасных сжиженных газов, эквивалентных по энергосодержанию до пяти мегатонн тротила. При этом аварии могут иметь угрожающий характер воздействия на окружающую среду и хозяйственную деятельность человека.

При выбросе сжиженных газов в атмосферу часть их в зависимости от условий хранения мгновенно вскипает: жидкость переходит в новое состояние термодинамического равновесия, принимает температуру кипения при атмосферном давлении окружающей среды [1]. Долю мгновенно вскипевшей жидкости при адиабатическом расширении можно определить из уравнения теплового баланса перехода части жидкости в пар:

$$\varphi_{\text{МГ}} = \frac{C_{\text{ж}} \cdot (T_0 - T_{\text{к}})}{r_{\text{ж}} - C_{\text{ж}} \cdot T_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{ж}}$  — теплоемкость жидкости;  $r_{\text{ж}}$  — удельная теплота парообразования при температуре кипения;  $T_0$  и  $T_{\text{к}}$  — соответственно температуры состояния жидкости.

Утечки значительных количеств опасного вещества (ОВ) образуют пролив. Жидкость продолжает кипеть за счет тепла верхнего слоя подстилающей поверхности (грунта) и тепла окружающего воздуха.

Следует отметить, что скорость кипения очень сильно зависит от природы грунта. По расчетам [2, 12] для бута эта скорость в 25 раз больше, чем для песка и в 11 раз больше, чем для средней почвы.

В результате охлаждения грунта его температура снижается, и верхний слой начинает выполнять роль теплоизолирующего подслоя, препятствуя подводу тепла от глубинных слоев грунта. Со временем кипение прекращается, и наступает процесс испарения жидкости из пролива. Определяющими становятся тепло атмосферного воздуха и скорость воздушного потока над зеркалом жидкости.

Парообразование при испарении из пролива достаточно подробно освещено в Федеральных нормах и правилах [3—6], работоспособность которых проанализирована в работах [7—9]. Согласно данным [10—16], процесс парообразования при испарении сжиженных газов из пролива протекает с понижением температуры жидкости, и, соответственно, сама скорость парообразования при этом уменьшается. К сожалению, все отечественные методики этого факта не учитывают.

Эффективной длительности процесса парообразования при кипении жидкости касаются в работах [1, 3—6, 11, 16—18]. Оказалось, что она имеет разброс от нуля до 1200 с, что указывает на необходимость более подробного анализа этих источников.

## 1. Анализ отечественных норм и правил

В правилах и нормах в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывоопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» до вступления в силу [3] указывалось только, что  $\tau_{и}$  — это время контакта жидкости с поверхностью разлива, принимаемое в расчет.

В методиках НПБ 105-95, затем в [4, 5, 17] рекомендовано время испарения принимать равным времени полного испарения, но не более 1 часа без учета времени кипения и времени испарения жидкости за счет теплоотдачи твердой поверхности (грунта) и воздушного потока.

И только в Федеральных нормах и правилах от 2013 г. [3] последовали рекомендации по оценке эффективной длительности процесса кипения жидкости из пролива. Но и здесь снова не учитыва-

ются последовательность и различие в длительности процессов кипения и испарения при определении массы паров, поступивших в атмосферу.

В материалах [4, 5] также отсутствуют рекомендации по оценке длительности процессов парообразования при кипении и испарении. Интенсивность испарения сжиженных углеводородных газов (СУГ) со свободной поверхности пролива здесь рекомендуется определять, используя зависимость:

$$W = \frac{\lambda_{г} \cdot C_{г} \cdot \rho_{г} \cdot (T_{г} - T_{к})}{r_{ж} \cdot (\pi \cdot \tau_{и})^{0,5}} + \frac{0,035 u^{0,8} \cdot \lambda_{а} \cdot (T_{г} - T_{к})}{v_{а}^{0,8} \cdot d^{0,2} \cdot r_{ж}}. \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое определяет скорость парообразования ( $W_{г}$ ) при кипении жидкости за счет тепла грунта, определенное при  $\tau \leq 10$  с; второе слагаемое определяет стационарную скорость парообразования при испарении ( $W_{и}$ ) за счет тепла воздушного потока. При этом зависимость представляет их сумму, а удельная массовая скорость поступления СУГ в атмосферу ( $M$ ) за время полного испарения СУГ (но не более 3600 с) составляет  $M = (W_{г} + W_{и}) \cdot \tau$ .

