

## **ОЦЕНКА ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЭЛАСТИЧНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Колотилин Дмитрий Валерьевич**

научный сотрудник, 25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации, РФ, г. Москва

**Дедов Александр Васильевич**

д-р техн. наук, старший научный сотрудник, 25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации, РФ, г. Москва

## **EVALUATION OF THE TIGHTNESS OF ELASTIC TANKS MADE OF POLYMERIC MATERIALS**

***Dmitry Kolotilin***

*Researcher, 25th State research Institute of chemmotology of the Ministry of defense of the Russian Federation, Russia, Moscow*

***Alexander Dedov***

*Doctor of engineering, Senior Researcher, 25th State research Institute of chemmotology of the Ministry of defense of the Russian Federation, Russia, Moscow*

**Аннотация.** Доставка горючего воздушным транспортом в полимерных резервуарах требует решения проблемы сохранения герметичности. В статье рассматриваются методика прогнозирования герметичности полимерных резервуаров и методы ее уточнения.

**Abstract.** Delivery of fuel by air transport in polymer reservoirs requires the solution of the problem of integrity preservation. The article discusses the method of predicting the tightness of polymer tanks and methods for its refinement.

**Ключевые слова:** резервуар; герметичность; моделирование.

**Keywords:** reservoir; tightness; modeling.

Доставка горючего воздушным транспортом применяется для войск, действующих в отрыве от главных сил, воздушному и морскому десанту, а также в тех случаях, когда доставка горючего в установленный срок другими видами транспорта невозможна. В качестве примера в таблице 1 приведена масса воздушных перевозок различных видов топлива для нужд армии в Афганистане, в абсолютных величинах это более 11 % от общих поставок.

## Подача ГСМ воздушным транспортом для нужд армии в Афганской войне за 1980 г.

	Масса, т
Автомобильный бензин	762
Топливо для реактивных двигателей	5523
Дизельное топливо	1536
Всего	8080

Основной проблемой при транспортировании полимерных резервуаров в герметичной грузовой кабине летательного аппарата являются технологические потери топлива с образованием взрывоопасных концентраций паров: для автомобильного бензина взрывоопасные объемные концентрации паров – от 0,8 %, а для дизельного топлива – от 2,1 %. Оценочный расчет показал, что взрывоопасные концентрации при хранении резервуаров в грузовой кабине Ил-76 создаются при выделении 5 кг бензина и 10 кг дизельного топлива. Контакт с парами топлива оказывает негативное влияние на боеспособность и здоровье экипажа.

Исходя из приказа министра обороны РФ от 27 мая 2013 года № 400, резервуар должен исключить возможность контакта топлива с деталями ЛА и людьми, что делает вопрос герметичности полимерных резервуаров предельно актуальным.

Актуальность исследований герметичности резервуаров подтверждается анализом конструкций специальных резервуаров для переборки топлива по воздуху, принятых на вооружение армией США. Выделены два основных подхода к увеличению продолжительности сохранения герметичности.

В первом подходе в оболочку резервуара включают промежуточные сорбционные материалы, которые поглощают диффундирующее топливо и увеличивают время выхода топлива на внешнюю поверхность оболочки. Вторым подходом является применение резервуаров с увеличенной толщиной оболочки. Следует отметить, что использование промежуточных слоев в конструкции резервуаров существенно повышает стоимость производства. Увеличение толщины резервуара приводит к возрастанию его массы и сложности эксплуатации, потому актуален точный расчет минимально необходимой толщины оболочки резервуара.

Чтобы приблизиться к решению проблем безопасного транспортирования топлива в полимерных резервуарах в замкнутых объемах, предлагается разработать методику для оценки времени сохранения герметичности резервуаров в грузовой кабине летательного аппарата, применимую при различной температуре, различных видах перевозимого топлива и различной толщине оболочки резервуара.

Проведен анализ стандартных методик определения сохранения герметичности полимерных материалов, на основании которого предложена формула для расчета времени сохранения герметичности:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{d^2}{6D}, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{ср}}$  – время сохранения герметичности, с;

$d$  – толщина материала, мм;

$D$  – коэффициент диффузии,  $\text{мм}^2/\text{с}$ .

Расчет времени сохранения герметичности требует определения коэффициента диффузии. Существуют две методики определения коэффициента диффузии – сорбционная и диффузионная.

