

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 632:629.73

Н. И. ТЮКОВ, И. А. МЕДВЕДЕВ, А. А. ОЛЬХОВ, А. И. ДАУТОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЯ  
МЯГКИХ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

В статье рассмотрены варианты испытания мягких топливных баков на герметичность при погружении их в воду и истечение воздуха в атмосферу. Дан анализ параметров, влияющих на проникновение топлива в микропоры. *Испытание ; мягкие баки ; герметичность ; истечение ; поверхностное натяжение ; капиллярность ; щель*

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений научно-технического прогресса является создание и внедрение в производство новых технологических процессов и более современных машин и оборудования.

Полые изделия имеют широкое применение в различных отраслях народного хозяйства: машиностроении, авиации, химической, нефтегазовой, пищевой. К полым изделиям относятся и мягкие баки авиационной техники, предназначенные для хранения топлива и масел.

Полые изделия в процессе производства подвергаются испытаниям на герметичность. Эти испытания сопровождаются тяжелыми условиями труда и недостаточной точностью контроля герметичности. Требования к изделиям по точности контроля герметичности возрастают и для многих типов изделий нормируются государственными стандартами или отраслевыми нормами.

Испытание на герметичность изделий является одной из проблем науки и техники. В условиях производства почти полностью отсутствуют апробированные установки и устройства автоматизированных испытаний на герметичность изделий серийного изготовления. Фактически, каждое предприятие такие установки проектирует и изготавливает самостоятельно.

В научно-технической литературе отсутствуют результаты теоретических и экспериментальных исследований по проектированию устройств и систем для испытания на герметичность изделий авиационной техники.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА  
ЧЕРЕЗ МИКРОЩЕЛИ

Испытание на герметичность производится воздухом, подаваемым внутрь бака, а сам бак помещается в воду. По выделению пузырьков воздуха или их отсутствию определяется герметичность бака.

При погружении изделий в жидкость возникает поверхностное натяжение, которое представляет собой меру нескомпенсированности межмолекулярных сил в поверхностном (межфазном) слое [1].

Поверхностное натяжение жидкости способствует созданию дополнительного давления, величина которого определяется по уравнению Лапласа [2]

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – дополнительное давление жидкости, Па;  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе двух сред, н/м;  $R_{\text{ш}}$  – радиус кривизны поверхности, м.

Размеры, форма щелей в изделии могут быть самыми разнообразными, поэтому условно принимаем их круглыми диаметром  $d_{\text{ш}}$ . Тогда радиус кривизны поверхности

$$R_{\text{ш}} = \frac{d_{\text{ш}}}{2}. \quad (2)$$

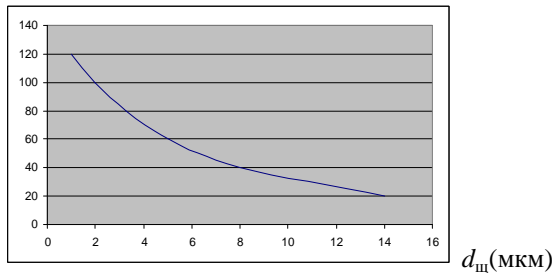
Тогда формула (1) примет вид

$$\Delta P = \frac{4\sigma}{d_{\text{ш}}}. \quad (3)$$

Испытание топливных баков, в соответствии с отраслевой инструкцией, производится избыточным давлением воздуха 0,025 МПа с погружением в резервуар с водой. При отсутствии

выделения пузырьков воздуха бак считается выдержавшим испытание.

$\Delta P \cdot 10^3 \text{ Па}$



**Рис. 1.** Изменение избыточного давления в микрощелях за счет поверхностного натяжения воды

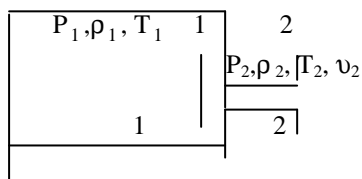
Из рис. 1 и формулы (3) можно сделать вывод, что при избыточном давлении воздуха 0,025 МПа щели с условным диаметром 11,6 мкм не будут пропускать воздух из-за равенства давлений, создаваемых в щели воздухом и силами поверхностного натяжения.

