

Министерство образования и науки России
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Е.В. Старовойтова, А.Д. Галеев, С.И. Поникаров

ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ЗАЛПОВЫХ
ВЫБРОСОВ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Монография

Казань
Издательство КНИТУ
2013

Старовойтова Е.В.

Основы прогнозирования последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов: монография / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И.; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. – 155 с.

ISBN 978-5-7882-1512-9

В монографии изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований парообразования сжиженных газов при их аварийном залповом выбросе в атмосферу.

Приведена разработанная модель оценки последствий аварий на объектах хранения, переработки и использования сжиженных газов. Модель базируется на численном решении трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики, переноса массы и энергии. Вычислительная процедура реализована с использованием программы FLUENT. На основе представленной модели исследовано влияние скорости ветра, устойчивости атмосферы, теплового эффекта при конденсации водяного пара, препятствий в области выброса в виде зданий, сооружений на интенсивность парообразования и характеристики опасных зон при залповом выбросе сжиженного газа.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских институтов, а также для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов технических вузов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета

Рецензенты: канд. техн. наук, с.т.н.с., зав. лаб. ОАО «ВНИИУС» *Б.Н. Матюшко*

канд. техн. наук, зам. дир. по направлению пожарной безопасности и разработке проектной документации ООО «Эксперт бюро» *И.Р. Хайруллин*

ISBN 978-5-7882-1512-9

© Старовойтова Е.В., Галеев А.Д.,
Поникаров С.И., 2013

© Казанский национальный исследовательский
технологический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ	7
1.1 Мгновенное вскипание жидкости	7
1.2 Аэрозолеобразование при мгновенном вскипании.....	10
1.3 Парообразование при кипении аварийного пролива сжиженного газа	19
1.4 Парообразование при испарении аварийного пролива сжиженного газа	31
Глава 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРОВОЗДУШНОГО ОБЛАКА ПРИ ВЫБРОСЕ СЖИЖЕННОГО ГАЗА	46
2.1 Математическая модель парообразования при аварийном выбросе сжиженного газа из емкостного оборудования.....	46
2.2 Моделирование распространения газообразного вещества в атмосфере.....	59
Глава 3 ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	65
3.1 Проверка достоверности математической модели парообразования	65
3.2 Проверка достоверности математической модели рассеяния газообразного вещества в атмосфере.....	69
Глава 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	80
4.1 Численный анализ процесса парообразования при кипении аварийного пролива сжиженного бутана	80
4.2 Исследование влияния влажности воздуха на процесс формирования взрывоопасного облака при аварийном выбросе сжиженного углеводородного газа	84
4.3 Исследование влияния влажности воздуха на процесс формирования паровоздушного облака при аварийном выбросе сжиженного аммиака.....	85

4.4 Влияние наличия препятствия на последствия аварийного выброса сжиженного аммиака	92
4.5 Влияние степени устойчивости атмосферы на динамику формирования паровоздушного облака при залповом выбросе сжиженного хлора	102
Глава 5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ	117
5.1 Пункт отгрузки сжиженного углеводородного газа	117
5.2 Парк хранения сжиженного аммиака	133
ЛИТЕРАТУРА	142

ВВЕДЕНИЕ

Ускорение темпов и расширение масштабов производственной деятельности в современных условиях обуславливает необходимость проведения анализа и оценки опасностей возможных аварий в результате образования токсичных и пожаровзрывоопасных облаков на потенциально опасных производственных объектах техносферы. Особую опасность представляют объекты использования сжиженных газов, так как при их аварийном выбросе происходит интенсивное парообразование с формированием протяженных токсичных или взрывоопасных облаков.

Парообразование при аварийном выбросе сжиженного газа обусловлено мгновенным вскипанием перегретой жидкости, кипением (испарением) пролива сжиженного газа, возникновением аэрозолей при взрывном вскипании и их последующим испарением. Процессы парообразования и рассеяния образующейся примеси в атмосфере отличаются сложным взаимным влиянием, которое учесть в рамках упрощенных аналитических и эмпирических соотношений крайне проблематично. Это обуславливает необходимость привлечения для решения данных задач методов численного моделирования на основе пакетов гидродинамического анализа (CFD пакеты). В рамках подхода численного моделирования сложная взаимосвязь тепло- и массообменных процессов, сопровождающих развитие аварии, учитывается непосредственно путем совместного решения дифференциальных уравнений переноса массы, импульса, энергии, примесей и турбулентных характеристик. Кроме интенсивности парообразования, CFD модель позволяет также определять размеры зон дрейфа пожаровзрывоопасных облаков и зон токсического воздействия с учетом наличия застройки и особенностей рельефа местности.