Сорбционная методика предусматривает получение кинетических зависимостей поглощения жидкости погруженным в нее образцом полимера, из которых рассчитывают время сорбции 50 % жидкости от равновесного содержания. Определение проницаемости по сорбционной методике проводят по ГОСТ 12020-2018.

Время сорбции используется для расчета коэффициента диффузии жидкости в полимере согласно формуле (2).

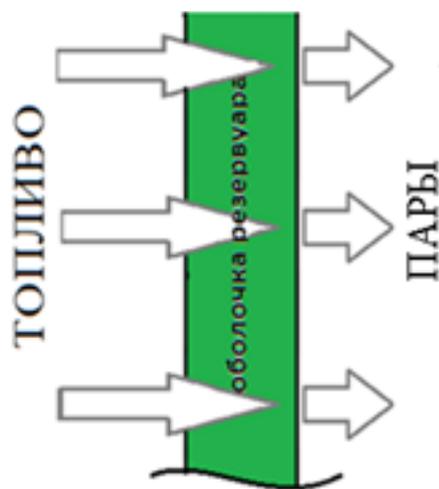
$$D = 0,049 \frac{d^2}{\tau_{0,5}}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;

$d$  – толщина материала,  $\text{мм}$ ;

$\tau_{0,5}$  – время сорбции половины жидкости от равновесного содержания,  $\text{с}$ .

По диффузионной методике измеряется потеря массы жидкости через образец полимера, закрепленный на ячейке с топливом (рис. 1), по которой рассчитывают коэффициент диффузии [формула (3)].



**Рисунок 1. Модель процесса проницаемости топлива по диффузионной методике**

$$D = \frac{d^2}{6\tau_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{ср}}$  – время сохранения герметичности,  $\text{с}$ ;

$d$  – толщина материала,  $\text{мм}$ ;

$D$  – коэффициент диффузии,  $\text{мм}^2/\text{с}$ .

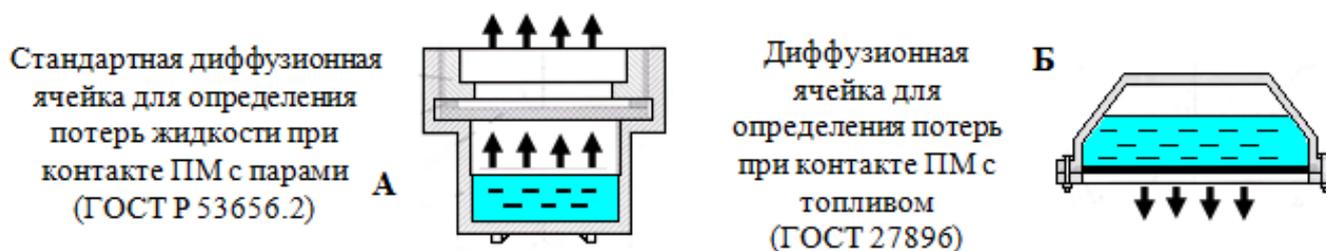
Определение проницаемости по диффузионной методике проводят по ГОСТ 27896-88.

Время сохранения герметичности полимера – время начала выделения паров топлива через полимерную мембрану – определяется пересечением линейного участка зависимости потерь с осью абсцисс (рис. 2). Анализ показывает, что условия эксплуатации полимерных резервуаров более соответствуют диффузионной методике.



**Рисунок 2.** Общий вид зависимости потерь топлива от времени хранения

Представлены две основные конструкции ячеек – А и Б (рис. 3). В ячейке А герметичность исследуется при контакте с парами жидкости. Такой метод не подходит для топлив, представляющих собой многокомпонентную систему, состав паров в которой может отличаться от состава жидкости. Исследование в ячейке Б предусматривает непосредственный контакт жидкости с полимерной мембраной, что исключает ранее перечисленные недостатки и приближает условия испытаний к условиям эксплуатации резервуара.

