Meshcheryakov Alexander – applicant of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: alex_mec@bk.ru.

Kornev Aleksey – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Science of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab7@yandex.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.

Поступила в редакцию (Received): 11.05.2021 Принята к публикации (Accepted): 21.06.2021

УДК 532
DOI: 10.35887/2305-2538-2021-3-135-139

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ БЕНЗИНА ПРИ ЕГО ХРАНЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ РЕЗЕРВУАРЕ

[1]Маркелов Станислав Валентинович,
[1]Левина Екатерина Юрьевна,
Левин Максим Юрьевич,
[2]Нагорнов Станислав Александрович,

[1] МГТУ им Баумана
[2]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Современные глобальные проблемы, такие как катастрофическое загрязнение окружающей среды, продолжающийся значительный прирост населения Земли перед каждой отраслью народного хозяйства формируют новые задачи и вызовы. В таких условиях прогнозируется рост потребления моторного топлива агропромышленными (АПК) и автотранспортными предприятиями (АТП). Несмотря на то, что снижение потерь моторного топлива является основным направлением экономии энергоресурсов и защиты окружающей среды от загрязнения углеводородами, до настоящего времени наземные горизонтальные резервуары емкостью менее 75 м^3, применяемые на нефтескладах в АПК и АПТ не обеспечены теоретической базой для расчета потерь топлива при хранении. Известно, что основная доля количественных потерь происходит при хранении моторного топлива в резервуарах, среди них 70% составляют потери от испарения. Испарение топлива из наземных горизонтальных цилиндрических резервуаров является сложным и малоизученным процессом. Для описания явлений тепломассопереноса при хранении топлива актуальной задачей становится моделирование конвекционных токов в его объеме, которые возникают из-за неравномерного нагрева хранимого топлива. Исследовали влияние солнечной радиации и переменной площади поверхности испарения при хранении бензина в наземном горизонтальном резервуаре на суммарный объем потерь легкокипящих фракций за счет явлений конвекции. Получили математическую модель, которая позволяет рассчитать сверхнормативные потери и повысить эффективность учета потерь нефтепродуктов при хранении.*

Ключевые слова: *испарение, моторное топливо, конвекция, бензин, хранение, наземные горизонтальные цилиндрические резервуары.*

SIMULATION OF CONVECTION OF GASOLINE DURING ITS STORAGE IN A HORIZONTAL CYLINDRICAL TANK

[1]Markelov Stanislav,
[1]Levina Ekaterina,
Levin Maxim,
[2]Nagornov Stanislav,

[1]Bauman Moscow State Technical University
[2]All-Russian Scientific and Research Institute of Use of Techniques and Oil Products in Agriculture

Abstract. *Global problems such as catastrophic pollution of the environment, the continuing significant increase in the world's population in front of each sector of the national economy form new tasks and challenges. In such conditions, the growth of motor fuel consumption by agro-industrial (AIC) and motor transport enterprises (ATP) is predicted. Despite the fact that reducing the loss of motor fuel is the main direction of saving energy resources and protecting the environment from hydrocarbon pollution, until now, ground horizontal tanks with a capacity of less than 75 m^3 used in oil storage facilities in the agro-industrial complex and ATP are not provided with a theoretical basis for calculating fuel losses during storage. In modern conditions, for quite a long time, hydrocarbon energy will play a key role in ensuring the economic and economic activities of mankind. A general trend in the global energy economy is an increase in the share of oil consumption as a motor fuel and petrochemical feedstock. The main share of quantitative losses occurs during storage of fuel in tanks, among them 70% are losses from evaporation. Evaporation of fuel from above-ground horizontal cylindrical tanks is a complex and poorly understood process. To describe the phenomena of heat and mass transfer during storage of fuel, it becomes an urgent task to model convection currents in its volume, which arise as a result of uneven heating due to the temperature difference along the height of the tank.*

Keywords*: evaporation, motor fuel, convection, gasoline, storage, ground horizontal cylindrical tanks.*