Суммирование скоростей парообразования при определении удельной массовой скорости испарения СУГ будет давать явно завышенный результат, так как эти процессы имеют разное время эффективного действия. Естественно, масса испарившегося вещества определяется по формуле  $M = W_{г} \cdot \tau_{к} + W_{и} \cdot \tau_{и}$ , но для этого нужно знать длительность процесса кипения ( $\tau_{к}$ ) за счет тепла грунта. К сожалению, авторы этого не учитывают.

Когда процесс протекает в неподвижной среде при  $u = 0$ , вторая составляющая уравнения, характеризующая процесс испарения, оказывается равной нулю, что противоречит физической сущности процесса испарения согласно [1, 3—6, 16].

Автор [1] рекомендует принимать  $\tau_{к} = 180$  с, так как в течение этого времени теплоприток от твердой поверхности резко снижается и при равенстве температур твердой поверхности (грунта) и жидкости наступает процесс испарения.

Данный вопрос рассматривается и в методике рассеивания выброса опасных веществ [6], где также предложена зависимость оценки длительности кипения за счет тепла грунта, согласно которой (пример 3, приложение 9) длительность кипения менее 13 с при проливе жидкого аммиака на бетон-

ную поверхность, что составляет около 0,6% от общей массы парогазовой смеси, поступившей в атмосферу. При столь малой доле этой массы встает вопрос о целесообразности проведения такого расчета.

Согласно математической модели, предложенной авторами [11], «после образования пролива 1 т жидкого хлора на бетонную поверхность при скорости ветра 1 м/с тепло притока от подстилающей поверхности снижается, становится сопоставимым с теплоотводом при испарении, а по истечении примерно 1200 с и меньше его. Наступает режим испарения, при котором температура жидкости становится ниже температуры кипения».

Такой вывод авторов имеет право на жизнь только с математической точки зрения, а не с физической сущности протекающих процессов кипения и испарения жидкости. Действительно, когда доля подвода тепла от подстилающей поверхности становится значительно меньше необходимых затрат на парообразование при испарении, то этой долей можно пренебречь. К сожалению, авторы [11] не конкретизируют величину этой доли.

Свод правил [17] при определении категории помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности вообще не учитывает эту стадию поступления опасного вещества в атмосферу.

В работе [18] также представлен результат анализа оценки длительности кипения сжиженных газов, предложенной в [3]. Относительно оценки эффективной длительности испарения из пролива, указанной в заголовке статьи, следует, что она не требует ни анализа, ни оценки, так как эта длительность согласно нормативам и правилам [4, 5, 17] регламентирована равной времени полного испарения, но не более 3600 с. Проведенный математический анализ не выявил зависимости физических процессов рассеивания опасного вещества и парообразования при кипении и испарении жидкости из пролива.

Утверждение авторов, что «время стационарного испарения до вступления в силу [3] определяли, как правило, временем локализации и ликвидации пролива, но не более 1 часа [2, 4, 5]», голословно. К сожалению, в [2] (ПБ 09-540-03), утвержденных в 2003 г., таких рекомендаций нет. Что касается [4, 5] — это

статьи, которые должны иметь одобрение Научно-технического совета Ростехнадзора на применение в качестве рекомендательного материала; при этом [5] опубликована в 2015 г., т.е. не могла быть использована до вступления в силу [3].

