УДК 628

DOI: 10.35887/2305-2538-2019-5-119-124

**МЕТОД РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ТОПЛИВА ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ
НАЗЕМНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ**¹Левин Максим Юрьевич¹Нагорнов Станислав Александрович²Левина Екатерина Юрьевна¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»²ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Реферат. Потери бензина при заполнении резервуара могут достигать от 1 до 4 литров на 1 м³ подаваемого топлива. Существующие методики определения потерь от испарения топлива преимущественно относятся к резервуарам вертикального типа от 400 м³ на крупных нефтебазах, а в сельскохозяйственных предприятиях чаще используют наземные горизонтальные цилиндрические резервуары. Проведено сравнение нескольких широко известных методик по погрешностям определения потерь топлива от испарения. Наилучшие результаты получены при использовании методики Коршака А.А. Отмечены недостатки известных методик: ряд уравнений получен при определенных начальных условиях проведения эксперимента, в формулах учитывается лишь температура окружающего воздуха и не учтены ее колебания, изменения площади поверхности раздела фаз и др. Разработан собственный метод расчета потерь топлива при заполнении наземных горизонтальных цилиндрических резервуаров, который учитывает молекулярное давление и собственный объем молекул. Полученный метод лишен недостатков, перечисленных выше. Получено, что упрощение молекулярного взаимодействия приводит ранее известные уравнения к погрешностям расчета. Экстремум на графиках расчета потерь бензина при наполнении резервуара является следствием переменной площади поверхности испарения, которая возникает при горизонтальном расположении резервуара цилиндрической формы. Показано, что при увеличении объема резервуара удельные потери топлива снижаются, что соответствует экспериментальным исследованиям и многолетнему опыту.

Ключевые слова: потери топлива от испарения, вертикальные, горизонтальные, резервуары, сельскохозяйственные предприятия.

**THE METHOD FOR CALCULATING LOSS OF FUEL
FROM HORIZONTAL CYLINDER RESERVOIRS IN THE GROUND**¹Levin Maxim¹Nagornov Stanislav²Levina Ekaterina¹FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"¹FSBEI HE "Bauman Moscow State Technical University"

Abstract. Loss of gasoline when filling the tank can reach from 1 to 4 liters per 1 m³ of fuel supplied. Existing methods for determining losses from fuel evaporation mainly relate to vertical tanks of 400 m³ or larger at oil depots, while agricultural enterprises more often use above-ground horizontal cylindrical tanks. A comparison was made of several well-known techniques for the errors in determining the loss of fuel from evaporation. The best results were obtained using the method of A. Korshak. The disadvantages of the known methods are noted: a number of equations were obtained under certain initial conditions of the experiment, only the ambient temperature is taken into account in the formulas and its fluctuations, changes in the interface surface area, etc. are not taken into account. A proprietary method for calculating fuel losses when filling ground horizontal cylindrical tanks has been developed that takes into account molecular pressure and intrinsic volume of molecules. The obtained method is free from the drawbacks listed above. It was found that simplification of molecular interaction leads the previously

known equations to calculation errors. The extremum in the graphs for calculating the loss of gasoline when filling the tank is a consequence of the variable evaporation surface area that occurs with a horizontal cylindrical tank. It is shown that with an increase in the volume of the tank, specific fuel losses decrease, which corresponds to experimental studies and many years of experience.

Keywords: loss of fuel from evaporation, vertical, horizontal, tanks, agricultural enterprises..

Введение. С ростом добычи нефти в середине XX века происходило увеличение количества перевалочных нефтебаз и нефтескладов. Потери топлива от испарения при хранении и сливно-наливных операциях наносили стране ощутимый экономический ущерб. Потери бензина при заполнении резервуара могут достигать от 1 до 4 литров на 1 м³ подаваемого топлива. Поэтому появилась необходимость теоретического описания и расчета потерь, разработки методов и средств сокращения данных потерь [1, 2]. Чем больше резервуар, тем больше будут из него потери от испарения в количественном выражении. Внимание ученых было обращено на резервуары вертикального типа объемом от 400 м³, которые применяются на крупных нефтебазах. В настоящее время основной вклад в разработку теоретических формул, методик определения потерь топлива от испарения внесли ученые Ф.Ф. Абузова, И.С. Бронштейн, И.П. Бударов, Н.Н. Константинов, А.А. Коршак, Ф.М. Хафизов, В.И. Черников и другие. Однако класс сельскохозяйственных нефтескладов, в которых используются наземные горизонтальные цилиндрические резервуары не обеспечен методикой расчета потерь топлива от испарения при его заполнении. Поэтому разработка метода расчета потерь топлива при заполнении наземных горизонтальных цилиндрических резервуаров является актуальной задачей для сельского хозяйства.

