



УДК 629.5.081

С.А. Комякова, магистрант, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
Е.Г. Бурмистров, профессор, д.т.н., ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕЧЕЙ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НАДУВОМ ВОЗДУХА

Ключевые слова: проверка на герметичность, испытания, герметичность, течь, трещины, ламинарный режим, канал, струя, поры, капилляр, скорость движения, цилиндрические каналы, движение, истечение воздуха, турбулентный режим, течение, число Рейнольдса, течь, течеискатель, турбулизация

Аннотация: В данной статье рассматриваются режимы истечения воздуха через дефекты корпусных конструкций. В результате анализа этих режимов, выбирается средство обнаружения течей и обосновывается его принцип действия.

При испытаниях надувом воздуха, если в контролируемом соединении имеется течь, воздух из нее будет выходить в виде струи. Можно принять вполне приемлемое для практических целей допущение, что течи имеют форму узких цилиндрических каналов (поры) и истечение происходит из капилляра или щели [1]. Цилиндрические каналы по величине диаметра разделяются [2] на:

- сверхкапиллярные ($d > 0,5 \cdot 10^{-3}$ м);
- макрокапиллярные ($0,5 \cdot 10^{-3}$ м $> d > 2 \cdot 10^{-7}$ м);
- микрокапиллярные ($d > 2 \cdot 10^{-7}$ м).

При истечении из капилляра струя будет осесимметричной, при истечении из щели – плоской [3]. Истечение воздуха можно считать как движение вязкой несжимаемой жидкости [4]. Опытами Бай-Ши-И [4] установлено, что в зависимости от величины скорости движения, размеров потока и вязкости среды могут наблюдаться два качественно различных режима течения: ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме течение имеет упорядоченный слоистый характер. Отдельные слои потока двигаются практически, не перемешиваясь одни с другими. При турбулентном режиме течение является беспорядочным. В потоке образуются завихрения и в результате этого возникает сильное перемешивание в поперечном к основному направлению [5]. Существование того или иного режима течения определяется известным безразмерным отношением (числом Рейнольдса) [7].

$$Re = \frac{\vartheta L}{\nu}, \quad (1)$$

где ϑ – характерная скорость течения, например, средняя по течению;
 L – характерный линейный размер поперечного сечения потока;
 ν – кинематическая вязкость воздуха;

$$v = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

В случае, когда $Re < 2,3 \cdot 10^3$, имеет место ламинарный режим течения; при $Re > 2,3 \cdot 10^3$ – турбулентный режим. Также, если отношение длины канала течи к его диаметру $\frac{l}{d} \leq 10$, то режим течения турбулентный; если $\frac{l}{d} \geq 10$ – ламинарный.

Судовые корпусные конструкции могут иметь толщину $\delta = 0,001 \dots 0,050$ м. Значит и режим течения воздуха через дефекты соединений судовых корпусных конструкций может быть как ламинарным, так и турбулентным. Используя формулу (1) можно получить зависимости режимов истечения от толщины конструкции, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимости режимов истечения от толщины конструкции

Вид течи	Режим истечения						
	Толщина конструкции, м						
	0,001-0,005	0,006-0,020	0,021-0,030	0,031-0,035	0,036-0,040	0,041-0,045	0,046-0,050
Сверхкапиллярная $d > 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	Турбулентный $2,3 \cdot 10^3$	ламинарный $2,3 \cdot 10^3$					
Макрокапиллярная $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} > d > 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	ламинарный $2,3 \cdot 10^3$						
Микрокапиллярная $d > 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	ламинарный $2,3 \cdot 10^3$						

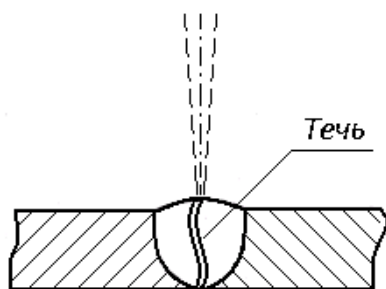


Рис. 1 – Струя при ламинарном режиме истечения

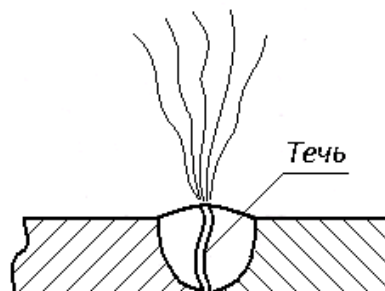


Рис. 2 – Струя при турбулентном режиме истечения

При ламинарном истечении (рис. 1.) струя распространяется на гораздо большее расстояние и имеет большее динамическое давление, чем струя при турбулентном режиме истечения (рис. 2.).

