



УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.107.1.002

© 2023. Все права защищены.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ГАЗОВЫХ СРЕД ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Соколов И. П.\*, д-р хим. наук (isokolov@secnrs.ru),  
Понизов А. В.\*, канд. техн. наук (ponizov@secnrs.ru),  
Попков В. А.\*, канд. техн. наук (popkov@secnrs.ru),  
Шарафутдинов Р. Б.\*, канд. техн. наук (charafoutdinov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 27 января 2023 г.

### Аннотация

*Определение давления и температуры продуктов взрыва газовых сред имеет важное значение для анализа потенциальных аварий на объектах ядерного топливного цикла. В настоящее время отсутствуют методы расчета параметров взрыва для реальных условий технологических процессов в радиохимических средах.*

*В связи с этим представляет интерес расчет предельных значений температуры и давления продуктов анализируемых экзотермических реакций, которые зависят от принятых термодинамических ограничений. Система таких ограничений включает различные варианты адиабатических условий протекания реакции. Вследствие этого возникает потребность в сравнительном анализе показателей взрыва для различных вариантов осуществления адиабатического процесса.*

*В статье изложен термодинамический подход к оценке максимального давления взрыва продуктов неуправляемых газовых реакций, возможных на объектах ядерного топливного цикла.*

*Проведен анализ различных вариантов адиабатических условий протекания экзотермических реакций в режиме взрыва. Предложена формула для расчета адиабатической температуры продуктов взрыва в герметичном оборудовании с использованием справочных данных, относящихся к изобарным условиям.*

*Показано снижение расчетного значения максимального давления взрыва в условиях постоянного объема при использовании изобарной адиабатической температуры продуктов взрыва вместо изохорной. Предложена схема термодинамического расчета максимального давления взрыва, протекающего в соответствии с адиабатами Пуассона и Гюгонио, с применением расчетного значения изохорной адиабатической температуры. Сопоставлены предельные значения давления взрыва для различных адиабатических условий протекания экзотермической реакции.*

► **Ключевые слова:** термодинамический подход, адиабатические условия, максимальное давление взрыва, объекты ядерного топливного цикла.

\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

## THERMODYNAMIC ESTIMATION OF LIMIT VALUES FOR INDICATORS OF EXPLOSION PRODUCTS IN GASEOUS ENVIRONMENTS OF NUCLEAR FUEL CYCLE FACILITIES

Sokolov I. P.\*, D. Sc.,  
Ponizov A. V.\*, Ph. D.,  
Popkov V. A.\*, Ph. D.,  
Sharafutdinov R. B.\*, Ph. D.

Article is received on January 27, 2023.

### *Abstract*

*Estimation of pressure and temperature values for explosion products in gaseous environments is essential for analysis of potential accidents at nuclear fuel cycle facilities. Nowadays, we lack calculation methods for explosion parameters in real-time process conditions of radiochemical environments.*

*In this regard, the interest is focused on calculation of temperature and pressure limit values for products of exothermic reactions being analyzed, which depend on the adopted thermodynamic limits. The framework of such limits contains various options of adiabatic conditions of the reaction behavior. As a result, the need arises for comparison analysis of explosion indicators for various options of the adiabatic process implementation.*

*The article presents the thermodynamic approach to estimation of the explosion maximum pressure for products of uncontrolled gaseous reactions that can occur at nuclear fuel cycle facilities.*

*The analysis was carried out for various options of adiabatic conditions of exothermic reactions behavior under the explosion mode. The formula was proposed to calculate the adiabatic temperature of explosion products in the sealed equipment using reference data related to isobaric conditions.*

*Reduction of the calculation value of the explosion maximum pressure was demonstrated in conditions of a constant volume using isobar adiabatic temperature for the explosion products instead of the isochoric value. A thermodynamic pattern was proposed for calculation of the maximum pressure of explosion, progressing in accordance with the Poisson and Hugoniot adiabats, along with the use of the calculated value of isochoric adiabatic temperature. The explosion pressure limit values were compared for various adiabatic conditions of exothermic reaction behavior.*

► **Keywords:** *thermodynamic approach, adiabatic conditions, explosion maximum pressure, nuclear fuel cycle facilities.*

\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

## Введение

Международный опыт эксплуатации объектов ядерного топливного цикла (ОЯТЦ) показывает, что повышенную радиационную опасность для персонала, населения и окружающей среды могут представлять аварийные взрывы [1].