Рассмотрим истечение воздуха через щели в атмосферу. На рис. 2 приведена схема истечения воздуха через щель изделия. В сечении 1–1, которое находится внутри изделия, воздух имеет параметры: давление  $P_1$ , плотность  $\rho_1$ , и температуру  $T_1$ . Скорость воздуха внутри изделия  $v_1$  принимаем равной нулю, так как геометрические размеры бака во много раз больше размеров щелей.

На выходе воздуха из щели в сечении 2–2: скорость воздуха  $v_2$ ; давление  $P_2$ ; плотность  $\rho_2$ , температура  $T_2$ . Считается, что температура по длине щели не изменяется, т. е. процесс истечения адиабатный [3]. Тогда уравнение Бернулли для воздуха примет вид:

$$\frac{k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{k}{k-1} \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2}, \quad (4)$$

где  $k$  – показатель адиабаты, для воздуха  $k=1,4$  [3].



**Рис. 2.** Схема истечения воздуха в атмосферу через щель бака

Решив уравнение (4) относительно  $v_2$ , получим

$$v_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left(1 - \frac{P_2}{P_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}. \quad (5)$$

Для адиабатного истечения воздуха через щель

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}}. \quad (6)$$

Получим

$$v_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}. \quad (7)$$

При установившемся течении газа его объемный расход может определяться параметрами в любом сечении. Тогда объемный расход воздуха через щель [4].

$$G_v = \frac{\Pi}{4} d_{щ}^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \quad (8)$$

где  $G_v$  – объемный расход воздуха через щель  $\text{мм}^3/\text{с}$ ;  $P_1$  и  $P_2$  – давление воздуха до и после щели, Па;  $\rho_1$  – плотность воздуха, протекающего через щель,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

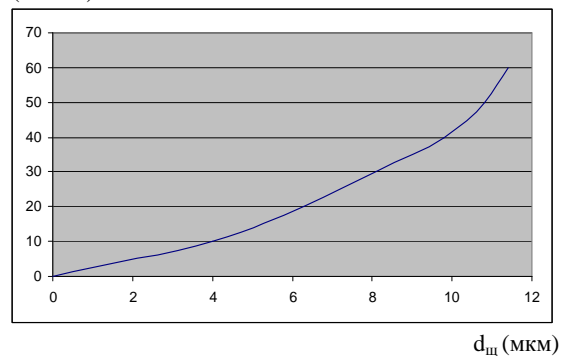
По формуле (8) определяется объемный расход воздуха через сопло, которое имеет закругления на входе. В щелях закругления отсутствуют, поэтому вводится коэффициент расхода  $\Psi$ .

Тогда формула (8) примет вид:

$$G_v = \Psi \frac{\Pi}{4} d_{щ}^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \quad (9)$$

где  $\Psi$  – коэффициент расхода воздуха через щель ( $\Psi = 0,7$ ) [4].

$G(\text{мм}^3/\text{с})$



**Рис. 3.** Расход воздуха через щели в атмосферу (для диаметров 1...12 мкм)

На рис. 3 приведены результаты расчетов по формуле (10) расхода сжатого воздуха через щели в атмосферу. Для щели  $d_{щ}=11,6$  мкм расход составит  $67,8$  мм<sup>3</sup>/с.

По формуле (9) можно определить расход воздуха через щель для различных соотношений  $p_2/p_1$ . В зависимости от способа обнаружения истечения воздуха можно обнаружить щели диаметром от 1 до 2 мкм, что недоступно при испытании баков погружением в воду.

### АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОНИКНОВЕНИЯ ТОПЛИВА В МИКРОПОРЫ

Одной из стадий изготовления мягких топливных баков является испытание их на герметичность и набухание внутреннего слоя резины. Испытание проводится топливом. При наличии несквозных пор топливо проникает в них. В этом случае стенки баков можно отнести к капиллярно-пористым телам, а топливо к жидкостям. При наличии градиента влагосодержания в капиллярно-пористом теле влага перемещается от места с большей влажностью к местам с меньшей влажностью. Плотность потока, проходящего через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению перемещения, в единицу времени, пропорциональна градиенту влагосодержания капиллярно-пористого тела:

$$G_{ж} = -D\rho_0 \left( \frac{du}{dn} \right), \quad (10)$$

где  $G_{ж}$  – плотность потока жидкости, кг/(м<sup>2</sup>с);  $D$  – коэффициент пропорциональности (коэффициент диффузии), (м<sup>2</sup>/с);  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>,  $\frac{du}{dn}$  – градиент влагосодержания, м<sup>-1</sup>.

