

## Методика оценки герметичности полимерных резервуаров для перевозки топлива воздушным транспортом

### Procedure for evaluation of tightness of polymer tanks for transportation of fuel by air

*Д.В. КОЛОТИЛИН, А.В. ДЕДОВ, Р.И. КЮННАП*

*D.V. KOLOTILIN, A.V. DEDOV, R.I. KUNNAP*

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», г. Москва

FAU "25 State Research Institute of Chemical Motology of the Ministry of Defense of Russia," Moscow

dedovs55@rambler.ru

Выполнен анализ методик оценки диффузионной проницаемости полимерных материалов. Показаны ограничения методик для определения времени герметичности и скорости выделения топлива из эластичных резервуаров на основе термопластичных полиуретанов. Для решения поставленных задач предложен подход, связанный с установлением зависимостей кинетики выделения дизельного топлива в системе координат условного времени, которое рассчитывали как корень квадратный из времени процесса. Время герметичности и скорость выделения топлива зависят от степени заполнения резервуара при испытаниях.

*Ключевые слова:* термопластичный полиуретан, резервуар, топливо

The analysis of methods for assessing the diffusion permeability of polymer materials is carried out. The limitations of the methods for determining the tightness time and the rate of fuel bleeding from elastic tanks based on thermoplastic polyurethanes are shown. To solve the set tasks, an approach is proposed related to establishing dependencies of the kinetics of diesel fuel bleeding in the coordinate system of the conditional time, which was calculated as the square root of the process time. The tightness time and rate of fuel bleeding depends on the degree of filling of the tank during testing.

*Keywords:* thermoplastic polyurethane, reservoir, fuel

DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-46-48

#### Введение

Эластичные резервуары на основе термопластичных полиуретанов (ТПУ) применяются для транспортирования топлива воздушным транспортом [1–5], что решает ряд проблем, возникающих при использовании для этой цели металлических баков. Пример размещения заполненных топливом эластичных резервуаров Turtle Pac (США) в грузовой кабине самолета [3] представлен на рис. 1.



Рис. 1. Эластичные резервуары Turtle Pac в грузовой кабине самолета.

Недостатком полимерных резервуаров является выделение топлива при хранении [4–7], содержание паров которых в замкнутых грузовых кабинах летательных аппаратов ограничено и должно быть ниже взрывоопасного предела [7–8]. Актуальность повышения герметичности подтверждается разработкой специальных резервуаров, в частности, на рис. 2 представлена конструкция оболочки резервуара Turtle Pac [4]. Повышение барьерных свойств резервуаров достигается введением в оболочку топливостойкого слоя, состав которого не раскрывается (рис. 2). Другое техническое решение повышения безопасности транспортирования топлива воздушным транспортом заключается в увеличении толщины оболочки резервуаров [4, 5].



Рис. 2. Конструкция оболочки резервуара TurtlePac.

Практическое значение имеет моделирование времени сохранения герметичности резервуаров и скорости выделения топлива из резервуара, что требует обоснования методики испытаний, отражающей условия эксплуатации резервуаров при транспортировании воздушным транспортом.

#### Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали пленку ТПУ 3290 (Израиль) толщиной 1 мм, что соответствует толщине оболочки стандартных резервуаров различной вместимости. В условиях эксперимента оценивали герметичность и выделение из эластичных резервуаров дизельного топлива арктического ДТ-А-К5 по ГОСТ Р 55475-2013, транспортирование которого воздушным транспортом является наиболее вероятным.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Герметичность полимерных резервуаров определяется скоростью диффузии топлива через оболочку и оценивается временем появления топлива на внешней поверхности резервуаров. В таких условиях проницаемость полимерной оболочки зависит только от температуры и не зависит от внешних условий, в частности, от

скорости удаления выделившегося топлива в окружающую среду, что необходимо учитывать в методике испытаний. После нарушения герметичности резервуаров десорбция топлив может зависеть или от скорости их диффузии в оболочке, или от скорости улетучивания выделившегося топлива с внешней поверхности оболочки резервуара.

Практическое значение имеет анализ стандартных методик испытаний диффузионной проницаемости полимерных материалов на соответствие между режимами испытаний и условиями эксплуатации эластичных резервуаров при транспортировании воздушным транспортом.