В системе нормативного обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ большое значение имеет научно обоснованная оценка показателей взрывоопасности применяемых технологических сред, включая прогнозируемые показатели продуктов взрыва [2].

Так, в соответствии с общими положениями обеспечения безопасности ОЯТЦ [3], в проекте ОЯТЦ должна быть представлена оценка последствий взрыва, а принятая система физических барьеров должна быть устойчива к возможным взрывам на объекте.

Основным показателем для оценки последствий взрыва и устойчивости физических барьеров ОЯТЦ является давление, достигаемое продуктами взрыва.

Согласно государственному стандарту [4] значения максимального давления взрыва следует применять при определении категорий помещений по взрывопожарной и пожарной опасности и при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов.

В [4] установлено, что допускается использовать экспериментальные и расчетные значения максимального давления взрыва. При этом расчет максимального давления взрыва допускается проводить путем использования специального программного обеспечения (реализующего термодинамический расчет давления взрыва при постоянном объеме) либо методом, изложенным в [4], для газо- и паровоздушных смесей.

В Своде правил [5] значение максимального давления взрыва входит в формулу для расчета избыточного давления взрыва. Оно определено как максимальное давление, развиваемое при сгорании стехиометрической смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным. При отсутствии данных, согласно [5], допускается принимать максимальное давление взрыва равным 900 кПа.

Газо- и паровоздушные смеси представляют взрывоопасность при эксплуатации ОЯТЦ, в том числе вследствие выделения радиолитического водорода. Так, в [3] приведено, что обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должно

проводиться при наличии или образовании в технологических процессах смесей горючих газов и паров горючих жидкостей с воздухом или окислителем.

Экспериментальное определение максимального давления взрыва для реальных взрывоопасных радиоактивных сред ОЯТЦ является трудновыполнимой задачей как с методической точки зрения, так и в связи с необходимостью обеспечения радиационной безопасности экспериментальной установки.

Применение изложенного в [4] метода приближенного расчета максимального давления взрыва для оценки взрывоопасности ОЯТЦ ограничено, в том числе, достаточно большой погрешностью определения искомого значения (30 % по [4]). В связи с этим для нахождения путей совершенствования методов расчета максимального давления взрыва представляется целесообразным проведение сравнительного анализа термодинамически обоснованных предельно возможных значений температуры и связанного с ней давления продуктов взрыва для различных типов термодинамических процессов, протекающих в адиабатических условиях.

Цель настоящей статьи – изложение результатов термодинамической оценки предельных значений температуры и давления продуктов взрыва газовых сред для различных типов адиабатических процессов.

## Типы адиабатических процессов

Для термодинамической оценки предельных значений взаимосвязанных между собой температуры и давления продуктов взрыва следует учитывать условия, в которых взрыв может происходить и которые задаются принятыми в термодинамике ограничениями.

Обычно термодинамические системы делят на [6]:

- изолированные, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом;
- закрытые, которые обмениваются с внешней средой энергией, но не обмениваются веществом;
- открытые, которые обмениваются с внешней средой и энергией, и веществом.

В примечании редактора к [6] отмечено, что существует иная классификация, связанная с детализацией энергетического обмена теплотой и работой, по которой термодинамические системы делят на открытые и закрытые, для которых отсутствует обмен вещества с внешней средой. В свою очередь, последние подразделяют на изолированные, адиабатически изолированные (нет теплообмена, но возможно изменение объема при совершении работы)

и замкнутые (возможен теплообмен при постоянстве объема).