В настоящее время выявление течей при контроле герметичности надувом воздуха производится наблюдением за образованием пузырьков на плёнке пенообразующего раствора, что не позволяет в полной мере использовать преимущества метода, так как способ обнаружения течей не является надёжным. Поэтому необходимо заменить пенообразующий раствор при выявлении течей таким чувствительным элементом, который бы фиксировал течи по непосредственному контакту струи воздуха из течи с этим элементом, а не по косвенным признакам утечки.

Использование элемента с эффектом взаимодействия встречных потоков (рис. 3) практически невозможно, так как совмещение канала управления 5 со струей 4, вытекающей из течи 3 испытываемого соединения 2 изделия 1 трудновыполнимо (диаметр канала управления равен $5 \cdot 10^{-4}$ м).

Наиболее подходящим для использования в качестве чувствительного элемента можно считать элемент с турбулизацией ламинарного потока. Его преимущество по

сравнению с описанным выше элементом состоит в том, что течь может быть обнаружена в любом месте по ширине контролируемого соединения, так как ламинарная струя питания 7 турбулентного элемента будет турбулизироваться от воздействия на неё вытекающей из течи струи на всём протяжении ламинарной струи, начиная от среза сопла питания (рис. 4).

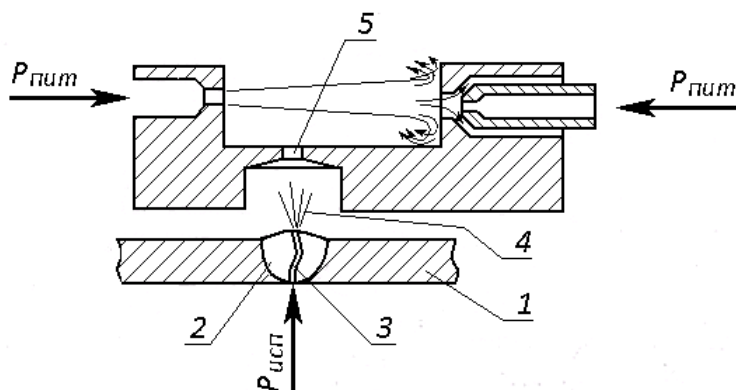


Рис. 3 – Использование элемента с эффектом взаимодействия встречных потоков

Элемент с турбулизацией ламинарного потока может быть использован для поиска течи следующим образом. Если перемещать элемент, состоящий из сопла питания 5 и приёмного канала 6 вдоль контролируемого соединения 2 изделия 1, то при прохождении над течью 3, струя 4, выходящая из неё, будет турбулизировать ламинарный поток 7. Тогда ламинарный режим течения мгновенно переходит в турбулентный и в результате этого давления $P_{\text{вых}}$, на выходе приёмного канала станет ничтожно малым, почти равным нулю. Падение же давления на выходе приёмного канала можно регистрировать специальными устройствами.

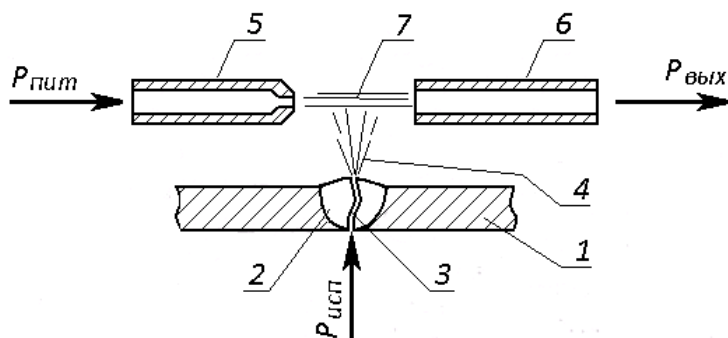


Рис. 4 – Использование элемента с турбулизацией ламинарного потока

В процессе исследования необходимо определить при каких значениях параметров чувствительного элемента струя питания будет иметь ламинарный режим течения, что является непременным условием надежной работы течеискателя при выявлении течей. В общем случае скорость W определяется по абсолютной величине и направлению значениями ее проекции W_x , W_y , W_z на оси координат. Для их определения могут быть использованы следующие уравнения [3]: три уравнения движения, уравнение неразрывности, уравнение состояния, уравнение сохранения энергии.