Время сохранения герметичности ( $\tau_{сг}$ , сек) полимерных оболочек толщиной  $d$ , см, при известном коэффициенте диффузии веществ в полимере  $D$ , см<sup>2</sup>/с, рассчитывается по выражению [13]:

$$\tau_{сг} = d/6D \quad (1)$$

Используется методика определения коэффициента диффузии веществ в полимерных материалах, связанная или с сорбцией жидкостей полимерными материалами, или с регистрацией уменьшения массы жидкостей в специальной ячейке, которая от внешней среды отделена мембраной из полимерного материала [13].

Методика определения коэффициента диффузии жидкостей в полимере по уменьшению массы в ячейке в большей степени отражает условия эксплуатации полимерных резервуаров. Зависимость десорбции от скорости диффузии вещества в мембране достигается постоянным удалением с внешней поверхности мембраны выделившейся жидкости, накопление которой приводит к уменьшению градиента концентрации топлива с соответствующим влиянием на величину коэффициента диффузии. Методика предназначена для непосредственной оценки  $\tau_{сг}$  мембраны заданной толщины и для расчета коэффициента диффузии жидкостей в мембране.

Время  $\tau_{сг}$  для полимерной мембраны заданной толщины определяется из кинетических зависимостей уменьшения массы жидкостей в ячейке ( $Q-\tau$ ). Общий вид зависимостей  $Q-\tau$  и способ определения  $\tau_{сг}$  представлены на рис. 3.

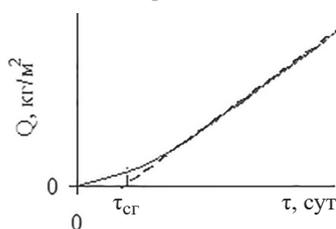


Рис. 3. Общий вид кинетических зависимостей уменьшения массы жидкости в ячейке ( $\tau_{сг}$  – время появления топлив на внешней поверхности мембраны, пояснение в тексте).

Для мембраны заданной толщины коэффициент диффузии рассчитывается из выражения (1), которое используется для расчета  $\tau_{сг}$  при изменении толщины оболочки. Линейный участок зависимостей  $Q-\tau$  используется для расчета коэффициента проницаемости и кинетики выделения жидкостей из резервуара известной толщины и площади поверхности оболочки.

При испытаниях используются две ячейки, схемы которых по ГОСТ 27896-88 и ГОСТ Р 53656.2-2009 представлены на рис. 4.

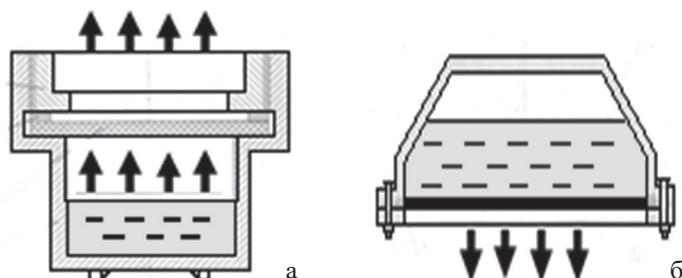


Рис. 4. Схема ячеек для определения потерь жидкости при контакте полимерной мембраны с парами жидкости (ГОСТ 27896-88) и контакте полимерного материала с топливом (ГОСТ Р 53656.2-2009).

При использовании ячейки по ГОСТ 27896-88 полимерная мембрана контактирует с парами индивидуальных жидкостей (рис. 4а), состав паров которых соответствует составу жидкостей. В случае использования топлив, представляющих собой смесь углеводоро-

дов различной летучести, состав паров может отличаться от состава топлив [10], что приводит к селективному переносу в мембране фракций топлива и искажает результаты эксперимента относительно условий эксплуатации резервуаров, в которых оболочка контактирует с топливом.

Контакт мембраны с топливом достигается при использовании ячейки по ГОСТ Р 53656.2-2009 (рис. 4б). При испытаниях в нижнюю часть ячейки подавался нагретый воздух, что обеспечивало непрерывное удаление с поверхности мембраны выделившегося топлива.

