

УДК 621.564.2.01

В. В. Осокин, К. А. Ржесик, А. Н. Бирюков (Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского)

**ОБ УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ В МАЛОПОДВИЖНОЙ СРЕДЕ
ИЗОБУТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, ОСОБЕННОСТЯХ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
ОТ ИСТОЧНИКА ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ЕЕ ПРИ ОТКРЫВАНИИ
ЕМКОСТИ С ИЗОБУТАНОМ**

Приведены результаты стендовых исследований процессов формирования и горения изобутано-воздушной смеси в закрытой и раскрывающейся емкости. Получены экспериментальные данные о динамике и продолжительности их протекания. Экспериментальный материал может быть использован при решении концептуальных вопросов обеспечения безопасности конструкции и сервисного обслуживания малой холодильной техники, работающей на изобутане.

Ключевые слова: изобутан, изобутано-воздушная смесь, концентрационные пределы взрываемости, воспламенение, горение, видеокдры.

До 40-х годов прошлого столетия в холодильной технике использовались природные хладагенты, причем в малой холодильной технике — углеводороды, в основном, пропан и изобутан. Углеводороды, обладая хорошими термодинамическими свойствами, имеют существенный недостаток — они пожароопасны. Вследствие этого на их использование в течении долгого времени был наложен запрет. Вместо них стали использовать в качестве холодильных агентов хлорфторуглероды (ХФУ) и гидрохлорфторуглероды (ГХФУ). Однако, как выяснилось, эти вещества при эмиссии в околоземном пространстве разрушают озоновый слой стратосферы. Монреальский протокол, подписанный индустриально развитыми странами, наложил поэтапный запрет на производство и использование ХФУ и ГХФУ. В связи с этим индустрия малого холода вновь обратилась к углеводородам как эффективным хладагентам при сохранившейся с давних пор проблеме их взрывопожароопасности.

Современные международные, в основном европейские, стандарты, которые должны гарантировать техническую и экологическую безопасность при использовании углеводородов в качестве хладагентов, имеют «успокоительную» направленность, не подтвержденную ни экспериментальными, ни теоретическими исследованиями. При этом в ряду взрывопожароопасных углеводородов никак не выделяются используемые в качестве хладагентов пропан и изобутан, имеющие специфические физико-химические свойства. Весьма существенное отличие — их плотность, превышающая плотность атмосферного воздуха, что, безусловно, должно влиять на особенности формирования газоздушных смесей при утечках хладагентов из компрессорной системы, их воспламенения от источников зажигания и горения. Необходимо визуальными и теплофизическими средствами оценить степень пожароопасности при сгорании реальной массы хладагента в холодильном шкафу или в окрестности его в случае вероятной

разгерметизации компрессорной системы и наличия источника воспламенения. Только на этой, не виртуальной, основе можно разрабатывать рекомендации по обеспечению технической безопасности при использовании углеводородов в качестве хладагентов.

В области обеспечения надежности, технической и экологической безопасности при использовании в малой холодильной технике углеводородов имеется немного публикаций, среди которых [1, 2].

Цель данной работы — исследования условий и особенностей формирования изобутано-воздушной смеси в малоподвижной среде, особенностей воспламенения смеси от источника зажигания и горения ее при открывании емкости с изобутаном.

Были проведены в лабораторных условиях соответствующие стендовые исследования с использованием емкости-аналога морозильной камеры объемом 48 дм³, имеющей дверцу с магнитным уплотнителем. При проведении исследований использованы стандартные газовые электрозажигалки мощностью по 90 Вт для создания теплового импульса и цифровая видеокамера — для регистрации происходящих процессов.

В одной из серий экспериментов разместили одну газовую электрозажигалку в донной части емкости, вторую на высоте 0,13 м от ее днища в геометрическом центре, соответственно, рассматриваемых площади и объема, третью снаружи, возле дверного проема на уровне ограничительного бортика днища.

В закрытую дверцей емкость подали из баллона по капиллярной трубке, проложенной в магнитном уплотнении, 10 г изобутана. При равномерном распределении газа в емкости концентрация его могла составить 213,7 г/м³, что больше верхнего концентрационного предела взрываемости 203 г/м³.