Недостаточное знание процессов, связанных с поступлением опасных веществ в атмосферу и их последующим рассеянием, не только не позволяет предсказать масштабы и течение возможных аварий, но и обосновать необходимый уровень безопасности (риска) технологических систем, содержащих сжиженные газы, выбирать экономически эффективные проектные и конструкторские решения. В существующих моделях [1÷3] описание источника поступления газообразного вещества вследствие парообразования довольно схематично, что может служить препятствием для надежной оценки зон распространения паровоздушных облаков.

В монографии обобщены существующие основные модели парообразования сжиженных газов (гл. 1) и представлены новые научные исследования в области прогнозирования последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов в атмосферу.

В гл. 2 рассмотрена модель оценки последствий залпового выброса сжиженного газа в атмосферу, позволяющая комплексно учитывать мгновенное вскипание сжиженного газа, кипение пролива сжиженного газа и его последующее испарение, испарение аэрозолей в облаке, распространение паровоздушного облака с капельными включениями в атмосфере. Описаны пользовательские функции, интегрируемые в пакет FLUENT, позволяющие определять интенсивность парообразования из пролива, массу газа во взрывоопасных пределах в зависимости от времени, рассчитывать поле токсодоз и учитывать дополнительный нагрев паровоздушного облака вследствие конденсации паров воды.

В гл. 3 осуществлена проверка предложенной модели как по результатам проведенного экспериментального исследования процесса кипения жидкого азота на непроницаемой поверхности, так и по экспериментальным значениям, опубликованным в открытой печати.

В гл. 4 проанализировано влияние скорости ветра, устойчивости атмосферы, теплового эффекта при конденсации водяного пара, препятствий в области выброса в виде зданий, сооружений на интенсивность парообразования и характеристики опасных зон при залповом выбросе сжиженного газа.

В качестве практического примера в гл. 5 выполнено моделирование возможных аварий на опасных производственных объектах, связанных с аварийным выбросом сжиженного газа.

ГЛАВА 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Анализ аварий на объектах, использующих сжиженные газы, показал, что источником образования опасного вещества, участвующего в создании поражающих факторов, является переход их в газообразное состояние в виде паров.

Формирование топливно-воздушного (токсического) облака и его дальнейшее рассеяние включают целый ряд явлений: мгновенное вскипание жидкой фазы, фазовые переходы при испарении аэрозоля и кипении пролива, испарение жидкой фазы с поверхности пролива, смешение газа с окружающим воздухом.

Ниже будут изложены основные аспекты процессов и явлений, определяющих последствия аварийных выбросов сжиженных газов.

1.1 Мгновенное вскипание жидкости

В результате быстрого разрушения оболочки резервуара высокого давления происходит резкое падение давления, приводящее к ударному вскипанию («мгновенному испарению») содержащейся в резервуаре жидкости. При этом жидкость переходит в новое состояние термодинамического равновесия, ее температура становится равной температуре кипения при атмосферном давлении, а часть жидкости за счет высвобождающейся энергии переходит в пар. Часть вещества, оставшегося в жидком состоянии, увлекается расширяющимся паром в виде мелкодисперсного аэрозоля, тогда как не захваченная потоком жидкость, находящаяся при температуре кипения, растекается по поверхности [4].

Массовая доля переходящей в пар жидкости x_v обычно оценивается из термодинамических соотношений [5]:

$$x_v = 1 - \exp\left(-\frac{C_{p,liq}(T_0 - T_b)}{\Delta H_g}\right), \quad (1.1)$$

где $C_{p,liq}$ — удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/(кг·К); T_0 — температура сжиженного газа в емкости, К; T_b — температура кипения жидкости, К; ΔH_g — удельная теплота парообразования при температуре кипения и атмосферном давлении, Дж/кг.

Доли мгновенно вскипающей жидкости в зависимости от температуры для некоторых рассматриваемых сжиженных газов приведены на рис. 1.1.