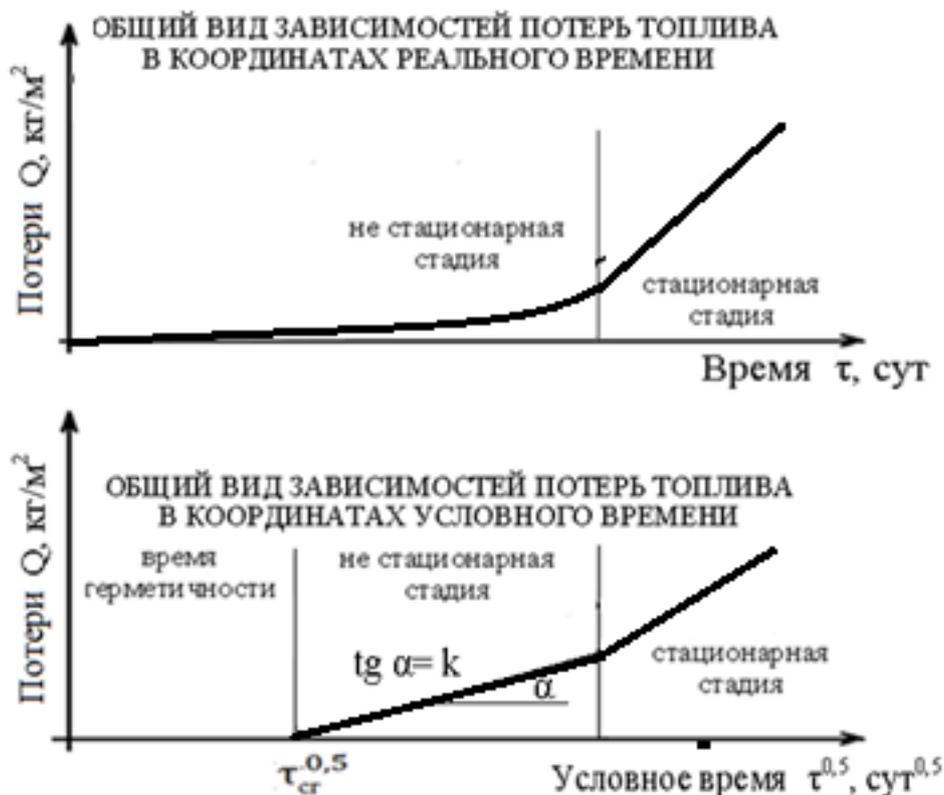


**Рисунок 3.** Различные конструкции ячеек для определения проницаемости топлива диффузионным методом

В ходе исследований процесса диффузии топлива через оболочку полимерного резервуара были выявлены три основные стадии процесса (рис. 4):

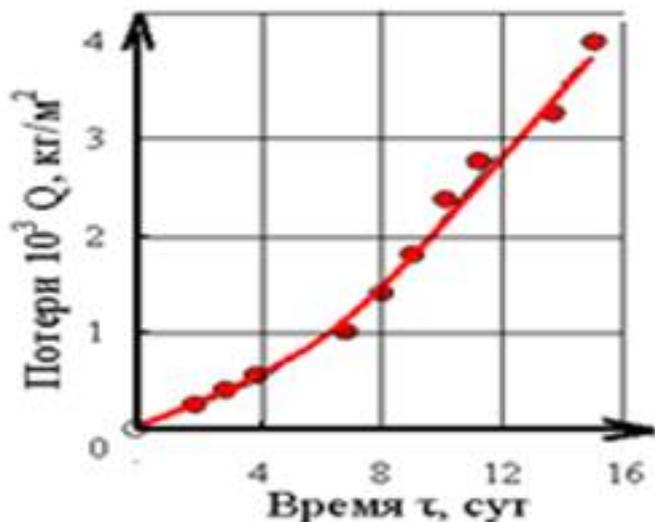
– стадия герметичности, в которой выделение топлива не происходит;

- нестационарная стадия процесса, при которой выделение топлива стабилизируется;
- стационарная стадия процесса, при которой выделение топлива стабильно.



**Рисунок 4. Общий вид потерь топлива в координатах условного и реального времени**

Стандартная методика оценки времени сохранения герметичности и кинетики выделения паров топлива из полимерного резервуара (ГОСТ 27896-88) применима для стационарной стадии процесса, при которой потери топлива максимальны. Определение потерь топлива по стационарной стадии применимо при продолжительном хранении топлива в полимерных резервуарах, однако герметичность и нестационарная стадия потерь различных топлив в полимерных резервуарах может продолжаться до нескольких суток (рис. 5), что превышает время перевозки топлива в грузовых кабинах летательных аппаратов (в случае основного грузового самолета Ил-76 - не более 12 часов).

