



Исследование зависимости интенсивности испарения углеводородов от давления насыщенного пара и скорости движения воздуха

А. А. Идрисова¹✉, В. В. Богач¹, В. Ю. Виноградов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия, e-mail: KlokovaAA@corp.knrtu.ru

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

Поступила в редакцию: 31.03.2026 г.; после доработки: 28.04.2026 г.; принята в печать: 29.04.2026 г.

Аннотация – В статье исследована интенсивность испарения углеводородов (пентан, гексан, гептан, октан) при различных скоростях воздушного потока. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных, выявившее их существенные расхождения. Установлено, что при отсутствии движения воздуха интенсивность испарения линейно зависит от давления насыщенного пара, а при его наличии возрастает влияние аэродинамического фактора. Результаты могут быть использованы для уточнения методик расчёта испарения ЛВЖ. Были выведены формулы для расчета интенсивности испарения при 0 м/с и для расчета поправочного коэффициента при скорости движения воздуха до 1 м/с.

Ключевые слова: интенсивность испарения, углеводороды, давление насыщенного пара.

Chemical hazard sources. Hazardous chemical substances

Study of the dependence of hydrocarbon evaporation rate on saturated vapor pressure and airflow velocity

Arina A. Idrisova¹✉, Vitaly V. Bogach¹, and Vasily Yu. Vinogradov²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, e-mail: KlokovaAA@corp.knrtu.ru

²Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

Received: March 31, 2026; Revised: April 28, 2026; Accepted: April 29, 2026

Abstract – The article investigates the evaporation rate of hydrocarbons (pentane, hexane, heptane, octane) at different air flow velocities. A comparison of experimental and calculated data revealed

significant discrepancies. It was found that in the absence of airflow, the evaporation rate linearly depends on the saturated vapor pressure, while the influence of aerodynamic factors increases with airflow. The results can be used to improve methods for calculating the evaporation of flammable liquids. Formulas were derived for calculating the evaporation intensity at 0 m/s and for calculating the correction factor at air velocities up to 1 m/s.

Keywords: evaporation rate, hydrocarbons, saturated vapor pressure.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире повышенное внимание уделяется вопросам загрязнения окружающей среды. Согласно требованиям законодательства, предприятия, на которых обращаются нефть и нефтепродукты, должны учитывать возможные последствия и риски от аварий, связанных с их разливами, а также разрабатывать планы мероприятий по ликвидации и локализации аварий. Один из основных факторов при прогнозировании последствий аварий является интенсивность испарения. Корректное определение массы испарившегося вещества является необходимым для оценки нанесенного ущерба при авариях с жидкими углеводородами. Как было показано ранее [1], существующие методики [2–5] не во всех случаях имеют достаточную точность при расчёте массы испарившегося вещества.

В данной статье приведен анализ экспериментальных и теоретических данных по испарению ряда углеводородов: пентан, гексан, гептан, октан. Перечисленные вещества были выбраны в целях последующей возможности анализа модельных смесей, например, бензина. Бензин представляет собой сложную многокомпонентную смесь, однако его основные эксплуатационные свойства (испаряемость, детонационная стойкость) определяются содержанием углеводородов, выкипающих в определенном температурном интервале. Указанные четыре алкана являются основными маркерами узких фракций бензина: пентановая, гексановая, гептановая и октановая фракции покрывают ключевой диапазон температур кипения товарного бензина (от 30°C до 125°C). Они позволяют смоделировать поведение как легких (пусковых), так и средних (рабочих) фракций топлива. [6].

В соответствии с [2–5] для ненагретых выше температуры окружающей среды легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) при отсутствии экспериментальных данных допускается рассчитывать интенсивность испарения по формуле:

$$W_{\text{теор}} = 10^{-6} n M^{0,5} P_{\text{Н}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{Н}}$ – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости, кПа;

M – молярная масса, г/моль;

n – коэффициент, принимаемый по ГОСТу [2] в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения; Масса испарившегося вещества определяется по формуле:

$$m = W_{\text{теор}} F T, \quad (2)$$

где $W_{\text{теор}}$ –интенсивность испарения (масса вещества, испаряющегося с единицы площади поверхности за единицу времени), кг/(м²с);

F –площадь поверхности испарения, м²;

T –время испарения, с;

При этом методиками [2–5] рекомендуется выполнение расчета массы испарения при значении $n = 1$, т.е. при скорости движения воздуха 0 м/с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика эксперимента была приведена в предыдущей статье по данной теме [1].