С учетом этого, применительно к термодинамической оценке предельных значений температуры и давления продуктов взрыва, можно провести дальнейшую детализацию термодинамических систем, в которых отсутствует теплообмен с внешней средой, и подразделить их на системы, в которых:

- сохраняется постоянным объем, и могут протекать изохорные адиабатические процессы;
- сохраняется постоянным давление, и могут протекать изобарные адиабатические процессы;
- изменение объема и давления происходит в соответствии с адиабатой (равновесной или неравновесной).

Для всех перечисленных вариантов при выделении в системе тепла и отсутствии теплообмена с внешней средой в конечном состоянии системы будут достигаться наибольшие значения температуры, по сравнению со случаями, допускающими теплообмен с внешней средой.

Условия протекания процессов приближаются к адиабатическим в случаях:

- большого масштаба процесса, когда снижается удельная поверхность теплоотдачи от системы к внешней среде;
- усиления тепловой изоляции и снижения теплового потока от нее к внешней среде;
- протекания процесса в системе в режиме взрыва, когда скорость тепловыделения в системе значительно превышает скорость теплоотвода от нее к внешней среде.

В термодинамике различают равновесные и неравновесные процессы перехода от начального к конечному состоянию системы. В [7] отмечено, что число параметров, полностью описывающих равновесное состояние, меньше, чем в любом неравновесном состоянии. Так, равновесное количество идеального газа полностью описывается любыми двумя переменными из трех (давление, объем и температура), в то время как для описания неравновесного состояния необходимы еще градиенты температуры и плотности.

Классическая термодинамика ограничивается рассмотрением состояний равновесия и их изменений, представляющих собой непрерывную последовательность равновесных состояний, которые могут происходить бесконечно медленно [7]. Напротив, взрывы происходят в результате протекания быстрых и необратимых процессов. В связи с этим равновесный процесс и значения его пара-

метров можно рассматривать как предельный случай для неравновесных процессов.

Обычно, в том числе в [4, 5], для оценки предельных значений температуры и давления продуктов взрыва газовых систем используют модель идеального газа.

Для реальных газов отклонения от состояний идеального газа становятся значительными при достаточно высоких давлениях и низких температурах. Для описания реальных газов используют уравнения состояния, в которых учитывают межмолекулярные взаимодействия с помощью эмпирических параметров, индивидуальных для каждого газа [8].

Для большинства газов уравнение состояния идеального газа хорошо описывает экспериментальные данные до давления в несколько атмосфер [6].

В [9] отмечено, что при больших мольных объемах и высоких температурах реальные изотермы мало отличаются от идеальных кривых.

В [10] сообщается, что температуру, давление и состав продуктов сгорания смесей, содержащих водород (которые представляют особую взрывоопасность для ОЯТЦ вследствие выделения радиолитического водорода), можно оценивать по уравнению состояния идеального газа вплоть до уровня давления 50 МПа.

Рассмотренные термодинамические ограничения позволяют обосновать предельно возможные значения температуры и давления продуктов взрыва газовых сред, которые можно использовать при консервативном подходе к оценке взрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ.

Взаимное расположение предельных значений температуры и давления продуктов взрыва газовых сред для различных типов адиабатических процессов показано на диаграмме с координатами давление – объем (см. рисунок).

В соответствии с уравнением состояния идеального газа зависимость между давлением  $P$  и объемом  $V$  газовой системы для различных значений температуры  $T$  и числа молей газообразных компонентов  $n$  имеет вид:

$$P = \frac{nRT}{V}, \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная.