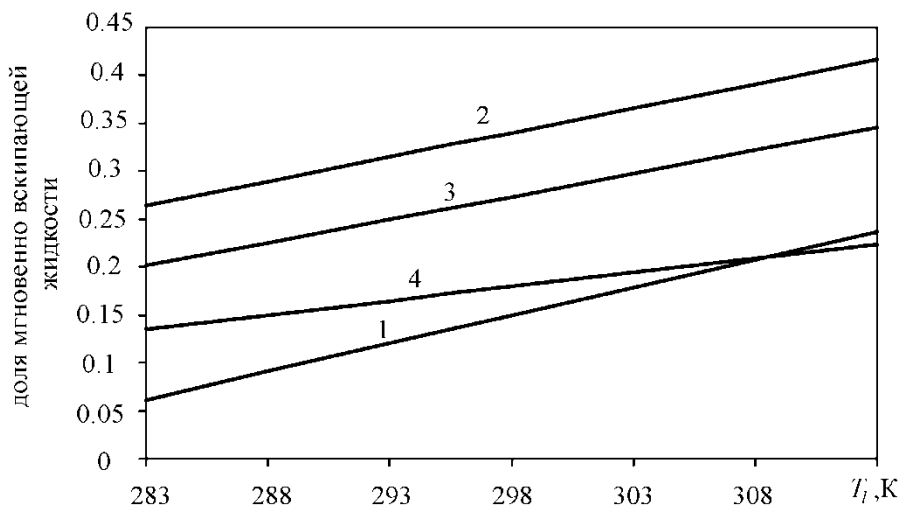


Рисунок 1.1 — Зависимость доли мгновенно вскипающей жидкости от температуры: 1 — бутан; 2 — пропан; 3 — смесь пропан-бутан; 4 — аммиак

Наиболее подробно как экспериментально, так и теоретически процессы вскипания перегретой жидкости при резком сбросе давления изучали в закрытой трубе, один из концов которой внезапно открывается.

Экспериментальные исследования процесса вскипания, в которых измерялись такие характеристики как возникающие в системе волна давления, скорость распространения волны вскипания, параметры двухфазного потока, можно найти в работах [6÷13]. Теоретические исследования одномерных течений вскипающей жидкости на основе одномерных моделей проводилось в ряде работ, как в предположении о термодинамической равновесности процесса, так и с учетом неравновесных эффектов [14, 15]. Подробный обзор работ по нестационарному истечению вскипающих жидкостей можно найти, например, в монографии [7].

Процессы распространения волн вскипания по перегретой жидкости весьма сложны, описывающие их модели содержат ряд

параметров, которые плохо известны для реальных веществ (например, начальная концентрация зародышей пузыреобразования в жидкости определяется не только характеристиками самой жидкости, но и степенью ее очистки, наличием дисперсных примесей и т. д.). Поэтому описание вскипания жидкости сводят к схематизации явления, ограничиваясь лишь наиболее существенными параметрами.

В работе [16] экспериментально исследовался выброс 3,5 кг аммиака при разгерметизации резервуаров высокого давления в форме цилиндрического сосуда диаметром 0,15 м и высотой 0,45 м при начальном давлении 3 атм. Разгерметизация оборудования производилась путем открытия специального быстродействующего клапана. В экспериментах обнаружено, что до 90% аммиака выбрасывается в атмосферу из сосуда, несмотря на то, что открывалась лишь малая часть стенки резервуара.

В начальный момент времени за счет интенсивной турбулентности происходит разбавление аммиачного облака с воздухом в следующей пропорции: примерно 10 кг воздуха приходится на каждый 1 кг аммиака [17].

Наиболее часто при разрушении оболочки резервуара со сжиженным газом возникает взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости (BLEVE — от англ. Boiling liquid expanding vapour explosion). Теория возникновения BLEVE представлена в работах [18, 19], случай, когда температура жидкости выше температуры перегрева. Резкий сброс давления приводит к объемному вскипанию жидкости, в результате чего часть ее переходит в пар, увлекая оставшуюся жидкость в виде мелкодисперсного аэрозоля.

В последнее время изучение явления BLEVE вызывает повышенный интерес [19÷25], поскольку оно считается наиболее опасным исходом аварии со сжиженными углеводородами. Крупномасштабные эксперименты по изучению данного явления проводились в [20] при взрыве резервуаров со сжиженными углеводородами.