Через 3 мин. после подачи изобутана в верхнюю часть емкости включили одновременно три газовые электрозажигалки и открыли дистанционно ее дверцу. В этот момент воспламенение изобутана не произошло. Все происходящие в дальнейшем процессы зарегистрированы видеокамерой, «стоп-кадры» их представлены на рисунке 1.

По данным видеосъемки, в течении первых 3,36 с после открытия дверцы происходило «вытекание» из емкости плотного изобутана через ограничительный бортик ее днища в виде нескольких опускающихся вниз струек. По истечении этого времени произошла вспышка изобутано-воздушной смеси с характерным хлопком в дверном проеме емкости, на уровне ограничительного бортика. Скорость движения наружного воздуха параллельно фронтальной части емкости до 0,1 м/с (измерена прибором АИСТ-3М)

Поджиг горючей смеси произошел в локальном объеме на выходе из емкости от расположенной снаружи ее электрозажигалки. В дальнейшем пламя начало распространяться вниз, поджигая изобутан, «вытекший» в течение указанного выше времени из емкости. Скорость распространения фронта пламени вниз около 2 м/с. Процесс горения изобутано-воздушной смеси завершился выгоранием ее в емкости. Продолжительность всей фазы горения 1,28 с. Прокомментировать зарегистрированные нами процессы можно следующим образом. После подачи изобутана в закрытую дверцей емкость в течение 3-х минут произошло отслоение его от атмосферного воздуха. Имея большую плотность, он опустился в донную часть ограниченного объема и образовал в нем однородный слой высотой около 0,02 м. Открывание дверцы емкости привело к протеканию естественных воздухогазообменных процессов.