Материалы и методы. Рассмотрим результаты расчетов потерь топлива от испарения по методикам Коршака А.А., Абузовой Ф.Ф., Черникова В.И., которые были проведены в работах [3 – 6]. Предложенные методики расчета потерь от испарений хорошо зарекомендовали себя относительно резервуаров вертикального типа большой емкости. Приведем данные по потерям бензина для резервуара РВС-20000 в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов потерь бензина из резервуара РВС-20000 по различным методикам [5, 6]

№ замера	Расчет по промышленным данным	Расчет по методике А.А. Коршака		Расчет по методике Ф.Ф. Абузовой		Расчет по формуле В.И. Черникова	
		Полные потери, кг	Погрешность, %	Полные потери, кг	Погрешность, %	Полные потери, кг	Погрешность, %
1-2	704,4	701,9	0,4	406,9	42,2	437,4	37,9
3-4	6392,9	6095,8	4,7	3918,3	38,7	1784	72,1
5-6	6844,3	6801,4	0,6	4151,2	39,4	1729,7	74,7

По полученным результатам можно сделать выводы:

1. Расчет по формуле В.И. Черникова дает большие погрешности, величины потери занижены, так как в этой методике не учитывается донасыщение газового пространства резервуара при его заполнении.

2. Методика Ф.Ф. Абузовой приводит к большим погрешностям, так как в ней не учитываются геометрические размеры резервуара и динамика перемешивания закачиваемой нефти, также эмпирический график прироста относительных концентраций построен для бензинов, что тоже влияет на величину погрешности.

3. Наибольшей точностью обладает методика А.А. Коршака, эта методика также является наиболее теоретически обоснованной, она учитывает и геометрические размеры резервуара и донасыщение газового пространства в процессе заправки динамику испарения и перемешивания продукта [6].

В то же время, в методике Коршака коэффициенты уравнения были получены для резервуаров вертикального типа, она не учитывает изменение площади поверхности испарения, которое имеет

место быть в горизонтальных наземных резервуарах. Скорость и амплитуда суточных колебаний температуры хранимого топлива будет также зависеть от его объема.

В рассматриваемых методиках расчета потерь от испарений ряд уравнений получен при определенных начальных условиях проведения эксперимента, в формулах учитывается лишь температура окружающего воздуха, однако, не берется во внимание количество тепла, переданного за счет солнечной радиации. Для расчетов потерь от испарения в горизонтальных резервуарах малой емкости они не применимы, так как не учтены температурные колебания, изменения площади поверхности раздела фаз и т.д.

Результаты и их обсуждение. Для получения точного описания испарения топлива сформулируем уравнение состояния, в котором будут учтены упрощенные ранее факторы: явление силового взаимодействия молекул (ассоциация, диссоциация), изменение температуры под действием внешней среды и в связи с окислением углеводородов. В общей форме опишем состояние ПВС в газовом пространстве резервуара уравнением:

$$\left(P_y + \frac{a}{V_y^2}\right) \cdot (V_y - b) = MRT, \quad (1)$$

где a и b – постоянные величины для реальных газов в уравнениях состояния, характеризующие молекулярное давление и собственный объем молекул.

V_y – объем газового пространства резервуара, м³;

P_y – давление газового пространства резервуара, м³;

R – газовая постоянная, Па*м³/моль*К;

M – масса углеводородов, кг;

T – температура, зависящая от воздействия окружающей среды и окисления, К.