Предлагаемое авторами соотношение для определения времени испарения внутри помещений с учетом длительности локализации и ликвидации пролива, которые взаимосвязаны и зависимы между собой, нереализуемо. На сегодня отсутствует методика по оценке длительности локализации и ликвидации пролива. Кроме того, ведение этих работ во взрывоопасной среде, согласно Уставу по организации и ведению газоспасательных работ, запрещено.

Только в методиках МЧС России [4, 5, 17] с 1998 г. длительность стационарного испарения принимают в расчетах равной времени полного испарения, но не более 3600 с.

Федеральные нормы и правила [3] для определения времени кипения рекомендуют зависимость:

$$\tau_{\text{и}} = \max \left[ \frac{L_{0,5\text{НКПР}}}{U_{\text{ветра}}} \cdot \left( \frac{3 \cdot (T_0 - T_{\text{к}})}{r_{\text{ж}} \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \xi \cdot \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{ж}} \cdot \sqrt{\tau}} \cdot \frac{1}{m_{\text{и}}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $T_0$  и  $T_{\text{к}}$  — соответственно абсолютные температуры подложки (грунта) и жидкости;  $r_{\text{ж}}$  — удельная теплота парообразования жидкости;  $\xi$  — коэффициент тепловой активности грунта;  $F_{\text{п}}$  — площадь поверхности контакта жидкости с твердой поверхностью пролива;  $F_{\text{ж}}$  — площадь поверхности зеркала жидкости;  $L_{0,5\text{НКПР}}$  — расстояние, на котором ПГФ, дрейфующая от пролива площадью  $F_{\text{ж}}$  и скоростью эмиссии  $m_{\text{и}}$ , рассеивается до концентрации 0,5 НКПР, отсчитывается от наветренной стороны;  $U_{\text{ветра}}$  — скорость воздушного потока над зеркалом испарения.

Данное соотношение вызывает удивление по своему физическому смыслу и возможности решения [7, 18].

Представленная зависимость справедлива для тех сжиженных газов, у которых выполняется условие  $T_0 > T_{\text{к}}$ . В случае выброса такой жидкости в атмосферу часть ее переходит в пар, образуя первичное облако, и только затем наступает процесс парообразования из пролива. К сожалению, зависимость не учитывает влияния этого облака на процесс рассеивания опасного вещества.

При этом отсутствие рекомендаций по оценке  $L_{0,5\text{НКПР}} U_{\text{ветра}} \sqrt{\tau}$  делают зависимость трудной в исполнении. Здесь длительность кипения связывают с временем рассеивания эмиссии до взятой без обоснования взрывобезопасной концентрации, равной 0,5 НКПР, при этом некоторые вещества могут быть токсически смертельно опасными на этом состоянии (аммиак и др.).

Жидкость, находящаяся при температуре кипения, продолжает кипеть, если имеет место подвод тепла. При несоблюдении этого условия кипение жидкости прекращается. Следовательно, время рассеивания эмиссии из пролива до 0,5 НКПР не оказывает влияния на длительность протекания процесса кипения жидкости.

## 2. Физические основы процессов кипения и испарения

Парообразование — это процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное (пар). Имеют место два способа парообразования — кипение и испарение, при этом теплота при испарении называется скрытой теплотой парообразования.

Теплота парообразования затрачивается на преодоление сил молекулярного сцепления в жидкой фазе и работу расширения при превращении жидкости в пар.

Кипение — это процесс парообразования по всему объему жидкости, протекающий при температуре кипения жидкости. Температура кипения наступает тогда, когда давление паров достигает упругости давления газа, окружающего жидкость (при проливе сжиженных газов  $P_H = 101,3$  кПа). Кипение жидкости требует постоянного подвода тепла. Это тепло должно обеспечить прежде всего поддержание жидкости при температуре кипения, и затем быть достаточным для образования паров и выхода их из жидкости. Массовая скорость парообразования зависит от интенсивности подвода тепла ( $q$ ) и удельной теплоты парообразования вещества ( $r_{ж}$ ):

$$m_k = \frac{q}{r_{ж}}$$

Под испарением понимают парообразование на свободной поверхности жидкости в результате теплового движения молекул. Это эндотермический

процесс, при котором поглощается теплота фазового перехода жидкости в пар. В отличие от кипения, испарение происходит при любой температуре. При переводе молекулы жидкости в пар необходимо оторвать ее от всех молекул, к которым она притягивается, и совершить работу расширения при превращении жидкости в пар.

