

АНАЛИТИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА BLEVE

Н. Н. Старовойтова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург

В статье рассматривается такое опасное явление, как взрыв расширяющихся паров кипящей жидкости (BLEVE). Среди наиболее разрушительных аварий, которые могут произойти в химической промышленности, выделяется BLEVE. Он сопровождается достаточными взрывными волнами и избыточным давлением. В статье дается характеристика этого явления и анализируются методики расчета избыточного давления взрыва BLEVE. Главное внимание обращается на различие методик, применяемых в Российской Федерации и во Франции. В основной части статьи дается описание явления BLEVE. Описываются причины его проявления и формулы, используемые в методиках. На основе анализа метода Baker, метода Prugh, метода Planas-Cuchi и методики МЧС показана разница в подходе определения избыточного давления. В заключение кратко разбираются значительные расхождения в результатах из-за термодинамических допущений – это поведение идеального газа и изохорного расширения пара.

Ключевые слова: BLEVE; взрыв; избыточное давление; анализ методик; энергия взрыва; метод Baker; метод Prugh; метод Planas-Cuchi; методика МЧС; Франция; Российская Федерация.

1. Введение

BLEVE (boiling liquid expanding vapors explosion) – это опасное явление, которое происходит при взрыве жидкости, находящейся под давлением. Когда жидкость быстро нагревается и превращается в пар, давление в емкости, где она хранится, может возрасти до критического уровня. Если в этот момент происходит повреждение емкости, например из-за пожара, жидкость быстро испаряется и расширяется, создавая огромное давление. Это может привести к внезапному взрыву.

Примером BLEVE может служить взрыв емкости с газом в железнодорожном вагоне или автотранспорте. При такой аварии газ, находящийся под высоким давлением, быстро вырывается из емкости, превращаясь в огромное облако, которое может взорваться при любом источнике искры или огня. BLEVE может быть особенно опасным в случаях, когда хранятся легковоспламеняющиеся жидкости, такие как бензин или спирт [1].

2. Материалы и методы

Метод Baker допускает, что максимальная энергия, выделяющаяся при взрыве, будет равна количеству энергии, необходимой для повышения давления газа от давления окружающей среды до давления разрыва, учитывая процесс постоянного объема [2, 3].

Энергия взрыва рассчитывается по формуле Brode [4]:

$$E = \frac{(P_1 - P_0) \cdot V}{(\gamma - 1)}, \quad (1)$$

где P_1 – начальное и конечное (окружающее) давление расширяющегося газа, кПа;
 P_0 – начальное и конечное (окружающее) давление расширяющегося газа, кПа;
 V – общий объем газа, м³; γ – его коэффициент теплоемкости равен 1,4 для двухатомных газов, 1,66 для одноатомных газов или 1,33 для паров воды, отн.ед.

Когда взрыв происходит на уровне земли, расчетное значение энергии обычно умножается на 2, чтобы учесть эффекты земли, такие как отражение ударной волны. Масштабированное расстояние (\bar{R}) рассчитывается по формуле:

$$\bar{R} = r \cdot \left(\frac{P_0}{E}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где r – радиус сосуда, м;

P_0 – начальное и конечное (окружающее) давление расширяющегося газа, кПа;

E – энергия взрыва, кДж.

Затем находится профиль давления с использованием графика масштабирования [5]. Важно отметить, что уравнение Brode является лишь грубым приближением реальности, поскольку оно представляет собой энергию, необходимую для сжатия идеального газа при постоянном объеме от P_0 до P_1 .

Метод Prugh имеет некоторое сходство с методом Baker, описанным в предыдущем абзаце [6, 7]. Однако в методе Prugh, в отличие от метода Baker, энергия взрыва рассчитывается исходя из предположения изотермического расширения идеального газа, т. е., когда происходит взрыв, можно предположить, что расширение газа происходит настолько быстро, что не происходит изменений температуры, поэтому процесс идет по изотермическому пути.

Сначала определяется избыточное давление, P_s , по уравнению:

$$P_b = P_s \cdot \left[1 - \frac{0,035 \cdot [\gamma - 1] \cdot [P_s - 101,3]}{\sqrt{\left(\frac{\gamma \cdot T}{M}\right) \cdot [1 + 0,059 \cdot P_s]}} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (3)$$

где P_s – избыточное давление, кПа;

P_b – давление разрыва сосуда, кПа;

γ – коэффициент теплоемкости расширяющегося газа, отн.ед;

T – абсолютная температура расширяющегося газа, К;

M – молекулярная масса расширяющегося газа, кг/моль.