На рисунке изображены три изотермы:

- нижняя зависимость соответствует начальной температуре  $T_0$  и исходному содержанию  $n_0$  газообразных компонентов газовой смеси в момент возникновения взрыва; точка 0 на этой зависимости

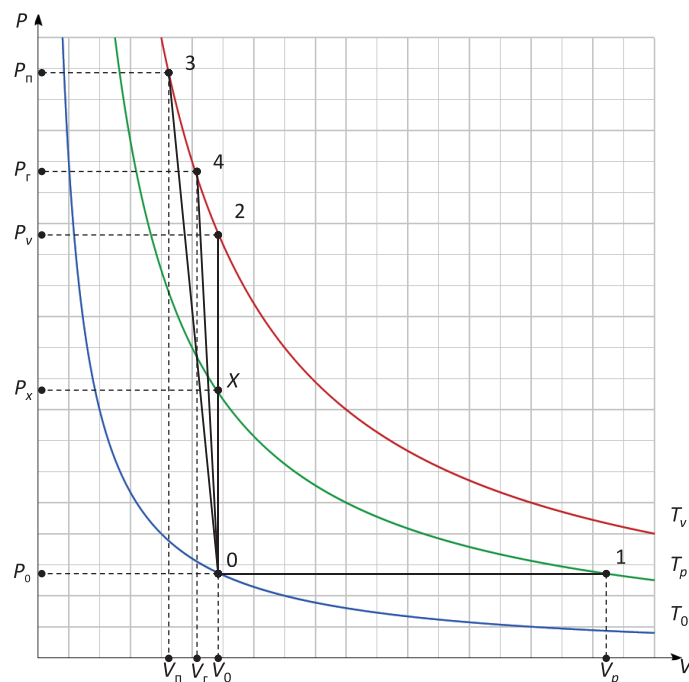


Рис. Диаграмма изотерм  
[Fig. Isotherm diagram]

соответствует начальному давлению  $P_0$  и объему  $V_0$  газовой смеси;

- средняя зависимость соответствует адиабатической температуре  $T_p$  продуктов взрыва, произошедшего при постоянном давлении, и количеству молей газообразных продуктов  $n_k$ ; точка 1 на этой зависимости соответствует начальному давлению  $P_0$  и объему образовавшихся продуктов  $V_p$ ; точка X находится на пересечении линии постоянного объема  $V_0$  и изотермы  $T_p$ ;

- верхняя зависимость соответствует адиабатической температуре  $T_v$  продуктов взрыва, произошедшего при постоянном объеме газовой системы, и количеству молей газообразных продуктов  $n_k$ ; точка 2 на этой зависимости соответствует начальному объему  $V_0$  и достигаемому давлению  $P_v$  продуктами взрыва, точка 3 – адиабатическому сжатию продуктов взрыва до объема  $V_n$  при достижении давления  $P_n$  в соответствии с равновесной адиабатой Пуассона, точка 4 – адиабатическому сжатию продуктов взрыва до объема  $V_r$  при достижении давления  $P_r$  продуктами взрыва в соответствии с ударной адиабатой Гюгонно.

Таким образом, на основании представленной диаграммы, для проведения термодинамической оценки взрывоопасности химико-технологического процесса ОЯТЦ с установленными или постулированными уравнениями химических реакций в общем случае требуется рассчитать предельные значения температур  $T_p$  и  $T_v$  и предельные значения давления, соответствующие этим температурам:  $P_v, P_n$  и  $P_r$ .

### Изобарные условия

Данные по термодинамическим свойствам веществ, приводимые в справочниках, относятся преимущественно к значениям параметров (энтальпии образования, изобарные теплоемкости и др.), применимым для процессов, протекающих при постоянном давлении. Их использование позволяет рассчитывать значения изобарных адиабатических температур и соответствующих им изменений объема при адиабатическом расширении продуктов взрыва. При этом расчет изобарных адиабатических температур может являться базовым при определении предельных значений давления взрыва для различных типов адиабатических процессов.

Важным условием для корректного определения изобарной адиабатической температуры продуктов взрывоопасного химико-технологического процесса является обоснование начального состояния реакционноспособной системы и выбора реакций, способных участвовать в данном взрывном процессе. Особую роль при расчете значений адиабатической температуры играет установление начальной температуры возникновения взрыва.