Молекулы любой жидкости находятся в непрерывном и беспорядочном движении, совершают тепловые колебания около положения равновесия со скоростью, отличной от средней в объеме жидкости. Поэтому у каждой молекулы кинетическая энергия может быть как больше, так и меньше средней кинетической энергии теплового движения, которая пропорциональна средней температуре жидкости:  $E_k \approx k \cdot T_{ср}$ , где  $k$  — постоянная Больцмана.

В жидкости потенциальная энергия взаимодействия молекул, как правило, превышает кинетическую энергию хаотического теплового движения. И все-таки, согласно закону молекулярной физики, на поверхности жидкости всегда найдутся молекулы, которые могут покинуть жидкость (уйти за ее пределы) вследствие превышения их кинетической энергии над потенциальной энергией связи с окружающими молекулами. При этом средняя энергия оставшихся молекул становится меньше, жидкость остывает.

Однако при испарении воды в открытом бассейне понижения температуры не наблюдается. Испарение в этом случае протекает медленно и температура жидкости поддерживается постоянной за счет теплообмена с окружающей средой. Характер изменения температуры жидкости зависит от соотношения интенсивности подвода тепла и необходимых затрат на парообразование, т. е. скорости испарения жидкости.

С повышением температуры жидкости возрастает средняя скорость теплового движения ее молекул и, следовательно, увеличивается число молекул, у которых кинетической энергии достаточно для покидания жидкости. Их число  $n$  в единице объема  $n_0$  оценивается выражением:  $n = n_0 \cdot e^{-M/rRT}$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $M$  — молекулярная масса вещества с энергией парообразования  $r$ .

С повышением температуры жидкости растет и упругость паров  $P_H$  в пространстве над жидкостью.

### 3. Эффективная длительность кипения жидкости из пролива

Рассмотрим поведение сжиженного аммиака при его проливе на бетонную поверхность с температурой 20 °С при скорости воздушного потока 1 м/с.

Графические зависимости поведения интенсивности парообразования при кипении и при испарении из пролива показаны на рисунке. Здесь же представлены теплоприток от подстилающей поверхности и потребность (расход) тепла на испарение из пролива, согласно Федеральным нормам и правилам [3, 5].

При этом для оценки интенсивности парообразования с единицы поверхности пролива использовано решение уравнения одномерной нестационарной диффузии теплового потока в зависимости от физических свойств подстилающей поверхности бетона:

$$m_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} \cdot \lambda_{\Gamma} \cdot (T_{\Gamma} - T_{\kappa})}{\pi \cdot \tau \cdot r_{\kappa}}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\Gamma} = 2300 \text{ кг/м}^3$  — плотность материала;  $C_{\Gamma} = 1130 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$  — теплоемкость матери-

ала;  $\lambda_{\Gamma} = 1,28 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$  — коэффициент теплопроводности;  $\tau$  — время контакта жидкости с поверхностью грунта, с;  $T_{\Gamma}$ ,  $T_{\kappa}$  — абсолютные температуры подстилающей поверхности и жидкости;  $r_{\kappa} = 1360 \text{ кДж/кг}$  — удельная теплота парообразования аммиака.

Для определения интенсивности испарения из пролива используем широко известную зависимость:

$$m_{\text{и}} = 10^{-6} \cdot \eta \cdot P_{\text{Н}} \cdot \sqrt{M}. \quad (5)$$

Здесь  $\eta$  — коэффициент, учитывающий влияние скорости и температуры воздушного потока над зеркалом испарения жидкости,  $P_{\text{Н}}$  — давление насыщенных паров жидкости при расчетной температуре (кПа),  $M$  — молекулярная масса опасного вещества, кг/кмоль.

