



Предупреждение аварий

УДК 502.55:66.048.912

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29010

**Исследование интенсивности испарения на примере ацетона в целях определения экологического вреда и потенциальной опасности для технологических объектов**

*А. А. Клокова<sup>1</sup>✉, А. М. Габдуллина<sup>1</sup>, В. В. Богач<sup>1</sup>, В. Ю. Виноградов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия, e-mail: [klokova.arina2017@gmail.com](mailto:klokova.arina2017@gmail.com)

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия

Поступила в редакцию: 01.07.2025 г.; после доработки: 18.09.2025 г.; принята в печать: 24.09.2025 г.

**Аннотация** – В статье представлены результаты экспериментального исследования интенсивности испарения ацетона. Установлено, что экспериментально определенная интенсивность испарения превышает расчетные значения, полученные по существующим методикам. Особое внимание уделено анализу влияния скорости движения воздуха на процесс испарения. При нулевой скорости воздушного потока выявлено максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными данными.

*Ключевые слова:* интенсивность испарения, ацетон.

Chemical accident / incident prevention

UDC 502.55:66.048.912

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29010

**Investigation of the evaporation rate of certain substances in order to determine environmental harm and other characteristics of the potential danger of technological facilities**

*Arina A. Klokova<sup>1</sup>✉, Albina M. Gabdullina<sup>1</sup>, Vitaly V. Bogach<sup>1</sup> and Vasily Yu. Vinogradov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, e-mail: [klokova.arina2017@gmail.com](mailto:klokova.arina2017@gmail.com)

<sup>2</sup>Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

Received: July 1, 2025; Revised: September 18, 2025; Accepted: September 24, 2025

**Abstract** – The article presents the results of an experimental study of the evaporation rate of acetone. It has been established that the experimentally determined evaporation rate exceeds the calculated values obtained using existing methods. Special attention is paid to the analysis of the

effect of air velocity on the evaporation process. Maximum discrepancy between experimental and calculated data is revealed at zero air flow velocity.

*Keywords:* evaporation rate, acetone.

### ВВЕДЕНИЕ

Расчет массы испарившегося вещества с поверхности разлива опасных веществ в случае аварии проводится в целях определения экологического вреда, вертикальных и горизонтальных размеров взрывоопасных зон, зон токсического поражения, воздействия ударной волны, установления категории взрывоопасности технологических блоков, отнесения помещений, зданий и наружных установок к категориям по взрывопожарной и пожарной опасности [1–4]. Таким образом, корректное определение параметров испарения является обязательным условием при проектировании, а также эксплуатации опасных производственных объектов в целях разработки мер для предупреждения и ликвидации аварий и их последствий.

В соответствии с [1–4] для ненагретых выше температуры окружающей среды ЛВЖ при отсутствии экспериментальных данных допускается рассчитывать интенсивность испарения по формуле:

$$W = 10^{-6} n M^{0.5} P_H, \quad (1)$$

где  $P_H$  – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости, определяемое по справочным данным [5], кПа;

$M$  – молярная масса, г/моль;

$n$  – коэффициент принимаемый по ГОСТу [1] в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения;

Масса испарившегося вещества определяется по формуле:

$$m = W F T, \quad (2)$$

где  $W$  – интенсивность испарения (масса вещества, испаряющегося с единицы площади поверхности за единицу времени), кг/(м<sup>2</sup>с);

$F$  – площадь поверхности испарения, м<sup>2</sup>;

$T$  – время испарения, с;

При этом методиками [1–4] рекомендуется выполнение расчета массы испарения при значении  $n = 1$ , т.е. при скорости движения воздуха 0 м/с.

По результатам ряда исследований [5, 6] отмечено, что экспериментальные данные не всегда совпадают с результатами расчета по формуле (1).

В данной статье проведено сравнение теоретической массы и интенсивности испарения, определенной по формулам (1) и (2) с данными, вычисленными по результатам экспериментов, проведенными в различных условиях.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования было выбрано вещество – ацетон, для которого известно значение  $P_H$  в интервале температур проведения экспериментов [5].