Обычно выделяют три стадии протекания теплового взрыва:

- 1) период индукции взрывоопасной реакции до температуры самовоспламенения реакционной системы;
- 2) горение с выделением газообразных продуктов;

3) образование ударной волны и протекание реакции в режиме взрыва.

Вследствие сложности фиксации начала периода индукции и образования ударной волны представляется целесообразным при проведении расчета адиабатической температуры продуктов взрыва использовать температуру самовоспламенения реакционноспособной среды в качестве начальной.

В справочниках приводятся значения температуры самовоспламенения для изученных взрывоопасных веществ и материалов. Однако при их использовании необходимо учитывать, что температура самовоспламенения в значительной степени зависит от состава реакционной смеси, масштаба процесса, давления газовой смеси, а для радиохимических сред ОЯТЦ – от дозы облучения [1].

Для обоснованной реакции, установленной начальной температуры  $T_0$ , известных значений энтальпий образования веществ  $\Delta H_{298}^\circ$ , а также изобарных теплоемкостей  $C_p$  можно рассчитать тепловой эффект реакции взрывчатого превращения:

$$\Delta H^\circ(T_0) = \Delta H_{298}^\circ + \int_{298}^{T_0} \Delta C_p \cdot dT, \quad (2)$$

где  $\Delta H^\circ(T_0)$ ,  $\Delta H_{298}^\circ$  и  $\Delta C_p$  – разности стандартных энтальпий образования и изобарных теплоемкостей продуктов реакции и реагентов с учетом стехиометрических коэффициентов реакции и температурных зависимостей  $C_p$ .

Обычно зависимость изобарной теплоемкости от температуры имеет вид:

$$C_p = a + bT + cT^{-2}. \quad (3)$$

Для определения изобарной адиабатической температуры  $T_p$  газовой смеси составляют тепловой баланс:

$$\Delta H^\circ(T_0) = \int_{T_0}^{T_p} \sum C_p \cdot dT, \quad (4)$$

где  $\sum C_p$  – сумма изобарных теплоемкостей продуктов реакции с учетом стехиометрических коэффициентов реакции и температурных зависимостей  $C_p$ .

В соответствии с (3) и (4) значение изобарной адиабатической температуры  $T_p$  находят из решения уравнения типа:

$$T_p + A \cdot T_p^2 + B \cdot T_p^{-1} = C, \quad (5)$$

где  $A, B, C$  – постоянные расчетные значения.

Для состава реакционной смеси, отличной от стехиометрической (при использовании избытка реагентов, инертных добавок), следует:

- в уравнении (2) использовать значение  $T_0$ , соответствующее температуре самовоспламенения для данного состава;

- в уравнении (4) в  $\sum C_p$  добавить сумму изобарных теплоемкостей компонентов, не участвующих в реакции, с учетом их мольного количества и температурных зависимостей изобарных теплоемкостей.

Для случая, когда часть газовой смеси нагрета до температуры самовоспламенения  $T_0$  внешним источником, а другая часть  $\alpha$  смеси при этом имеет более низкую температуру  $T_x$ , тепловой баланс для определения изобарной адиабатической температуры  $T_p$  можно записать в виде:

$$\Delta H^\circ(T_0) = \alpha \int_{T_x}^{T_0} \sum C_p(\text{исх}) dT + \int_{T_0}^{T_p} \sum C_p(\text{пр}) dT, \quad (6)$$

где  $\sum C_p(\text{исх})$  и  $\sum C_p(\text{пр})$  – суммы изобарных теплоемкостей исходных веществ и продуктов реакции с учетом их мольных количеств и температурных зависимостей.

Для вариантов определения изобарной температуры продуктов реакции с учетом фазовых превращений компонентов реакционной системы или взаимодействия компонентов с разными температурами может быть использован подход, изложенный в [11].

Расчет по приведенным формулам применим к определению адиабатических температур не выше 3 000 К. Выше этой температуры следует учитывать потери тепла на ионизацию компонентов реакционной смеси и разрыв связей в молекулах.