Значения коэффициента  $\eta$  выбираем по таблице, заимствованной из [3—5]. Все действующие источники [3—6] предполагают постоянство скорости парообразования при испарении с поверхности пролива.

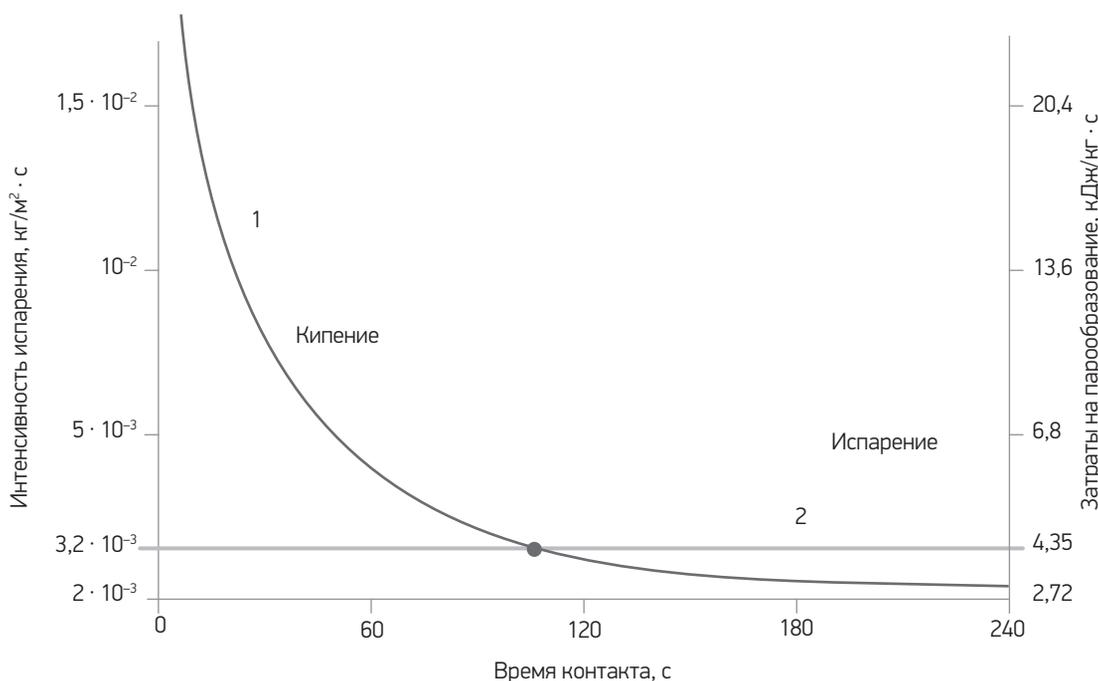


Рисунок. Парообразование жидкого аммиака на бетонной поверхности во времени при скорости воздушного потока 1 м/с

Построение графиков тепловых потоков базируется на представленных выше зависимостях с учетом теплоты парообразования при кипении  $q_{\Gamma} = r_{\text{ж}} \cdot m_{\Gamma}$  и при испарении  $q_{\text{и}} = r_{\text{ж}} \cdot m_{\text{и}}$ .

Это позволило объединить на рисунке графические зависимости материальных и тепловых потоков, обеспечить наглядность сопоставления интересующих нас процессов кипения и испарения аммиака.

Из рисунка следует, что процесс испарения аммиака из пролива характеризуется постоянством как скорости парообразования, так и расходов энергии на испарение во времени (зависимость 2).

После пролива происходят резкое снижение теплового потока от подстилающей твердой поверхности и соответственно также резкое падение интенсивности парообразования при кипении (зависимость 1). По мере охлаждения грунта величина теплопотока снижается и становится сопоставимой с потребностями на испарение  $q_{\Gamma} = q_{\text{и}}$ , а затем становится меньше  $q_{\text{и}}$ .