Эксперимент проводился при различных скоростях движения воздуха, расчет теоретических значений $W_{\text{теор}}$ был проведен по методике, приведённой в ГОСТ [2]. На основе экспериментальных значений были рассчитаны значения интенсивности испарения ($W_{\text{эксп}}$) для углеводородов. На рис. 1 приведен пример зависимости массы испарившегося вещества с 1 квадратного метра площади испарения от времени испарения для н-пентана.

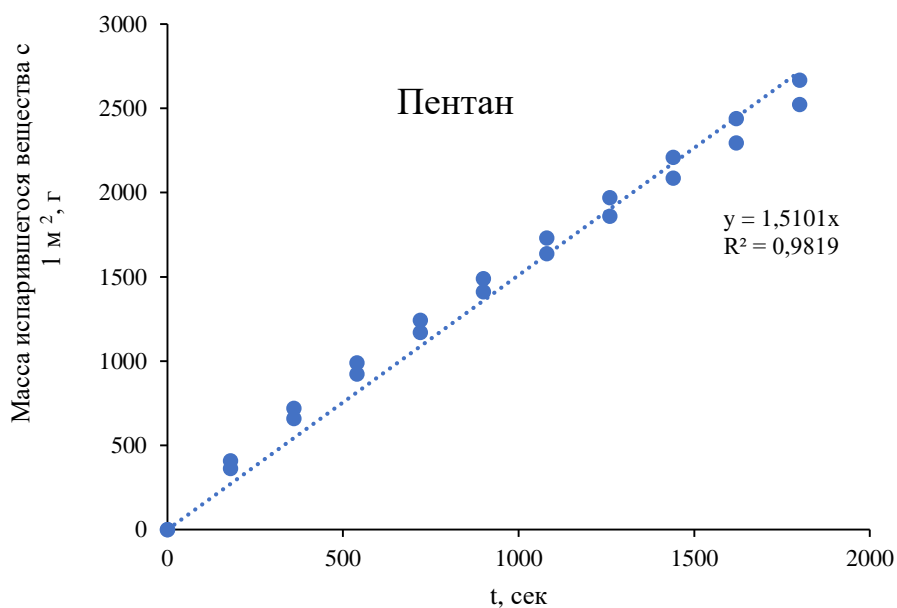


Рис. 1. Зависимость массы н-пентана, испарившегося с 1 квадратного метра площади испарения за определенное время при скорости движения воздуха 0 м/с.

Fig. 1. Dependence of the mass of pentane evaporated from 1 square meter of the evaporation area over a certain time at an air velocity of 0 m/s.

В таблицах 1–3 приведены рассчитанные экспериментальные и теоретические значения по интенсивности испарения выбранных углеводородов при различных скоростях движения воздуха. Для корректного сравнения результатов все значения были приведены к единой температуре. Порядок приведения к единой температуре описан в ранее опубликованной статье [1]. Как видно из данных таблиц 1–3, есть существенная разница между

экспериментальными и теоретическими значениями. Давление насыщенных паров углеводородов принято по [7].

Таблица 1. Экспериментальные и теоретические значения интенсивности испарения для ряда углеводородов при 0 м/с при температуре 25°C

Table 1. Experimental and theoretical values of evaporation intensity for a number of hydrocarbons at 0 m/s at a temperature of 25°C

Углеводород	P_n , кПа	$W_{\text{эксп}}$, г/(м ² с)	$W_{\text{теор}}$, г/(м ² с)
Пентан	68,3	1,52	0,580
Гексан	20,2	0,434	0,188
Гептан	6,1	0,140	0,057
Октан	1,5	0,0446	0,014

Таблица 2. Экспериментальные и теоретические значения интенсивности испарения для ряда углеводородов при 0,7 м/с при температуре 25°C

Table 2. Experimental and theoretical values of evaporation intensity for a number of hydrocarbons at 0,7 m/s at a temperature of 25°C

Углеводород	P_n , кПа	$W_{\text{эксп}}$, г/(м ² с)	$W_{\text{теор}}$, г/(м ² с)
Пентан	68,3	3,987	3,074
Гексан	20,2	1,598	1,072
Гептан	6,1	0,344	0,341
Октан	1,5	0,123	0,078

Таблица 3. Экспериментальные и теоретические значения интенсивности испарения для ряда углеводородов при 1,4 м/с при температуре 25°C

Table 3. Experimental and theoretical values of evaporation intensity for a number of hydrocarbons at 1,4 m/s at a temperature of 25°C

Углеводород	P_n , кПа	$W_{\text{эксп}}$, г/(м ² с)	$W_{\text{теор}}$, г/(м ² с)
Пентан	68,3	4,245	3,668
Гексан	20,2	2,029	1,321
Гептан	6,1	0,499	0,411
Октан	1,5	0,167	0,095

Для установления закономерности была рассмотрена зависимость интенсивности испарения углеводорода от давления насыщенного пара [7]. При движении воздуха 0 м/с интенсивность испарения зависит только от свойств исследуемого вещества, на рис.2 представлена зависимость интенсивности

испарения $W_{\text{эксп}}$ от давления насыщенного пара для всех исследуемых углеводородов.