Для вязкой сжимаемой жидкости:

Уравнение движения

$$\begin{cases} \frac{\partial W_x}{\partial t} = X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} + \nu_{\nabla} \cdot W_x + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dx} \\ \frac{\partial W_y}{\partial t} = Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dy} + \nu_{\nabla} \cdot W_y + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dy} \\ \frac{\partial W_z}{\partial t} = Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dz} + \nu_{\nabla} \cdot W_z + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dz} \end{cases} \quad (2)$$

где X, Y, Z – ускорения, которыми можно пренебречь [6].

$$\begin{cases} \nabla = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \\ \theta = \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \end{cases} \quad (2a)$$

В уравнении (2) членами $-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx}$; $-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dy}$; $-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dz}$ – учитывается действие сил давления:

членами $\nu_{\nabla} \cdot W_x + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dx}$; $\nu_{\nabla} \cdot W_y + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dy}$; $\nu_{\nabla} \cdot W_z + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dz}$ – влияние сил вязкости:

членами $\frac{\partial W_x}{\partial t}$; $\frac{\partial W_y}{\partial t}$; $\frac{\partial W_z}{\partial t}$ – учитывается действие сил инерции.

Так как в нашем случае жидкость (воздух) вязкая и несжимаемая, то в уравнении для этой жидкости в отличие от уравнения (2), должны отсутствовать соответственно члены $\frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dx}$; $\frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dy}$; $\frac{\nu}{3} \cdot \frac{d\theta}{dz}$ и тогда для вязкой и несжимаемой жидкости уравнения движения принимает вид уравнения Навье – Стокса

$$\begin{cases} \frac{\partial W_x}{\partial t} = X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} + \nu_{\nabla} \cdot W_x \\ \frac{\partial W_y}{\partial t} = Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dy} + \nu_{\nabla} \cdot W_y \\ \frac{\partial W_z}{\partial t} = Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dz} + \nu_{\nabla} \cdot W_z \end{cases} \quad (3)$$

Уравнение движения для осесимметричного течения вязкой несжимаемой жидкости

$$W_x \cdot \frac{\partial W_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} + \nu_{\nabla} \cdot W_x. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности для вязкой сжимаемой жидкости

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial(\rho \cdot W_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot W_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot W_z)}{\partial z}. \quad (5)$$

При установившемся движении, как в нашем случае, в уравнении (5) $\frac{dP}{dt} = 0$.

И для несжимаемой жидкости $\rho = const$, тогда уравнение (5) примет вид:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z}. \quad (6)$$

Уравнение состояния газа

$$\frac{P}{\gamma} = RT, \quad (7)$$

где R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Уравнением сохранения энергии для несжимаемой жидкости является уравнение Бернулли без учёта сил тяжести

$$\frac{W^2}{2} + \frac{P}{\rho} = const \quad (8)$$

Выводы:

Подробно рассмотрены режимы истечения воздуха через дефекты судовых корпусных конструкций. Также было выбрано наиболее подходящее в качестве чувствительного элемента средство обнаружения течей. В результате теоретических и экспериментальных исследований течения воздуха была получена возможность определять в любой из точек профиля струи для любого момента времени t значение скорости W при условии, что заданы некоторые граничные и начальные условия.

Список литературы:

- [1] Васильев С.П., Пейч Н.Н., Соколов В.Ф., Течение воздуха через неплотности при испытании судовых помещений на герметичность. – Технология судостроения, 1971, №5, с. 26.
- [2] Основы технологии судостроения: Учебник / В.Д. Мацкевич, Э.В. Ганов, В.П. Доброленский, В.С. Кравченко, В.Ю. Лейзерман, В.Д. Наумов, Е.И. Никитин. – Л.: Судостроение, 1980. – 350 с.
- [3] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
- [4] Бай-Ши-И. Теория струй. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 326 с.
- [5] Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, ч. II. – М.: Транспорт, 1978/ – 272 с.
- [6] Елимелех И.М. Перспективы использования струйных устройств ввода информации на судостроительных предприятиях и в морских приборах. – Технология судостроения, 1972, №6/ – с.29.

THEORETICAL FOUNDATIONS OF DETECTION OF LEAKS IN CONTROL OF SEALING OF SHIPBOARD STRUCTURES BY AIR BAG

S.A. Komiakova, E.G. Burmistrov

Keywords: *checking for leaks, testing, leakage, cracks, laminar flow, channel, jet, pores, capillary, speed, cylindrical channels, motion, air flow, turbulence, flow, Reynolds number, leak, leak detector, turbulence.*

Abstract: *In this article, air flow modes through the defects of hull structures are considered. As a result of the analysis of these modes, the leak detection tool is chosen and its operating principle is justified.*