Исследовали эффективность применения стандартной методики для определения  $\tau_{сг}$  и кинетики выделения дизельного топлива от степени заполнения ячейки при проведении эксперимента. В ячейку вводили 5, 10, 15, 20, 30 и 50 г дизельного топлива при предельной вместимости ячейки 55 г. Степень заполнения рассчитывали как отношение массы введенного топлива к массе топлива при полном заполнении ячейки. Кинетические зависимости уменьшения массы топлива ДТ-А-К5 в ячейке, рассчитанной на единицу поверхности мембраны ( $Q$ , кг/м<sup>2</sup>) при различной степени заполнения ячейки с мембраной на основе ТПУ 3290, представлены на рис. 5.

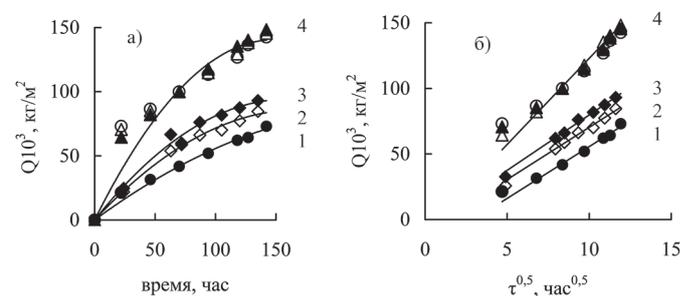


Рис. 5. Кинетические зависимости уменьшения массы дизельного топлива ДТ-А-К5 при степени заполнения ячейки как 0,09 (1), 0,18 (2), 0,27 (3) и 0,36 (▲), 0,54 (△) и 0,9 (○) общая зависимость 4 в системе координат реального (а) и условного (б) времени.

Зависимости  $Q$  от  $\tau$  (рис. 5) отличаются от аналогичных зависимостей для индивидуальных жидкостей (рис. 3) и отражают десорбцию топлива с непрерывно уменьшающейся скоростью, что ограничивает применение стандартной методики оценки  $\tau_{сг}$  и скорости выделения топлива.

При степени заполнения меньше 0,36 выделение топлива из ячейки зависит от степени заполнения – чем меньше степень заполнения, тем меньше топлива выделяется из ячейки (рис. 5, зависимости 1–3). При степени заполнения больше 0,36 выделение топлива не зависит от степени заполнения (рис. 5, зависимость 4).

Свободный объем ячейки, который образуется между поверхностью топлива и верхней крышкой ячейки (рис. 4б), определяет количество испарившихся низкомолекулярных углеводородов и, соответственно, изменение состава дизельного топлива. Поэтому зависимости скорости выделения топлива от степени заполнения (рис. 5а) свидетельствуют о неравномерном составе потока топлива в мембране на основе ТПУ 3290. Первоначально диффундируют легкие фракции, содержание которых в топливе зависит от степени заполнения ячейки, с последующей диффузией тяжелых фракций.

Вид кинетических зависимостей  $Q-\tau$  ограничивает применение стандартного способа определения  $\tau_{сг}$  для оболочки резервуаров на основе ТПУ 3290 и получение модели для прогнозирования кинетики выделения топлива.

Предложен подход [3–6], связанный с получением кинетических зависимостей выделения топлива в шкале условного времени, выраженного как корень квадратный из времени эксперимента ( $\tau^{0,5}$ , сут<sup>0,5</sup>). Зависимости  $Q-\tau^{0,5}$  при различной степени заполнения ячейки, в которой в качестве мембраны использовали ТПУ 3290, представлены на рис. 5б.

В системе координат  $\tau^{0,5}$  (рис. 5б) участки зависимостей сложного вида в системе координат  $\tau$  (рис. 5а) трансформируются в линейные. Пересечение линейных зависимостей с осью абсцисс определяет условное время сохранения герметичности полимерного резервуара ( $\tau_{сг}^{0,5}$ , ч<sup>0,5</sup>). При условии  $\tau^{0,5} > \tau_{сг}^{0,5}$  линейные зависимости  $Q-\tau^{0,5}$  с коэффициентом корреляции не менее 0,92 описываются уравнениями общего вида:

$$Q \times 10^3 = k(\tau^{0,5} - \tau_{cr}^{0,5}) \text{ при } \tau^{0,5} > \tau_{cr}^{0,5} \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент приведения, кг/(м<sup>2</sup>×ч<sup>0,5</sup>), который соответствует условной скорости выделения дизельного топлива из резервуара площадью поверхности оболочки 1 м<sup>2</sup>.