Условия возникновения явлений типа BLEVE, влияние стратификации жидкости при неравномерном нагреве резервуара на рост внутреннего давления, разрыв сосуда и влияние характеристик стенок на процесс раскрытия оболочки после разгерметизации при взрыве сосудов высокого давления со сжиженным пропаном (объем резервуара составлял 400 л) изучались в работах [25÷29]. Важным результатом исследования явилось определение диапазонов для

параметров, при которых нагрев сосуда высокого давления может привести к BLEVE. Экспериментально была установлена и возможность возникновения двух типов выбросов, получивших название «холодных» и «горячих» BLEVE.

1.2 Аэрозолеобразование при мгновенном вскипании

Важной особенностью аварийных выбросов является возможность образования облака паров опасного вещества, содержащего мелкодисперсные аэрозольные жидкие капли.

В зависимости от условий хранения вещества, геометрии резервуара, внешних условий, характера и продолжительности разгерметизации, физико-химических свойств вещества возможны различные механизмы образования аэрозолей при аварийных выбросах [5, 30, 17].

Одним из случаев образования аэрозолей, как было уже упомянуто выше, является ударное вскипание жидкости, в результате которого расширяющиеся пары диспергируют и увлекают часть жидкости, поэтому образующееся облако содержит смесь пара и жидкости в виде капель мелкодисперсного аэрозоля.

Другой случай образования аэрозолей — частичная разгерметизация резервуара. В случае, когда отверстие находится над поверхностью жидкости и его площадь намного меньше площади горизонтального сечения резервуара, то происходит однофазное истечение паров вещества и аэрозольное облако не образуется. Если площадь отверстия достаточно велика, происходит резкое падение давления в резервуаре, что приводит к бурному вскипанию и вспениванию жидкости в объеме резервуара. В результате, несмотря на то, что отверстие расположено выше поверхности жидкости, истечение происходит в двухфазном режиме и в атмосферу выбрасывается смесь паров вещества и жидких капель [55]. В другом возможном случае, когда отверстие находится ниже уровня жидкости, вещество начинает поступать из резервуара в жидком состоянии. Если отверстие непосредственно соединяет объем резервуара с внешней атмосферой, то результатом станет образование жидкостной струи [4].

Наличие аэрозоля может существенно изменить такие характеристики парового облака, как его плавучесть, время существования опасной концентрации, протяженность взрывоопасной или токсичной зоны при дрейфе облака, концентрационные пределы

воспламенения. Важную роль играют фазовые переходы в объеме аэрозольного облака, влияющие на его состав, температурный режим и рассеяние в атмосфере [4].

Наличие в смеси капельных включений может привести к тому, что не только без воздуха, но и при подмешивании воздуха в процессе распространения получающиеся смеси будут «тяжелыми газами». Это связано с тем, что, во-первых, капли повышают плотность, а во-вторых, по мере испарения капель смесь охлаждается [17, 31, 32].

С учетом образования дисперсного аэрозоля доля вещества, остающегося в жидком состоянии и образующего пролив на поверхности x_1 , составляет [2, 4]:

$$x_1 = 1 - (x_v + x_d), \quad (1.2)$$

где x_d — доля переходящего в аэрозоль вещества.

Масса выброшенных капель жидкости, согласно [5], равна массе мгновенно образовавшейся паровой фазе. Однако в [33] утверждается, что успевает испариться всего лишь половина капель, оказавшихся в аэрозольном облаке. В то же время, согласно [34], при $x_v \geq 0,35$ вся масса сжиженного газа, находящаяся в оборудовании, за счет взрывного характера испарения переходит в парокпельное облако. При $x_v < 0,35$, оставшаяся часть жидкости испаряется с поверхности пролива за счет потока тепла от подстилающей поверхности и воздуха. В работе [30] принимают $x_d \approx (2-3)x_v$ при $x_v < 0,05$. А в методиках [35, 36] процессом испарения капель вообще пренебрегают.

Экспериментальные исследования образования аэрозольных облаков при разрушении резервуаров со сжиженными газами можно встретить и в работах [37÷39]. В экспериментах при помощи высокоскоростной киносъемки и методом лазерного зондирования определялось распределение капель аэрозоля по размерам, скорость движения переднего фронта видимого облака парожидкостной смеси (состоящей из пара и аэрозольных капель).

Крупномасштабные исследования по распространению аэрозольных облаков проводились компанией British Gas [20] при разрушении торгового судна-хранилища объемом $5,7 \text{ м}^3$ заполненный двумя тоннами бутана (коэффициент заполнения 77% по объему).

Однако данный эксперимент носит только познавательный характер и конкретную информацию не содержит.