Введение. Снижение потерь моторного топлива является основным направлением экономии энергоресурсов и защиты окружающей среды от загрязнения углеводородами. Однако, процессы испарения топлива при хранении в наземных горизонтальных резервуарах емкостью менее 100 м^3, которые применяются на нефтескладах агропромышленного комплекса (АПК) и автотранспортных предприятий (АТП), является малоизученным. Главной особенностью данного типа резервуаров в отличие от вертикальных наземных является переменная площадь поверхности испарения топлива. При наземном размещении горизонтальных резервуаров малой емкости хранимое топливо подвержено влиянию суточных колебаний температур за счет воздействия солнечной радиации и теплообмена с окружающей средой. Перечисленные факторы будут способствовать неравномерному изменению температуры топлива в течение дня, что поспособствует возникновению конвекционных токов в его объеме. Для описания процессов тепломассопереноса является актуальной задача моделирования конвекции топлива при его хранении в горизонтальном цилиндрическом резервуаре.

В данной работе проведено моделирование конвекции при хранении бензина, так как этот тип топлива больше подвержен испарению. Как известно, бензин — это смесь предельных, непредельных (25-61%), ароматических (4-16%), нафтеновых (9-71%) и ароматических (4-16%) углеводородов, для которых характерна различная плотность и температура кипения.

Материалы и методы. Хранение нефтепродуктов в условиях АПК и АТП производится в основном в наземных горизонтальных резервуарах объемом до 100 м^3. Емкости размещают непосредственно на земле, иногда встречается размещение на подготовленных бетонированных площадках. В течение светового дня Солнце влияет на температуру не только самого резервуара, но и окружающего пространства, на котором его размещают. Солнечная радиация нагревает стенки резервуара, происходит теплообмен с окружающей средой и теплопередача от стенок резервуара бензину.

Из ранее проведенных исследований известно [1, 2, 3], что на поверхности земли температура будет отличаться от температуры на высоте двух метров (высота горизонтально расположенного резервуара). Разница температур за сутки может достигать 10 ºС (рисунок 1). Температура бензина внутри резервуара также изменяется в зависимости от уровня наполненности резервуара. Это всё приводит к неравномерному нагреву хранимого бензина по высоте, что поспособствует возникновению явления конвекционных токов.

Интенсивность солнечной радиации и количество теплоты, которое получает 1м^2 стенки, ограниваюшей газовое пространство резервуара рассчитывается по формулам [4,5,6]:

$$i_0 = \frac{1357 * K_0}{1 + \frac{1-\gamma}{\gamma * cos(\psi - \varphi)}}, \quad (1)$$

где K_0 – коэффициент облачности, γ – коэффициент прозрачности атмосферы, ψ – географическая широта выбраного места, φ – расчётное склонение солнца.

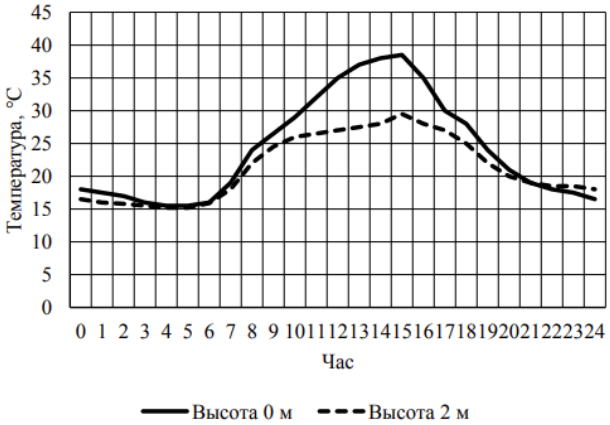

Рисунок 1 – График разницы температуры по высоте резервуара в течение суток в летний месяц [1].