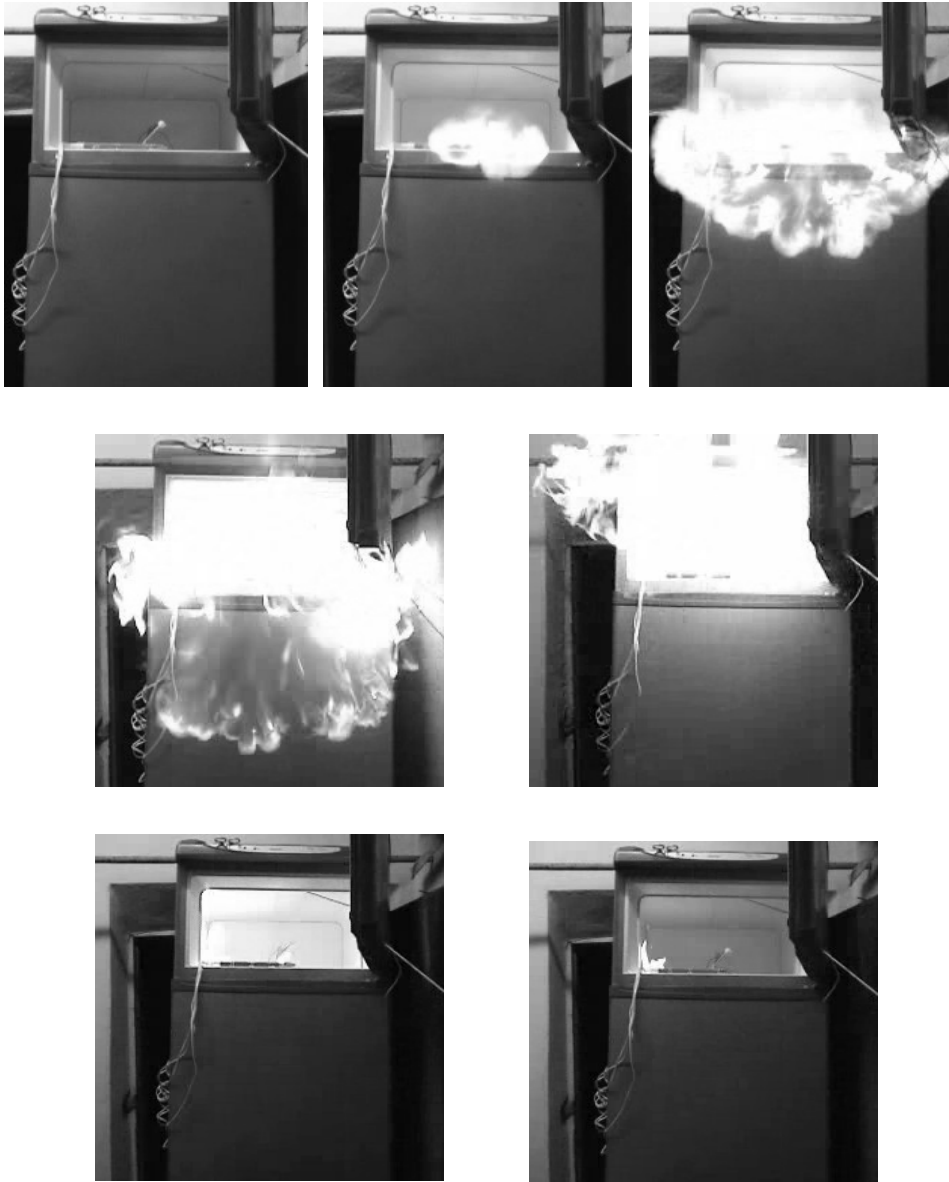


Рис. 1. Видеокадры процесса воспламенения и горения изобутана, «вытекающего» из раскрывшейся емкости

Вследствие «размывания» слоя чистого изобутана и выноса его в атмосферу за пределы емкости образовалась взрывопожароопасная изобутано-воздушная смесь, воспламенение и последующее горение которой при наличии источника зажигания было зарегистрировано. Интенсификации этих процессов способствовало прохождение волны сжатия от пункта вспышки горючей смеси.

В настоящее время в некоторых моделях импортных бытовых холодильников предусматривается использование малогабаритного вентилятора для обеспечения воздухообмена в закрытом холодильном шкафу. При микроутечках изобутана из компрессорной системы в охлаждаемый объем слоевые накопления его при работе вентилятора не могут создаваться: неизбежно образование в воздушных потоках горючей смеси, воспламенение которой от источника зажигания весьма вероятно без запаздывания, в отличие от рассмотренного выше случая.

Для проверки этого предположения были проведены следующие исследования. В испытательной емкости разместили малогабаритный тангенциальный вентилятор QLK 45/1200-2513, имеющий производительность 68 м³/час, и две газовые электрозажигалки по принятой ранее схеме, одна - в донной части емкости, другая — на высоте 0,13 м от дна. Дверной проем емкости при открытой дверце герметично перекрыли полиэтиленовой пленкой (закреплена по периметру двухсторонним скотчем). Подали в замкнутый объем 3,5 г изобутана, что обеспечивало теоретическую концентрацию 74,8 г/м³ (выше нижнего концентрационного предела взрываемости 38 г/м³). Включили вентилятор и с запаздыванием на 3 с — газовые электрозажигалки, что вызвало воспламенение и горение изобутано-воздушной смеси, прохождение волны сжатия, под действием которой один из углов полиэтиленовой пленки отслоился и завернулся в направлении ее распространения (пленка выполнила функцию разгрузочного клапана). По данным видеосъемки, общая продолжительность процесса горения изобутано-воздушной смеси 0,24 с, причем за пределами емкости — 0,16 с.

Аналогичным образом проведено исследование в емкости с закрытой дверцей при отсутствии полиэтиленовой диафрагмы. В замкнутый объем подали 5г изобутана, что обеспечивало теоретическую концентрацию его в воздухе 106,8 г/м³. Включение газовых электрозажигалок через 3 с после включения малогабаритного вентилятора вызвало динамический эффект: распахнулась до отказа дверца емкости — видно вырывающееся из нее пламя горящего изобутана, затем дверца захлопнулась за счет эффекта амортизации упруго сжатых конструкционных материалов. По данным видеосъемки, общая продолжительность динамического процесса от открытия до закрытия дверцы емкости составила 1,76 с, продолжительность видимого горения изобутано-воздушной смеси 0,32 с, в том числе за пределами емкости — 0,16 с. Некоторые «стоп-кадры» рассматриваемого динамического процесса представлены на рисунке 2.