Для решения уравнения при заполнении резервуара топливом введем обозначения: $P = \left(P_y + \frac{a}{V_y^2}\right)$ и $V = (V_y - b)$ и продифференцируем по времени τ , с:

$$\dot{P}V + \dot{V}P = MRT \left(\frac{\dot{M}}{M} + \frac{\dot{R}}{R} + \frac{\dot{T}}{T} \right), \quad (2)$$

Выражая изменение массы ПВС $\dot{M}$ с течением времени, получим:

$$\dot{M} = M \cdot \left[\frac{\left(P_y + \frac{a}{V_y^2}\right) \cdot \frac{2a(V_y - b)}{V_y^3}}{MRT} \cdot \dot{V} - \frac{\dot{R}}{R} - \frac{\dot{T}}{T} \right]. \quad (3)$$

Упростив числитель, получаем:

$$\dot{M} = M \cdot \left(\frac{1}{V - b} \cdot \dot{V} - \frac{2a}{P + \frac{a}{V^2}} \cdot \dot{V} - \frac{\dot{R}}{R} - \frac{\dot{T}}{T} \right). \quad (4)$$

Изменение массы ПВС $\dot{M}$ можем выразить через скорость испарения при заполнении резервуара и вытеснении углеводородов в атмосферу:

$$\dot{M} = \beta \cdot \dot{F}(C_s - C) - \rho JS_{отв}, \quad (5)$$

где β – коэффициент массоотдачи кг*м²/с, F – площадь поверхности испарения резервуара, м², C_s, C – концентрация насыщенных паров углеводородов и средняя концентрация паров в ГП резервуара соответственно, ρ – плотность углеводородов, кг/м³, J – скорость выхода ПВС через отверстие люка площадью $S_{отв}$. Приравняем G произведению $JS_{отв}$.

Потери ПВС от испарения G при этом выразим:

$$G = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\beta \dot{F}(C_s - C) + M \cdot \left(\frac{1}{V - b} \cdot \dot{V} - \frac{2a}{P + \frac{a}{V^2}} \cdot \dot{V} - \frac{\dot{R}}{R} - \frac{\dot{T}}{T} \right) \right], \quad (6)$$

С применением пакета программ Mathematica рассчитали значение потерь G по полученному уравнению (6) и сравнили со значением потерь углеводородов Q_k по ранее известному уравнению [3].

Моделировался процесс заполнения бензином АИ-92 наземного горизонтального цилиндрического резервуара объемами 3, 5, 10, 25, 50, 75, 100 м³. Скорость насоса бензовоза составляла 40 л/мин. Геометрические размеры резервуаров и время его наполнения бензовозом приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры резервуаров для расчета потерь бензина от испарения

Объем резервуара, м ³	Диаметр D, мм	Длина L, мм	Максимальная площадь испарения, м ²	Время наполнения, сек
3	1400	2550	3,57	3600
5	1600	2785	4,456	7500
10	2200	3335	7,337	7500
25	2760	4990	13,7724	9375
50	2760	10100	27,876	18750
75	3000	10100	30,3	18750
100	3000	14400	43,2	25000

Приведем графики расчета потерь для наземного горизонтального цилиндрического резервуара объемом 10 м³ на рисунке 1.

Рисунок 1 – График расчета потерь бензина от испарения при заполнении резервуара объемом 10 м³ с учетом межмолекулярного взаимодействия

График расчета потерь углеводородов по уравнению [3] для резервуара 10 м³ приведен на рисунке 2.

Рисунок 2 – График расчета потерь бензина от испарения при заполнении резервуара объемом 10 м³ без учета межмолекулярного взаимодействия.

По полученным данным из уравнения (6) рассчитаем удельные потери топлива на объем резервуара и сведем полученные данные в таблице 3 и на рисунке 3.

Таблица 3 – Удельные потери бензина

Объем резервуара, м ³	Удельные потери, г/с*м ³
3	0,125622
5	0,0941578
10	0,0775408
25	0,0582368
50	0,0489456
75	0,0427144
100	0,0320358

Рисунок 3 – Удельные потери бензина из резервуаров различной вместимости

Выводы. Анализируя полученные данные можно сделать следующие выводы:

1. Упрощение молекулярного взаимодействия приводит ранее известные уравнения к погрешностям расчета.
2. Экстремум на графиках расчета потерь бензина при наполнении резервуара является следствием переменной площади поверхности испарения, которая возникает при горизонтальном расположении цилиндра.
3. Величину потерь углеводородов можно выразить зависимостью от соотношения объемов жидкой фазы и резервуара в виде:

$$G = K \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{V_{ж}}{V_p}\right)$$

4. При увеличении объема резервуара удельные потери топлива снижаются, что соответствует экспериментальным исследованиям и многолетнему опыту.

