

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В СКВОЗНЫХ КАПИЛЛЯРАХ

*Кугот А.А.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Лобанова И.С., к.т.н., ст. преподаватель отделения контроля и диагностики ТПУ*

Капиллярные методы контроля основаны на проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации индикаторных следов.

Данный метод предназначен для обнаружения невидимых и слабовидимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов, определения их расположения, протяженности (для трещин) и ориентации по поверхности.

Основным объектом поиска при капиллярном контроле является трещина, имеющая выход на поверхность, так называемая поверхностная трещина (несплошность). Различают тупиковые и сквозные дефекты (трещины). Сквозной дефект справа имеет два выхода на поверхность.

В основе течения жидкости лежит уравнение Навье-Стокса

$$-\mu \nabla \times \nabla \times \vec{v} - \nabla p = \rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla (\vec{v}^2) \right],$$

где  $\mu$  - коэффициент динамической сдвиговой вязкости,  $v$  - вектор скорости,  $\nabla p$  - градиент давления. Градиент давления составная величина. Он складывается из трех составляющих, представленных уравнением

$$\nabla p = \frac{1}{l} (p_k + p_a - p_c)$$

где  $p_a$  - атмосферное давление,  $p_k$  - капиллярное давление. Третья составляющая  $p_c$  - давление сжатого газа в тупиковой области капилляра (появляется в закороченных капиллярах).

Переход от уравнения Навье-Стокса для скорости заполнения капилляра к зависимости глубины проникновения жидкости в капилляр, приводит к модифицированному уравнению Порхаева, которое было заложено в основу программного комплекса, позволяющего моделировать процессы движения жидкостей в тупиковых и сквозных щелевидных капиллярах

$$\frac{d^2 h_1}{dt^2} + \frac{1}{h_1} \left( \frac{dh_1}{dt} \right)^2 + \frac{8\mu}{r^2 \rho} \frac{dh_1}{dt} - \frac{2\sigma \cos(\theta_0)}{\rho h_1 r} + \frac{p_a}{\rho(h_0 - h_1)} + g \sin(\alpha) = 0,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $r$  – размер капилляра,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\Theta_0$  – угол смачивания на гладкой поверхности,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h_1$  – глубина,  $\alpha$  – угол наклона капилляра.

Моделирование проводилось в программе «Капилляр». В качестве материала капилляра было выбрано стекло, в качестве жидкостей – изопропиловый спирт и вода.

Для подтверждения математической модели был проведен эксперимент. На стеклянные трубочки, диаметром 900 мкм, наносились метки с шагом 10 мм.

Моделированные данные отличаются от экспериментальных. Это может зависеть от следующих факторов: – капля жидкости при эксперименте не всегда была одинаковой (человеческий фактор); - возможно недостаточно хорошо помыли или обезжирили стеклянную поверхность.

### Список информационных источников

1. Калиниченко, Н.П. Капиллярный контроль: учебное пособие для подготовки специалистов 1, 2 и 3 уровня / Н.П. Калиниченко, А.Н. Калиниченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
2. ГОСТ Р ИСО 3452-2-2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 2. Испытания пенетрантов. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 26 с
3. G. Cavaccini, V. Pianese, S. Iacono, A. Jannelli, and R. Fazio. Onedimensional mathematical and numerical modeling of liquid dynamics in a horizontal capillary. *J. Comput. Meth. Sci. Eng.*, 9:3–16, 2009.
4. Прохоренко П.П., Мигун Н.П. Введение в теорию капиллярного контроля. – Ми.: Наука и техника, 1988. – 207 с.
5. Бекман, И. Н. Высшая математика: математический аппарат диффузии. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 459 с.
6. M. Hultmark, J.M. Aristoff, and H. A. Stone. The influence of the gas phase on liquid imbibition in capillary tubes. *J. Fluid Mech.*, 678:600–606, 2011.
7. S. Deutsch. A preliminary study of the fluid mechanics of liquid penetrant testing. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 84:287–292, 1979.
8. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. – Москва: Издательство стандартов, 1981. – 16 с.