При подаче в закрытую дверцей емкость изобутана в количестве 10 и 15 г воспламенения изобутано-воздушной смеси

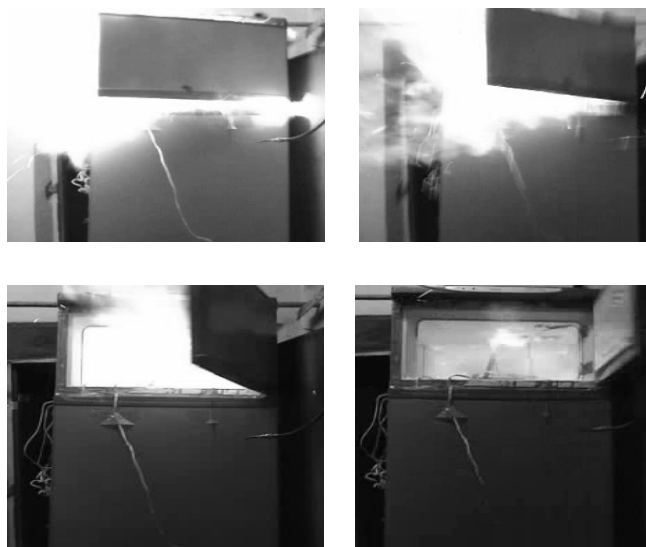


Рис. 2. Видеокadres динамического процесса, обусловленного воспламенением изобутано-воздушной смеси в емкости при работающем в ней малогабаритном вентиляторе

от газовых электрозажигалок при работающем малогабаритном вентиляторе не произошло, что вполне закономерно: концентрация горючего газа в воздухе 213,7 и 320,5 г/м³ превышала верхний концентрационный предел его взрываемости (203 г/м³).

Не произошло воспламенение изобутано-воздушной смеси ни в одном случае одновременного включения газовых электрозажигалок, расположенных по указанной выше схеме в закрытой, не имеющей микровентилятора емкости, в которую за 2,5 мин до создания теплового импульса подавалась масса изобутана от 1,8 до 9,5 г в интервале

концентрационных пределов взрываемости газа при условии равномерного распространения его в ограниченном объеме. Это обусловлено опусканием изобутана в донную часть емкости и образованием однородного слоя его, не содержащего атмосферного воздуха, в течении указанного выше времени. В рассматриваемом случае одна газовая электрозажигалка создавала тепловой импульс в слое «чистого» изобутана, другая — в слое «чистого» атмосферного воздуха. Естественно, без смешивания газа с воздухом взрывопожароопасная ситуация не создается.

Таким образом, нами получены экспериментальные данные, в том числе и видеоматериалы, касающиеся особенностей процессов формирования и горения изобутано-воздушной смеси в замкнутых и раскрывающихся объемах, а также сведения о динамике и продолжительности указанных процессов. Полученный нами экспериментальный материал может быть использован при решении концептуальных вопросов обеспечения безопасности конструкции и сервисного обслуживания малой холодильной техники, работающей на изобутане, а также соответствующих аппаратов химических производств. Нами рассмотрены скоротечные процессы динамического формирования изобутано-воздушных смесей. Необходимо рассмотреть вопрос о возможности образования взрывопожароопасной концентрации изобутана в воздухе над поверхностью «розлива» изобутана в малоподвижной среде за счет медленно протекающих диффузионных процессов.

Требуется создание теоретической основы для расчета динамики изменения концентрации изобутана в воздухе ограниченного объема на различной высоте от зеркала его розлива в течение любого времени.

Процесс диффузии описывается законом Фика [3].

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где c — концентрация изобутана, г/м³, t — время, с, D — коэффициент диффузии, м²/с.

Коэффициент диффузии газа в воздухе D может зависеть от их температуры и концентрации. В данной работе принимаем D постоянным, так как температура внутри шкафа неработающего холодильника остается неизменной.

Для решения уравнения (1) зададимся краевыми условиями: диффузионный поток через верхнюю и нижнюю стенки равен нулю, так как стенки непроницаемы. При этом

$$\frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0,$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0.$$

В начальный момент времени изобутан сосредоточен в бесконечно тонком нижнем слое, то есть

$$c(x, 0) = m \delta(x),$$

где m — масса изобутана, кг.