Затем определяется эквивалентный заряд энергии взрыва по уравнению:

$$W_{TNT} = \frac{(2,4 \cdot 10^{-4} \cdot P_b \cdot V)}{\gamma - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{101}{P_b}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right], \quad (4)$$

где P_b – давление разрыва сосуда, кПа;

V – общий объем пара, м³;

γ – коэффициент теплоемкости расширяющегося газа, отн.ед.

«Виртуальное расстояние» определяется на основе кривых максимального избыточного давления P_s , разрыва и эквивалентного заряда W_{TNT} в тротиловом эквиваленте с использованием расстояния на котором мы хотим узнать давление [5]:

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}}^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

где R – расстояние, на котором мы хотим узнать давление, м;

W_{TNT} – эквивалентный заряд TNT.

Однако, в отличие от метода Baker, здесь вводится виртуальное расстояние для фиктивного перемещения центра взрыва «против ветра» по отношению к поверхности расширяющегося газа, что позволяет использовать традиционный тротильный эквивалент. Масштабированное расстояние, Z , для взрыва находится по графику, при

помощи масштабируемого давления [3]. Полученное таким образом значение виртуального расстояния затем нужно, чтобы получить масштабированное расстояние Z модели TNT, где должно быть определено пиковое избыточное давление по графику [6, 7].

Метод Planas-Cuchi учитывает реальную работу расширения, совершаемую при переходе всего содержимого сосуда (включая как паровую, так и жидкую фазу) из состояния взрыва в конечное состояние (соответствующее атмосферному давлению 101 кПа). Поскольку считается, что процесс адиабатический, то эта работа должна быть равна изменению внутренней энергии содержимого сосуда [8].

Реальная работа по расширению равна $P_0 \cdot \Delta V$, где ΔV представляет собой изменение объема всего содержимого сосуда при переходе его из состояния взрыва в гипотетическое конечное состояние. С другой стороны, для адиабатического процесса эта работа должна быть равна изменению внутренней энергии содержимого сосуда, ΔU .

Эта задача может быть решена графически. На рис. 1 показано изменение U в зависимости от ситуации взрыва и различных условий, определяемых общим давлением 101 кПа и различными условиями равновесия жидкость – пар, соответствующими различным значениям фракции пара. На том же рисунке изменение $P_0 \cdot \Delta V$ также было нанесено на график в зависимости от доли пара, соответствующей теоретическому конечному условию. Пересечение обеих прямых соответствует условию нахождения E по уравнению [9].