### Изохорные условия

С точки зрения обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ наибольший интерес представляет оценка предельных показателей потенциально возможных тепловых взрывов, происходящих в герметичном оборудовании, в условиях постоянства объема технологической среды. Приведенные в нормативных документах [4, 5] методики расчета максимального давления взрыва также относятся к изохорным условиям его протекания.

В обобщенном виде тепловой баланс процесса, протекающего в изохорных условиях, можно записать следующим образом:

$$\Delta U = C_v \cdot (T_v - T_0), \quad (7)$$

где  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии реакционной системы в ходе химического превращения, которое эквивалентно тепловому эффекту реакции, осуществляемой при постоянном объеме;

$C_v$  – суммарная теплоемкость продуктов реакции при постоянном объеме с учетом количества их молей.

Для идеального газа в условиях постоянства объема внутренняя энергия не затрачивается на совершение работы, а обеспечивает рост температуры продуктов реакции. Поэтому взаимосвязь между параметрами, относящимися к изохорным и изобарным условиям протекания процесса в газовой среде, можно записать в виде:

$$\Delta U = \Delta H + (n - n_0) \cdot R(T_v - T_0); \quad (8)$$

$$C_v = C_p - R. \quad (9)$$

Тогда, в соответствии с (4), (8), (9), следует, что:

$$\sum C_v (T_v - T_0) = \sum C_p (T_p - T_0) + \Delta n R (T_v - T_0). \quad (10)$$

Отсюда можно в общем виде определить зависимость между изохорной и изобарной адиабатическими температурами:

$$T_v = \left[ \frac{\sum C_p}{\sum (C_p - R)} \right] \cdot T_p + \left[ \frac{(1 + \Delta n) R}{\sum (C_p - R)} \right] \cdot T_0. \quad (11)$$

Поскольку  $\frac{C_p}{(C_p - R)} > 1$ , из (11) следует, что для изохорного процесса адиабатическая температура  $T_v$  больше, чем  $T_p$  для изобарного процесса. Можно также отметить, что, согласно (11), в сравнимых условиях с увеличением числа молей газообразных продуктов адиабатическая температура  $T_v$  будет увеличиваться.

Зная значение изохорной адиабатической температуры  $T_v$  и используя уравнение (1), можно определить предельное значение давления  $P_v$  продуктов взрыва, протекающего при постоянном объеме реакционной системы. Если же использовать значение изобарной адиабатической температуры  $T_p$  для оценки давления продуктов взрыва при этой температуре и при начальном фиксированном объеме  $V_0$ , то по уравнению (1) будет получено заниженное значение  $P_x$ , по сравнению с давлением продуктов взрыва, при постоянном объеме реакционной системы  $P_v$  (см. рисунок). Такое различие необходимо учитывать при оценке максимального давления взрыва, происходящего при постоянном объеме реакционной системы.

### Условия адиабатического сжатия

При изменении состояний продуктов взрыва, в соответствии с адиабатой (равновесной или ударной), тепловой эффект реакции равен изменению внутренней энергии реакционной системы. Поэтому для процессов данного типа адиабатическая температура продуктов взрыва будет численно равна значению адиабатической температуры, достигаемой в изохорном процессе.

Вместе с тем уменьшение объема реакционной системы в результате сжатия должно приводить к возрастанию давления газообразных продуктов. Так, для равновесной адиабаты Пуассона должно выполняться соотношение:

$$T_v^Y \cdot P_v^{1-Y} = T_0^Y \cdot P_0^{1-Y}, \quad (12)$$

где  $Y = \frac{C_p}{C_v}$ .