Данная задача решалась двумя методами: численным и аналитическим.

К преимуществам численного метода относятся простота реализации и простота перехода к более сложным задачам, например, с переменным коэффициентом диффузии.

Преимущество аналитического метода — как правило, удовлетворительная точность получаемого результата.

Для решения задачи численным методом выбираем схему аппроксимации принятого условия. Наиболее простой является схема с симметричной аппроксимацией второй производной [4].

Выбираем шаг по времени Δt и шаг по высоте:

$$\Delta x = \frac{h}{n},$$

где h — высота, м, n — количество шагов по высоте.

Обозначим значение концентрации изобутана на узлах сетки j - i как $c_{j,i}$. Производная концентрации по времени имеет вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx \frac{c_{j+1,i} - c_{j,i}}{\Delta t}, \quad (2)$$

где j — номер шага по времени, i — номер шага по высоте, Δt — шаг по времени.

Производная концентрации по высоте имеет вид

$$\frac{\partial c}{\partial x} \approx \frac{c_{j,i+1} - c_{j,i}}{\Delta x}, \quad (3)$$

вторая производная концентрации по высоте

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta}{\Delta x} \frac{\Delta c_i}{\Delta x} = \frac{\Delta}{\Delta x} \frac{c_{j,i+1} - c_{j,i}}{\Delta x} = \frac{c_{j,i+2} - c_{j,i+1} - (c_{j,i+1} - c_{j,i})}{\Delta x^2} = \frac{c_{j,i+2} - 2c_{j,i+1} + c_{j,i}}{\Delta x^2}, \quad (4)$$

где Δ — конечное приращение концентрации изобутана (разность значений концентрации в соседних узлах сетки).

Граничные условия определяются выражением

$$c_1 = c_2, c_N = c_{N-1},$$

где c_1 — граничная концентрация изобутана возле зеркала его разлива, c_N — концентрация изобутана в подпотолочной части холодильного шкафа.

Начальные условия имеют вид

$$c_{11} = m/(s\Delta x), c_{1i} = 0,$$

где c_{11} — начальное граничное условие, c_{1i} — концентрация изобутана в узле холодильника i в момент времени j .

Объединяя приведенные выражения, получаем расчетные формулы

$$c_{j+1,i} = c_{j,i} + \Delta t D \frac{c_{j,i+2} - 2c_{j,i+1} + c_{j,i}}{\Delta x^2}, \quad (5)$$

$$c_{j+1,1} = \Delta t D \frac{c_{j,2} - c_{j,1}}{\Delta x^2}, \quad (6)$$

$$c_{j+1,N} = c_{j,i} + \Delta t D \frac{c_{j,N-1} - c_{j,N}}{\Delta x^2}. \quad (7)$$

По приведенным выше формулам выполняем расчеты с помощью разработанной в оболочке VBA программы «Диффузия 1».

Для решения задачи аналитическим методом используем аналитическое решение уравнения Фика [5].

Уравнение Фика

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \nabla^2 P, \quad (8)$$

где P — линейная плотность изобутана (масса изобутана на единицу высоты в данной точке), t — время, ∇^2 — оператор Лапласа (лапласиан).

В рассматриваемом случае лапласиан имеет вид

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2}.$$

Решение уравнения Фика имеет вид [5]:

$$P = (4\pi D)^{-3/2} t^{-1/2} e^{-r^2/4Dt}. \quad (9)$$

Удаляем константу $(4\pi D)^{-3/2}$, так как она не влияет на правильность решения. При этом получаем

$$P = t^{-1/2} e^{-r^2/4Dt}. \quad (10)$$

Подставляя это решение в уравнение Фика (8), убеждаемся, что его левая и правая части равны.