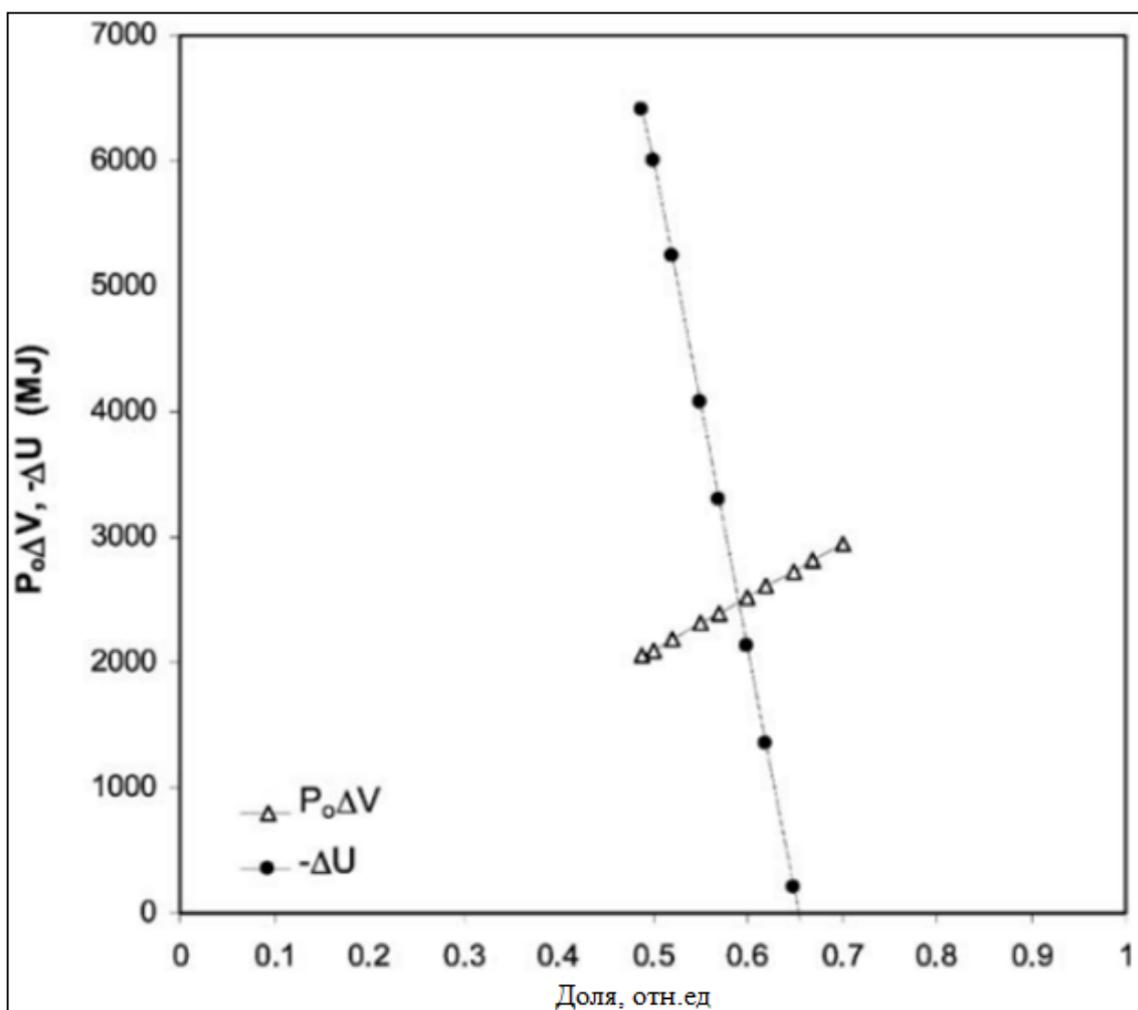
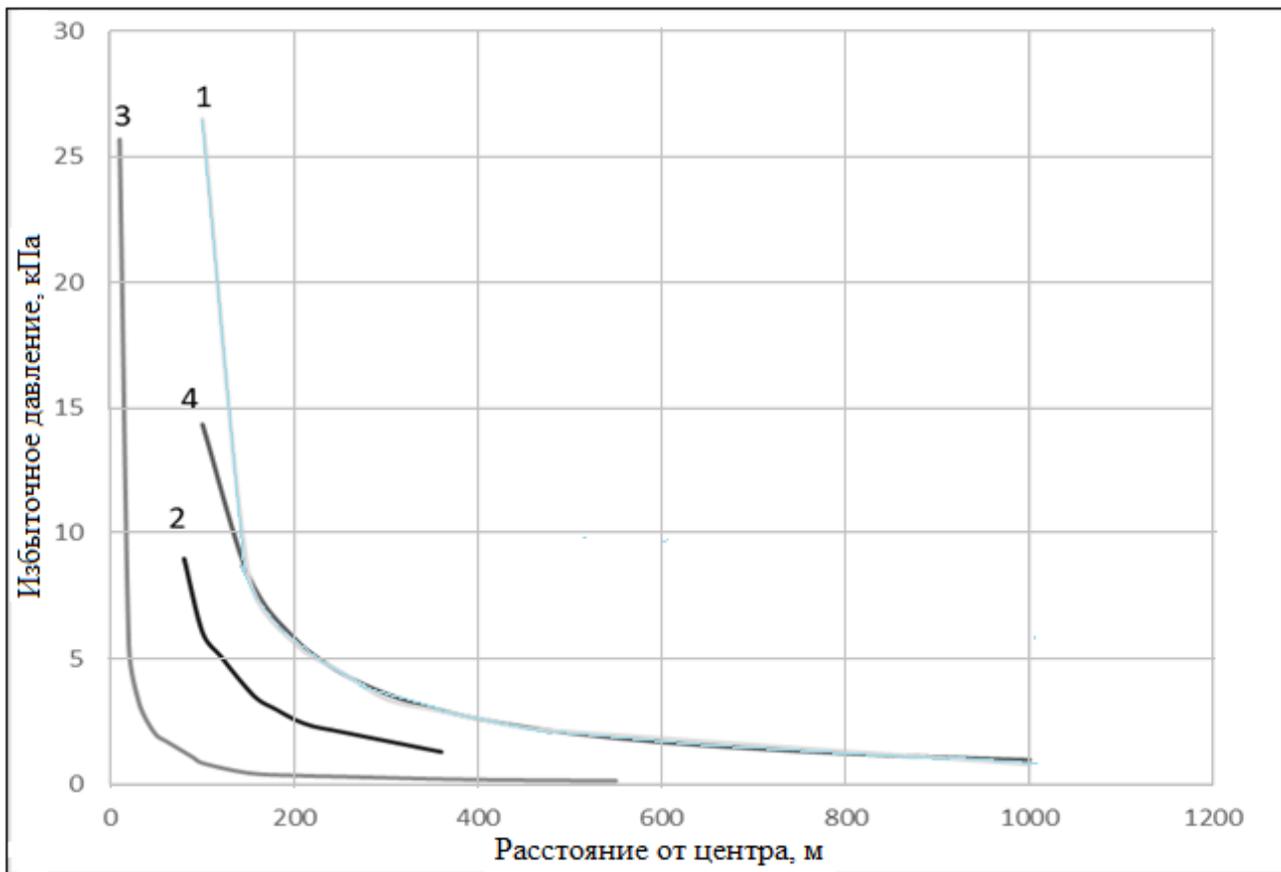


