

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕА КАПСУЛЫ СО СМЕЩЕННЫМ ЦЕНТРОМ МАСС

Вахрушев Б.С. , Молчанов А.О. , Соловьев М.Р.

Научный руководитель – к.т.н. Пантюхин Игорь Сергеевич

Университет ИТМО

kogwr@mail.ru

Введение

Современный поток конструкторской разработки и реверс-инженерного процесса характерен все более жесткими требованиями к срокам, а также повышающейся сложностью и требованиям к разрабатываемым установкам и машинам. Работа над такими проектами требует контроля объемного массива факторов [1]. Привычные итеративные подходы (проектирование – изготовление прототипа – испытания – корректировка) негативно сказываются на бюджете и сроках [3].

Одним из подходов для частичного решения представленных проблем может стать использование технологии цифровых двойников, как метода для повышения эффективности разработок. Такой подход переносит часть физических итераций в виртуальную среду [2,3]. Виртуальные испытания при достаточно высокой сложности и стоимости разработки позволяют заранее определить слабые места или недочеты, а исправление требует лишь корректировки виртуального проекта.

Однако, подобный подход без готовых и налаженных методик использования может быть не востребуем. В настоящей работе метод проектирования и цифрового моделирования применяется для разработки устройства, основанного на альтернативном подходе к измерению плотности жидкости.

Основная часть

В рамках текущей работы, при проектировании измерительного устройства основной идеей была реализация подхода на основе цифровых двойников. Использование такого пути в разработке обусловлено альтернативным подходом к принципу работы устройства. На данный момент существует потребность автоматизации измерений пластовых вод на местах нефтедобычи. Используемые методы, базирующиеся на ручных ареометрах, имеют ряд неудобств для рабочего персонала помимо периодически возникающих ошибок, связанных с человеческим фактором. Также полевые условия, ограничивающие использование лабораторных вибрационных или оптических плотномеров, требуют технической простоты и надежности для такого прибора.

Подход к измерению был основан на стандартной ареометрии, однако, основным принципом стало измерение угла наклона тела со смещенным центром масс, в отличие от ручных приборов, которые измеряют плотность по степени погружения плавучего тела. Стандартный итеративный подход требовал бы изготовления ряда пробных капсул с разной степенью смещения центра масс, что не позволило бы оперативно проверить гипотезу о работоспособности такого подхода при измерении пластовых вод [3].

При разработке было проведено цифровое моделирование устройства в среде расчетов SolidWorks, где происходил расчет объема погруженной части тела при различных конфигурациях. Отсутствие готовых модулей в открытом доступе, позволяющих рассчитать крен плавучего тела, привело к последовательному использованию цифрового двойника из среды SolidWorks и Python скрипта. Такой тандем, импортирующий данные из среды расчетов в скрипт, позволил итеративно подобрать оптимальные параметры смещения ЦМ и в последствии построить корреляционный график зависимости угла наклона от плотности жидкости.

Выводы

В результате этапа разработки, основанного на цифровых двойниках и цифрового моделирования подтверждена работоспособность предложенного подхода к измерению плотности жидкости на основе угла наклона плавучего тела со смещенным центром масс, а также эффективность альтернативного подхода к разработке, позволившего:

1. определить оптимальные параметры устройства (масса 0,2 кг, объём $1,4 \cdot 10^{-4}$ м³, координаты центра масс [9, 0, -8] мм, метацентрическая высота 15 мм), обеспечивающие устойчивое равновесие и требуемую чувствительность;
2. получить линейную градуировочную характеристику в диапазоне плотностей 1000–1200 кг/м³ с чувствительностью 0,14 град/(кг·м⁻³) и коэффициентом детерминации $R^2 > 0,99$;
3. обеспечить погрешность измерения плотности не более 0,7 кг/м³ при использовании стандартного MEMS-акселерометра с точностью 0,1°, что сопоставимо с лабораторными ареометрами;
4. подтвердить эффективность применения цифрового двойника на этапе проектирования, полностью исключив затраты на изготовление и испытания опытных образцов [2, 3].

Литература

1. Рябинина, О. А. Проектирование сто с использованием цифрового двойника станочного оборудования / О. А. Рябинина, А. И. Болдырев, А. Ю. Рязанцев // Современные технологии производства в машиностроении : Межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2024. – С. 53-60. – EDN VMABDU.
2. Применение концепции цифрового двойника на этапах проектирования, моделирования и управления химическим процессом / М. И. Кузьмин, Д. И. Кушнирук, А. В. Аникин [и др.] // Программные продукты и системы. – 2024. – № 4. – С. 629-637. – DOI 10.15827/0236-235X.148.629-637. – EDN AUHOFO.
3. Мартынец, Е. Р. Методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников / Е. Р. Мартынец // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23, № 3. – С. 141-150. – DOI 10.18503/1995-2732-2025-23-3-141-150. – EDN IBWROZ.