Левая часть:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} (t^{-1/2}) e^{-r^2/4Dt} + (t^{-1/2}) \frac{\partial}{\partial t} e^{-r^2/4Dt} = (-1/2)t^{-3/2} e^{-r^2/4Dt} + (t^{-1/2}) e^{-r^2/4Dt} = \\ &= e^{-r^2/4Dt} \left((-1/2)t^{-3/2} + t^{-1/2} \frac{r^2}{4Dt^2} \right) = e^{-r^2/4Dt} \left((-1/2)t^{-3/2} + t^{-5/2} \frac{r^2}{4D} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Правая часть:

первая производная

$$D \frac{\partial P}{\partial r} = t^{-1/2} e^{-r^2/4Dt} \left(-2r \frac{1}{4Dt} \right) D = (-1/2) t^{-3/2} r e^{-r^2/4Dt}, \quad (12)$$

где $r = x$ — текущее значение высоты [5];

вторая производная

$$\begin{aligned} D \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} &= \frac{\partial}{\partial r} \left((-1/2) t^{-3/2} r e^{-r^2/4Dt} \right) = \left((-1/2) t^{-3/2} e^{-r^2/4Dt} \right) + \\ &+ \left((-1/2) t^{-3/2} r e^{-r^2/4Dt} \right) \frac{2r}{4t} = e^{-r^2/4Dt} \left((-1/2) t^{-3/2} + \frac{r^2}{4D} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Итак, левая часть уравнения равна правой.

Полученное решение уравнения Фика зависит от произвольной константы λ . Для определения ее проинтегрируем указанное решение (10) и приравняем результат к m :

$$\int_0^{\infty} \lambda e^{-q^2 x^2} dx t^{-1/2} = m. \quad (14)$$

Интеграл в левой части уравнения вычисляем с помощью табличного интеграла [6]:

$$\int_0^{\infty} \lambda e^{-q^2 x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2q}, \quad (15)$$

где q — произвольная положительная константа.
В нашем случае

$$q^2 = \frac{1}{4Dt}. \quad (16)$$

Далее

$$\int_0^{\infty} \lambda e^{-q^2 x^2} dx t^{-1/2} = \lambda t^{-1/2} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{1/(4Dt)}} = \lambda t^{-1/2} \sqrt{\pi Dt} = c_0,$$

$$\lambda = \frac{c_0}{\sqrt{\pi D}} t^{-1/2}. \quad (17)$$

Для аналитического решения уравнения Фика окончательно

$$c(x, t) = \frac{c_0}{\sqrt{\pi D}} t^{-1/2} e^{-x^2/(4Dt)}, \quad (18)$$

где c_0 — начальная концентрация изобутана.

Формула (18) была выведена в предположении, что область определения x бесконечна, то есть

$$x \in [0, \infty].$$

В нашем случае эта область представляет собой конечный отрезок, то есть

$$x \in [0, h].$$

Для корректного преобразования формулы (18) применительно к решаемой задаче необходимо учесть отражение диффузионного потока от стенок холодильника. Практика вычислений показывает, что достаточно учесть отражение потока только от потолочной части емкости. При этом

$$c_1(x, t) = c(x, t) + c(h - x, t) \quad (19)$$

где c_1 — суммарная концентрация изобутана, c — концентрация изобутана в соответствии с формулой (18).

По приведенной выше формуле (18) с помощью разработанной в оболочке VBA программы «Диффузия 2» выполняем вычисления.

В качестве исходных данных в программу вводятся:

- масса (кг) утечки изобутана;
- высота (м) емкости (холодильного шкафа), в котором произошла утечка изобутана;
- площадь (м^2) поперечного сечения емкости;
- коэффициент диффузии изобутана в воздухе ($\text{м}^2/\text{с}$);
- интервал по времени, в течение которого определяется концентрация изобутана в емкости.

В качестве примера был выполнен расчет диффузии изобутана массой 0,022 кг в холодильном шкафу, имеющем высоту 1,525 м и площадь поперечного сечения 0,35 м^2 , объем холодильного шкафа 0,53 м^3 . При этом принят коэффициент диффузии $D = 8,19 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. После подачи изобутана в закрытую дверцей емкость, он опустился в донную часть холодильного шкафа и образовал в нем, согласно расчетам при плотности $\rho = 2,672 \text{ кг}/\text{м}^3$, однородный слой высотой около 0,026 м: $h = 0,022 / (0,35 \cdot 2,672)$.