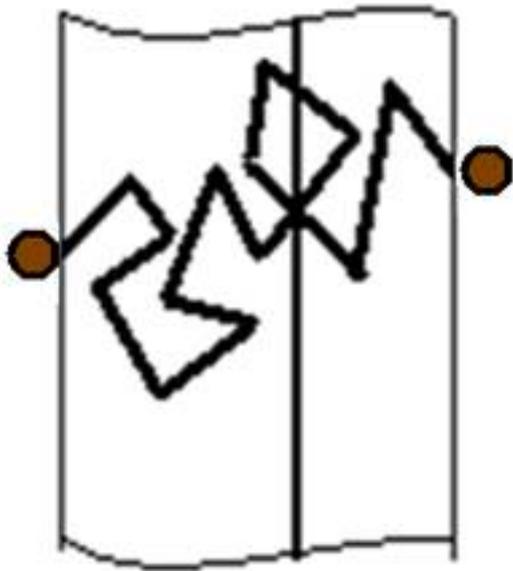


**Рисунок 5. Кинетическая зависимость уменьшения массы арктического дизельного топлива в диффузионной ячейке с мембраной из резиновой ткани 1015 при температуре 50 °С**

Нами разработана методика, позволяющая производить удобный расчет потерь на нестационарной стадии процесса. Она подразумевает расчет процесса потерь в координатах корня квадратного из времени, в котором участки кинетических зависимостей потерь от времени, отражающие перенос топлива нестационарной стадии процесса, трансформируются в линейные (рис. 4). Пересечение линейного участка с осью абсцисс позволяет определить время сохранения герметичности ЭР. Тангенс угла наклона линейного участка соответствует условной скорости выделения паров из резервуара на нестационарной стадии переноса.

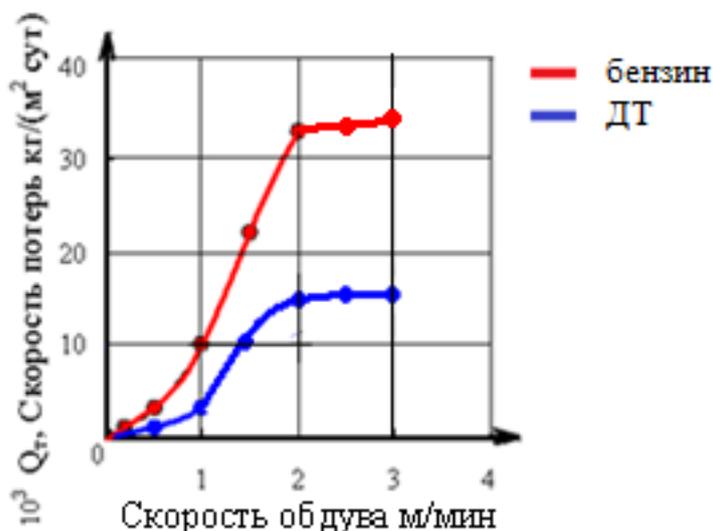
Научные основы разработанной методики оценки герметичности полимерных резервуаров базируются на применении решения уравнения Альберта Эйнштейна, моделирующего броуновское движение для описания диффузии низкомолекулярных веществ в полимерных материалах, что было предложено и развито в работах Бэррера, Кранка, Фика и представлено в работах отечественных исследователей – Рейтлингера, Чалых, Манина, Громова. Суть решения уравнения Эйнштейна сводится к тому, что математическое ожидание положения частицы при броуновском движении, а в нашем случае положение диффундирующей молекулы, пропорционально корню квадратному из времени.

Соответствие между броуновским движением и движением молекулы в полимере связано с тем, что диффундирующая молекула перескакивает из одного положения в другое при образовании микрополостей, которые формируются в разных направлениях. Траектория движения молекулы представлена на рис. 6.