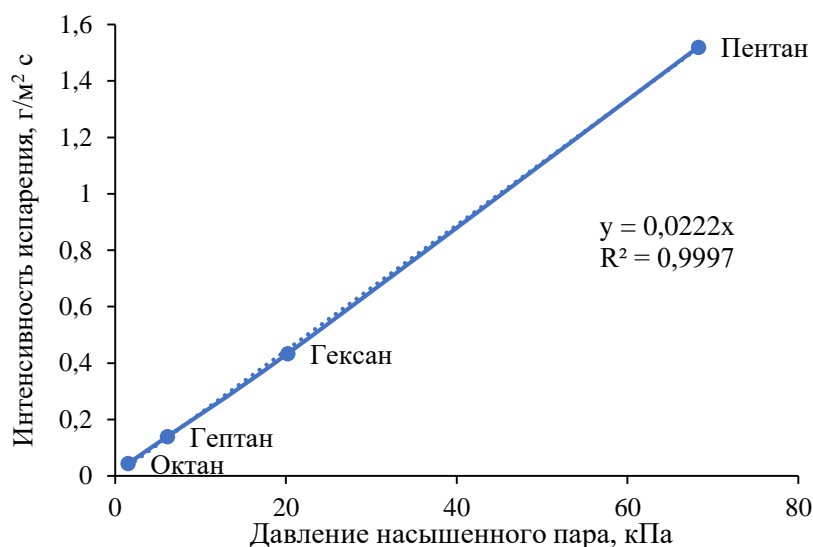


Рис.2. Зависимость интенсивности испарения $W_{\text{эксп}}$ от давления насыщенного пара для всех исследуемых углеводородов

Fig.2. Dependence of evaporation intensity on saturated vapor pressure for all studied hydrocarbons

Исходя из графика следует, что зависимость имеет линейный характер и может быть описана уравнением:

$$W_{\text{эксп}} = 0,0222P_{\text{н}}, \quad (3)$$

Формула (3) имеет лучшую сходимость с результатами эксперимента, чем (1), и она может быть предложена для оценки интенсивности испарения ряда углеводородов при скорости движения воздуха 0 м/с.

Увеличение скорости движения воздуха является существенным внешним фактором воздействия на интенсивность испарения, который может учитываться применением поправочного коэффициента n [2–5].

В целях установления численных значений поправочного коэффициента был проведен анализ данных 48 экспериментов, проведенных с углеводородами, а также ранее проведенных опытов [1] с водой и ацетоном. Величина n определялась, как отношение $W_{\text{эксп}}$ при данной скорости V (например, 0,5 м/с) к $W_{\text{эксп}}$ при $V=0$ м/с. После обработки результатов рассчитаны средние значения коэффициента (n) для различных скоростях движения воздуха V (табл.4). В интервале исследованных значений увеличение скорости движения воздуха более 1 м/с не приводит к существенным изменениям интенсивности испарения, что в целом соответствует положениям методик [2–5]. Проанализировав диапазон полученных данных в диапазоне V от 0 до 1 м/с, был построен график, представленный на рисунке 3, и получена формула зависимости коэффициента n от скорости движения воздуха V :

$$n = 2,99V + 1 \quad (4),$$

которую можно использовать для определения коэффициента влияния скорости движения воздуха в диапазоне от 0 до 1 м/с, а интенсивность испарения, соответственно, может быть определена с учетом коэффициента n :

$$W_{\text{эсп}} = n \cdot 0,0222 P_{\text{н}} \quad (5).$$

Таблица 4. Коэффициент зависимости интенсивности испарения от скорости движения воздуха