Исследования проводили в вытяжном шкафу в диапазоне температур от 21 до 26°C при скорости движения воздуха над поверхностью пролива: 0 м/с, 0,5 м/с и 1 м/с. Скорость движения воздуха и температура измерялась анемометром testo 410-2 погрешность при измерении скорости воздуха  $\pm (0,2 \text{ м/с} + 2\% \text{ от измеряемых значений})$ , погрешность измерения температуры равна  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . В связи с тем, что методиками [1–4] особое внимание отводится определению массы испарения при скорости движения воздуха над поверхностью испарения 0 м/с, в ходе проведения эксперимента все возможные точки подачи и выхода воздуха из объема вытяжного шкафа были физически перекрыты.

Процесс испарения проходил в чашках Петри, измерение массы испарившегося вещества фиксировали на электронных весах CAS MWP-300, погрешность при измерении 0,01 г. При различных скоростях было проведено не менее 6 независимых повторных опытов.

Для корректного сравнения результатов эксперимента, экспериментальные данные массы испарения были приведены к единой температуре. Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению давления насыщенных паров и, следовательно, массы вещества, перешедшего в газообразное состояние, что следует из уравнений (1) и (2). Для приведения массы к единой температуре использовалось уравнение (3), полученное путем преобразования уравнений (1) и (2):

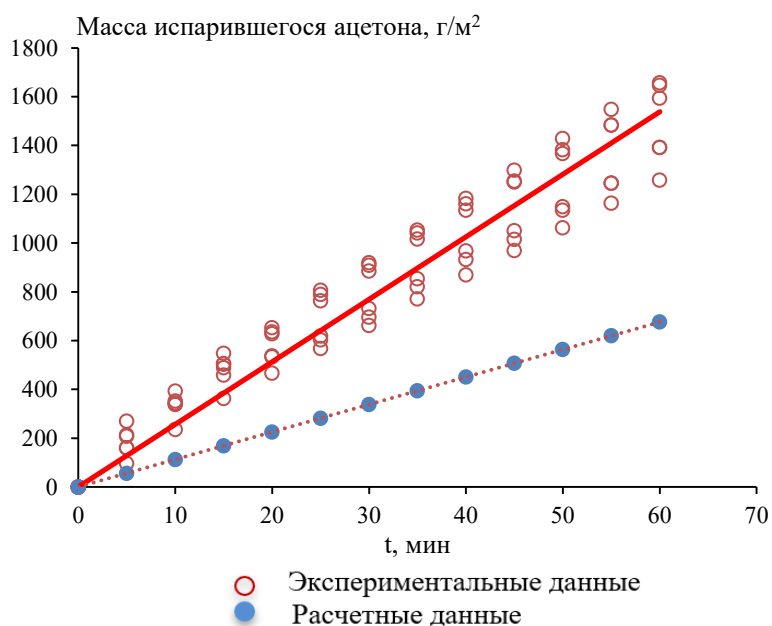
$$m_{20} = m_X n_{20} P_{H20} / (n_X P_{HX}), \quad (3)$$

где  $m_{20}$  и  $m_X$  – масса испарившегося вещества при температуре 20°C и X°C, соответственно;

$n_{20}$  и  $n_X$  – значения коэффициента  $n$  при температуре 20°C и X°C, соответственно;

$P_{H20}$  и  $P_{HX}$  – давление насыщенных паров при температуре 20°C и X°C, соответственно.

На графиках приведены экспериментальные и расчетные (эмпирические) результаты определения массы испарения для ацетона (рис. 1) при скорости движения воздуха 0 м/с, приведенные к температуре 20°C и к единице поверхности  $\text{м}^2$ , а также аппроксимирующая кривая для экспериментальных и расчетных значений.



**Рис. 1.** Изменение массы испарившегося ацетона ( $\text{г/м}^2$ ) во времени при скорости движения воздуха  $0 \text{ м/с}$  и  $20^\circ\text{C}$ .

**Fig. 1.** Change in the mass of evaporated acetone over time ( $\text{g/m}^2$ ) at an air speed of  $0 \text{ m/s}$  and  $20^\circ\text{C}$ .