Вызывает повышенный интерес проведенные исследования по определению размеров капель в аэрозольном облаке [37, 38, 40÷48].

Обработка экспериментальных данных [37, 38, 40] показала, что зависимость числа капель от диаметра с хорошей точностью описывается логарифмически нормальным распределением [4]:

$$\bar{p}(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \bar{\sigma}}} \exp\left(-0,5 \left(\frac{\ln d_p - \ln \bar{d}_p}{\ln \bar{\sigma}}\right)^2\right), \quad (1.3)$$

где d_p — диаметр аэрозольных капель, м; \bar{d}_p — средний диаметр аэрозольных капель, м; $\bar{p}(d)$ — плотность распределения вероятности, $\bar{\sigma}$ — дисперсия распределения.

Средний диаметр аэрозольных капель в различных опытах колеблется в диапазоне $\bar{d}_p = 30-100$ мкм; несколько меньшие размеры частиц наблюдались в экспериментах по выбросам аммиака: $\bar{d}_p = 10-30$ мкм [41, 42]. Аналогичный интервал средних размеров капель, образующихся при вскипании струи перегретой воды, приведен в [43, 44]: $\bar{d}_p = 10-100$ мкм. Выпадение капель из облаков не наблюдалось ни в одном эксперименте.

Размеры наблюдаемых капель в [46, 47] оказались намного меньше, чем максимальные стабильные диаметры капли, вычисленные при критическом числе Вебера и скорости распространения облака.

Серия экспериментов по изучению характеристик аэрозоля и растекающейся по поверхности фреона-114 была проведена в работе [45]. Сосуды заполнялись полностью и наполовину; для идентификации положения фронта парового облака рядом с сосудом была организована дымовая завеса в виде узкого и плоского вертикального слоя дыма. После разрушения оболочки резервуара распад жидкости на отдельные капли происходил весьма быстро. Начальная скорость капель при этом практически не зависела от их диаметра. Фронт парового облака на начальной стадии (вплоть до окончательной фрагментации жидкости) практически не перемещал дымовую завесу, т.е. не обгонял движущиеся капли. В свою очередь капли аэрозоля двигались сквозь дымовую завесу, не возмущая ее: наблюдалось «разбавление» дыма за счет испарения капель, однако перемещение дымовой завесы как целого отсутствовало. Такое

движение возникало только после того, как разлет капель завершился, и образовавшееся при их испарении облако начинало «растекаться» по поверхности под действием гравитационных сил. Часть жидкости, попавшая в виде капель на поверхность, образовывала лужу, растекающуюся и испаряющуюся с течением времени. Наиболее крупные капли аэрозоля, которые были заметны при высокоскоростной видеосъемке, отвечают числам Вебера $We_p = 15 - 30$ [45]. Указанный диапазон числа Вебера хорошо согласуется с данными экспериментов [37÷39]. Размеры наиболее крупных капель составляли 2,8–3,5 мм, а их скорость разлета — 2,8–3,6 м/с. Температура жидкости, находящейся на поверхности, быстро падала ниже точки кипения ($3,5^{\circ}\text{C}$) за счет интенсивного испарения фреона и составляла на протяжении времени испарения (около 15 сек) $-5-10^{\circ}\text{C}$. Процесс начального разлета облака, как выяснилось, нельзя разделить по времени на два этапа — выделение пара и захват им жидкости [4]. В реальности дробление жидкости на капли происходило практически сразу же после разрушения оболочки - менее чем за 0,1 сек. К окончанию процесса дробления доля пара была намного меньше, чем рассчитанная из соотношения (1.1). В то же время движение парового облака отмечалось лишь тогда, когда разлетающиеся капли успевали либо испариться, либо выпасть на поверхность — на временах порядка нескольких секунд.

В проведенных экспериментах [49÷53] по изучению выбросов паров и аэрозоля в результате разрушения оболочки резервуара высокого давления, наблюдалась следующая последовательность событий: начальное разрушение резервуара, распространение трещины и полное раскрытие стенок, «мгновенное испарение» сжиженного газа, быстрое расширение облака пара, увлечение неиспарившейся жидкости в виде мелких капель, турбулентное смешение парожидкостной смеси с внешним воздухом, полное испарение капель жидкости под действием притока тепла извне, уменьшение концентрации пара за счет смешения с внешним воздухом.