Рис. 1. Изменение U и $P_0 \cdot \Delta V$ в зависимости от доли фракции пара теоретического конечного условия

3. Результаты и выводы

Расчет избыточного давления был произведен по графику на рис. 1.

Для сравнения французских методов с российской методикой МЧС, а также проверки полученных результатов была смоделирована авария и сопоставлены профили избыточного давления в зависимости от расстояния от центра взрыва. Рассмотренные варианты различаются по расстояниям, на которых рассчитывается избыточное давление: сферический сосуд объемом 125 м^3 со сжиженным пропаном. На рис. 2 показаны профили избыточного давления в зависимости от расстояния от центра резервуара объемом 125 м^3 для трех методов и методики МЧС.



1 – Метод Baker, 2 – Метод Prugh, 3 – Метод Planas-Cuchi, 4 – Методика МЧС

Рис. 2. Профили избыточного давления в зависимости от расстояния от центра резервуара объемом 125 м^3

Сначала можно заметить из рис. 2, что модели Baker и Planas-Cuchi дают большие значения избыточного давления, чем модель Prugh и методика МЧС. Однако с увеличением расстояния от центра взрыва разница между моделями становится все меньше. Также при более консервативном подходе метода Baker пороговые расстояния, рассчитанные по этой процедуре, всегда дают большие расстояния по сравнению с расстояниями Prugh.

В методике МЧС используется только два параметра, это приведенная масса и эффективная энергия взрыва. При этом методы: Baker, Prugh и Planas-Cuchi используют значительно большее число параметров, учитывающих физические свойства вещества, процесс постоянного объема (Baker), перемещение центра взрыва «против ветра» по отношению к поверхности расширяющегося газа, предполагают изотермический процесс расширения газа (Prugh) и реальную работу расширения, совершаемую при переходе всего содержимого сосуда из состояния взрыва в конечное состояние (Planas-Cuchi).