По результатам обработки экспериментальных данных и вычислений по формуле (1) были получены значения интенсивности испарения веществ в зависимости от скорости движения воздуха при температуре  $20^\circ\text{C}$ , которые приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Экспериментальные и эмпирические значения интенсивности испарения для ацетона при  $20^\circ\text{C}$  в зависимости от скорости движения воздуха

**Table 1.** Experimental and empirical values of evaporation intensity for acetone at  $20^\circ\text{C}$  depending on air velocity

Скорость движения воздуха м/с	W экспериментальное, $\text{г/м}^2 \text{ с}$	W расчетное, $\text{г/м}^2 \text{ с}$	Отклонение, %
0	0,43	0,19	127%
0,5	1,02	0,88	16%
1	1,74	1,45	20%

Из приведенных данных следует, что при скорости воздуха  $0 \text{ м/с}$  наблюдается наибольшее расхождение эмпирических и экспериментальных значений. По результатам обработки экспериментальных данных, определено, что для корректной оценки расчета массы испарения исследованного вещества в данных условиях по формулам (1) и (2) рекомендуется использовать следующие значения коэффициента  $n$ :

**Таблица 2.** Сравнение эмпирического и экспериментального значения  $n$  для ацетона**Table 2.** Comparison of empirical and experimental values of  $n$  for acetone

Скорость движения воздуха, м/с	Экспериментальное $n$	Эмпирическое $n$
0	2,3	1
0,5	6	5,4
1	8,5	7,7

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что экспериментально полученная величина интенсивности испарения ацетона выше, определяемой расчетным путем по методикам [1–4], причем наибольшее отклонение наблюдается при скорости движения воздуха 0 м/с. Таким образом, для:

- оценки вертикальных и горизонтальных размеров взрывоопасных зон и зон воздействия ударной волны,
- установления категории взрывоопасности технологических блоков,
- отнесения помещений, зданий и наружных установок к категориям по взрывопожарной и пожарной опасности,
- определения экологического вреда в результате аварий с разгерметизацией оборудования, содержащего ацетон

при оценке массы испарения ацетона рекомендуется принимать значение коэффициента  $n=2,3$  в формуле (1), для скорости движения воздуха 0 м/с.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests.

### Список литературы:

1. ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» <https://docs.cntd.ru/document/1200103505> (дата обращения 20.06.2025).
2. СП 12.13130-2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=188234> (дата обращения 21.06.2025).
3. Приказ МЧС РФ от 26 июня 2024 г. N 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах». <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409515151/> (дата обращения 20.06.2025).
4. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2020 № 533 об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих

производств». <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012250048> (дата обращения 25.06.2025).

5. Бобылев В. Н. (2003). Физические свойства наиболее известных химических веществ. Справочное пособие. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева.
6. Галеев А. Д., Поникаров С. И., Долгова М. А. (2012). Численный анализ процесса испарения однокомпонентной жидкости с поверхности аварийного пролива в условиях неизотермичности. *Химическая промышленность сегодня*, (2), 43–48. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17434084>
7. Богач В. В., Виноградов В. Ю., Хайруллина Л. И., Пучкова О. А. (2024). Особенности определения массы испарения веществ из растворов при расчете экологического вреда окружающей среде. *Химическая безопасность*, 8(1), 8–16. <https://doi.org/10.25514/CHS.2024.1.26001>.

#### References:

1. GOST R 12.3.047-2012 “Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control” <https://docs.cntd.ru/document/1200103505> (accessed 20.06.2025). (in Russ).
2. SP 12.13130-2009 “Definition of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards”. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=188234> (accessed 21.06.2025). (in Russ).
3. Order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation No. 533 dated June 26, 2024 “On Approval of the Methodology for determining calculated Fire Risk values at production facilities” <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409515151/> (accessed 20.06.2025). (in Russ).
4. Order No. 533 of the Federal Environmental, Technological and Nuclear Supervision Service dated 12.15.2020 On Approval of Federal Standards and Regulations in the Field of Industrial Safety “General Rules of Explosion Safety for Explosive Chemical, Petrochemical and Oil Refining industries”. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012250048> (accessed 25.06.2025). (in Russ).
5. Bobylev V. N. (2003) Physical properties of the most famous chemicals: A reference manual. М.: МУКТР. (in Russ).
6. Galeev A. D., Ponikarov S. I., & Dolgova M. A. (2012). Numerical analysis of the evaporation process of a single-component liquid from the surface of an emergency strait under non-isothermal conditions *Khimicheskaya Promyshlennost Segodnya* = *Chemical industry today*. (2), pp.43–48. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17434084>. (in Russ).
7. Bogach V. V., Vinogradov V. Yu., Khairullina L. I., & Tuchkova O. A. (2024). Features of determining the mass of evaporation of substances from solutions when calculating environmental damage to the environment. *Khimicheskaya Bezopasnost* = *Chemical Safety Science*, 8(1), pp.8–16. <https://doi.org/10.25514/CHS.2024.1.26001>. (in Russ).