В испытаниях «Пустыня Тортоис» [5] жидкий аммиак под давлением выпускался из трубы. Жидкая струя мгновенно вскипала на выходе из трубы, около 18% жидкости переходило в газовую фазу. Остальные 82% аммиака оставались в виде жидкости, которая размельчалась в аэрозоль от бурного вскипания. Однако сообщается, что часть жидкости, хоть и небольшая, все же достигала грунта.

Как показывают эксперименты [43, 56], испарение перегретой жидкости даже при небольших перепадах температуры (превышающих 7–10% от абсолютной температуры кипения) сопровождается ее дроблением на дисперсные капли.

Исследование режимов испарения аэрозольных капель пропана приведены в работе [4]. Время испарения капель в облаке определяется не только свойствами самих капель, но зависит также от скорости смешения облака с теплым внешним воздухом, служащим источником тепла, необходимым для дальнейшего испарения жидкости. В [4] сообщается о двух предельных режимах испарения капель: «режим смешения» (в том смысле, что глобальные процессы турбулентного смешения облака с окружающей атмосферой определяют скорость испарения индивидуальных капель в облаке) и «режим диффузии» (в том смысле, что процессы молекулярной диффузии у поверхности капли определяют глобальную скорость испарения). Реализация того или иного режима испарения капель зависит от соотношения между характерным временем перемешивания облака с воздухом (зависящим от массы выброса, геометрии течения и т. п.) и характерным временем испарения (зависящим от диаметра капли, внешних условий и т. п.).

В ходе исследования [4] было установлено, что для масс топлива, превосходящих примерно 1 кг, время испарения весьма слабо зависит от размеров капель, что указывает на то, что испарение происходит в «режиме смешения». В тоже время, для меньших масс топлива процесс испарения лимитируется диффузией и безразмерное время полного испарения зависит от диаметра капель. При увеличении массы топлива сверх 1 кг, время испарения несколько возрастает при всех диаметрах капель. Это является результатом того, что для больших масс топлива сильнее сказывается влияние отрицательной плавучести холодного двухфазного облака.

В отличие от рассмотренного выше случая полного разрушения резервуара высокого давления, струйные истечения изучены гораздо более подробно, поскольку возникающее течение, как правило, является квазистационарным и значительно легче поддается экспериментальному и теоретическому исследованию.

Возможны три механизма распада струи — капиллярный, аэродинамический и связанный с быстрым вскипанием. В работе [55] на основе модели, предложенной в [62], разработан метод, позволяющий для заданных параметров истечения жидкостной струи

определить доминирующий механизм распада и оценить размер капель образующегося аэрозоля. Этот метод основан на сравнении характерных расстояний, на которых начинает проявляться тот или иной механизм распада. Доминирующую роль будет играть механизм, отвечающий наименьшей длине распада струи [4].

После начального дробления жидкости устойчивость и дальнейшая эволюция образующихся капель определяется числом Вебера, построенным по диаметру капли:

$$We_p = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot d_p}{\sigma_{liq}}, \quad (1.4)$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м^3 ; v — скорость истечения струи, м/с ; σ_{liq} — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м .

Скорость истечения v определена как функция перепада давления через отверстие ΔP , коэффициента истечения C_D и плотности жидкости ρ_{liq} [48]:

$$v = C_D \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{liq}}}. \quad (1.5)$$

Высокие числа Вебера указывают на преобладание сдвиговых сил над силами поверхностного натяжения, при которых струя неустойчива и диспергируется. При низких числах Вебера преобладают силы поверхностного натяжения, и струя устойчива либо из-за того, что скорость недостаточная низкая, чтобы вызвать распад или большая часть струи была уже диспергирована на устойчивые капли.

Различные механизмы дробления капель в зависимости от величины числа Вебера подробно рассмотрены, например, в работах [7, 57–59].

Максимальный диаметр, при котором капля, обтекаемая потоком с данной скоростью, является устойчивой, соответствует критическому числу Вебера $We_p = 12-22$ [60]. Капли большего диаметра в таком потоке будут дробиться на более мелкие. Сравнение диаметров, отвечающих различным механизмам распада струи, показывает, что при не слишком малых диаметрах выходного отверстия капли, образующиеся по капиллярному механизму распада струи, весьма велики, поэтому они будут быстро выпадать на земную поверхность и их опасность связана в основном с последующим испарением и рассеянием паров в атмосфере в виде шлейфа. Несколько меньшие размеры капель получаются при