4. Список литературы

1. Оценка техногенного риска для линейных и площадочных объектов нефтегазодобывающего комплекса / А. П. Бызов, А. В. Андреев, О. Е. Ковязина, М. Т. Пелех // Проблемы управления рисками в техносфере (2). – Санкт-Петербург: 2019. – № 2. – с. 98–104.
2. Explosion Hazards and Evaluation / W. E. Baker, P. A. Cox, J. J. Kulesz [et al.]. – 1st ed. – New York, USA: Elsevier Science, 1983. – 840 p.
3. *Ahlert, R. C.* Guidelines for consequence analysis of chemical releases. Center for Chemical Process Safety / R. C. Ahlert – New York, USA: American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 1999. – 320 p.
4. *Brode, H. L.* Blast wave from a spherical charge / H. L. Brode // Physics of Fluids. – 1959. – № 2. – P. 217–229.
5. *Kumar A.* Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and bleves. Center for Chemical Process Safety (CCPS) of the AIChE [Текст] / Kumar A. – New York, USA: American Institute of Chemical Engineers, 1994. – 387 p.
6. *Prugh R. W.* Quantitative evaluation of «BLEVE» hazards / R. W. Prugh // J. Fire Protect. Eng. – 1991. – № 3. – P. 9–24.
7. *Prugh R. W.* Quantify BLEVE hazards / R. W. Prugh. // Chem. Eng. Prog. – 1991. – № 87. – P. 66–72.
8. *Planas-Cuchi, E., Salla J.M., Casal J.* Calculating overpressure from BLEVE explosions / Planas-Cuchi E., Salla J.M., Casal J. // J. Loss Prev. Process Ind.. – 2004. – № 17. – P. 431–436.
9. *Planas, E.* BLEVE-Fireball / E. Planas, J. Casal // Handbook of Combustion: Online. – 2010. – P. 1–25.

Сведения об авторах:

Старовойтова Наталья Николаевна, студентка 2 курса магистратуры, направление : «Промышленная безопасность», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, starovnatalia1998@gmail.com.

ANALYTICAL COMPARISON OF METHODS FOR CALCULATING THE EXCESS PRESSURE OF AN EXPLOSION BLEVE

N. N. Starovoitova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

The article deals with such a dangerous phenomenon as the explosion of expanding vapors of boiling liquid (BLEVE). Among the most devastating accidents that can occur in the chemical industry, BLEVE stands out. It is accompanied by sufficient explosive waves and excessive pressure. The article describes this phenomenon and analyzes the methods of calculating the excess pressure of the BLEVE explosion. The main attention is drawn to the difference between the methods used in the Russian Federation and in France. The main part of the article describes the phenomenon of BLEVE. The reasons for its manifestation and the formulas used in the methods are described. The article, based on the analysis of: Baker method, Push method, Planes-Cuchi method and MOE methodology, shows the difference in the approach of determining excess pressure. In conclusion, significant discrepancies in the results due to thermodynamic assumptions are briefly analyzed – these are the behavior of an ideal gas and the isentropic expansion of steam.

Key words: BLEVE; explosion; overpressure; analysis of techniques; explosion energy; Baker method; Push method; Planes-Cuchi method; MOE methodology; France; The Russian Federation.

References

1. Technogenic risk assessment for linear and site facilities of the oil and gas production complex/A.P. Byzov, A.V. Andreev, O. E. Kovyazina, M.T. Pelekh//Risk management problems in the technical sphere (2). - St. Petersburg: 2019. – № 2. – P. 98–104.
2. Explosion Hazards and Evaluation / W. E. Baker, P. A. Cox, J. J. Kulesz [et al.]. – 1st ed. – New York, USA: Elsevier Science, 1983. – 840 p.
3. Ahlert, R. C. Guidelines for consequence analysis of chemical releases. Center for Chemical Process Safety / R. C. Ahlert – New York, USA: American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 1999. – 320 p.
4. Brode, H. L. Blast wave from a spherical charge / H. L. Brode // Physics of Fluids. – 1959. – № 2. – P. 217–229.
5. Kumar A. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and bleves. Center for Chemical Process Safety (CCPS) of the AIChE [Текст] / Kumar A. – New York, USA: American Institute of Chemical Engineers, 1994. – 387 p.
6. Prugh R. W. Quantitative evaluation of «BLEVE» hazards / R. W. Prugh // J. Fire Protect. Eng. – 1991. – № 3. – P. 9–24.
7. Prugh R. W. Quantify BLEVE hazards / R. W. Prugh. // Chem. Eng. Prog. – 1991. – № 87. – P. 66–72.
8. Planas-Cuchi, E., Salla J.M., Casal J. Calculating overpressure from BLEVE explosions / Planas-Cuchi E., Salla J.M., Casal J. // J. Loss Prev. Process Ind.. – 2004. – № 17. – P. 431–436.
9. Planas, E. BLEVE-Fireball / E. Planas, J. Casal // Handbook of Combustion: Online. – 2010. – P. 1–25.