Список литературы

1. Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю. Особенности процесса испарения топлива из наземных горизонтальных резервуаров [Текст] // Наука в центральной России. 2017. – № 4 (28). – С. 121-130.
2. Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Романцова С.В. Расчет потерь моторного топлива от испарения с изменяемой поверхности [Текст] // Наука в центральной России. – 2017. – № 2 (26). – С. 77-84.
3. Новоселов В.Ф. и др. Методика расчета потерь от испарения нефти и нефтепродуктов из наземных резервуаров: Учебное пособие/ В. Ф. Новоселов, В.П. Ботыгин, И. Г. Блинов. – Уфа: Изд-во УНИ, 1987. – 73 с.
4. Коршак А.А. и др. Нефтебазы и АЗС: Учебное пособие / А. А. Коршак, Г. Е. Коробков, Е. М. Муфтахов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2006. – 416 с.

5. Берёзина И.С., Головчун С.Н. Анализ методик расчета процесса испарения светлых нефтепродуктов при перевозке, хранении и сливно-наливных операциях // Вестник АГТУ. 2008. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodik-rascheta-protsesta-ispareniya-svetlyh-nefteproduktov-pri-perevozke-hranenii-i-slivno-nalivnyh-operatsiyah> (дата обращения: 18.10.2019).

6. Медникова М.И. Сравнительный анализ методик расчета потерь нефти от испарений // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. ЛII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 4(51). URL: [https://sibac.info/archive/technic/4\(51\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/4(51).pdf) (дата обращения: 08.11.2018).

References

1. Levin M.YU., Nagornov S.A., Levina E.YU. Osobennosti processa ispareniya topliva iz nazemnyh gorizontalnyh rezervuarov [Tekst] // Nauka v central'noj Rossii. 2017. – № 4 (28). – S. 121-130.

2. Levin M.YU., Nagornov S.A., Romancova S.V. Raschet poter' motornogo topliva ot ispareniya s izmenyaejmoj poverhnosti [Tekst] // Nauka v central'noj Rossii. – 2017. – № 2 (26). –S. 77-84.

3. Novoselov V.F. i dr. Metodika rascheta poter' ot ispareniya nefi i nefteproduktov iz nazemnyh rezervuarov: Uchebnoe posobie/ V. F. Novoselov, V.P. Botygin, I. G. Blinov. – Ufa: Izd-vo UNI, 1987. – 73 s.

4. Korshak A.A. i dr. Neftebazy i AZS: Uchebnoe posobie/ A. A. Korshak, G. E. Korobkov, E. M. Muftahov. –Ufa: ООО «DizajnPoligrafServis», 2006. – 416 s.

5. Beryozina I. S., Golovchun S. N. Analiz metodik rascheta processa ispareniya svetlyh nefteproduktov pri perezozke, hranenii i slivno-nalivnyh operatsiyah // Vestnik AGTU. 2008. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodik-rascheta-protsesta-ispareniya-svetlyh-nefteproduktov-pri-perevozke-hranenii-i-slivno-nalivnyh-operatsiyah> (data obrashcheniya: 18.10.2019).

6. Mednikova M.I. Sravnitel'nyj analiz metodik rascheta poter' nefi ot isparenij // Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki: sb. st. po mat. LII mezhduar. stud. nauch.-prakt. konf. № 4(51). URL: [https://sibac.info/archive/technic/4\(51\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/4(51).pdf) (data obrashcheniya: 08.11.2018)

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Левин Максим Юрьевич – кандидат технических наук Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: lmu@list.ru.

Нагорнов Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Левина Екатерина Юрьевна – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, г. Москва.

Author credentials

Affiliations

Levin Maxim – Candidate of Technical Sciences of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: lmu@list.ru.

Nagornov Stanislav – Full Doctor of Technical sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Levina Ekaterina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Bauman Moscow State Technical University”, Russia, Moscow.

Поступила в редакцию (Received): 20.09.2019 Принята к публикации (Accepted): 23.10.2019