Особый интерес вызывает точка пересечения, для которой характерно прежде всего равенство скоростей парообразования при кипении  $m_{\Gamma}$  и при испарении  $m_{\text{и}}$ . Кроме того, в этой точке теплоприток от грунта  $q_{\Gamma}$  становится равным затратам на испарение  $q_{\text{и}}$ . В дальнейшем при  $q_{\Gamma} < q_{\text{и}}$  подвод тепла не компенсирует энергозатраты на парообразование при кипении и испарении: будет происходить понижение температуры жидкости со временем. Следовательно, можно считать, что кипение жидкости прекращается в точке пересечения, когда  $q_{\Gamma} = q_{\text{и}}$ .

Время кипения  $\tau_{\text{к}}$  жидкости за счет тепла подстилающей поверхности (грунта) следует определять из условия равенства скоростей парообразования при кипении и испарении жидкости:

$$\frac{T_{\Gamma} - T_{\text{к}}}{r_{\text{ж}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma} \cdot \lambda_{\Gamma}}}{\sqrt{\pi \cdot \tau_{\text{к}}}} = 10^{-6} \cdot \eta \cdot P_{\text{Н}} \cdot \sqrt{M}. \quad (6)$$

Решение этого уравнения показывает, что время кипения для нашего случая будет составлять около 120 с.

С возрастанием скорости воздушного потока, т.е. интенсивности испарения, время кипения будет уменьшаться. При скорости испарения  $5 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup> · с) время кипения сократится до 60 с.

Для сжиженных газов теплоприток от воздушного потока окружающей среды не оказывает за-

метного влияния на повышение температуры жидкости и, следовательно, на процесс испарения. Так, при скорости испарения  $5 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup> · с), коэффициенте  $a'_{\text{в}} = 8$  Вт/м<sup>2</sup> и  $\Delta t = 20 - (-33,4) = 53,4$  °С тепловой поток, согласно уравнению Ньютона — Рихмана,  $q_{\text{в}} = a'_{\text{в}} \cdot \Delta t$ , составит 0,427 кДж/(м<sup>2</sup> · с), что от необходимых затрат на парообразование при испарении не будет превышать 6%.

В случае выброса сжиженного хлора на бетонную поверхность длительность эффективного кипения при скорости ветра 1 м/с не превышает 10 мин, что в два раза меньше, чем по утверждениям авторов [11]. В то же время, согласно данным, представленным на рис. 4.24, жидкий хлор при проливе находится только в режиме кипения. Следовательно, работоспособность фундаментального уравнения (2.16) [11], где представлены условия перехода режима кипения в режим испарения, которые регламентируются через «диффузионный поток, определяемый с помощью пристеночных функций из условия, что мольная доля пара на межфазовой границе равна единице», вызывает сомнение из-за противоречивости представленных данных.

Вследствие энергетических затрат на фазовый переход «жидкость — пар» температура жидкости при испарении находится значительно ниже температуры кипения, о чем говорят многочисленные отечественные и зарубежные исследования [11—16].

Так, при разгерметизации труб аммиакопровода за счет испарения 1/6 части количества вытекшего аммиака грунт охлаждается до -60 °С [10]. Это еще раз подтверждает, что теплом воздушного потока можно пренебречь. Авторы монографии [11] считают, что выполнение расчетов интенсивности испарения с поверхности пролива с использованием постоянных значений давления насыщенных паров дает результаты, завышенные в несколько раз.

Для учета эффекта снижения температуры жидкости при испарении авторы работ [15, 16] рекомендуют вводить понижающий коэффициент, равный 1,5—2,0 для жидкостей с температурой кипения ниже 80 °С.

*Примечание.* Применение данных, представленных в таблице 1 из [3—5], о снижении скоростей испарения с повышением температуры воздушного потока на поверхности пролива вызывает сомнение для индивидуальных опасных веществ.