Отсюда, рассчитав изохорную адиабатическую температуру  $T_v$  и зная начальные значения температуры  $T_0$  и давления  $P_0$ , можно определить максимально возможное давление продуктов взрыва:

$$P_v^{1-Y} = \left( \frac{T_0}{T_v} \right)^Y \cdot P_0^{1-Y}. \quad (13)$$

Для ударной адиабаты Гюгонио исходное уравнение для определения предельного значения давления  $P_r$  можно записать в виде:

$$\Delta H = \left[ \frac{(P_r - P_0)}{2} \right] \cdot (V_0 + V_r), \quad (14)$$

где  $\Delta H$  – изменение энтальпии в ходе протекания реакции;

$V_r$  – объем продуктов реакции в конечном состоянии реакционной системы.

Используя уравнение состояния идеального газа, уравнение (14) можно преобразовать в виде:

$$\Delta H = \left[ \frac{(P_r - P_0)}{2} \right] \cdot \left( \frac{n_0 T_0}{P_0} + \frac{n_r T_v}{P_r} \right), \quad (15)$$

которое содержит взаимосвязь между предельным значением давления  $P_r$  и адиабатической температурой  $T_v$ , достигаемой в изохорном процессе. После соответствующих преобразований можно получить формулу для расчета предельного давления продуктов взрыва применительно к условиям реализации ударной адиабаты Гюгонио:

$$P_r^2 + \left[ \left( \frac{n_r T_v}{n_0 T_0} - \frac{2 \cdot \Delta H}{n_0 R T_0} - 1 \right) \cdot P_0 \right] \cdot P_r - \left( \frac{n_r T_v}{n_0 T_0} \right) \cdot P_0^2 = 0. \quad (16)$$

Таким образом, определение предельного значения давления, соответствующего ударной адиабате, сводится к решению квадратного уравнения:

$$P_{\Gamma}^2 + A \cdot P_{\Gamma} - B = 0, \quad (17)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные величины.

Условия адиабатического сжатия реализуются при переходе режима дефлаграционного взрыва в режим детонации. В цикле Карно адиабатическое сжатие иллюстрируют опусканием поршня в цилиндре. Аналогичное действие может оказывать, например, добавление сверху в реактор технологической

среды при инициировании взрывного процесса на границе раздела фаз.

### Выводы

1. Установлены соотношения между предельными значениями давления взрыва для различных вариантов осуществления экзотермической реакции, протекающей в адиабатических условиях.
2. Предложена формула для расчета давления взрыва, протекающего при постоянном объеме, с использованием изобарной адиабатической температуры продуктов экзотермической реакции.

### Литература

1. Соколов И. П., Шарафутдинов Р. Б. Введение в обеспечение взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла / Труды «НТЦ ЯРБ». Часть 1. Специфика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2019. – 200 с.
2. Соколов И. П., Понизов А. В., Шарафутдинов Р. Б. Введение в обеспечение взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла / Труды «НТЦ ЯРБ». Часть 2. Система нормативного обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2021. – 202 с.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ). НП-016-05: утв. приказом Ростехнадзора от 28.07.2014 № 326.
4. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М.: Стандартинформ, 2006.
5. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: Стандартинформ, 2009.
6. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
7. Мюнстер А. Химическая термодинамика: уч. изд. / А. Мюнстер; пер. с нем. Е. П. Агеева; под ред. Я. И. Герасимова. – М.: УРСС, 2002. – 295 с.
8. Ерёмин В. В. Основы физической химии: уч. пос.: в 2 ч. / В. В. Ерёмин и др.; под ред. Е. Э. Григорьева. – 2-е изд., перераб. и доп. Ч. 1. Теория. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2013. – 319 с.
9. Эткинс П., де Паула Дж. Физическая химия: уч. изд.: в 3 ч. / Ч. 1. Равновесная термодинамика. – М.: Мир, 2007. – 494 с.
10. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 284 с.
11. Соколов И. П. Термодинамический анализ металлотермических реакций: монография / И. П. Соколов. – М.: МГВМИ, 2009. – 63 с.