**Рисунок 6. Схема траектории диффузии молекул топлива в полимере**

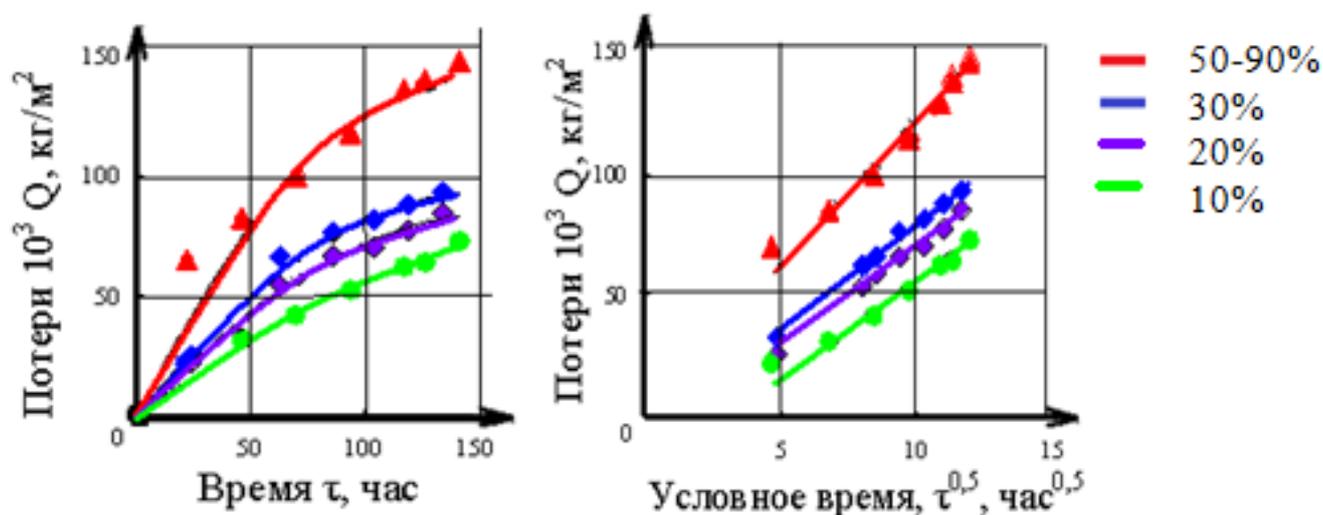
Разработанная методика оценки времени сохранения герметичности включает размещение ячейки в термостат с подачей воздуха через нижнюю решетку и удаление выделяющихся паров. Исходя из зависимости времени сохранения герметичности от скорости диффузии, необходимо полностью исключить накопление паров в термостате, что требует решения задачи обдува образца. Поэтому выполнены исследования зависимостей скорости потерь от скорости обдува исследуемого образца. Полученные данные позволяют определять минимальную скорость обдува в зависимости от вида топлива - не менее 2 м/мин (рис. 7).



**Рисунок 7. Влияние скорости обдува на скорость уменьшения массы топлива в диффузионной ячейке при температуре 50 °С**

Предложенная методика отличается установлением линейной скорости обдува для различных топлив. Также исследовано влияние на потери степени заполнения ячейки топливом (рис. 8).

Наглядно представлено, что степень заполнения ячейки влияет как на время сохранения герметичности, так и на скорость выделения топлива. Была определена минимальная степень заполнения, выше которой заполнение ячейки не оказывает влияния на время сохранения герметичности и скорость выделения паров. Ранее подобные исследования не проводились.



**Рисунок 8. Кинетические зависимости уменьшения массы арктического дизельного топлива при различной степени заполнения резервуара в системе координат реального и условного времени**

Новизна методики заключается в следующем:

- определена оптимальная скорость обдува: для бензина – не менее 2 м/мин, для дизельного топлива – не менее 1,5 м/мин;
- определена оптимальная степень заполнения ячейки – не менее 50 % и не более 90 %;
- проведена обработка полученных результатов в системе координат условного времени с получением линейных зависимостей скорости выделения паров и времени сохранения герметичности.

Предложенная методика обеспечивает высокую точность измерений и прогнозирования времени сохранения герметичности, что является принципиально важным вопросом при перевозке полимерных резервуаров воздушным транспортом.

#### Список литературы:

1. Гришин Н.Н., Середа В.В. Энциклопедия химмотологии. – М. : Перо, 2016. – 960 с.
2. Данильченко И.Г., Виноградов В.А., Карташов А.Г. Служба горючего в афганской войне. – М. : Ветераны-пенсионеры Службы горючего ВС РФ, 2009. – 704 с.
3. Колотилин Д.В., Дедов А.В. Герметичность полимерных резервуаров на основе термопластичного полиуретана для перевозки топлива воздушным транспортом // Все материалы. Энциклопедический справочник. – М., 2019. – № 12.
4. Рейтлингер С.А. Проницаемость полимерных материалов. – М. : Химия, 1974. – 272 с.