Зависимость коэффициента  $\eta$ 

Таблица 1

Скорость воздушного потока над зеркалом испарения, м/с	Значение коэффициента $\eta$ при температуре воздуха над зеркалом испарения, °С				
	10	15	20	30	35
0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Согласно закону Дальтона (1903 г.), скорость испарения воды пропорциональна разности давлений: давления насыщенного пара ( $P_H$ ) при температуре жидкости и давления водяных паров, находящихся в воздушном пространстве ( $P_B$ ).

При повышении температуры воздушного потока снижается движущая сила процесса испарения воды ( $P_H - P_B$ ) за счет повышения содержания паров воды в воздушном пространстве ( $P_B$ ) над поверхностью испарения воды. Скорость процесса испарения падает, невзирая на возрастание теплоприхода от воздушного потока.

При испарении индивидуальных опасных веществ их пары в набегающем воздушном потоке отсутствуют. Данные таблицы 1 справедливы при испарении воды.

## Заключение

Представленный материал позволяет сделать следующие выводы.

Проведен анализ материального и теплового балансов процессов кипения и испарения жидкости. В результате получено расчетное уравнение, которое позволяет оценить время кипения жидкости с учетом тепловой активности материала подстилающей поверхности и скорости испарения опасного вещества.

При проливе сжиженные газы приобретают температуру кипения и, соответственно, давление насыщенных паров, определяемое давлением окружающей среды над жидкостью, становится равным атмосферному давлению 101,3 кПа.

Физическая сущность эндотермического процесса парообразования при испарении указывает

на понижение температуры жидкости со временем и соответственно на падение давления насыщенных паров интенсивности парообразования. Следовательно, Федеральные нормы и правила по расчету скорости испарения требуют корректировки, так как не учитывают этого факта.

## Литература

1. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. С. 432.
2. Resplandy A. Chimie Industrie-Genie Chimique. 1969. V. 102. № 6. P. 691—702.
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утв. Приказом Ростехнадзора от 11 марта 2013 г. № 96 взамен ПБ 09-540-03.
4. ГОСТ 12.3.047-(1998) 2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
5. Методика определения расчетов величин пожарного риска на производственных объектах. Приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404.
6. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ, утв. приказом Ростехнадзора от 20.04.2015 взамен РД 03-26-2007.
7. Васьков Р.Е., Кочетов Н.М. Надежность методик прогнозирования последствий взрыва топливно-воздушной смеси на опасном производственном объекте // Проблемы анализа риска. 2014. Т. 11. № 6. С. 60—71.
8. Кочетов Н.М. О методиках оценки потенциальной опасности при проектировании технологических процессов // Проблемы анализа риска. 2009. Т. 6. № 2. С. 64—71.

9. Кочетов Н.М. Оценка поражающего воздействия взрыва при проектировании технологических процессов // Проблемы анализа риска. 2010. Т. 7. № 3. С. 80—86.
10. Заказнов В.Ф., Куршева Л.Н., Упадышев К.А. Ликвидация пролива жидкого аммиака // Химическая промышленность. 1980. № 6. С. 351—363.
11. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Основы прогнозирования последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов: Монография. Казань: Изд-во ИНИТУ, 2013. С. 156.
12. Иванов Ю.А., Стрижевский И.И. Хранение и транспортирование аммиака. М.: Химия, 1998. С. 68.
13. Ball L. W. Ammonia plant Safety 1970, V. 12, № 3. P. 264.
14. Burgess et. al. 15-th Symposium International Combustion, Tokyo, 1974. P. 283—289.
15. Тищенко Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: Справ. изд. М.: Химия, 1991. С. 362.
16. Кочетов Н.М. Моделирование процесса парообразования сжиженных газов при их аварийном разливе. Проблемы анализа риска. 2009. Т. 6. № 3. С. 64—71.
17. СП 12.13130-09. Определение категорий помещений зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
18. Богач В.В., Васьков Р.Е. и др. Об эффективной длительности испарения // Вестник Казанского технологического ун-та. 2015. № 12 (18). С. 44—46.

## 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