### References

1. Sokolov I. P., Sharafutdinov R. B. (2019). Vvedenie v obespechenie vzryvobezопасnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla. Spetsifika vzryvobezопасnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla [Introduction to explosion safety of nuclear fuel cycle facilities. Vol. 1. The specifics of explosion hazard of nuclear fuel cycle facilities]. Moscow: SEC NRS, SEC NRS Proceedings (Vols. 1–2). [in Russian].
2. Sokolov I. P., Ponizov A. V., Sharafutdinov R. B. (2021). Vvedenie v obespechenie vzryvobezопасnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla. Sistema normativnogo obespecheniya vzryvobezопасnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla. [Introduction to explosion safety of nuclear fuel cycle facilities. Vol. 2. System of regulatory provisions for nuclear fuel cycle facilities explosion safety]. Moscow: SEC NRS, SEC NRS Proceedings (Vols. 1–2). [in Russian].



3. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii "Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla (OPB OYATTS)" (NP-016-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "General provisions for safety of nuclear fuel cycle facilities" (NP-001-15)]. 2015.
4. GOST 12.1.044-89 (ISO 4589-84). Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazatelei i metody ikh opredeleniya [GOST 12.1.044-89. (ISO 4589-84). Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination]. 1989.
5. SP 12.13130.2009. Opredelenie kategorii pomeshchenii, zdanii i naruzhnykh ustanovok po vzryvopozharnoi i pozharnoi opasnosti [SP 12.13130.2009. Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard]. 2009.
6. Prigogine I., Kondepudi D. (2002). Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigatelei do dissipativnykh struktur [Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures]. Moscow: Mir. [in Russian].
7. Munster A. (2002). Khimicheskaya termodinamika [Chemical thermodynamics]. A. Myunster, E. P. Ageev (Trans.), Ya. I. Gerasimov (Ed.). Textbook. Moscow: URSS. [in Russian].
8. Eremin V. V. (2013). Osnovy fizicheskoi khimii. Teoriya [Fundamentals of physical chemistry. Vol. 1. Theory]. V. V. Eremin et al., E. Eh. Grigor'ev (Ed.). Textbook (Vols. 1–2). Moscow: Binom. Knowledge Lab. [in Russian].
9. Atkins P., De Paula J. (2007). Fizicheskaya khimiya. Ravnovesnaya termodinamika [Physical Chemistry. Vol. 1. Equilibrium Thermodynamics]. Textbook (Vols. 1–3). Moscow: Mir. [in Russian].
10. Gelfand B. E., Popov O. E., Chaivanov B. B. (2008). Vodorod: parametry goreniya i vzryva [Hydrogen: combustion and explosion parameters]. Moscow: FIZMATLIT. [in Russian].
11. Sokolov I. P. (2009). Termodinamicheskii analiz metallotermicheskikh reaktsii [Thermodynamic analysis of metallothermic reactions]. Monography. Moscow: MSEMI. [in Russian].

#### Сведения об авторах

*Соколов Иван Павлович*, главный научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Понизов Антон Владимирович*, начальник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Попков Владислав Александрович*, заместитель начальника отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Шарафутдинов Рашет Борисович*, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

#### Authors credentials

*Sokolov Ivan Pavlovich*, Chief Researcher of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: isokolov@secnrs.ru.

*Ponizov Anton Vladimirovich*, Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

*Popkov Vladislav Aleksandrovich*, Deputy Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: popkov@secnrs.ru.

*Sharafutdinov Rashed Borisovich*, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

**Для цитирования**

*Соколов И. П., Понизов А. В., Попков В. А., Шарафутдинов Р. Б.* Термодинамическая оценка предельных значений показателей продуктов взрыва газовых сред объектов ядерного топливного цикла // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 1 (107). С. 18–27. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.107.1.002.

**For citation**

*Sokolov I. P., Ponizov A. V., Popkov V. A., Sharafutdinov R. B.* Thermodynamic estimation of limit values for indicators of explosion products in gaseous environments of nuclear fuel cycle facilities. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2023, No. 1 (107), pp. 18–27. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.107.1.002.