Выражение (2) является моделью для прогнозирования скорости выделения дизельного топлива ДТ-А-К5 при хранении в резервуаре на основе ТПУ 3290. Кроме того,  $k$  и  $\tau_{cr}^{0,5}$  ( $\tau_{cr}$ ) являются критериями оценки применения эластичного резервуара на основе ТПУ 3290 для транспортирования дизельного топлива авиационной техникой при температуре 50°С. Показатели  $k$ ,  $\tau_{cr}^{0,5}$  и  $\tau_{cr}$  представлены в таблице.

**Таблица. Показатели критериев герметичности и скорости выделения дизельного топлива ДТ-А-К5 из резервуаров на основе ТПУ 3290 при различной степени заполнения.**

Степень заполнения	$k$ , кг/(м <sup>2</sup> ×ч <sup>0,5</sup> )	$\tau_{cr}^{0,5}$ , ч <sup>0,5</sup>	$\tau_{cr}$ , ч
0,09	7,9	4,0	16,00
0,18	8,0	1,2	1,44
0,27	8,4	0,6	0,36
> 0,36	13,1	0,6	0,36

Увеличение степени заполнения ячейки приводит к возрастанию условной скорости выделения дизельного топлива и снижению времени сохранения герметичности, что хорошо согласуется с объяснением зависимости процесса переноса и выделения топлива от содержания легких фракций.

#### Выводы

– степень заполнения ячейки дизельным топливом влияет на определение времени герметичности и скорость выделения паров топлива;

– степень заполнения резервуара влияет на изменение содержания низкомолекулярных фракций дизельного топлива;

– при испытании и транспортировке степень заполнения не должна быть меньше 0,36.

#### Литература

1. Рыбаков Ю.Н., Ванчугов Н.А. Применение эластичных резервуаров на объектах топливозаправочного комплекса авиатопливообеспечения // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. №183. С.173–175.

2. Рыбаков Ю.Н. Вклад в теорию и практику химмотологии в области создания полевых средств хранения горючего // Химия и технология топлив и масел. 2014. – №5. – С. 23–26.
3. ATL Drop Drum™ airs lift able fuel trac sport bladders. URL: <http://www.atlinc.com/pillow.html> (дата обращения 2020-09-03).
4. Иванов А.В., Рыбаков Ю.Н. Хранение и транспорт горючего с использованием эластичных резервуаров в СВ США. Зарубежное военное обозрение. 2015. – №8. – С. 54–57.
5. Иванов А.В. Система обеспечения горючим армии США. Москва. Воениздат. 2018. с.164.
6. Рыбаков Ю.Н., Дедов А.В., Рушкин Н.С., Плохой Д.С. Снижение проницаемости эластичных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Все материалы. Энциклопедический справочник – 2018. – №5. – С.13–16.
7. Рыбаков Ю.Н., Волгин С.Н., Ларионов С.В., Дедов А.В. Прогнозирование кинетики потерь топлива при хранении в полимерных резервуарах // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов – 2018. – Т.8 – №2. – С.143–145
8. Асметков И.Д., Колотилин Д.В., Дедов А.В. Проницаемость термопластичного полиуретана для резервуаров хранения топлива // Пластические массы – 2018. – №5–6. – С. 48–50.
9. Рыбаков Ю.Н., Дедов А.В., Ларионов С.В. Проницаемость полимерных материалов для технических средств хранения нефтепродуктов // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов – 2019. – Т.9 – №4. – С. 440–443.
10. Гуреев А.А., Фукс И.Г., Лашхи В.Л. Химмотология // – М.: Химия. 1986. – 368 с.
11. Резервуар МРД-4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Б.2900.000.ТО. Москва. 1978.
12. Москалев П.В., Шитов В.В. Математическое моделирование пористых структур // – М.: МАИК Наука/Интерпериодика. 2007. – 114 с.
13. Манин В.Н., Громов А.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации // – М.: Химия. 1980 г. – 248 с.