При испытании топливных баков возникает разность давления по высоте бака. Давление в любой точке определяется по закону Паскаля:

$$P = P_0 + \rho gh \quad (11)$$

где  $P$  – давление в данной точке, Па,  $P_0$  – давление на свободной поверхности жидкости, Па,  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,  $h$  – расстояние от свободной поверхности до рассматриваемой точки, м.

Диффузия, возникающая от неоднородности давления, называется бародиффузией.

Плотность потока массы, учитывающая бародиффузию

$$G_p = -D\rho_0 \frac{1}{P} \left( \frac{dP}{dn} \right), \quad (12)$$

где  $P$  – местное абсолютное давление, Па,  $\frac{dP}{dn}$  – градиент абсолютного давления, Па/м.

При повышении температуры процесс диффузии жидкости в капиллярно-пористые тела интенсифицируется из-за раскрытия пор и увеличения подвижности молекул жидкости.

Плотность потока влаги, обусловленного температурным градиентом:

$$G_T = -D\rho_0 \delta \left( \frac{dT}{dn} \right), \quad (13)$$

где  $\delta$  – коэффициент термовлагопроводности, 1/К,  $\frac{dT}{dn}$  – градиент температуры, К/м.

Общий поток жидкости равен сумме всех потоков

$$G = G_{ж} + G_p + G_T = -D\rho_0 \left( \frac{du}{dn} \right) - D\rho_0 \frac{1}{P} \left( \frac{dP}{dn} \right) - D\rho_0 \delta \left( \frac{dT}{dn} \right). \quad (14)$$

Данное дифференциальное уравнение описывает перенос массы вещества. Решение уравнения при условии постоянства массообменных характеристик дает возможность теоретически рассчитать поле влагосодержания стенок топливных баков.

### ВЫВОДЫ

Установлен характер взаимодействия между мягкими топливными баками как капиллярно-пористыми телами и авиационным топливом. В статье выявлено, что плотность потока зависит от температуры топлива, давления и градиента влагосодержания и с увеличением этих параметров процесс диффузии топлива интенсифицируется.

При испытании баков на герметичность избыточным давлением 0,025 МПа с погружением в воду щели с условным диаметром менее 11,6 мкм не обнаруживаются из-за поверхностного натяжения воды. При испытании с истечением в атмосферу можно обнаружить щели с условным диаметром 1...2 мкм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чертов, А. Г. Физические величины / А. Г. Чертов. М. : Высшая школа. 1990. 469 с.
2. Жежера, Н. И. Основы автоматизации испытаний изделий на герметичность / Н. И. Жежера, Н. И. Тюков. Кумертау, 2003. 328 с.

3. **Егорушкин, В. У.** Основы гидравлики и теплотехники / В. У. Егорушкин, Б. И. Цепхович. М. : Машиностроение, 1981. 264 с.

4. **Луканин, В. Н.** Теплотехника / В. Н. Луканин. М. : Высшая школа, 2000. 671 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Тюков Николай Иванович**, проф., зав. кафедрой промышленной автоматизации Кумертауск. филиала УГАТУ. Дипл. инженер по механизации и автоматизации технологич. процессов (Оренбургск. с.-х. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по автоматич. упр-ю и регулир-ю (ин-т им. Потона, Киев, 1984). Иссл. в обл. мет. основ проектир-я автоматизир. технологич. процессов и изготовления изделий вертолета из полимеров.



**Медведев Иван Александрович**, ст. преп. Кумертауск. филиала УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1974). Иссл. в обл. производства изделий авиац. техники из неметаллов.



**Ольхов Александр Анатольевич**, зам. гл. инженера КумАПП. Дипл. инженер по пром. электронике (УАИ, 1988). Иссл. в обл. пр-ва изделий из неметаллов.



**Даутов Анвар Ибрагимович**, дир. Кумертауск. филиала УГАТУ, зав кафедрой естественнауч. и общетехн. дисциплин». Дипл. инженер электр. техники по электр. приборам (Электротехн. ин-т нефти, 1972). Канд. техн. наук по теор. основам теплотехники (Казанск. хим.-технол. институт, 1977). Иссл. в обл. теплотехники, теплофизики.