$$q = \varepsilon_c \frac{F_0}{F} * i_0, \quad (2)$$

где F_0 – площадь проекции стенок резервуара на плоскость, нормальную к направлению солнечных лучей в полдень, F – площадь проекции стенок, ограничивающих ГП резервуара, ε_c – Степень черноты наружней поверхности резервуара

$$F_0 = F_в * sin(\psi - \varphi) + F_г cos(\psi - \varphi), \quad (3)$$

где $F_в, F_г$ – площади проекций поверхности стенок, ограничивающих ГП резервуара, соответственно на вертикальную и горизонтальную плоскость рассчитывающиеся по следующим формулам:

$$F_в = \pi r^2, \quad (4)$$

$$F_н = LD, \quad (5)$$

где r, D – радиус и диаметр резервуара, L - длина резервуара.

$$F = F_в * \pi + F_н, \quad (6)$$

В нагретой жидкости для установления механического равновесия должны выполнятся определенные условия, но, если разница температур достаточно велика, возникает конвективное движение, равновесие нарушается и становится неустойчивым. Конвекция может возникать и при малой разнице температур при тех же условиях, если равновесие невозможно. С учетом того, что бензин состоит из углеводородов с разной температурой кипения, в первую очередь нагреваться будут легкокипящие фракции (ЛКФ). При неравномерном нагреве жидкости более нагретый объем становится менее плотным и устремляется вверх, в результате чего происходит перемешивание, образуются конвекционные токи в объеме бензина. За счет конвекции ЛКФ будут подниматься к поверхности раздела фаз, что способствует интенсификации испарения.

Результаты и обсуждение. Уравнения гидродинамики описывают макроскопические движения жидкости с помощью системы уравнений. Данная система состоит из уравнения непрерывности, уравнения переноса тепла, уравнения непрерывности, движения Навье-Стокса и уравнения состояния среды. Запишем данную систему уравнений для сжимаемой жидкости:

$$\rho \left[\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + (\vartheta \nabla)\vartheta\right] = -\nabla p + \eta \Delta \vartheta + \left(\frac{\eta}{3} + \xi\right) \nabla div \vartheta + \rho g, \quad (7)$$

$$\rho T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla s\right) = \chi \Delta T + D, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho\vartheta) = 0, \quad (9)$$

$$\rho = \rho(T, p), \quad (10)$$

где υ - скорость, p - давление, ρ - плотность, T - абсолютная температура, s - энтропия единицы массы жидкости, g - ускорение свободного падения, η и ξ - коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости, χ - коэффициент теплопроводности, D – диссипативная функция.

Запишем систему уравнений для возмущений в объеме жидкости, которые способствуют возникновению конвективных токов, в безразмерном виде, где полость окружена теплопроводным массивом:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = -\nabla p + \Delta\vartheta + RT_y \\ P\frac{\partial T}{\partial t} - (\vartheta y) = \Delta T \\ P\chi\frac{\partial T_m}{\partial t} = \Delta T_m \end{cases} \quad (11)$$

$$div\vartheta = 0$$

Здесь ϑ , p ,T ,Tm - безразмерные возмущения.

Производные будут браться по безразмерным координатам и времени. В данной системе малые возмущения равновесия можно свести к системе линейных однородных уравнений в частных производных с постоянными коэффициентами. Решая данную систему уравнений, можно получить частные решения, которые зависят от времени по следующему закону:

$$F\{\upsilon, p, T, Tm\} \sim \exp(-\lambda T),$$

где λ - декремент, который определяет период возмущений.

В данной системе уравнений скоростью по горизонтали и давлением можно пренебречь. Тогда получаем следующую систему уравнений для скорости перемешивания жидкости по Z и возмущениям температуры:

$$\frac{\partial}{\partial t}\Delta\vartheta_z = \Delta\Delta\vartheta_z + R\Delta_1 T, \quad (12)$$

$$P\frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + \vartheta_z, \quad (13)$$

где $\Delta_1 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – плоский лапласиан

В итоге проведенных преобразований и с учетом уравнения Ван-дер-Ваальса для реальных газов получим суммарный дополнительный объем потерь легкокипящих фракций бензина за счет явлений конвекции:

$$\psi = \sum_{n=1}^{3} \frac{P_n V_n \mathrm{M}_n}{RT(\tau)}, \quad (14)$$

где $T(\tau)$ – выраженная температура из уравнения (13), R – универсальная газовая постоянная, M – молярная масса ЛКФ, P,V – давление и объем с учетом межмолекулярного взаимодействия, n – номер фракции.