Table 4. The coefficient of dependence of evaporation intensity on air velocity

V, м/с	n
0	1
0,5	2,37
0,7	3,12
1	4,05
1,4	3,67

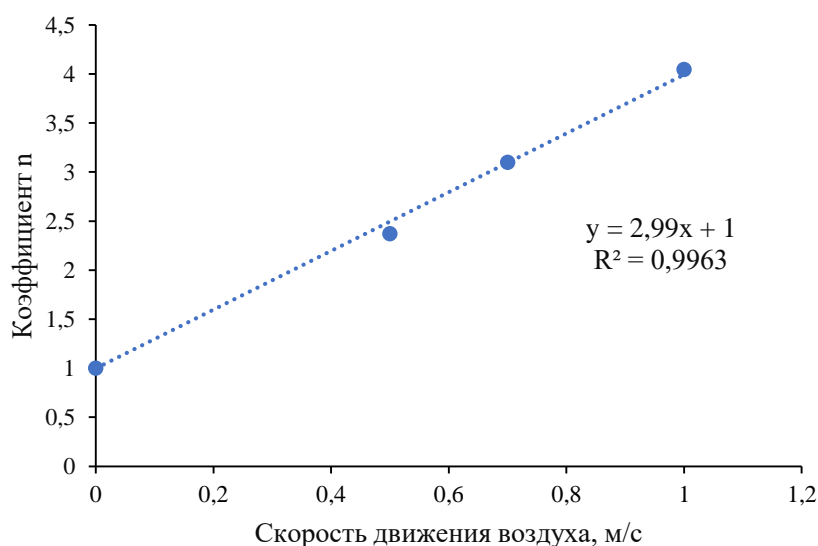


Рис.3. Зависимость коэффициента n от скорости движения воздуха

Fig. 3. Dependence of the n coefficient on the air velocity

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что существующие методики расчёта интенсивности испарения ЛВЖ не обеспечивают достаточной точности в отношении рассмотренного ряда углеводородов, так как наблюдаются значительные расхождения между теоретическими и экспериментальными данными. Установлено, что при скорости движения воздуха 0 м/с интенсивность испарения углеводородов имеет линейную зависимость от давления насыщенного пара и может быть выражена уравнением (3).

С увеличением скорости воздушного потока возрастает влияние аэродинамического фактора, что приводит к изменению интенсивности испарения. Экспериментальные данные подтверждают, что увеличение скорости движения воздуха до 1 м/с существенно влияет на процесс

испарения, что согласуется с положениями методик [2–5]. Результаты исследования показали, что в диапазоне скорости движения воздуха от 0 до 1 м/с зависимость коэффициента n от V имеет линейный характер и описывается уравнением (4).

Список литературы:

1. Клокова А.А., Габдуллина А.М., Богач В.В., Виноградов В.Ю. (2025) Исследование интенсивности испарения на примере ацетона в целях определения экологического вреда и потенциальной опасности для технологических объектов. *Химическая безопасность*, 9(2), 172–177. <https://doi.org/10.25514/CHS.2025.2.29010>
2. 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 20.02.2025).
3. 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 21.02.2025).
4. 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 20.02.2025)
5. 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 25.02.2025).
6. Ахметов С.А. (2002). Технология глубокой переработки нефти и газа. *Уфа.: Гилем*.
7. Бобылёв В.Н. (2003). Физические свойства наиболее известных химических веществ. Справочное пособие. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева.

References:

1. Klokova A.A., Gabdullina A.M., Bogach V.V., Vinogradov V.Yu. (2025) Research of evaporation intensity on the example of acetone in order to determine environmental damage and potential hazard for technological facilities. *Khimicheskaya Bezopasnost' = Chemical Safety Science*, 9(2), 172–177. <https://doi.org/10.25514/CHS.2025.2.29010>.
2. GOST R 12.3.047-2012. Occupational Safety Standards System. Fire Safety of Technological Processes. General Requirements. Control Methods. <https://docs.cntd.ru/document/1200103505> (accessed 20.02.2025).
3. SP 12.13130-2009. Determination of Categories of Rooms, Buildings, and Outdoor Installations for Explosive and Fire Hazard. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=188234> (accessed 21.02.2025).
4. Order No. 533 of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation dated June 26, 2024. On Approval of the Methodology for Determining the Estimated Fire Risk Values at Production Facilities. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409515151/> (accessed 20.02.2025).
5. Order No. 533 of the Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision dated December 15, 2020, approving federal standards and regulations in the field of industrial safety. General Rules for Explosion Safety for Explosive and Fire Hazardous Chemical, Petrochemical, and Oil Refining Plants. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012250048> (accessed 25.02.2025).

6. Akhmetov S.A. (2002). Technology of Deep Oil and Gas Processing. *Ufa: Gilem*,.
7. Bobylev V.N. (2003). Physical Properties of the Most Common Chemical Substances. Reference Guide. Moscow: D. I. Mendeleev Russian Chemical Technological University.