Для подтверждения сходимости результатов расчетов по предложенным двум методам, были установлены с использованием их численные значения концентрации изобутана на высоте 0,738 м от зеркала разлива через каждый час в течение суток. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Концентрация изобутана в воздухе на высоте 0,738 м от зеркала разлива в течение каждого часа на протяжении суток, $\text{г}/\text{м}^3$

Время	Метод расчета	
	Численный	Аналитический
1	1,4	2,1
2	12	14
3	23	25
4	30	32
5	34	36
6	37	39
7	38	40
8	39	41
9	40	41
10	40	41
11	40	41
12	41	41
13	41	41
14	41	41
15	41	41
16	41	41
17	41	41
18	41	41
19	41	41
20	41	41
21	41	41
22	41	41
23	41	41
24	41	41

Как видно, результаты расчетов по обоим методам полностью совпадают. В дальнейшем все расчеты, согласно поставленной цели, будут выполнены аналитическим методом.

Проследим динамику изменения концентрации изобутана в воздухе холодильного шкафа в течение 24 час на высоте от зеркала розлива: 0,024; 0,738; 1,520 м. По результатам расчетов построены приведенные на рисунке 3 а, б, в графики зависимости концентрации изобутана (c) в воздухе от времени (t) на высоте от зеркала его розлива, соответственно: 0,024; 0,738; 1,520 м.

Как видно на рисунке 3а, концентрация изобутана в воздухе холодильного шкафа на высоте 0,024 м от зеркала его розлива экспоненциально убывает с

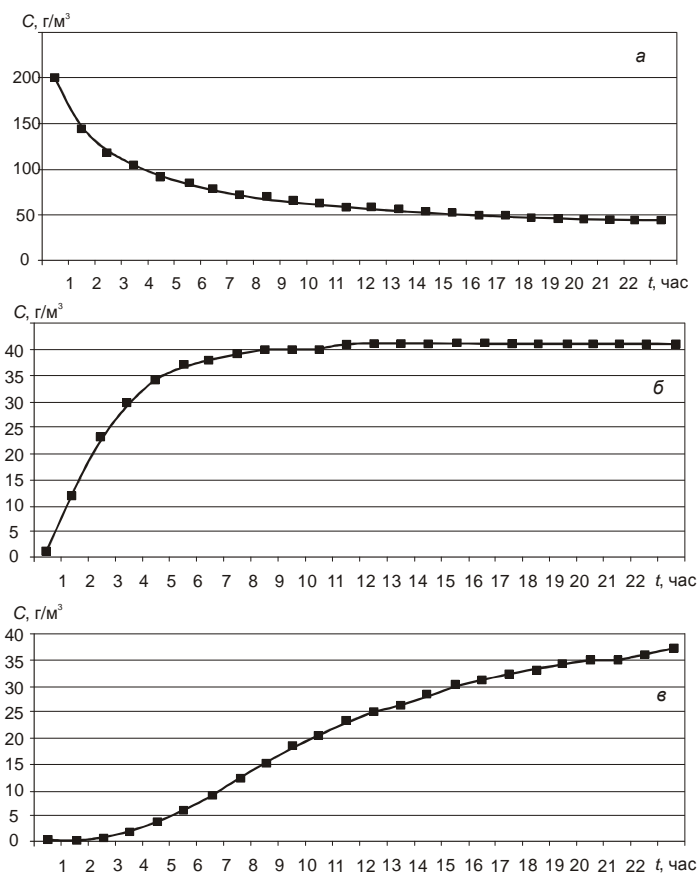


Рис. 3. Графики зависимости концентрации изобутана (c) в воздухе от времени (t) на высоте от зеркала его розлива, соответственно, 0,024м (а), 0,738м (б), 1,520м (в)

200 г/м³ (практически, верхний концентрационный предел воспламеняемости) — через 0,5 час от начала отсчета времени до около 50 г/м³ к концу одних суток наблюдений. По данным рисунка 3б, концентрация изобутана в воздухе на отметке 0,738 м экспоненциально возрастает с практически нулевого значения (0,5 час от начала отсчета времени) до 40 г/м³ к указанному выше времени окончания наблюдений. На рисунке 3в представлена динамика изменения концентрации изобутана в воздухе холодильного шкафа на отметке 1,520 м (в подпотолочной части бытового холодильника) в течение 24 час наблюдений: концентрация изобутана возрастает от нуля (через 2 часа от начала наблюдений) до 37,5 г/м³ в конце одних суток

наблюдений. По результатам анализа полученных данных, прослеживается тенденция к выравниванию вследствие диффузионных процессов концентрации изобутана в воздухе холодильного шкафа по всей его высоте и стабилизации ее на уровне около 40 г/м³. Простой арифметический расчет подтверждает правильность этого заключения. При равномерном распределении указанной выше массы изобутана ($m = 22$ г) в воздухе всего объема холодильного шкафа ($V = 0,53$ м³) концентрация взрывопожароопасного газа составит $0,22/0,53 \approx 40$ г/м³.