Данный коэффициент ψ позволяет рассчитать потери бензина при хранении для наземного горизонтального резервуара с учетом переменной площади испарения и конвекционных токов.

Заключение. Таким образом, получена математическая модель, которая моделирует конвекцию бензина при его хранении в горизонтальном цилиндрическом резервуаре. За счет конвекции будет происходить вытеснение более легких фракций углеводородов в верхние слои жидкости, что приведет к интенсификации их испарения.

Моделирование конвекции бензина и расчет потерь топлива от испарения с учетом поправочного коэффициента ψ при его хранении в наземном горизонтальном цилиндрическом позволит усовершенствовать существующие методы расчета потерь топлива от испарения и получить более точные знания о физике процесса испарения.

Список литературы

1. Левин М.Ю., Левина Е.Ю. Совершенствование методов и технических средств для снижения потерь моторного топлива при хранении. – Липецк: Колор, 2020. – 272 с.
2. Левин М.Ю. Особенности процесса испарения топлива из наземных горизонтальных резервуаров [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А., Левина Е.Ю. // Наука в центральной России. – 2017. – № 4 (28). – С. 121-130.
3. Левин М.Ю. Исследование температурного поля в наземном горизонтальном цилиндрическом резервуаре [Текст] / Левин М.Ю., Нагорнов С.А. // Наука в центральной России. – 2019. – № 1 (37). – С. 103-107.
4. П.И.Тугунов, В.Ф.Новосёлов, А.А.Коршак, А.М.Шаммазов. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. Учебное пособие для ВУЗов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – 658с. 3
5. Бринкворт Б.Дж. Солнечная энергия для человека: М.: Мер, 1976. - 278с. 2. Берковский Б.М., Кузьмин В.А. Возобновляемые источники энергии на службе человека. М.: Наука, 1987. - 125 с.
6. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации [Текст]. -Ленинград Гидрометеоиздат, 1968. - 232 с.

References

1. Levin M. Yu., Levina E. Yu. Improvement of methods and technical means for reducing motor fuel losses during storage. - Lipetsk: Kolor, 2020 – 272 p.
2. P. I. Tugunov, V. F. Novoselov, A. A. Korshak, A. M. Shammazov. Standard calculations for the design and operation of oil depots and oil pipelines. Textbook for universities. - Ufa: OOO "DesignPoligrafServis", 2002. - 658s. 3
3. Levin M. Yu. Features of the process of fuel evaporation from ground horizontal tanks [Text] / Levin M. Yu., Nagornov S. A., Levina E. Yu. / / Science in Central Russia. – 2017. – № 4 (28). – Pp. 121-130.
4. Levin M. Yu., Nagornov S. A. Study of the temperature field in a ground-based horizontal cylindrical reservoir. – 2019. – № 1 (37). – P. 103-107.
5. Brinkworth B. J. Solar energy for man: M.: Mer, 1976. - 278s. 2. Berkovsky B. M., Kuzmin V. A. Renewable energy sources in the service of man. M.: Nauka, 1987. - 125 p.
6. Sivkov S. I. Methods for calculating the characteristics of solar radiation [Text]. - Leningrad Hydrometeoizdat, 1968. - 232 p.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Маркелов Станислав Валентинович, студент 4 курса, МГТУ им Баумана.

Левина Екатерина Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры физики МГТУ им Баумана E-mail: levina@bmstu.ru.

Левин Максим Юрьевич, кандидат технических наук, 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.

Author credentials

Affiliations

Markelov Stanislav, 4th year student, Bauman Moscow State Technical University.

Levina Ekaterina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics Bauman Moscow State Technical University, E-mail: levina@bmstu.ru.

Levin Maxim, candidate of technical sciences, 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.

Поступила в редакцию (Received): 11.05.2021 Принята к публикации (Accepted): 21.06.2021