Как показано в работе [7], предельная масса изобутана, которая может выделиться в холодильный шкаф бытового холодильника ДХ-245 (доза заправки компрессорной системы хладагентом 67 г) из испарительной системы через повреждение при его работе, не может превышать 4,5 г (при этом в систему подсасывается 1,5 г воздуха). После этого начинается аварийная работа холодильника: компрессор работает непрерывно без отключения термостатом от электрической сети. По тем же данным, после принудительной

остановки холодильной машины аварийно работающего холодильника в холодильный шкаф в течение нескольких суток может выделиться еще 17,5 г изобутана. Итак, принятая в расчетах масса изобутана 22 г — это предельная масса его, которая вообще может выделиться в холодильный шкаф через микроповреждение в испарительной системе. По данным упомянутой работы [7], после отключения аварийно работающего бытового холодильника от электросети дверь его холодильного шкафа должна быть приоткрыта до начала выполнения ремонтных работ для того, чтобы малые дозы изобутана, выделяющегося в течение нескольких суток из испарительной системы под действием имеющегося в ней избыточного давления, могли рассеиваться в окружающем пространстве.

При решении вопроса об уровне взрывозащиты электротехнических изделий в холодильном шкафу как потенциальных источников теплового импульса, способного воспламенить изобутано-воздушную смесь, ориентироваться следует только на указанную выше массу изобутана 4,5 г: большая масса его (17,5 г) выделяется в холодильный шкаф отключенного от электросети холодильника, то есть при отсутствии напряжения на электротехнических изделиях.

На основании уже полученных данных можно сделать заключение: электротехнические изделия в холодильном шкафу бытового холодильника, работающего на взрывопожароопасном хладагенте изобутана, могут иметь общепромышленное исполнение при условии их размещения в его подпотолочной части.

Задача дальнейших исследований: определить расчетом по приведенной выше методике формирование в закрытом холодильном шкафу за счет процессов диффузии изобутано-воздушной смеси над зеркалом розлива 4,5 г изобутана.

Литература

1. Осокин В.В. Об оценке степени пожаровзрывобезопасности бытовых холодильников, работающих на изобутане / В.В. Осокин, К.А. Ржесик // Современные проблемы холодильной техники и технологии / Сборник трудов 4-й Международной научно-технической конференции. Одесса, 21-23 сент., 2005 г. — Одесса: ОГАХ, 2005. — С. 6–8.
2. Осокин В.В. Об особенностях формирования и горения изобутано-воздушной смеси в закрытой и раскрывающейся емкости / В.В. Осокин, К.А. Ржесик, Ю.А. Селезнева // Холодильная техника и технология. — 2006. — № 1(99). — С. 23–26.
3. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплоперенос в химической кинетике / Франк-Каменецкий Д.А. — М.: Наука, 1987. — 502 с.
4. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики. 7-е издание / Тихонов А.Н., Самарский А.А. — М.: МГУ, 2004. — 798 с.
5. Кайзер Дж. Статистическая термодинамика неравновесных процессов / Кайзер Дж. — М.: Мир, 1990. — 608 с.
6. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм рядов и произведений. 4 – е изд. / Градштейн И.С., Рыжик И.М. — М.: Физматгиз, 1963. — 1100 с.
7. Ржесик К.А. Повышение надежности и безопасности бытовых холодильников, работающих на изобутане : автореферат дис. на получение научной степени канд. тех. наук : спец. 05.05.14 «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования» / К.А. Ржесик. — Одесса, 2008. — 20 с.

© Осокин В.В., Ржесик К.А., Бирюков А.Н., 2011

Надійшла до редколегії 16.03.2011 г.